

Raquel Acero Cacho

Desarrollo, implementación y
ensayo de técnicas de verificación
y calibración de instrumentos
portátiles de medición por
coordenadas mediante plataforma
multi-registro

Departamento
Ingeniería de Diseño y Fabricación

Director/es
Santolaria Mazo, Jorge

<http://zaguan.unizar.es/collection/Tesis>

© Universidad de Zaragoza
Servicio de Publicaciones

ISSN 2254-7606

Tesis Doctoral

DESARROLLO, IMPLEMENTACIÓN Y ENSAYO DE
TÉCNICAS DE VERIFICACIÓN Y CALIBRACIÓN DE
INSTRUMENTOS PORTÁTILES DE MEDICIÓN POR
COORDENADAS MEDIANTE PLATAFORMA MULTI-
REGISTRO

Autor

Raquel Acero Cacho

Director/es

Santolaria Mazo, Jorge

UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA

Ingeniería de Diseño y Fabricación

2015



Universidad
Zaragoza

UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA

Departamento de Ingeniería de Diseño y Fabricación

TESIS DOCTORAL

**DESARROLLO, IMPLEMENTACIÓN Y ENSAYO DE TÉCNICAS DE
VERIFICACIÓN Y CALIBRACIÓN DE INSTRUMENTOS PORTÁTILES
DE MEDICIÓN POR COORDENADAS MEDIANTE PLATAFORMA
MULTI-REGISTRO**

Raquel Acero Cacho

Director de tesis:

Dr. D. Jorge Santolaria Mazo

Zaragoza, Febrero 2015

A mi familia, apoyo incondicional

Qui e ora

Agradecimientos

Quisiera expresar mi gratitud a mi director de tesis Jorge Santolaria Mazo, que confió en mí desde un principio, sin conocerme, guiándome a lo largo de este arduo trabajo. Gracias por ayudarme a salir de la zona de confort Jorge.

Igualmente agradecer a mis compañeros del Departamento de Ingeniería de Diseño y Fabricación, Agustín Brau por nuestras interminables jornadas en el laboratorio y ayuda. A José Antonio Albajez, José Antonio Yagüe y Juan José Aguilar que vivieron mis inicios de vuelta al mundo de la metrología.

Finalmente un recuerdo a mis compañeros del Centro Universitario de la Defensa, Marta, Marcos, Joaquín, Jorge, por los buenos momentos compartidos en el día a día de trabajo.

Índice

Índice de figuras.....	11
Índice de tablas.....	19
Resumen.....	23
Abstract.....	25
1 Introducción.....	27
1.1 Ámbito de aplicación de la tesis.....	27
1.2 Objetivos de la tesis.....	28
1.3 Estructura de la tesis	29
2 Equipos portátiles de medición y técnicas de evaluación	31
2.1 Introducción	31
2.2 Descripción y clasificación de sistemas de medición portátiles.....	31
2.2.1 Brazos articulados de medición por coordenadas	31
2.2.2 Láser tracker	38
2.2.3 Plataforma multi-registro	41
2.3 Técnicas de evaluación de precisión de sistemas de medición portátiles.....	44
2.3.1 Normativa y métodos de evaluación aplicables a brazos articulados de medición por coordenadas.....	46
2.3.2 Normativa y métodos de evaluación aplicables a láser trackers	61
2.4 Patrones de calibración y verificación.....	71
2.5 Conclusiones	78
3 Modelado cinemático de sistemas de medición portátiles	79
3.1 Introducción	79
3.2 Representación de la orientación y posición	80
3.3 Representación según modelo de Denavit - Hartenberg.....	82
3.4 Descripción cinemática del brazo articulado de medición por coordenadas	88
3.4.1 Modelo cinemático y determinación de parámetros nominales	89
3.5 Descripción cinemática del láser tracker	92
3.5.1 Modelo cinemático de láser tracker basado en errores geométricos.....	93
3.5.2 Modelo cinemático según modelo de Denavit – Hartenberg y determinación de parámetros nominales	97
3.6 Descripción cinemática de la plataforma multi-registro	99
3.6.1 Modelo matemático de la plataforma multi-registro	101

3.7	Conclusiones	105
4	Calibración y verificación de brazos articulados de medición por coordenadas con plataforma multi-registro	107
4.1	Introducción	107
4.2	Integración de modelos cinemáticos de brazo articulado y plataforma multi-registro	108
4.3	Captura de datos e identificación de parámetros del brazo articulado	112
4.3.1	Instrumento patrón	113
4.3.2	Procedimiento y posiciones de captura	115
4.3.3	Métodos de evaluación del error y parámetros de calidad	117
4.3.4	Optimización de parámetros del modelo cinemático	120
4.3.5	Evaluación de los parámetros identificados	128
4.4	Procedimiento de verificación de brazo articulado de medición por coordenadas con plataforma multi - registro	130
4.4.1	Resultados del procedimiento de verificación del brazo con plataforma multi-registro	133
4.5	Comparativa de procedimientos de evaluación de brazos articulados de medición por coordenadas con plataforma multi-registro	135
4.5.1	Normativa aplicable	136
4.5.2	Ensayos de evaluación	137
4.5.3	Resultados de la comparativa de procedimientos de verificación	141
4.5.4	Análisis de productividad del uso de una plataforma multi-registro en procesos de verificación de brazos articulados de medición por coordenadas	147
4.6	Análisis de uso de un equipo de láser tracker como patrón en procedimientos de evaluación de brazos articulados de medición por coordenadas	149
4.6.1	Evaluación de la precisión de láser tracker	150
4.6.2	Ensayos de evaluación en máquina herramienta	151
4.6.3	Ensayos de evaluación en guía lineal	152
4.6.4	Procedimiento experimental de evaluación del láser tracker como patrón	154
4.6.5	Resultados de evaluación del láser tracker como patrón	158
4.7	Conclusiones	165
5	Verificación de láser tracker con plataforma multi-registro	169
5.1	Introducción	169
5.2	Integración de modelos cinemáticos de láser tracker y plataforma multi-registro	170
5.3	Procedimiento de verificación de láser tracker con plataforma multi-registro	173

5.3.1	Resultados del procedimiento de verificación de láser tracker con plataforma multi-registro.	182
5.4	Procedimiento de verificación de láser tracker con plataforma multi-registro mediante distancias virtuales.....	188
5.4.1	Resultados del procedimiento de verificación de láser tracker con plataforma multi-registro mediante distancias virtuales.	201
5.5	Conclusiones.....	210
6	Modelo de cálculo de incertidumbre de medición de la plataforma multi-registro	213
6.1	Introducción.....	213
6.2	Análisis de la plataforma multi-registro mediante método de elementos finitos.....	214
6.2.1	Simplificaciones del modelo de la plataforma multi-registro.....	214
6.2.2	Resultado global de las simplificaciones en el modelo final para cálculo.....	216
6.3	Análisis modal de la plataforma multi-registro mediante Abaqus.....	223
6.3.1	Tratamiento del modelo.....	224
6.3.2	Resultados del análisis modal con modelo libre.....	226
6.3.3	Resultados análisis modal modelo con apoyo en mesa.....	227
6.3.4	Conclusiones.....	228
6.4	Análisis modal experimental de la plataforma multi-registro.....	229
6.4.1	Fases del ensayo modal experimental.....	229
6.4.2	Resultados del ensayo modal experimental.....	232
6.4.3	Conclusiones.....	234
6.5	Estimación de la incertidumbre de la plataforma multi-registro mediante simulación de Monte Carlo.....	236
6.5.1	Definición de variables de entrada del modelo.....	236
6.5.2	Definición de variables de salida del modelo.....	247
6.5.3	Resultados de estimación de incertidumbre.....	249
6.6	Conclusiones.....	261
7	Conclusiones.....	263
7.1	Conclusiones.....	263
7.2	Líneas de trabajo futuro.....	266
7.3	Publicación de resultados.....	267
8	Bibliografía.....	269

Índice de figuras

Figura 2.1 Configuraciones de brazos de medición por coordenadas Fuente: (ASME B89.4.22-2004)	33
Figura 2.2 Encoders absolutos y posicionamiento de encoders angulares en articulación brazo de medición. Fuente: (Eltra, Heidenhain, Romer)	34
Figura 2.3. Palpadores pasivos para brazos de medición. Fuente: (Romer, Faro)	34
Figura 2.4. Palpadores touch trigger: principio de funcionamiento y modelos comerciales. Fuente: (Tesastar, Renishaw, Faro)	35
Figura 2.5. Palpadores sin contacto: sensor láser y palpador de tubos. Fuente: (Romer, Faro)	35
Figura 2.6. Bases de fijación y trípodes para brazos de medición. Fuente: (Romer, Faro, Brunson)	36
Figura 2.7. Principio de medición de un láser tracker	38
Figura 2.8. Principio de funcionamiento y componentes de un láser tracker	39
Figura 2.9. Modelos y configuraciones de láser tracker	40
Figura 2.10. Plataforma multi-registro en configuración con láser tracker y brazo articulado medición	41
Figura 2.11. Vista de sensor capacitivo vertical y sensor capacitivo horizontal con sus targets	42
Figura 2.12. Disposición de los sensores capacitivos con sus piezas de amarre a la placa fija.	42
Figura 2.13. Mecanizado de los asientos cinemáticos en la placa móvil para las esferas (a) y en la placa fija para los cilindros (b)	43
Figura 2.14. Hoja de especificaciones brazo de medición FARO Arm Platinum según norma ASME B89.4.22-2004. Fuente: (FARO)	45
Figura 2.15. Hoja de especificaciones láser tracker LEICA AT901 según norma ASME B89.4.19-2006. Fuente: (Leica Geosystems)	45
Figura 2.16. Prueba de error de palpado (posiciones y orientaciones de articulación). Fuente: (VDI/VDE 2617-2009 parte 9)	47
Figura 2.17. Prueba de error de palpado tamaño, distribución de puntos palpados por esfera. Fuente: (ISO/CD 10360 parte12 -2014 borrador)	48
Figura 2.18. Posiciones de ensayo en prueba de repetibilidad de punto. Fuente: (ASME B89.4.22-2004)	49
Figura 2.19. Posiciones de articulación del brazo en prueba de repetibilidad de punto. Fuente: (ASME B89.4.22-2004)	50
Figura 2.20. Asiento cinemático y palpador durante prueba de repetibilidad de punto	51
Figura 2.21. Posiciones de palpador del brazo en prueba de evaluación del error de articulación. Fuente: (ISO/CD 10360 parte 12)	52
Figura 2.22. Numeración de octantes del volumen de medida de un brazo articulado, ASME B89.4.22-2004	54
Figura 2.23. Orientación de la barra de bolas respecto al brazo articulado	54
Figura 2.24. Posiciones de ensayo de evaluación de rendimiento volumétrico. ASME B89.4.22-2004	55
Figura 2.25. Distribución de volúmenes parciales en ensayo de precisión longitudinal volumétrica. (Fuente VDI/VDE 2617-2009 parte 9)	56
Figura 2.26. Posición de articulaciones del brazo en ensayo de precisión longitudinal volumétrica. Fuente: (VDI/VDE 2617-2009 parte 9)	57
Figura 2.27. Posición patrón en ensayo de precisión longitudinal volumétrica por volúmenes completos. Fuente: (VDI/VDE 2617-2009 parte 9)	58

Figura 2.28. Configuración de un brazo de medición por coordenadas de siete ejes. Fuente: (ISO/CD 10360 parte 12)	59
Figura 2.29. Posicionamiento de las distancias calibradas en el volumen de medida del brazo. Fuente: (Normativa ISO/CD 10360 parte 12)	60
Figura 2.30. Orientaciones del brazo de medida en ensayo en ensayo de evaluación de error en longitud. Fuente: (ISO/CD 10360 parte 12)	60
Figura 2.31. ASME B89.4.19 Prueba de medición de distancia absoluta. Fuente: (ASME B89.4.19) ..	62
Figura 2.32. ASME B89.4.19 Prueba de medición de longitud horizontal, vertical, diagonal derecha y diagonal izquierda. Fuente: (ASME B89.4.19)	63
Figura 2.33. ASME B89.4.19 Prueba a dos caras. Fuente: (ASME B89.4.19).....	64
Figura 2.34. Posiciones prueba de evaluación de error de medición de longitud. Fuente: (ISO/CD10360-10).....	67
Figura 2.35. Posible disposición de líneas de medición en prueba de evaluación de error de medición de longitud (opción 2). Fuente: (VDI/VDE 2617- parte 10).....	67
Figura 2.36. Disposición de líneas de medición en prueba de evaluación de error de medición de longitud con láser tracker en posición variable. Fuente: (VDI/VDE 2617- parte 10)	69
Figura 2.37. Tipos de patrones: barras, cubos, bases y tetraedros de bolas. Fuente: (Unimetrik S.A)	71
Figura 2.38. Modelo instrumento medición basado en barra e interferómetro. Fuente: (Kovac & Frank, 2001)	72
Figura 2.39. Patrón de calibración de geometría virtual. Fuente: (Piratelli & Lesnau, 2010)	73
Figura 2.40. Patrón de placa de esferas virtuales. Fuente: (Piratelli et al. 2012)	74
Figura 2.41. Patrón de aluminio con círculos virtuales. Fuente: (González et al. 2013)	74
Figura 2.42. Patrón con múltiples geometrías integradas. Fuente: (Cuesta et al. 2014)	75
Figura 2.43. Barra con rodamientos esféricos acoplada a CMM y brazo de medición. (Hamana et al. 2011)	75
Figura 2.44. Determinación de longitud de referencia L, desde posición de láser tracker P ₀ . Fuente: (VDI/VDE 2617- parte 10).....	76
Figura 2.45. Procedimiento para establecer longitud de referencia usando un espejo inclinado. Fuente: (VDI/VDE 2617- parte 10).....	76
Figura 2.46. Esquema de guía lineal de medición láser en configuración horizontal de medición. Fuente: (ASME B89.4.19)	77
Figura 2.47. Configuración ensayo de medición de longitud según ASME B89.4.19. Fuente: (Phillips, S.D, 2011)	77
Figura 2.48. Configuración de ensayo para calibración de láser tracker. Fuente: (Unkuri et al, 2012) .	78
Figura 3.1. Rotaciones del sistema (x ₁ ,y ₁ ,z ₁) respecto al sistema (x ₀ ,y ₀ ,z ₀).....	81
Figura 3.2. Modelo Denavit – Hartenberg. Fuente (Denavit-Hartenberg, 1955)	82
Figura 3.3. Brazo de medida FARO Platinum montado sobre plataforma multi-registro.....	88
Figura 3.4. Relación entre el origen del sistema de medida y el modelo	89
Figura 3.5. Disposición de articulaciones en brazo FARO Platinum	90
Figura 3.6. Sistemas de coordenadas en posición inicial para brazo FARO Platinum según modelo D-H	90
Figura 3.7. Medición de parámetros geométricos iniciales del modelo con MMC	91
Figura 3.8. Principio de medición de un láser tracker.....	92
Figura 3.9. Definición de sistemas de coordenadas laser tracker API / FARO. Fuente (Muralikrishnan et al., 2009).....	93

Figura 3.10. Errores geométricos láser tracker API / FARO (parte 1). Fuente (Muralikrishnan et al., 2009).....	94
Figura 3.11. Errores geométricos láser tracker API / FARO (parte 2). Fuente (Muralikrishnan et al., 2009).....	95
Figura 3.12. Errores geométricos láser tracker Leica (parte 1). Fuente (Loser and Kyle., 1998).....	96
Figura 3.13. Errores geométricos láser tracker Leica (parte 2). Fuente (Loser and Kyle., 1998).....	96
Figura 3.14. Errores geométricos láser tracker Leica (parte 3). Fuente (Loser and Kyle., 1998).....	97
Figura 3.15. Sistemas de coordenadas en posición inicial para laser tracker API T3 según modelo D-H	98
Figura 3.16. Plataforma multi-registro.....	99
Figura 3.17. Posicionamiento de esferas de referencia en placa móvil y fija de la plataforma multi-registro.	100
Figura 3.18. Esquema geométrico de un sensor capacitivo entre la posición de referencia de calibración y un nuevo posicionamiento de la plataforma durante el procedimiento de verificación. ..	101
Figura 4.1. Sistemas de coordenadas del brazo de medida y de la placa móvil.	111
Figura 4.2. Sistema de coordenadas de la placa móvil y sistema de coordenadas de la placa fija	112
Figura 4.3. Soporte de precisión KOBAS fijación del patrón procedimientos de calibración y verificación	114
Figura 4.4. Palpador de asiento cinemático de esferas para captura continua	115
Figura 4.5. Cálculo de distancia entre esferas posición patrón Barradiagdos45arriba y Barradiagdos45arriba.....	116
Figura 4.6. Posiciones de barra patrón en identificación de parámetros	116
Figura 4.7. Esquema del procedimiento de optimización	122
Figura 4.8. Plataforma multi-registro y ensayo de verificación de brazo con plataforma multi-registro	131
Figura 4.9. Posiciones del patrón en verificación brazo articulado con plataforma multi-registro	131
Figura 4.10. Esferas medidas y distancias entre esferas para la posición 1 Barra Vertical.	132
Figura 4.11. Esferas medidas y distancias entre esferas para la posición 2 Barra Horizontal	132
Figura 4.12. Esferas medidas y distancias entre esferas para la posición 3 Barra Diag45abajo.	132
Figura 4.13. Esferas medidas y distancias entre esferas para la posición 4 Barra Diag45arriba	132
Figura 4.14. Esferas medidas y distancias entre esferas para la posición 5 Barra_Diagdos45arriba .	132
Figura 4.15. Error en distancia por posición de barra patrón y posición rotativa de la plataforma	134
Figura 4.16. Disposición del brazo en ensayos de normativa y brazo con plataforma multi-registro. .	135
Figura 4.17. Posiciones ensayo de error de palpado tamaño / diámetro efectivo ASME B89.4.22-2004 VDI/VDE 2617-2009.....	137
Figura 4.18. Disposición ensayo de repetibilidad de punto SPAT ASME B89.4.22-2004	139
Figura 4.19. Muestra de posiciones de ensayo volumétrico según ASME B89.4.22-2004	140
Figura 4.20. Resultados prueba de error de palpado de tamaño ASME B89.4.22-2004 y VDI/VDE 2617-2009.....	141
Figura 4.21. Máxima distancia en ensayo SPAT según ASME B89.4.22-2004.....	142
Figura 4.22. Resultados de SPAT y prueba de error de palpado de posición	143
Figura 4.23. VDI/VDE 2617-2009 parte 9 y ASME B89.4.22-2004: resultados por posición de ensayo	143

Figura 4.24. Resultados comparativos de la prueba de evaluación de precisión volumétrica (máxima desviación distancia, rango y 2RMS) según norma en verificación con plataforma multi-registro y especificación fabricante	144
Figura 4.25. VDI/VDE 2617-2009 parte 9: error en distancia según longitud evaluada	145
Figura 4.26. ASME B89.4.22-2004 Error en distancia por posición ensayo (1-20).....	145
Figura 4.27. VDI/VDE 2617-2009 parte 9 representación de error volumétrico	146
Figura 4.28. ASME B89.4.22-2004 representación de error volumétrico	146
Figura 4.29. Comparativa tiempos de ensayo ASME B89.4.22, VDI/VDE 2617 y plataforma multi-registro.....	147
Figura 4.30. Disposición ensayo láser tracker e interferómetro sobre bancada máquina herramienta	151
Figura 4.31. Disposición ensayo láser tracker e interferómetro sobre guía lineal	152
Figura 4.32. Disposición de retrorreflectores, brazo articulado de medición y láser tracker en el ensayo	155
Figura 4.33. Procedimiento de calibración del brazo mediante asiento cinemático.	155
Figura 4.34. Disposición de retrorreflectores en la malla según medición del láser tracker.....	156
Figura 4.35. Disposición de retrorreflectores en la malla según medición del brazo para 6 posiciones de la plataforma (operario 1)	157
Figura 4.36. Disposición de retrorreflectores en la malla según medición del brazo para 6 posiciones de la plataforma (operario 2)	157
Figura 4.37. Error de palpado de tamaño (diámetro) por posición plataforma: desviación máxima. ..	160
Figura 4.38. Error de palpado de tamaño (diámetro) por posición plataforma: desviación estándar ..	160
Figura 4.39. Desviación en diámetro por SMR y posición de la plataforma	160
Figura 4.40. Error de medición en diámetro por operario.....	161
Figura 4.41. Error en distancia 2RMS por posición de la plataforma	162
Figura 4.42. Error medio en distancia por posición de la plataforma	162
Figura 4.43. Error máximo en distancia por posición de la plataforma.....	162
Figura 4.44. Error medio en distancia por posición de la plataforma y operario	163
Figura 4.45. Error en distancia por posición de la plataforma y longitud evaluada	163
Figura 5.1. Sistemas de coordenadas del láser tracker y sistema de coordenadas de la placa móvil.	172
Figura 5.2. Sistema de coordenadas de la placa móvil y sistema de coordenadas de la placa fija.	172
Figura 5.3. Ensamblaje plataforma multi-registro, láser tracker API T3-15 y soporte fijación láser tracker.....	173
Figura 5.4. Disposición de retrorreflectores, láser tracker y plataforma multi-registro en el ensayo ...	174
Figura 5.5. Posiciones de retrorreflectores al láser tracker en malla de ensayo (1).....	175
Figura 5.6. Distancias de retrorreflectores al láser tracker en malla de ensayo (2)	175
Figura 5.7. Láser tracker sobre plataforma multi-registro en el ensayo	176
Figura 5.8. Patrón físico con cuatro retrorreflectores y medición del patrón con máquina de medición por coordenadas.....	177
Figura 5.9. Patrones de fotogrametría y disposición en la malla de medición	177
Figura 5.10. Disposición de retrorreflectores en malla de medida, puntos expresados en sistema referencia láser tracker, posiciones plataforma 1-6.....	179
Figura 5.11. Disposición de retrorreflectores en malla de medida, puntos expresados en sistema de referencia plataforma inferior, posiciones plataforma 1-6.....	179

Figura 5.12. Representación vectorial de errores en coordenadas de retroreflectores en malla 1 y malla 2 (factor amplificación 50)	182
Figura 5.13. Representación vectorial de errores en coordenadas de retroreflectores en malla 1 y malla 3 (factor amplificación 50)	182
Figura 5.14. Representación vectorial de errores en coordenadas de retroreflectores en malla 1 y malla 4 (factor amplificación 50)	183
Figura 5.15. Representación vectorial de errores en coordenadas de retroreflectores en malla 1 y malla 5 (factor amplificación 50)	183
Figura 5.16. Representación vectorial de errores en coordenadas de retroreflectores en malla 1 y malla 6 (factor amplificación 50)	183
Figura 5.17. Errores en distancia entre mallas de puntos comparadas (posiciones plataforma 1-6) ..	184
Figura 5.18. Error medio en distancia por malla de puntos comparada (posiciones plataforma 1-6) ..	185
Figura 5.19. Error en distancia frente a valor nominal en MMC por posición de plataforma	186
Figura 5.20. Error en distancia frente a valor nominal fotogrametría por posición de plataforma	186
Figura 5.21. Error medio de punto por malla de retroreflector	187
Figura 5.22. Error medio de punto por retroreflector	187
Figura 5.23. Generación de mallas de medición virtuales 1 - 6	189
Figura 5.24. Explicación del concepto de distancia virtual con plataforma multi-registro aplicado a equipo de láser tracker	190
Figura 5.25. Cambio de sistemas de coordenadas para la obtención de un punto virtual	191
Figura 5.26. Representación del concepto de distancia medida y distancia virtual	192
Figura 5.27. Método evaluación 1: distancia virtual entre punto virtual en malla 1 y sus puntos virtuales homólogos en mallas virtuales 2-6	194
Figura 5.28. Método evaluación 2: distancia virtual entre punto virtual en malla 1 y sus homólogos en mallas virtuales consecutivas	195
Figura 5.29. Generación de hexágono virtual a partir de las distancias entre retroreflectores homólogos en mallas virtuales consecutivas (alturas 0/1/2/6m)	196
Figura 5.30. Método evaluación 3: distancias virtuales cruzadas entre malla virtual 1 y mallas virtuales 2-6	197
Figura 5.31. Método evaluación 4: distancias virtuales verticales, horizontales y diagonales en malla virtual 1	198
Figura 5.32. Método evaluación 4: distancias virtuales verticales, horizontales y diagonales por malla virtual	199
Figura 5.33. Posiciones en prueba de evaluación de error de medición de longitud. Fuente: (ISO/CD10360-10)	200
Figura 5.34. Posible disposición de líneas de medición en prueba de evaluación de error de medición de longitud (opción 2). Fuente: (VDI/VDE 2617- parte 10)	200
Figura 5.35. Comparativa de errores en distancia según método de evaluación distancias virtuales ..	201
Figura 5.36. Comparativa resultados de errores en distancia mediante distancias virtuales y procedimiento verificación convencional con plataforma multi-registro	202
Figura 5.37. Error en distancia por punto y malla virtual (método 1)	204
Figura 5.38. Error medio en distancia por malla virtual (método 1)	204
Figura 5.39. Error medio en distancia por puntos virtuales homólogos (método 1)	204
Figura 5.40. Error por distancia virtual evaluada en orden decreciente (método 1)	205
Figura 5.41. Error en distancia por punto y malla virtual (método 2)	205

Figura 5.42. Error medio en distancia por malla virtual (método 2).....	206
Figura 5.43. Error medio en distancia por puntos virtuales homólogos (método 2)	206
Figura 5.44. Error por distancia virtual evaluada en orden decreciente de magnitud (método 2)	207
Figura 5.45. Error en distancia cruzadas por malla virtual (método 3)	207
Figura 5.46. Error medio en distancia cruzada por malla virtual (método 3)	208
Figura 5.47. Error medio en distancia cruzada por parejas de puntos virtuales (método 3)	208
Figura 5.48. Error por distancia virtual evaluada y malla virtual (método 4).....	209
Figura 5.49. Error medio en distancia por malla virtual (método 4).....	209
Figura 5.50. Error medio en distancia por distancia virtual (método 4)	209
Figura 5.51. Error por distancia virtual evaluada en orden decreciente y malla (método 4)	210
Figura 6.1. Ejemplo de simplificación esfera posicionamiento, original- sección original-cuerpo simplificado	215
Figura 6.2. Ejemplo de simplificación soporte sensor capacitivo horizontal, original- sección original – simplificación - sección simplificada	216
Figura 6.3. Modelo CAD completo, plataforma multi-registro y brazo articulado de medición	216
Figura 6.4. Modelo CAD completo de la plataforma multi-registro	217
Figura 6.5 Componentes mecánicos de la placa fija de la plataforma multi-registro	218
Figura 6.6 Simplificación de cilindro de acoplamiento	219
Figura 6.7 Componentes mecánicos y geometría final de la placa fija simplificada.....	221
Figura 6.8 Componentes mecánicos de la placa móvil	222
Figura 6.9 Componentes mecánicos y geometría final de placa móvil simplificada	222
Figura 6.10 Simplificación final del modelo plataforma multi-registro.....	223
Figura 6.11. Mallado de la plataforma multi-registro	224
Figura 6.12. Mallado de la plataforma multi-registro	225
Figura 6.13. Detalle mallado de elementos de posicionamiento cilindro - esfera.....	225
Figura 6.14. Modos de vibración en análisis modal del modelo libre	227
Figura 6.15. Modos de vibración en análisis modal del modelo con apoyo en mesa.....	228
Figura 6.16. Disposición de puntos y dirección de la medida.....	229
Figura 6.17. Martillo de excitación	230
Figura 6.18. Vista en planta plataforma multi-registro y secuencia de excitación del ensayo	230
Figura 6.19. Interface del software utilizado para captura de datos	231
Figura 6.20. Visualización de función de respuesta en frecuencia	231
Figura 6.21. Función de coherencia	232
Figura 6.22. Ejemplos picos resonancia, anti-resonancia y desfase 180°-180° entre resonancia y anti- resonancia	232
Figura 6.23. Función de respuesta en frecuencia del ensayo modal resultante	233
Figura 6.24. Modos de vibración: modo 1 (964,5 Hz), modo 2 (991,9 Hz) y modo 3 (1879 Hz)	233
Figura 6.25. Modos de vibración MEF Abaqus Plataforma superior: modo 1 (1170,3 Hz), modo 2 (1184 Hz) y modo 3 (2211,9 Hz).....	234
Figura 6.26. Propagación de distribuciones de variables de entrada a través del modelo de la plataforma multi-registro.	236
Figura 6.27. Error de sensibilidad del sensor capacitivo (fuente: Lion Precision)	238
Figura 6.28. Error de offset del sensor capacitivo (fuente: Lion Precision)	239
Figura 6.29. Error de linealidad del sensor capacitivo (fuente: Lion Precision)	239
Figura 6.30. Simulación error de banda sensor capacitivo 1, n-iteraciones = 100.000.....	240

Figura 6.31. Captura en continuo sensores capacitivos (1-6), plataforma en estático, precarga 4 bar, posición plataforma 1.....	242
Figura 6.32. Ajustes función de probabilidad normal para capturas en continuo sensores capacitivos (1-6), plataforma en estático, precarga 4 bar, pos 1.....	243
Figura 6.33. Comparativa datos de calibración y resultado experimental de desviación estándar del ruido generado por los sensores capacitivos (1-6), plataforma en estático, precarga 4 bar, pos 1.....	244
Figura 6.34. Entradas del modelo distribución lecturas sensores capacitivos (1-6), posición plataforma 1, posición patrón Barra Lejos, esfera 1, punto 1. n-iteraciones 100.....	245
Figura 6.35. Entradas del modelo distribución lecturas sensores capacitivos (1-6), posición plataforma 1, posición patrón Barra Lejos, esfera 1, punto 1, n-iteraciones 100.000.....	246
Figura 6.36. Disposición patrón posición Barra Lejos y brazo articulado de medición en captura de datos	246
Figura 6.37. Propagación de distribuciones de variables de entrada a través del modelo de la plataforma multi-registro y generación de variables de salida.	247
Figura 6.38. Esquema de estimación de incertidumbre de plataforma multi-registro.	248
Figura 6.39. Posibles valores de términos de traslación XYZ y rotación ABC de matriz de transformación homogénea de cambio de sistema referencia superior a inferior, n-iteraciones 10000.	250
Figura 6.40. Posibles valores de términos de traslación XYZ y rotación ABC de matriz de transformación homogénea de cambio de sistema referencia superior a inferior, n-iteraciones 1000.	250
Figura 6.41. Posibles valores de las coordenadas XYZ del punto 1, esfera 1 en sistema de referencia plataforma inferior, n-iteraciones 10000.....	252
Figura 6.42. Posibles valores de las coordenadas XYZ del punto 1, esfera 1 en sistema de referencia plataforma inferior, n-iteraciones 10000.....	253
Figura 6.43. Posibles valores de las coordenadas XYZ del punto 1, esfera 1 en sistema de referencia plataforma inferior, n-iteraciones 10000.....	253
Figura 6.44. Posibles valores de las coordenadas XYZ del centro de las n-esferas 1 en sistema de referencia plataforma inferior, n-iteraciones 10000.....	254
Figura 6.45. Incertidumbre de la plataforma multi-registro en la generación puntos por esfera (esfera 1, 2 y 5) en sistema de referencia plataforma inferior, n- iteraciones 10000.	255
Figura 6.46. Posibles valores de las coordenadas XYZ del centro de las n-esferas 2 expresadas en sistema de referencia plataforma inferior, n-iteraciones 10000.	256
Figura 6.47. Posibles valores de las coordenadas XYZ del centro de las n-esferas 5 expresadas en sistema de referencia plataforma inferior, n-iteraciones 10000.	256
Figura 6.48. Evaluación de error en distancia, n-iteraciones 10000 (a).....	258
Figura 6.49. Evaluación de error en distancia, n-iteraciones 10000 (b).....	258
Figura 6.50. Comparativa de incertidumbres en la generación de puntos por posición de plataforma 1/3/6 y esfera asociada en sistema de referencia plataforma inferior, n- iteraciones 10000.	259
Figura 6.51. Influencia del número de iteraciones en variable de salida X (mm).	260

Índice de tablas

Tabla 2.1. Modelos de brazos de medición por coordenadas. Fuente: (Romer, Faro, Nikon, Kreon)...	37
Tabla 2.2. Modelos de láser tracker. Fuente: (Romer, Faro, Api).....	40
Tabla 2.3. Comparativa de ensayos para verificación y calibración de brazos según normativa aplicable.....	46
Tabla 2.4. Comparativa de ensayos para evaluación del error de palpado de tamaño ASME B89.4.22, VDI/VDE 2617 e ISO/CD 10360.....	48
Tabla 2.5. Comparativa de ensayos para evaluación del error de palpado de forma VDI/VDE 2617 e ISO/CD 10360.....	49
Tabla 2.6. Comparativa de ensayos para evaluación del error de palpado de posición según normativa ASME B89.4.22, VDI/VDE 2617 e ISO/CD 10360.....	52
Tabla 2.7. Comparativa de ensayos para evaluación del rendimiento volumétrico según normativa ASME B89.4.22, VDI/VDE 2617 e ISO/CD 10360.....	53
Tabla 2.8. Definición de posiciones y parámetros ensayo de evaluación del rendimiento volumétrico. Fuente: (ASME B89.4.22-2004).....	55
Tabla 2.9. Posiciones para evaluación del rendimiento volumétrico por volúmenes parciales. Fuente: (VDI/VDE 2617- 9).....	57
Tabla 2.10. Posiciones en ensayo de evaluación de error en longitud. Fuente: (ISO/CD 10360 - 12).....	59
Tabla 2.11. Orientaciones del brazo de medida en líneas de medida. Fuente: (ISO/CD 10360 - 12).....	61
Tabla 2.12. Posiciones en prueba de medición de distancia absoluta. Fuente: (Norma ASME B89.4.19).....	62
Tabla 2.13. Posiciones en el ensayo de evaluación del error de medida de longitud. Fuente: (Norma ASME B89.4.19).....	63
Tabla 2.14. Posiciones en el ensayo de evaluación a dos caras. Fuente: (Norma ASME B89.4.19).....	64
Tabla 2.15. Posiciones en el ensayo de evaluación a dos caras. Fuente: (ISO/CD10360-10).....	65
Tabla 2.16. Posiciones fundamentales en test de evaluación del error de medición de longitud. Fuente: (ISO/CD10360-10).....	66
Tabla 2.17. Equipos de ensayo y fórmulas de cálculo del error de medición en distancia en prueba de evaluación de error de medición de longitud. Fuente: (VDI/VDE 2617- 10).....	70
Tabla 3.1. Valores iniciales de los parámetros geométricos del modelo cinemático brazo FARO Platinum.....	91
Tabla 3.2. Valores iniciales de los parámetros geométricos del modelo cinemático LT API T3.....	98
Tabla 4.1. Certificado de calibración de la barra de esferas patrón.....	113
Tabla 4.2. Coordenadas promedio en la calibración de la barra de esferas patrón.....	114
Tabla 4.3. Esquema de cálculo de errores de punto por esfera 3/5/7/9 y posición del patrón.....	119
Tabla 4.4. Funciones objetivo definidas en procedimiento de optimización de parámetros.....	121
Tabla 4.5. Parámetros de calidad obtenidos en procedimiento de optimización de parámetros para funciones objetivo 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 8.....	125
Tabla 4.6. Valores de parámetros cinemáticos identificados mediante funciones objetivo 1-4 para todas las posiciones capturadas.....	127
Tabla 4.7. Valores de parámetros cinemáticos identificados mediante funciones objetivo 5-8 para todas las posiciones capturadas.....	128

Tabla 4.8. Resultados de evaluación con el juego de parámetros identificado en procedimiento de optimización para posición de prueba del patrón.....	129
Tabla 4.9. Resultados comparativos de la prueba de evaluación de precisión volumétrica en procedimiento verificación brazo con plataforma multi-registro y especificación fabricante	133
Tabla 4.10. Comparativa de ensayos para verificación y calibración de brazos según ASME B89.4.22, VDI/VDE 2617 e ISO/CD 10360.....	136
Tabla 4.11. Comparativa de ensayos para evaluación del error de palpado de tamaño según normativa	137
Tabla 4.12. Comparativa de ensayos para evaluación del error de palpado de posición según normativa.....	138
Tabla 4.13. Comparativa de ensayos para evaluación del rendimiento volumétrico según normativa	139
Tabla 4.14. Resultados prueba de error de palpado de tamaño según ASME B89.4.22 y VDI/VDE 2617-2009	141
Tabla 4.15. Resultados de prueba de repetibilidad de punto según ASME B89.4.22-2004, VDI/VDE 2617-2009	142
Tabla 4.16. Resultados comparativos de la prueba de evaluación de precisión volumétrica	143
Tabla 4.17. Evaluación de ensayos según ASME B89.4.22-2004, VDI/VDE 2617-2009 - 9, plataforma multi-registro en términos de tiempo y coste	148
Tabla 4.18. Número de mediciones por tipo de ensayo ASME B89.4.22-2004 y VDI/VDE 2617-2009	148
Tabla 4.19. Comparativa de precisiones disponibles en equipos de láser tracker comerciales	150
Tabla 4.20. Mediciones distancias sobre máquina herramienta mediante láser tracker e interferómetro	151
Tabla 4.21. Resultados comparativos mediciones interferómetro y láser tracker LEICA LTD600 en MH	152
Tabla 4.22. Resultados comparativos mediciones interferómetro y láser tracker LEICA LTD600 sobre guía de medición	153
Tabla 4.23. Definición de las posiciones de los retrorreflectores en el ensayo	154
Tabla 4.24. Definición de distancias entre retrorreflectores para evaluación de error en distancia	158
Tabla 4.25. Distancias nominales entre centros de retrorreflectores medidas con equipo láser tracker	159
Tabla 4.26. Resultados prueba de evaluación de error de palpado de tamaño (diámetro).....	159
Tabla 4.27. Resultados prueba de evaluación de precisión volumétrica	161
Tabla 4.28. Resultados comparativos de la prueba de evaluación de precisión volumétrica con láser tracker como patrón, plataforma multi-registro y patrón convencional y datos fabricante	164
Tabla 4.29. Resultados comparativos de la prueba de evaluación de precisión volumétrica con láser tracker como patrón y verificación brazo según ASME B89.4.22-2004	164
Tabla 5.1. Definición de las posiciones de los retrorreflectores en el ensayo	174
Tabla 5.2. Definición de distancias nominales entre retrorreflectores en el patrón	177
Tabla 5.3. Medición de distancias entre retrorreflectores patrón en máquina medición por coordenadas	178
Tabla 5.4. Medición de distancias entre retrorreflectores patrón por fotogrametría	178
Tabla 5.5. Error en distancia, verificación láser tracker con plataforma multi-registro	184
Tabla 5.6. Resultados de la prueba de evaluación de precisión volumétrica, verificación láser tracker con plataforma multi-registro frente a valor nominal calibrado	186

Tabla 5.7. Error de punto, verificación láser tracker con plataforma multi-registro	187
Tabla 5.8. Definición de distancias virtuales cruzadas desde malla virtual 1 a mallas virtuales 2-6. ..	196
Tabla 5.9. Definición de distancias virtuales por malla (1-6).....	198
Tabla 5.10. Errores en distancia por método de evaluación distancias virtuales	201
Tabla 5.11. Comparativa resultados de errores en distancia mediante distancias virtuales y procedimiento verificación convencional con plataforma multi-registro	202
Tabla 5.12. Agrupación de posiciones de retroreflectores en la malla por altura	206
Tabla 6.1. Lista de materiales utilizados en la plataforma multi-registro	224
Tabla 6.2. Modos de vibración obtenidos en análisis modal del modelo libre	226
Tabla 6.3. Modos de vibración obtenidos en análisis modal con apoyo en mesa	227
Tabla 6.4. Número de modos, frecuencias y desfases resultantes del análisis modal experimental ..	233
Tabla 6.5. Resultados modales del análisis MEF Abaqus para plataforma superior	234
Tabla 6.6. Parámetros de calibración sensores capacitivos (fuente: Lion Precision)	240
Tabla 6.7. Resultados de calibración sensores capacitivos (fuente: Lion Precision).....	241
Tabla 6.8. Parámetros ajuste datos en continuo sensores función de distribución normal	243
Tabla 6.9. Lecturas nominales sensores capacitivos.....	244
Tabla 6.10. Incertidumbre de posición y orientación plataforma multi-registro en matrices de transformación homogéneas plataforma superior a inferior, esfera 1, punto 1, n-iteraciones 10000. .	249
Tabla 6.11. Incertidumbre de la plataforma multi-registro en la generación de punto 1, esfera 1 en sistema de referencia plataforma inferior, n- iteraciones 10000.	251
Tabla 6.12. Incertidumbre de la plataforma multi-registro en la generación de punto 2, esfera 1 en sistema de referencia plataforma inferior, n- iteraciones 10000.	251
Tabla 6.13. Incertidumbre de la plataforma multi-registro en la generación de punto 3, esfera 1 en sistema de referencia plataforma inferior, n- iteraciones 10000.	251
Tabla 6.14. Incertidumbre de la plataforma multi-registro en la generación de punto 4, esfera 1 en sistema de referencia plataforma inferior, n- iteraciones 10000.	252
Tabla 6.15. Incertidumbre de la plataforma multi-registro en la generación de punto 5, esfera 1 en sistema de referencia plataforma inferior, n- iteraciones 10000.	252
Tabla 6.16. Comparativa de incertidumbres en la generación de puntos por esfera (esfera 1, 2 y 5) y esfera gaussiana asociada en sistema de referencia plataforma inferior, n- iteraciones 10000.	255
Tabla 6.17. Definición de distancias nominales entre esferas en el patrón	257
Tabla 6.18. Resultados de la evaluación en distancia e influencia de la incertidumbre de la plataforma multi-registro, n-iteraciones 10000.....	257
Tabla 6.19. Comparativa de incertidumbres en la generación de puntos por posición de plataforma 1/3/6 y esfera asociada en sistema de referencia plataforma inferior, n- iteraciones 10000.	259

Resumen

Desarrollo, implementación y ensayo de técnicas de verificación y calibración de instrumentos portátiles de medición por coordenadas mediante plataforma multi-registro

Autor: Raquel Acero Cacho

Director: Dr. D. Jorge Santolaria Mazo

La necesidad de verificación o inspección de unas determinadas características de un producto cobra importancia en procesos de homologación y aseguramiento de la calidad en entornos industriales o laboratorios, donde es necesario certificar que el producto cumple con unos requerimientos establecidos, bien a nivel dimensional o funcional. Dentro de la verificación dimensional de precisión, los instrumentos portátiles de medición por coordenadas han evolucionado, debido a su flexibilidad, portabilidad y coste frente a las máquinas de medición por coordenadas convencionales (MMC), como ocurre en el caso de los brazos articulados de medición por coordenadas. Otros instrumentos portátiles de medición como el láser tracker están dirigidos a mediciones de alto rango, en piezas o equipos de grandes dimensiones donde una verificación geométrica convencional no es viable.

Sin embargo, el propio uso y manipulación de estos equipos, acentuado por su condición de portabilidad, que permite su operación en entornos con ambientes no tan controlados, hace que sea necesaria su periódica calibración y verificación, con objeto de asegurar sus correctas características metroológicas y por lo tanto generando una medición con resultados fiables. Estas tareas suelen ser intensivas en tiempo y mano de obra, inhabilitando el equipo durante su realización con la merma de productividad derivada. Por este motivo, surgió el trabajo de tesis que se presenta a continuación, cuyo principal objetivo es definir, desarrollar, ensayar e implementar nuevas técnicas de calibración y verificación para instrumentos portátiles de medición, brazos articulados de medición y láser tracker con una plataforma multi-registro.

La plataforma multi-registro es un instrumento dotado de una alta repetibilidad de posicionamiento y presenta como principales ventajas la posibilidad de obtener puntos fijos en un sistema de referencia global y la generación de distancias patrón virtuales, ambas técnicas presentadas en esta tesis. Es el instrumento portátil fijado sobre la plataforma, el que rota en las seis posiciones de la plataforma en lugar del patrón de medida, pudiéndose generar un número mayor de posiciones de ensayo sin necesidad de un movimiento físico del patrón, evaluando en cada rotación un nuevo volumen de trabajo del instrumento de medición. Para la validación de estas técnicas de calibración y verificación, se realiza en este trabajo una revisión del estado del arte tanto a nivel de equipos como de técnicas de evaluación, analizando normativa aplicable a procedimientos de evaluación. Se definen e integran los modelos cinemáticos y matemáticos de brazo, láser tracker y plataforma, realizándose en el caso del brazo articulado de medición, un proceso de identificación de parámetros que permite minimizar los errores en el procedimiento de calibración. Posteriormente se lleva a cabo la fase experimental de los procedimientos de evaluación propuestos a nivel teórico, para láser tracker y brazo articulado de medición con la plataforma multi-registro, incluyendo el concepto de distancias virtuales. Para finalizar, se realiza un cálculo de estimación de la incertidumbre de la plataforma multi-registro aplicando el método de Monte Carlo, identificando las posibles fuentes de error asociadas al comportamiento estático y dinámico de la misma.

Abstract

Design, implementation and testing of calibration and verification techniques for portable coordinate measuring machines with an indexed metrology platform.

Author: Raquel Acero Cacho

Supervisor: Dr. D. Jorge Santolaria Mazo

The need of inspection and verification for certain features of a product, has a paramount importance in quality assurance and product release processes carried out in industrial applications or laboratories, where dimensional or functional product requirements should be fulfilled. Within high precision dimensional verification, portable coordinate measuring machines (PCMM) like articulated arm coordinate measuring machines (AACMMs) have had a great success in the market due to their flexibility, portable condition and lower cost in comparison with the conventional coordinate measuring machines (CMMs). In regard to high range measuring systems like laser trackers, they are focused on big dimension parts where the conventional geometrical verification is not suitable.

Nevertheless, the use and manipulation of this type of equipment, stressed by their portable condition, allows their use in non-controlled environment conditions, making necessary their periodical calibration and verification in order to assure their proper metrological features and the derived reliable measuring results. These tasks are cost, time and labor intensive and normally disables the equipment during the execution generating the consequent productivity loss. On these grounds, we present the following doctoral dissertation whose main target is to define, develop, implement and test new calibration and verification techniques for portable measuring instruments, articulated arm coordinate measuring machines and laser trackers by means of an indexed metrology platform.

The indexed metrology platform has a high positioning repeatability and shows as main advantages the possibility to generate fixed points in a global coordinate reference system and the ability to create virtual reference distances, being both methodologies presented in this doctoral dissertation. The portable measuring instrument, fixed on the platform, rotates along the six rotation positions of the platform instead of moving the calibrated gauge that remains fixed generating a bigger number of test positions in an easy way. Each time the platform rotates to a new position, a new working volume of the instrument is evaluated. In order to validate these proposed calibration and verification procedures, firstly a revision of the state of the art in regard to portable measuring instruments and evaluation techniques is carried out, followed by an analysis of the applicable standards for laser tracker and articulated arm measuring coordinate machines, which will be used as a base for the procedures definition. Then the kinematic and mathematical models for the three equipment, AACMM, laser tracker and the indexed metrology platform are defined and integrated. Regarding AACMM calibration, a parameter identification procedure is carried out to minimize the error in the measuring process. In addition, it is presented in this work the experimental phase and results of the aforesaid verification theoretical procedures proposed, for the laser tracker and the AACMM with the indexed metrology platform, including the virtual distance concept. Finally, an uncertainty estimation of the indexed metrology platform is completed based on Monte Carlo method, identifying the possible error sources in relation with the static and dynamic behavior of the platform.

Capítulo 1

1 Introducción

1.1 **Ámbito de aplicación de la tesis**

Es en el sector industrial de fabricación de bienes o equipos, donde la necesidad de verificación o inspección de unas determinadas características de un producto cobra importancia en procesos de homologación o control. Si bien la implementación de calidad en un producto es un factor a definir en la fase inicial de diseño, a lo largo del ciclo de vida del producto es necesario asegurar mediante una planificación de calidad detallada, que se cumplen unos determinados requerimientos dimensionales o funcionales. Todo ello unido a que el concepto de productividad es un valor fundamental y necesario a nivel industrial, hace que las tareas inspección y verificación traten de ser optimizadas al máximo aportando el mayor valor añadido posible al conjunto.

Dentro de la verificación dimensional de precisión, es donde los instrumentos portátiles de medición por coordenadas, tales como los brazos articulados de medición por coordenadas, han tenido un fuerte auge debido a su flexibilidad, portabilidad y menor coste frente a una máquina de medición por coordenadas convencional. En el caso de equipos de medición de alto rango, como el láser tracker, el desarrollo sufrido en las últimas décadas en sectores de fabricación de equipos de grandes dimensiones, ha generado una necesidad de utilización de estos equipos de medición con alta precisión donde una verificación geométrica por contacto no es viable. Sin embargo, el uso y manipulación habitual que se hace de estos equipos en entornos de laboratorio o incluso en entornos fabriles con condiciones ambientales menos controladas, hace que sea necesaria una periódica verificación y calibración de los mismos para asegurar sus correctas características metrológicas. Estas tareas suelen ser costosas en tiempo y dinero, suponiendo la inhabilitación del equipo durante el tiempo de evaluación, con la consiguiente merma de utilización del equipo, que en muchos casos hace necesaria una parada al no poder realizarse una sustitución por la no existencia de un equipo de reemplazo.

Y es en este punto de optimización donde se enmarca el trabajo realizado en esta tesis, que versa sobre la definición, desarrollo y ensayo de nuevas técnicas de calibración y verificación de equipos portátiles de medición, en este caso brazos articulados de medición por coordenadas y láser tracker, con una nueva plataforma multi-registro. Estos nuevos procedimientos desarrollados ambicionan una optimización de los ensayos a realizar y de las técnicas ya existentes, minimizando el tiempo de preparación y propio de ensayo, así como la mano de obra y espacio físico necesario, aumentando la productividad de estas operaciones de calibración y verificación.

La plataforma multi-registro es un instrumento dotado de una alta repetibilidad de posicionamiento y presenta como principales ventajas la posibilidad de obtener puntos fijos en un sistema de referencia global y la generación de distancias patrón virtuales, ambas técnicas presentadas en esta tesis. Una de sus aportaciones, es la reducción de tiempo, esfuerzo y espacio físico que genera en estos procedimientos debido a que es el instrumento portátil fijado sobre la plataforma, el que rota en las seis posiciones de la plataforma en lugar del patrón de medida, pudiendo generar un número mayor de posiciones sin necesidad de un movimiento físico del patrón. Cada vez que la plataforma rota a una nueva posición permitiendo al brazo medir la misma esfera o al láser tracker el mismo retroreflector, los valores de los encoders angulares del brazo y láser tracker varían, y por lo tanto un nuevo volumen de trabajo es evaluado para cada posición de la plataforma. De especial interés es la utilización de la plataforma con equipos de alto rango como láser trackers, donde las distancias patrón a materializar suelen ser de grandes dimensiones, con la consiguiente dificultad en equipos patrón y espacio necesario para la realización de las pruebas. Por este motivo, tras su utilización inicial con brazos articulados de medición donde se validó su correcta aplicación, se decidió extrapolar su uso a láser trackers en un segundo paso, donde se desarrolla un novedoso procedimiento de obtención de distancias patrón mediante distancias virtuales que elimina la necesidad de utilización de un patrón físico.

Por todos los motivos anteriormente mencionados y por el hecho de que no existen trabajos previos específicos en este ámbito con un equipo como la plataforma multi-registro, el trabajo desarrollado en esta tesis pretende ser una aportación novedosa a las técnicas de calibración y verificación de equipos portátiles de medición por coordenadas.

1.2 Objetivos de la tesis

Este trabajo de tesis tiene como objetivo principal el desarrollo, implementación y ensayo de nuevas técnicas de verificación y calibración de instrumentos portátiles de medición por coordenadas mediante una plataforma multi-registro, aplicándose en este caso a brazos articulados de medición por coordenadas y a láser trackers. Con el propósito de alcanzar este objetivo general, es necesario definir una serie de tareas de más bajo nivel cuya realización permita la consecución del objetivo principal definido y son las siguientes:

- Realizar una revisión del estado del arte de equipos de medición portátiles, brazos articulados de medición por coordenadas y láser tracker, identificando los modelos comerciales disponibles con sus principales prestaciones técnicas y características metrológicas, así como los tipos de patrones desarrollados que se utilizan para la evaluación de ambos instrumentos. Igualmente, se hace una búsqueda de bibliografía relacionada con técnicas de calibración y verificación de estos equipos analizando si existen aplicaciones similares.
- Revisar exhaustivamente la normativa aplicable a procedimientos de evaluación de brazos articulados de medición por coordenadas y láser trackers incluyendo los principales estándares AMSE, VDI e ISO. Establecer una comparativa entre las normas y los ensayos indicados en las mismas, identificando ventajas e inconvenientes, permitirá generar unos nuevos procedimientos de verificación de brazo y láser tracker lo más optimizados posible cumpliendo los requerimientos necesarios.
- Realizar el modelado cinemático del brazo articulado Faro Platinum y láser tracker API T3/15m utilizados en este trabajo, definiendo los parámetros nominales de ambos modelos, así como la integración de estos modelos cinemáticos con el modelo matemático de la plataforma. Como paso

previo, es necesario revisar el estado del arte relativo a modelado cinemático aplicable en procedimientos de calibración de estos equipos de medición.

- Capturar los datos y hacer la identificación de parámetros del brazo articulado con plataforma multi-registro, con objeto de optimizar los parámetros del brazo de medición dentro del procedimiento de calibración minimizando el error de medida.
- Definir, desarrollar y ensayar nuevos procedimientos de verificación para brazos articulados de medición con plataforma multi-registro y un patrón de barra de esferas, comparando los resultados obtenidos en la fase experimental con los resultados de aplicación de los procedimientos de verificación establecidos en normativa aplicable.
- Validar la posibilidad de utilización de un equipo de láser tracker como patrón en procedimientos de verificación de brazos articulados con plataforma multi-registro, en sustitución de una barra patrón convencional de esferas, teniendo en cuenta las precisiones ofrecidas por el láser tracker y la precisión necesaria para la verificación del brazo articulado.
- Definir, desarrollar y ensayar nuevos procedimientos de verificación para láser tracker con plataforma multi-registro, comparando con los procedimientos de verificación establecidos en normativa aplicable.
- Desarrollar y ensayar el concepto de verificación de láser tracker con plataforma multi-registro mediante distancias virtuales, comparando los resultados experimentales con los obtenidos en la verificación del láser tracker utilizando únicamente la plataforma multi-registro.
- Realizar una estimación de la incertidumbre de la plataforma multi-registro mediante el método de Monte Carlo, identificando las posibles fuentes de error que pueden afectar a la incertidumbre de la misma.
- Realizar un análisis de elementos finitos de la plataforma mediante Abaqus para estimar su comportamiento en deformación y llevar a cabo un análisis modal computacional y experimental basado en ese modelo para ver la respuesta de la plataforma en frecuencia ante excitaciones externas. Este trabajo permitirá ver posibles influencias en la medida de la plataforma y generar futuras optimizaciones de su diseño en caso necesario.

1.3 Estructura de la tesis

Este trabajo de tesis se estructura en seis capítulos principales cuyos contenidos se describen a continuación.

En el *capítulo 2* se realiza una revisión del estado del arte de equipos de medición portátiles, brazos articulados de medición por coordenadas y láser tracker, así como de los patrones utilizados en los procedimientos de calibración y verificación de estos equipos. Igualmente se introduce el concepto de la plataforma multi-registro, describiendo sus partes principales, sus características técnicas y metrológicas. Para concluir este bloque, se revisan las técnicas de evaluación existentes para estos equipos y la normativa aplicable en la que se basan estos procedimientos de calibración y verificación.

Como primer paso a establecer en los procesos de calibración y verificación, el *capítulo 3* versa sobre la realización del modelado cinemático de los equipos de medición que se utilizarán en el trabajo, brazo articulado de medición por coordenadas, láser tracker y la presentación del modelo matemático de la plataforma multi-registro. Para ello, se llevará a cabo una revisión del estado del arte de metodologías de modelado cinemático, seleccionando el modelo de Denavit-Hartenberg [1] como el más apropiado a utilizar en este trabajo. La obtención del conjunto de parámetros nominales del brazo articulado, servirá

como punto de partida para la definición de los valores iniciales de parámetros en el posterior procedimiento de optimización.

Es a partir de este punto, donde este trabajo de tesis se divide para investigar en detalle la utilización de la plataforma multi-registro como medio auxiliar en métodos de verificación de brazos articulados de medición por coordenadas, trabajo recopilado en el *capítulo 4*, y en técnicas de evaluación de láser tracker con la citada plataforma cómo se desarrolla a lo largo del *capítulo 5*.

En el *capítulo 4* se aborda la definición de nuevos procedimientos de calibración y verificación de brazos de medición utilizando la plataforma multi-registro. Para ello, y teniendo en consideración los parámetros nominales del modelo cinemático del brazo Faro Platinum y el modelo matemático de la plataforma, se realiza una captura de datos y una posterior identificación de parámetros para la optimización de los mismos dentro del proceso de calibración del brazo usando la plataforma. En lo que respecta a verificación, se hace un procedimiento de verificación completo del equipo utilizando la plataforma y una barra patrón de esferas. Tras esta verificación, y para comprobar la idoneidad del procedimiento de verificación del brazo usando la plataforma multi-registro, se comparan los resultados obtenidos con los procedimientos que rigen las normativas [2], [3], [4] de evaluación de brazos, observando ventajas, inconvenientes y diferencias entre ellos mediante la realización de los ensayos correspondientes. Se introduce también en este capítulo otra técnica de verificación de brazos articulados, incluyendo el concepto de utilización de un equipo de láser tracker como instrumento patrón para calibración y verificación de brazos articulados de medición con plataforma multi-registro, completándose con la fase experimental de ensayo.

El *capítulo 5* describe nuevos procedimientos de verificación de equipos de láser tracker con la plataforma multi-registro. Para ello, se toma como referencia la normativa aplicable a evaluación de láser trackers [5]–[7] y se lleva a cabo un procedimiento de verificación completo de un láser tracker API T3-15 m, montado sobre la plataforma, con una malla de grandes dimensiones compuesta de 23 retrorreflectores dispuestos en el volumen de trabajo del láser tracker y un patrón. Se presenta en este capítulo también la aplicación a láser trackers del concepto de verificación de instrumentos portátiles de medición mediante evaluación de distancias virtuales con plataforma multi-registro, que posibilita la definición de un número ilimitado de distancias patrón de cualquier longitud sin necesidad de materialización de las mismas en un patrón físico. Para finalizar, se comparan los resultados obtenidos con ambos métodos de verificación propuestos para el láser tracker.

La plataforma multi-registro, como elemento auxiliar a utilizar en un proceso de medición conjunto con instrumentos de medición portátiles, tiene una determinada incertidumbre de medición que es necesario estimar para ver su influencia en el resultado de la medición final obtenido y es este punto desarrollado en el *capítulo 6*. Para ello, se realiza una estimación de la incertidumbre de la plataforma mediante la aplicación del método de propagación de distribuciones de probabilidad de acuerdo a la GUM y una simulación mediante el método de Monte Carlo. Adicionalmente, para analizar el efecto de posibles deformaciones de la plataforma en el resultado de la medida, se realiza en este capítulo un análisis de la plataforma mediante elementos finitos y un posterior análisis modal de la misma, que permita caracterizar el comportamiento del sistema cuando es sometido a excitaciones ajenas al equipo.

Finalmente el *capítulo 7* muestra las principales conclusiones de este trabajo de tesis realizado, las líneas futuras de trabajo y un resumen de las publicaciones científicas derivadas del mismo.

Capítulo 2

2 Equipos portátiles de medición y técnicas de evaluación

2.1 Introducción

En el presente capítulo se aborda una revisión del estado del arte de equipos de medición portátiles, brazos de medición por coordenadas y láser tracker, así como una descripción técnica de una plataforma multi-registro de alta precisión y repetibilidad de posicionamiento que se utilizará conjuntamente con estos instrumentos en sus respectivos procedimientos de evaluación metrológica. Tras analizar los tipos de brazos y láser tracker existentes en el mercado, la tecnología disponible y las precisiones ofrecidas por ambos equipos, se pasará a describir los métodos de evaluación utilizados y la normativa aplicable. Para finalizar, se realiza un estudio de los patrones en uso en procedimientos de calibración y verificación de los equipos previamente mencionados, brazos de medición y láser tracker.

2.2 Descripción y clasificación de sistemas de medición portátiles

En este trabajo se han utilizado dos equipos de medición portátiles empleados frecuentemente en aplicaciones industriales, un brazo articulado de medición por coordenadas y un láser tracker. Ambos equipos se ensayan con una novedosa plataforma multi-registro de alta precisión y repetibilidad de posicionamiento, que presenta una clara alternativa para incrementar la eficacia de los procedimientos de calibración y verificación de estos equipos en términos de tiempo de ensayo, esfuerzo físico y mano de obra asociada. A continuación se describen las principales características de los equipos portátiles indicados y de la plataforma de posicionamiento.

2.2.1 Brazos articulados de medición por coordenadas

Los brazos de medición por coordenadas han tenido un gran auge en los últimos años en el sector industrial debido a su portabilidad, capacidad para inspeccionar piezas de diversa complejidad y su menor coste frente a las máquinas de medición por coordenadas convencionales. Independientemente de la fuerte reducción en tareas de simple inspección de piezas a nivel fabril y la transferencia hacia el concepto de calidad en diseño o fabricación, la verificación dimensional del producto es siempre necesaria en las fases de diseño y homologación del producto, así como en las inspecciones periódicas que puedan llevarse a cabo sobre él. En este ámbito de aplicación es donde los brazos de medición por coordenadas cobran fuerza, teniendo actualmente una fuerte implantación industrial. Por ello y para

asegurar la trazabilidad de la medición con estos instrumentos, se realizan a nivel de investigación numerosas actividades que permitan optimizar los procedimientos de calibración y verificación de brazos existentes.

Los brazos articulados de medición por coordenadas constituyen un grupo especial de equipos dentro de la medición por coordenadas debido a sus características especiales y a sus diferencias con respecto a las máquinas de medir por coordenadas tradicionales. Aunque su función es la misma, es decir, determinar las coordenadas (x,y,z) de un punto en su volumen de trabajo con respecto a un sistema de referencia global, la diferencia fundamental reside en su estructura cinemática. Mientras que las máquinas de medir por coordenadas, ya sean de puente, gantry, o de brazo horizontal, tienen una configuración tal que permite la medición del desplazamiento físico de cada uno de sus tres ejes, en los brazos de medida la obtención del punto medido es producto de una serie de transformaciones matemáticas, regidas por su modelo matemático específico. Los brazos de medida adoptan su estructura cinemática de los brazos robot y, al igual que estos, están formados por una serie de tramos rectos unidos por articulaciones giratorias que confieren los grados de libertad necesarios para alcanzar las posiciones de medida requeridas. Tanto por nivel de precisión necesaria como por funcionalidad, las diferencias con los brazos robot son amplias, prestando especial atención a la precisión de sus captadores y materiales empleados en su construcción. Además, otra diferencia importante con respecto a las máquinas de medir por coordenadas y los brazos robot es su carácter de operación manual, ya que el movimiento en estos últimos equipos se realiza de forma automática. Un brazo articulado de medida consiste en una serie de tramos rectos conectados por articulaciones rotatorias que permiten realizar al brazo los giros necesarios para alcanzar una posición en el espacio. La unión de los tramos rectos de la estructura mecánica se realiza generalmente mediante articulaciones dobles que materializan giros entorno a ejes perpendiculares entre sí. Por lo tanto, es posible establecer una clasificación general de los brazos de medida atendiendo a la configuración de su cadena cinemática.

En todos los brazos de medida, heredada de la nomenclatura tradicional en el ámbito de los brazos robot, se diferencian cuatro zonas que se denominan hombro, codo, muñeca y mano, por su similitud con un brazo humano. En el caso de un brazo, la mano coincidirá con el palpador final del brazo. Cada una de estas zonas representa la o las articulaciones correspondientes, cada una de ellas con uno o dos grados de libertad. La norma ASME B89.4.22 describe una clasificación de las diferentes configuraciones que puede adoptar un brazo de medida en función de su cadena cinemática y los grados de libertad de sus articulaciones. Para ello, se indica mediante tres números consecutivos los grados de libertad de las articulaciones del hombro, del codo y de la mano o muñeca respectivamente. Por otro lado, otra forma de definir las rotaciones presentes en cada parte del brazo es especificar mediante una cadena de letras cada una de las rotaciones posibles de las articulaciones. Un brazo con siete grados de libertad podrá ser definido como un brazo 2-2-3 o con la sucesión de letras a-b-c-d-e-f-g, hombro (a,b), codo (c,d), muñeca (e,f,g). En la Figura 2.1 se muestran diversas configuraciones posibles de los brazos de medida.

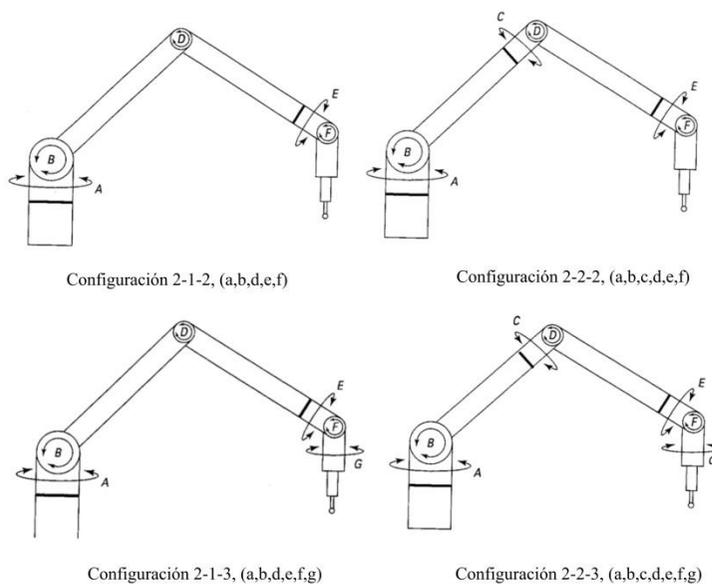


Figura 2.1 Configuraciones de brazos de medición por coordenadas Fuente: (ASME B89.4.22-2004)

Además de las diferentes configuraciones, otro dato que clasifica los brazos de medición es su volumen de trabajo que se define mediante una esfera de radio la longitud del brazo. Los volúmenes de trabajo de los brazos actualmente disponibles en el mercado varían entre 1.5 m y 4.5 m.

A continuación se describen los componentes fundamentales de un brazo de medición por coordenadas y las influencias que pueden tener estos componentes sobre el proceso de medición.

El principal componente de un brazo de medición son los encoders angulares. Estos componentes están asociados a cada articulación del brazo de medición mediante un parámetro geométrico del modelo cinemático del brazo, que es el giro entorno al eje de la articulación con respecto a su posición de cero inicial. Las articulaciones sirven de punto de unión entre los diversos segmentos tubulares que forman el brazo, usualmente fabricados en materiales como fibra de carbono o composite, materiales con bajo peso, alta rigidez y estabilidad térmica. El encoder angular será el encargado de la medición directa de este ángulo de giro, montándose un encoder angular por cada grado de libertad del brazo. Es importante que el eje de giro del encoder coincida con el eje mecánico de la articulación, de modo que la medida se vea lo menos influenciada por la posible excentricidad de giro. En la actualidad, algunos fabricantes han incorporado encoders absolutos en sus equipos, que evitan la necesidad de un paso por cero de los encoders antes de empezar la medición, ver Figura 2.2. Su principio de funcionamiento es muy similar al de un encoder incremental, en el que un disco que gira con zonas transparentes y opacas, interrumpe un haz de luz captado por fotorreceptores. Posteriormente, los fotorreceptores transforman los impulsos luminosos en impulsos eléctricos, los cuales son tratados y transmitidos por la electrónica de salida. Sin embargo, desde el punto de vista funcional hay importantes diferencias. Mientras que en los encoders incrementales la posición está determinada por el número de impulsos con respecto a la marca de cero, los encoders absolutos asignan a cada posición angular un valor inequívoco, incluso durante varias revoluciones. Por lo tanto, los encoders absolutos no pierden la posición eliminando la necesidad de la búsqueda del cero del equipo.



Figura 2.2 Encoders absolutos y posicionamiento de encoders angulares en articulación brazo de medición. Fuente: (Eltra, Heidenhain, Romer)

Parte fundamental de los brazos de medición son también los palpadores de medición que con movimiento solidario a la última articulación del brazo, capturan el punto medido con respecto al sistema de referencia global del equipo. Los palpadores son intercambiables en el equipo dependiendo de las necesidades de medición y actualmente muchos equipos disponen de sistemas de reconocimiento automático de palpadores permitiendo un intercambio rápido de los mismos sin necesidad de calibración adicional. Se clasifican en tres grupos principales [8]: palpadores pasivos, palpadores activos (*touch-trigger*) y palpadores sin contacto.

Los palpadores pasivos están diseñados para medición por contacto entre el palpador y la pieza a partir de una captura de datos. Zonas como la fijación y vástago suelen estar fabricados en materiales como acero o fibra de carbono, mientras que las esferas palpadoras suelen ser de cerámica o rubí, ver Figura 2.3. Es fundamental tener en consideración el efecto de las variaciones de la temperatura en la medición, para lo cual en la fabricación de palpadores se utilizan materiales con bajo coeficiente de dilatación y se hace uso de correcciones térmicas en tiempo real mediante sensores de medición de temperatura.



Figura 2.3. Palpadores pasivos para brazos de medición. Fuente: (Romer, Faro)

Los palpadores activos o *touch trigger* son menos utilizados en brazos de medición por coordenadas que en máquinas de medición por coordenadas convencionales. Consiste básicamente en 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 apoyan en tres cilindros formando un acoplamiento cinemático que proporciona una excelente repetibilidad de posicionamiento al restringir los seis grados de libertad del sistema. Ejemplos de palpadores *touch trigger* comerciales así como una representación gráfica del diseño de los mismos puede verse en la Figura 2.4.

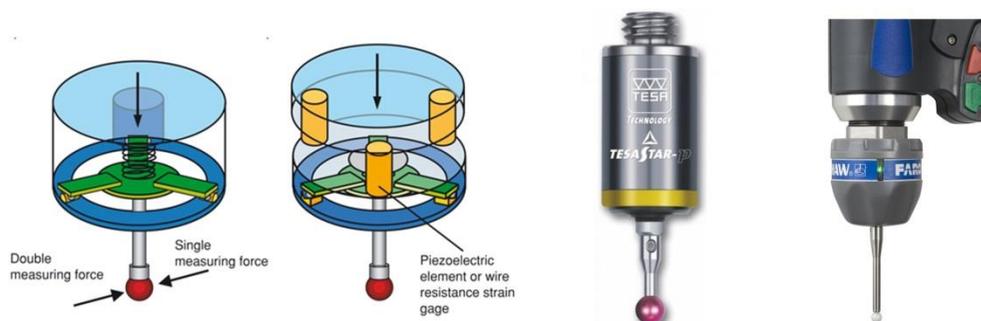


Figura 2.4. Palpadores touch trigger: principio de funcionamiento y modelos comerciales. Fuente: (Tesastar, Renishaw, Faro)

Finalmente resaltar los palpadores sin contacto, basados principalmente en sistemas de medición láser, que han tenido un gran auge en su utilización conjunta con brazos de medición por coordenadas. El uso de sensores láser por triangulación [9] aporta versatilidad en este tipo de equipos portables, pero adolece de una alta precisión, utilizándose habitualmente en aplicaciones que no requieran una alta precisión, tales como digitalización y modelado 3D, ingeniería inversa o prototipado rápido. Asimismo existen palpadores sin contacto para medición de piezas con geometrías específicas como tubos de difícil medición con otro tipo de equipos. Igualmente se muestra en la Figura 2.5 ejemplos de brazos de medición con láser escáner integrados.



Figura 2.5. Palpadores sin contacto: sensor láser y palpador de tubos. Fuente: (Romer, Faro)

Otro de los componentes importantes en un brazo de medición es el contrapeso, que permite equilibrar el peso del brazo para facilitar su movimiento, minimizando el esfuerzo de torsión en la base del brazo, la fatiga del operario y dotando al usuario de una mayor libertad en las opciones de montaje, tales como trípodes ligeros, bases magnéticas y de vacío. Es necesario destacar que los brazos de medición pueden colocarse sobre un elemento de fijación que permita asegurar la estabilidad del equipo. Existen múltiples tipos de bases que parten desde las iniciales atornilladas, pasando por sistemas magnéticos en caso de uso de materiales ferromagnéticos o de vacío sobre una superficie, ver Figura 2.6. Adicionalmente es muy común el uso de trípodes que permiten fijar al brazo en diferentes alturas y

simplifican el movimiento del mismo en caso de necesidad de adoptar diversas posiciones en procesos de medición.

Respecto a los sistemas de alimentación y comunicación de estos equipos, disponen muchos de ellos de sistemas de baterías externas que permiten el funcionamiento autónomo y sistemas de comunicación inalámbricos WIFI o bluetooth.



Figura 2.6. Bases de fijación y trípodes para brazos de medición. Fuente: (Romer, Faro, Brunson)

Las precisiones que se alcanzan con brazos de medición por coordenadas han ido mejorando a lo largo del tiempo y son dependientes del modelo y fabricante. Es importante indicar que los valores de precisión ofrecidos por los fabricantes son los valores de error máximo obtenidos con los métodos de verificación indicados, de acuerdo a la normativa de referencia elegida, siendo realizados estos ensayos por personal cualificado y experimentado en el uso de brazos. La principal norma utilizada como referencia es la norma americana ASME B89.4.22, si bien algunos fabricantes utilizan también la recomendación técnica VDI-VDE 2617- parte 9 de 2009. Los valores de error suelen ser valores de repetibilidad y precisión volumétrica obtenidos con los correspondientes ensayos de las normas y muestran valores decrecientes al disminuir el rango de medición de los equipos.

Como principales fabricantes de brazos de medición se pueden destacar Faro y Romer (Cimcore), incluyendo también modelos de brazos en sus catálogos fabricantes como Nikon, Api o Kreon. Todos ellos ofrecen diferentes modelos posicionados en diversas gamas o segmentos según la precisión y rango de medida, siendo seleccionados por el usuario en función de las necesidades de medida requeridas. Un resumen de los principales modelos de brazos de los fabricantes más representativos con sus datos de evaluación según norma ASME B89.4.22 o VDI-VDE 2617- parte 9 se muestra en la Tabla 2.1.

El brazo de medida utilizado en este trabajo para la realización de los ensayos de verificación es un modelo comercial marca Faro brazo Platinum 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 de medida es del tipo 2-2-3, dando un total de siete grados de libertad con giro ilimitado de sus articulaciones. La precisión en la prueba de rendimiento volumétrico del brazo de medida reportada por el fabricante es de ± 0.043 mm y repetibilidad de punto 0.030 mm.

Modelo	Configuración	Longitud	Resultados de evaluación						
			Repetibilidad		Precisión volumetrica				
Romer absolute 73/75		2-2-2			Modelo 73		Modelo 75		
		a-b-c-d-e-f	1,5	0,025	±0,037				
			2,0	0,030	±0,042	0,016	±0,023		
			2,5	0,038	±0,051	0,020	±0,029		
			3,0	0,059	±0,075	0,030	±0,044		
			3,5	0,079	±0,100	0,040	±0,057		
			4,0	0,099	±0,125	0,055	±0,069		
Romer absolute 73/75		2-2-3			Modelo 73		Modelo 75		
		a-b-c-d-e-f-g	2,0	0,044	±0,061	0,023	±0,033		
			2,5	0,049	±0,069	0,027	±0,038		
			3,0	0,079	±0,100	0,042	±0,058		
			3,5	0,099	±0,125	0,055	±0,081		
			4,0	0,115	±0,151	0,067	±0,098		
			4,5	0,141	±0,179	0,084	±0,119		
Romer Multi Gage		2-2-2	1,2	MPEe (µm) = 5+ L/40 <=18 MPEp (µm) = 8 según ISO 10360-2					
Faro Edge		2-2-3							
		a-b-c-d-e-f	1,8	0,024	±0,034				
			2,7	0,025	±0,041				
			3,7	0,064	±0,091				
Faro Prime		2-2-2	1,2	0,016	±0,023				
		a-b-c-d-e-f	1,8	0,019	±0,027				
			2,4	0,024	±0,034				
			3,0	0,042	±0,059				
			3,7	0,060	±0,085				
Faro Fusion		2-2-2			2-2-2		2-2-3		
		a-b-c-d-e-f /	1,8	0,036	±0,051	0,046	±0,064		
		2-2-3	2,4	0,043	±0,061	0,051	±0,071		
		a-b-c-d-e-f-g	3,0	0,074	±0,104	0,089	±0,124		
			3,7	0,104	±0,147	0,124	±0,175		
Nikon MCAx+		2-2-3			MCAx+		MCAx		
		a-b-c-d-e-f-g	2,0	0,023	± 0,033	0,044	± 0,061		
			2,5	0,027	± 0,038	0,049	± 0,069		
			3,0	0,042	± 0,058	0,079	± 0,100		
			3,5	0,055	± 0,081	0,099	± 0,125		
			4,0	0,067	± 0,098	0,115	± 0,151		
			4,5	0,084	± 0,119	0,141	± 0,179		
Tokyo Bochi Tech. Vectoron		2-2-2	3,1	0,060	± 0,150				
		a-b-c-d-e-f	3,1	0,040	± 0,080				
			3,5	0,040	± 0,060				
			3,9	0,060	± 0,080				
API Axis		2-2-2	2,6	0,035	± 0,060				
		a-b-c-d-e-f	3,2	0,055	± 0,090				
Microscribe		2-1-2	0,63	0,051	Spherical diameter test				
		a-b-d-e-f	0,80	0,076					
Fratelli Rotondi		2-1-2	3,5	E (mm) = (0.05 + L/10000) con L(mm) según ISO 10360-2					
		a-b-c-d-e-f							
Kreon Ace		2-2-3	2	0,022	±0,032				
		a-b-c-d-e-f-g	2,5	0,027	±0,038				
			3	0,042	±0,057				
			3,5	0,054	±0,08				
			4	0,069	±0,099				
			4,5	0,092	±0,125				
Kreon Baces		Carbon	2-2-2	2,6	0,028	±0,044	±0,035	±0,052	
				3,2	0,045	±0,064	±0,058	±0,077	
			Aluminium	2-2-3	2,6	0,04	±0,065	±0,05	±0,08
					3,2	0,068	±0,095	±0,076	±0,115
					4,2	0,098	±0,21	±0,12	±0,35

Tabla 2.1. Modelos de brazos de medición por coordenadas. Fuente: (Romer, Faro, Nikon, Kreon)

2.2.2 Láser tracker

Si bien los primeros trabajos de desarrollo de mediciones basadas en laser tracker comenzaron en la década de los 80 aplicadas a estudios de precisión de robots [10], en los últimos años, la verificación dimensional en estructuras de grandes dimensiones en sectores tan diversos como automoción, aeronáutico o naval, ha sufrido un fuerte empuje [11]. La necesidad de mejorar los métodos existentes en la verificación dimensional de piezas de gran volumen ha desarrollado métodos de medición sin contacto de alto rango, como los basados en tecnología láser tales como láser tracker y láser escáner.

Los laser tracker son un sistema de medición portátil que mide la posición de un objeto en coordenadas esféricas. Los láser trackers utilizan interferometría para la medición de distancias relativas (d) y encoders ópticos para medir los ángulos de azimut (θ) y elevación del haz láser dirigido hacia el objeto a medir (φ) tal y como se observa en la Figura 2.7.

Las mediciones del interferómetro se obtienen relativas a un punto de inicio denominado "home", realizando el rayo láser un seguimiento del retroreflector colocado en el objeto a medir. Este procedimiento funciona siempre que el rayo del sistema de seguimiento que va al retroreflector no se vea interrumpido por un obstáculo en su camino. Cuando esto sucede, es necesario volver a la posición de referencia. Para evitar este problema, en la actualidad se ha incorporado en la mayoría de los láser tracker un sistema de medición de distancia absoluta (absolute distance measurement, ADM) [12]. La gran ventaja de este tipo de sistema medición es que permite al operador reiniciar el sistema sin necesidad de colocar el retroreflector en la posición de referencia calibrada, por lo que si el rayo del sistema de seguimiento es interrumpido, no sería necesario regresar al punto de inicio o home [13], [14].

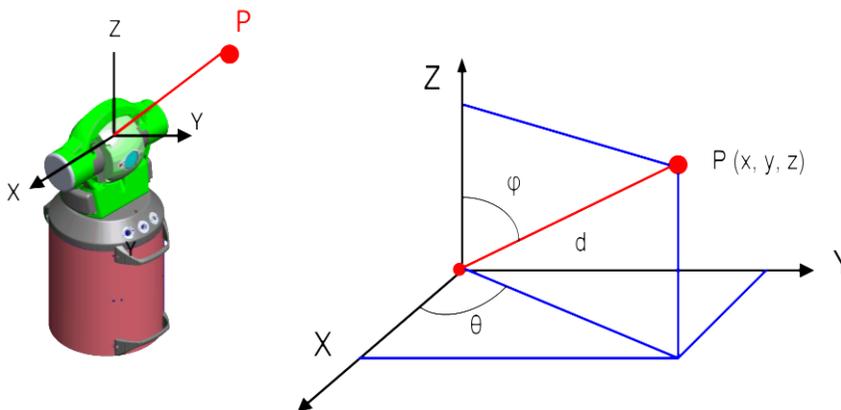


Figura 2.7. Principio de medición de un láser tracker

Las coordenadas del retroreflector correspondientes al punto medido se determinan del siguiente modo:

$$x = d \sin \varphi \cos \theta \quad (2-1)$$

$$y = d \sin \varphi \sin \theta \quad (2-2)$$

$$z = d \cos \varphi \quad (2-3)$$

Un equipo de láser tracker está compuesto por los siguientes componentes interferómetro láser, divisor de haz, sistema de espejos de seguimiento, retroreflector, sensor de posición (*position sensor detector*, PSD) y una unidad de control tal cual se muestra en Figura 2.8. Su principio de funcionamiento [15], [16] se basa en un rayo láser emitido por el interferómetro que se divide en dos rayos en un divisor de haz. Uno de los rayos se redirige al receptor y el otro pasa el divisor de haz direccionándose mediante el mecanismo de espejos de seguimiento hacia el retroreflector (*spherically mounted retroreflector*, SMR) y reflejándose de regreso hacia el receptor. Si el retroreflector cambia de posición, se produce una variación de frecuencia y el consecuente desplazamiento relativo puede ser cuantificado. Parte del rayo reflejado se direcciona a un PSD para medir el posible offset del rayo reflejado. El offset del rayo medido por el PSD se usa para controlar el ángulo de tracking del espejo asegurando que el rayo incide en el centro óptico del retroreflector. Si el rayo láser toca el retroreflector fuera del centro, el rayo incide fuera del centro del PSD, lo que ocasiona una señal de salida que es utilizada por la unidad de control del motor. A través de un algoritmo de control se controla la rotación de los dos ejes mecánicos del sistema de espejo de seguimiento, de tal manera que el rayo láser de medición siempre se encuentre centrado en el retroreflector mientras este se mueve en el espacio.

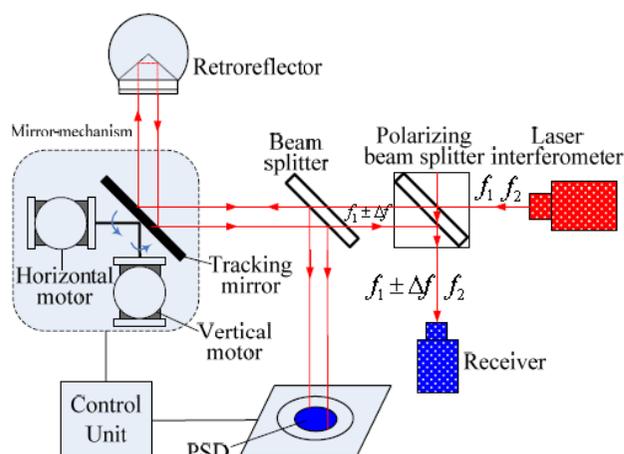


Figura 2.8. Principio de funcionamiento y componentes de un láser tracker

En el mercado existen diversos tipos de láser tracker que se clasifican en función de su configuración dependiendo del origen de la fuente de láser: con origen en el cabezal giratorio del equipo (API / Faro), en la columna soporte del mismo con un espejo reflector en el cabezal giratorio (Leica) o sobre el eje del láser tracker. Estas diversas configuraciones se describen en la Figura 2.9.

Los laser tracker ofrecen importantes ventajas frente a otros equipos como son la portabilidad, fiabilidad, aplicación a todo tipo de materiales y superficies conjuntamente con su amplio rango de medición que de acuerdo a los modelos comerciales actualmente disponibles en el mercado puede variar entre 0 y 160 m. Sin embargo, presentan algunos inconvenientes como su menor precisión frente a las obtenidas en máquinas de medición por coordenadas. La capacidad de estos sistemas para medir distancias con precisión está basada en la utilización de interferómetros láser (IFM) seguidos posteriormente por los medidores de distancias absolutas (ADM). La capacidad de medir una distancia no es suficiente por sí misma, si se requiere como resultado final de la medición un conjunto de coordenadas. Para conseguir esto último, el instrumento de seguimiento láser está equipado con un sistema de medición angular que

permite procesar la medición de las distancias junto con dos ángulos medidos, para obtener las coordenadas necesarias. Por lo tanto, los fabricantes suministran datos tanto de precisión de la medición de la distancia como de la precisión de la medición angular del instrumento. Las normas utilizadas como referencia son, ASME B89.4.19-2006, VDI-VDE 2617- parte 10 de 2009 y el borrador ISO10360-10 - 2012 que se utilizan en procedimientos de evaluación de láser trackers tal y como se describe posteriormente en el apartado 2.3.2.

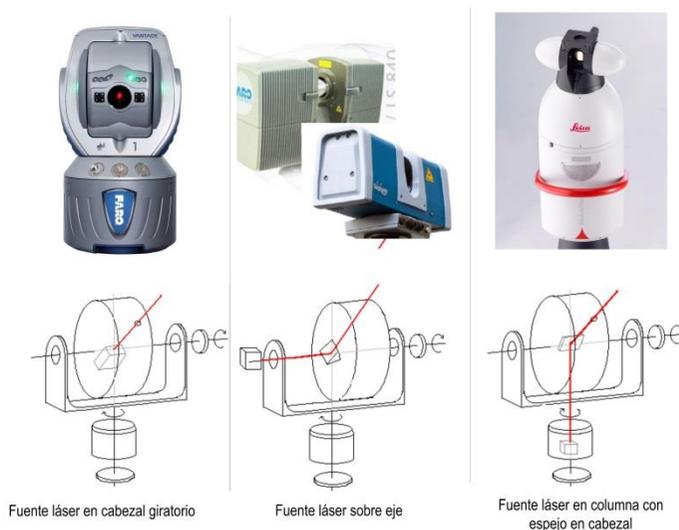


Figura 2.9. Modelos y configuraciones de láser tracker

Los equipos de láser tracker utilizados en este trabajo son los modelos LEICA LTD600 y API T3-15m. Un resumen de los principales modelos de láser tracker disponibles en el mercado con sus características, volumen de medición y resultados de evaluación de características metrológicas según norma ASME B89.4.19 se muestra en la Tabla 2.2.

Fabricante	Modelo	MPE	Volumen medición	Resultados de evaluación		
				Precisión angular	Precisión distancia (ADM)	Precisión distancia (IFM)
LEICA	AT401	MPE	320m	15 μ m+6 μ m/m	\pm 10 μ m	
	AT901	MPE	50/160m	15 μ m+6 μ m/m	\pm 10 μ m	\pm 0.4 μ m +0.3 μ m/m
FARO	Ion	MPE	30/40/55m	20 μ m+5 μ m/m	16 μ m+0.8 μ m/m	4 μ m+0.8 μ m/m
	Vantage	MPE	30/60/80m	20 μ m+5 μ m/m	16 μ m+0.8 μ m/m	
API	Tracker 3	MPE	15/40/60m	3.5 μ m/m	\pm 15 μ m or 1.5ppm	$>$ \pm 0.5ppm
	Radian	MPE	40/100/160m	3.5 μ m/m	\pm 10 μ m or 1ppm	$>$ \pm 0.5ppm
	Omnitrack 2	MPE	160/200m	\pm 18+5ppm	\pm 15 μ m +1.5 μ m/m	

Tabla 2.2. Modelos de láser tracker. Fuente: (Romer, Faro, Api)

2.2.3 Plataforma multi-registro

Los equipos de medición por coordenadas portátiles presentan una gran flexibilidad para la realización de mediciones de gran complejidad debido a su portabilidad, pero el hecho de que se utilicen en ocasiones en condiciones ambientales no tan fácilmente controlables, tales como líneas de producción, hace necesaria su calibración y verificación periódicas con el fin de garantizar la fiabilidad de las mediciones a realizar. Como se ha comentado anteriormente, este trabajo se focalizó en la utilización de dos instrumentos portátiles de medición que son un brazo articulado de medición por coordenadas y un láser tracker. Las tareas de verificación y calibración, realizadas de acuerdo a la normativa aplicable, suelen implicar una gran cantidad de tiempo, mano de obra y esfuerzo físico en su realización. Éstas técnicas se basan en la captura de datos con el instrumento de medida de un objeto patrón calibrado, dispuesto sucesivamente en varias posiciones dentro del volumen de medida del equipo con el fin de cubrir gran parte de su espacio de trabajo. Estos cambios de posición del patrón alrededor del instrumento de medida, hacen que el procedimiento de verificación tenga una larga duración, además de requerir el uso de soportes para fijar rígidamente el patrón en distintas alturas y orientaciones respecto al equipo a verificar.

Con objeto de optimizar estos procedimientos de evaluación y calibración, se decidió evaluar el uso de una plataforma multi-registro desarrollada en un trabajo anterior del departamento de Ingeniería de Diseño y Fabricación, ver Figura 2.10, como método alternativo a los procedimientos clásicos de calibración y verificación de acuerdo a norma para instrumentos de medición portátiles.

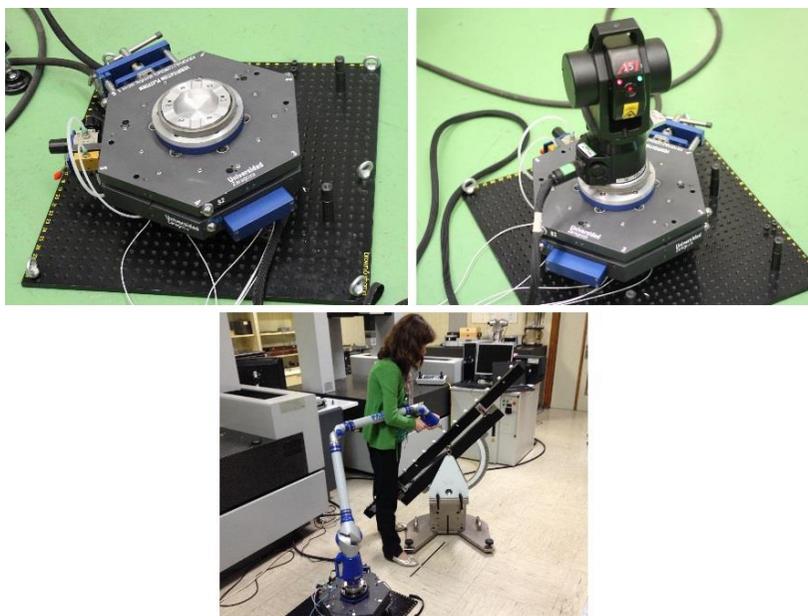


Figura 2.10. Plataforma multi-registro en configuración con láser tracker y brazo articulado medición

La plataforma multi-registro tiene una alta repetibilidad de posicionamiento, permitiendo determinar con alta precisión la posición y orientación de la placa superior de la plataforma, donde va colocado el instrumento portátil de medición, respecto a la placa inferior de la plataforma que permanece fija [17], [18]. Esto se consigue por medio de seis sensores capacitivos con resolución nanométrica y un rango

de medida de $100\ \mu\text{m}$ para un voltaje de salida entre $10\ \text{V}$ y $-10\ \text{V}$ cubriendo un desplazamiento desde 100 a $200\ \mu\text{m}$. Un voltaje de salida positivo indica que el target del sensor se encuentra entre 100 y $150\ \mu\text{m}$, y un voltaje de salida negativo marca un target situado entre 150 y $200\ \mu\text{m}$. La sensibilidad del sensor indicada por el fabricante es $0.20\ \text{V}/\mu\text{m}$, lo cual hace que un cambio de $0.2\ \text{V}$ en voltaje sea equivalente a una variación en distancia de $1\ \mu\text{m}$ entre target y sensor. Para cada posición de ensayo, se capturan simultáneamente la medida del punto con el instrumento de medición, brazo o láser tracker, y las lecturas de los sensores capacitivos. El hecho de que la plataforma tenga una alta repetibilidad de posicionamiento $4\ \mu\text{m}$, asegura que los sensores capacitivos se mantengan en su rango de trabajo (100 - $200\ \mu\text{m}$) en cada una de las seis posiciones de la plataforma durante el proceso de verificación. Tres de los sensores capacitivos están colocados axialmente y los otros tres en dirección tangencial al eje de giro de la plataforma. En las siguientes figuras Figura 2.11 y Figura 2.12 puede observarse el posicionamiento de los sensores y targets sobre la placa fija y móvil de la plataforma.

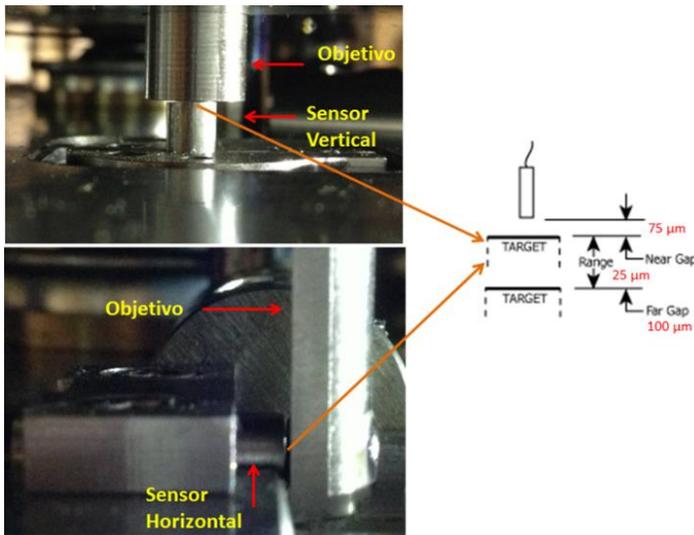


Figura 2.11. Vista de sensor capacitivo vertical y sensor capacitivo horizontal con sus targets



Figura 2.12. Disposición de los sensores capacitivos con sus piezas de amarre a la placa fija.

La repetibilidad mecánica de la plataforma se obtiene por medio de acoplamientos cinemáticos a modo de parejas cilindro - esfera y su valor de repetibilidad evaluado en los ensayos pertinentes es de $0.7 \mu\text{m}$ [18]. Una vista del diseño final de los acoplamientos y de su proceso de mecanizado incluido en la placa móvil y fija de la plataforma se puede observar en la siguiente Figura 2.13.



Figura 2.13. Mecanizado de los asientos cinemáticos en la placa móvil para las esferas (a) y en la placa fija para los cilindros (b)

Las coordenadas capturadas de los puntos medidos en el proceso de verificación del instrumento portátil de medición, son obtenidas en un sistema global de referencia fijo localizado en la placa inferior de la plataforma. Mediante un modelo matemático, se obtienen las matrices de transformación homogéneas que permiten el cambio del sistema de coordenadas del instrumento de medición montado sobre la placa móvil de la plataforma al sistema global de referencia fijo.

Una de las ventajas de la plataforma es que permite la obtención de puntos fijos en este sistema de referencia global, generando una reducción en el número de posiciones físicas del patrón a ensayar respecto a las pruebas definidas por la norma, siendo compensadas éstas por las posiciones de rotación (1-6) de la plataforma.

Cada vez que la plataforma rota a una nueva posición permitiendo al brazo medir la misma esfera o al láser tracker el mismo retrorreflector, los valores de los encoders angulares del brazo y láser tracker varían, y por lo tanto un nuevo volumen de trabajo es evaluado para cada posición de la plataforma. El uso conjunto de la plataforma y el instrumento portátil de medición permite explorar un número superior de diferentes posiciones y orientaciones de la barra patrón o de la malla de retrorreflectores definida, en comparación con los definidos en la normativa aplicable a evaluación de estos instrumentos de medición, pudiendo concluir como se verá en capítulos posteriores, que la evaluación de sus volúmenes de trabajo se realizarán de manera satisfactoria.

2.3 Técnicas de evaluación de precisión de sistemas de medición portátiles

Dentro del grupo de sistemas de medición portátiles, este trabajo se focaliza en la utilización de brazos articulados de medición por coordenadas y láser tracker. En ambos casos, es necesario chequear y evaluar la precisión de estos equipos de una manera periódica para asegurar la fiabilidad de los resultados obtenidos en las mediciones realizadas y comparar estos valores con los indicados por el fabricante en sus especificaciones. Para ello, y debido al auge en la utilización en diversos ámbitos de estos equipos, han ido surgiendo normas que aseguran una estandarización de los procedimientos de evaluación a realizar. Las pruebas metrológicas de evaluación recogidas en estas normas son las aceptadas en la actualidad por todos los fabricantes de estos equipos como procedimientos estándar de determinación del error máximo de medida y de repetibilidad, que posteriormente se incluyen en las especificaciones del equipo. Independientemente de estas pruebas de evaluación, los fabricantes realizan pruebas adicionales más detalladas y exigentes a nivel interno en sus procedimientos de homologación. Los procedimientos de calibración y verificación suelen ser propios de cada fabricante, no siendo información pública, y permiten realizar un análisis exhaustivo de la precisión del equipo y determinar con detalle las fuentes de error. Pero su gran desventaja es que al ser procedimientos propios de los fabricantes, no posibilitan obtener unos resultados comparativos entre equipos calibrados o evaluados por diferentes fabricantes o laboratorios externos.

Generalmente, los procedimientos de evaluación tienen en cuenta tres factores fundamentales que son: la clasificación y tipo de equipo en estudio con sus principales características técnicas, los factores ambientales tales como temperatura, humedad, vibraciones y condiciones de montaje a las que se realizarán los ensayos de evaluación y las características metrológicas a evaluar en el equipo, por ejemplo la precisión, cuyos valores resultado permitirán emitir un juicio acerca del correcto funcionamiento del mismo. Un ejemplo en el que se muestran los resultados de precisión volumétrica y repetibilidad de punto para distintos modelos comerciales de brazos de medición de coordenadas puede observarse en la Figura 2.14.

Inicialmente, se utilizó la norma UNE-EN ISO 10360 como referente en procesos de calibración y verificación de brazos, ya que establece métodos de evaluación y verificación periódica de máquinas de medir por coordenadas tradicionales, directamente relacionados con la precisión y repetibilidad de la máquina. Sin embargo, la diferente naturaleza cinemática de los brazos, por la cual infinitas combinaciones de posición de las articulaciones permiten alcanzar un mismo punto en el volumen de medida, exigió la realización de una normativa específicamente adaptada a estos equipos de medición. La primera norma publicada en 2004 expresamente para brazos fue la norma americana ASME B89.4.22 [2], convirtiéndose en un referente internacional ampliamente utilizado por los fabricantes de brazos para proporcionar las principales características técnicas de sus equipos, tal cual se muestra en la Figura 2.14. Posteriormente apareció la recomendación técnica alemana VDI/VDE 2617 Parte 9 [3] en 2009, que describe procedimientos de evaluación de brazos de una manera similar a la realizada por ASME y con amplia aceptación igualmente en el mercado. La última normativa en incorporarse a la lista de estándares existentes es el borrador del documento de la norma ISO/CD 10360 parte 12 [4] publicado en 2014, aplicable específicamente a brazos de medición. Análogamente a sus predecesoras [2] y [3], establece una serie de pruebas de evaluación cuyos resultados permiten la cuantificación del error del brazo en términos de repetibilidad, precisión volumétrica y otros parámetros que se describirán a lo largo del capítulo, permitiendo su posterior comparación con los valores máximos admisibles indicados por el fabricante. De este modo, se determina la manera de establecer comparativas de resultados entre laboratorios, fabricantes, empresas o cualquier otro tipo de usuario de estos equipos de una manera

trazable. A diferencia de [2] y [3] que establecen métodos de evaluación para brazos en medidas por contacto mediante palpadores pasivos o activos, y si bien todos los ensayos de evaluación son aplicables a brazos en medidas por contacto, se incluye en [4] un anexo específico relativo a pruebas a realizar a un palpador sin contacto montado en un brazo, en caso de utilización de este tipo de palpadores por el usuario referenciando a la norma ISO10360 parte 8 [19] y parte 9 [20].

Performance Specifications						
Model (Measuring Range) axis	Volumetric Accuracy		Single Point Repeatability		FaroArm Weight	
	6	7	6	7	6	7
Platinum 6 ft. (1.8 m)	± 0.011 in. (.029 mm)	± 0.015 in. (.037 mm)	.0008 in. (.020 mm)	.0010 in. (.026 mm)	20.5 lbs. (9.3 kg)	21 lbs. (9.5 kg)
Platinum 8 ft. (2.4 m)	± 0.014 in. (.036 mm)	± 0.017 in. (.043 mm)	.0010 in. (.025 mm)	.0012 in. (.030 mm)	21 lbs. (9.5 kg)	21.5 lbs. (9.75 kg)
Platinum 10 ft. (3.0 m)	± 0.024 in. (.061 mm)	± 0.029 in. (.073 mm)	.0017 in. (.043 mm)	.0020 in. (.052 mm)	21.5 lbs. (9.75 kg)	22 lbs. (9.98 kg)
Platinum 12 ft. (3.7 m)	± 0.034 in. (.086 mm)	± 0.041 in. (.103 mm)	.0024 in. (.061 mm)	.0029 in. (.073 mm)	22 lbs. (9.98 kg)	22.5 lbs. (10.21 kg)

FaroArm Test Methods - (Test methods are a subset of those given in the B89.4.22 standard.)
Volumetric Accuracy or Volumetric Maximum Deviation: Determined by using traceable length artifacts, which are measured at various locations and orientations throughout the working volume of the FaroArm. This test is a method for determining articulating measurement machine accuracy.
Single Point Repeatability or Single Point Articulation Performance Test (Max-Min)/2: The probe of the FaroArm is placed within a conical socket, and individual points are measured from multiple approach directions. Each individual point measurement is analyzed as a range of deviations in X, Y, Z. This test is a method for determining articulating measurement machine repeatability.

Figura 2.14. Hoja de especificaciones brazo de medición FARO Arm Platinum según norma ASME B89.4.22-2004. Fuente: (FARO)

En referencia a métodos de evaluación de láser tracker, la dos normativas vigentes publicada son la norma americana ASME B89.4.19 [5] de 2006 y la recomendación técnica VDI/VDE 2617- parte 10 [6] de 2011. El comité técnico ISO TC 213 WG10 está trabajando en un borrador de un estándar internacional aplicable a láser trackers ISO/CD10360-10 [7] que mantiene los principales puntos de ambas norma y recomendación técnica, eliminado pruebas redundantes o aquellas consideradas tras evaluación como poco eficaces. Estos documentos permiten a los fabricantes establecer criterios de evaluación comparables haciendo que los equipos puedan ser utilizados y probados posteriormente por los usuarios de una manera trazable. Todo ello con un objetivo de detección e identificación de los principales errores de láser tracker. Un ejemplo de hoja de especificaciones de fabricante incluyendo resultados de ensayos de evaluación de precisión para un láser tracker puede verse en la Figura 2.15.

Performance		
	MPE values	Typical values
Angle Performance		
Angular accuracy	$\pm 15 \mu\text{m} + 6 \mu\text{m}/\text{m}$	$\pm 7.5 \mu\text{m} + 3 \mu\text{m}/\text{m}$
Distance Performance		
<u>ADM</u> Accuracy	$\pm 10 \mu\text{m}$	$\pm 5 \mu\text{m}$
<u>Interferometer</u> Accuracy	$\pm 0.4 \mu\text{m} + 0.3 \mu\text{m}/\text{m}$	$\pm 0.2 \mu\text{m} + 0.15 \mu\text{m}/\text{m}$
RO Parameter	$5 \mu\text{m}$	$2.5 \mu\text{m}$

All specifications are calculated per the ASME B89.4.19 standard. Information is from the most recent Leica Absolute Tracker specifications released in December of 2008. To allow for comparison, variation in air temperature is not included.

Figura 2.15. Hoja de especificaciones láser tracker LEICA AT901 según norma ASME B89.4.19-2006. Fuente: (Leica Geosystems)

2.3.1 Normativa y métodos de evaluación aplicables a brazos articulados de medición por coordenadas

La normativa ASME B89.4.22-2004 [2], la recomendación técnica VDI/VDE 2617-2009 parte 9 [3] y el borrador ISO/CD 10360 parte 12 -2014 [4] son los únicos documentos aceptados internacionalmente que definen y guían el proceso de verificación de brazos de medición por coordenadas con la trazabilidad requerida en el proceso. Todos ellos permiten la caracterización metrológica de un brazo de medida en términos de precisión volumétrica y repetibilidad. Para llevar a cabo los ensayos descritos en estas normas y recomendación técnica, son necesarios patrones y artefactos calibrados que son posicionados en múltiples posiciones del volumen de trabajo del brazo y que materializan la dimensión de referencia que permitirá por comparación la determinación del error del brazo a lo largo del proceso de medida. Los ensayos incluidos en estos tres documentos se pueden resumir en el ensayo de diámetro efectivo, el ensayo de repetibilidad de punto o ensayo de articulación de punto sencillo (SPAT) y el ensayo de precisión longitudinal volumétrica. Los ensayos incluidos en los tres documentos adoptan diferente terminología pero son similares, con ventajas e inconvenientes, pero en cualquier caso los resultados obtenidos pueden ser considerados totalmente comparables. A continuación se describe una comparativa entre las tres normas y las pruebas indicadas en cada una de ellas, clasificando estas últimas en cuatro grupos indicados en la Tabla 2.3 en función de su analogía. En la mayor parte de los casos, las pruebas son similares pero existen diferencias que se indicarán a continuación.

Grupo	VDI/VDE 2617-2009 parte 9	ASME B89.4.22-2004	ISO/CD 10360 parte 12 borrador
1	Prueba de error de palpado (tamaño)	Prueba de diámetro efectivo	Prueba de error de palpado (tamaño)
2	Prueba de error de palpado (forma)		Prueba de error de palpado (forma)
3	Prueba de error de palpado (posición)	Prueba de articulación de punto sencillo o repetibilidad de punto	Prueba de error de posición de articulación
4	Prueba de rendimiento volumétrico (volúmenes de medición totales o parciales)	Prueba de precisión longitudinal volumétrica o rendimiento volumétrico	Prueba de precisión longitudinal volumétrica

Tabla 2.3. Comparativa de ensayos para verificación y calibración de brazos según normativa aplicable

a) Grupo 1: prueba de error de palpado de tamaño / prueba de diámetro efectivo.

La prueba de diámetro efectivo indicada por ASME B89.4.22-2004 consiste en medir una esfera calibrada, de diámetro entre 10 y 50 mm, posicionada aproximadamente a la mitad de distancia del alcance del brazo. La esfera debe ser medida tres veces en la misma posición. Cada una de las tres medidas debe realizarse con nueve puntos distribuidos en el hemisferio superior de la esfera, cuatro puntos en el ecuador, cuatro puntos girados 45° con respecto a los tomados en el ecuador y un punto en el polo de la esfera. A lo largo de las tres medidas, las articulaciones del brazo deben cambiar lo menos posible. De este modo, se intenta determinar la capacidad de medida del brazo de una dimensión como el diámetro de la esfera. El resultado de esta prueba debe reflejar la desviación máxima en valor absoluto entre el diámetro de la esfera nominal y el diámetro medido en las tres medidas realizadas, comparando esta desviación con la provista por el fabricante.

En el caso de VDI/VDE 2617-2009 parte 9, la prueba de error de palpado para evaluación de tamaño incluye un número de repeticiones superior a ASME y posiciones adicionales de ensayo para la esfera patrón calibrada. Las tres posiciones de prueba donde se sitúan las esferas, serán comunes a las pruebas de error de palpado para la evaluación de la forma y posición de la esfera que se describirán a continuación. El volumen de trabajo del brazo se divide en tres sectores de 120° y las posiciones se definen en función de la distancia de la esfera calibrada al brazo de medida, menor del 30%, entre 30 y 70%, superior al 70% de la longitud útil del brazo, y la altura a la que se sitúa la esfera respecto al brazo de medida, -20%, 0%, 50% de la longitud útil del brazo. La esfera se mide con cinco puntos en uno de los hemisferios, un punto en el polo y cuatro repartidos uniformemente en el ecuador. La medición de la esfera se debe repetir cinco veces con posiciones del palpador distintas tal y como se incluye en la Figura 2.16. El error de palpado de tamaño, PS es calculado como la máxima desviación de los tres diámetros medidos frente al valor calibrado entre todas las posiciones ensayadas.

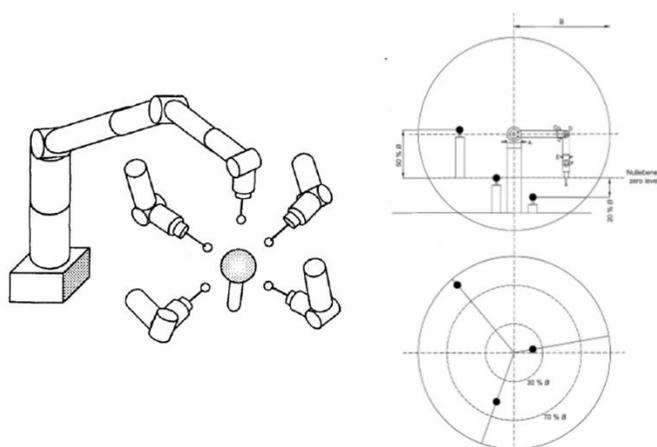


Figura 2.16. Prueba de error de palpado (posiciones y orientaciones de articulación). Fuente: (VDI/VDE 2617-2009 parte 9)

La norma ISO/CD 10360 parte12-2014 define una prueba con dos posiciones de prueba en el volumen de trabajo del brazo a definir por el usuario, con alturas de esfera calibrada dentro del rango indicado por el fabricante y 25 puntos capturados por esfera uniformemente distribuidos al menos en un hemisferio tal como se muestra en la Figura 2.17. Al igual que indica la norma ASME, el movimiento de las articulaciones del brazo debe minimizarse durante la realización de la prueba.

Para cada una de las dos posiciones y usando las 25 capturas de puntos por esfera, se calcula el diámetro de la esfera gaussiana asociada. El valor del error de palpado de tamaño se calcula como la diferencia del diámetro calculado al diámetro calibrado de la esfera. Este valor de error de palpado de tamaño se compara con el mayor error permitido MPE suministrado por el fabricante para el equipo en cuestión.

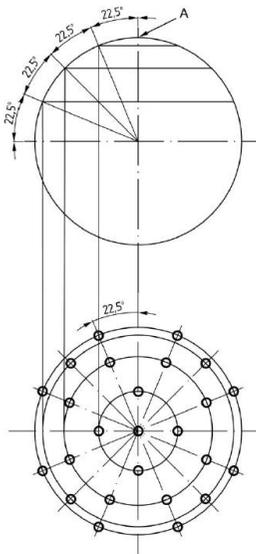


Figura 2.17. Prueba de error de palpado tamaño, distribución de puntos palpados por esfera. Fuente: (ISO/CD 10360 parte12 -2014 borrador)

Los principales parámetros a tener en cuenta para la definición de las pruebas de error de palpado de tamaño y su posterior evaluación de acuerdo a las normas [2], [3] y [4] son mostradas en la siguiente Tabla 2.4.

	VDI/VDE 2617-2009 parte 9	ASME B89.4.22-2004	ISO/CD 10360 parte 12 borrador
	Prueba de error de palpado (tamaño)	Prueba de diámetro efectivo	Prueba de error de palpado (tamaño)
Posiciones	3	1	2
Puntos por esfera	5	9	25
Repeticiones	5	3	1
Orientaciones	5 orientaciones palpador	Minimizar cambios	Minimizar cambios
Patrón	Esfera patrón (d =10 – 50mm)	Esfera patrón (d=10 – 50mm)	Esfera patrón (d < =51mm)
Cálculo del error	Máxima diferencia entre el diámetro medido y el valor del diámetro calibrado para todas las posiciones, PS	Máxima diferencia entre el diámetro medido y el valor del diámetro calibrado	Máxima diferencia entre el diámetro medido y el valor del diámetro calibrado por posición, P _{Size}

Tabla 2.4. Comparativa de ensayos para evaluación del error de palpado de tamaño ASME B89.4.22, VDI/VDE 2617 e ISO/CD 10360

b) Grupo 2: prueba de error de palpado de forma

La prueba para evaluar el error de palpado de forma únicamente se especifica en el caso de VDI/VDE 2617-2009 parte 9 e ISO/CD 10360 parte 12. La definición y condiciones de ensayo en ambos casos son análogas a las explicadas en el apartado anterior para la evaluación del error de palpado de tamaño.

El error de palpado de forma, P_{Form} , en el caso de ISO/CD 10360 parte 12 se calcula para cada una de las dos posiciones ensayadas, calculando la esfera gaussiana con las 25 mediciones realizadas por posición y de ahí se obtiene la distancia radial gaussiana R con respecto al centro de la esfera. El error de palpado de forma es el rango de los radios calculados $R_{max} - R_{min}$ y será comparado en cada posición con el máximo error permitido MPE especificado por el fabricante. VDI/VDE 2617-2009 parte 9 especifica un cálculo del error de palpado de forma, PF, similar al descrito en la norma ISO, siendo el valor de PF el máximo rango de los radios calculados en las tres posiciones de prueba definidas. Un resumen de los parámetros de ensayo se incluye en la tabla Tabla 2.5 a continuación.

	VDI/VDE 2617-2009 parte 9	ISO/CD 10360 parte 12 borrador
	Prueba de error de palpado (forma)	Prueba de error de palpado (forma)
Posiciones	3	2
Puntos por esfera	5	25
Repeticiones	5	1
Orientaciones	5 orientaciones palpador	Minimizar cambios
Patrón	Esfera patrón ($d = 10 - 50\text{mm}$)	Esfera patrón ($d < = 51\text{mm}$)
Cálculo del error	Máximo rango de los radios, PF	Máximo rango de los radios, P_{Form}

Tabla 2.5. Comparativa de ensayos para evaluación del error de palpado de forma VDI/VDE 2617 e ISO/CD 10360

c) Grupo 3: prueba de error de palpado de posición / prueba de repetibilidad de punto

La prueba de repetibilidad de punto o SPAT (*Single-Point Articulation performance Test*) indicada por ASME B89.4.22-2004 persigue determinar la capacidad del brazo de repetir la medida de un mismo punto desde orientaciones diferentes, lo que implica que se tengan diferentes configuraciones del brazo, cubriendo así distintas configuraciones de ángulos de articulación para un mismo punto medido. Para lograr el máximo número de orientaciones del brazo dentro del volumen de medida, la prueba se realiza en tres posiciones diferentes donde se ubica el objeto a medir atendiendo a la división del volumen de trabajo en tres zonas como se muestra en la Figura 2.18: un círculo de radio hasta el 20% de la longitud del brazo, una corona circular desde el 20% hasta el 80% de la longitud del brazo y una corona circular desde el 80% hasta el 100%.

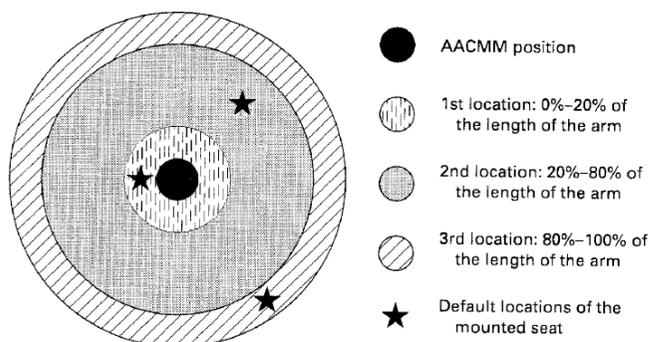


Figura 2.18. Posiciones de ensayo en prueba de repetibilidad de punto. Fuente: (ASME B89.4.22-2004)

En relación a las posiciones del brazo durante el ensayo, la norma recomienda colocar el brazo en diez posiciones distintas para cada uno de los tres puntos, de manera que se maximice la variación en todas las articulaciones del brazo. Para ello se definen cinco posiciones de articulación del brazo, como puede verse en la Figura 2.19 y se repite el mismo patrón con la muñeca del brazo rotada 180°.

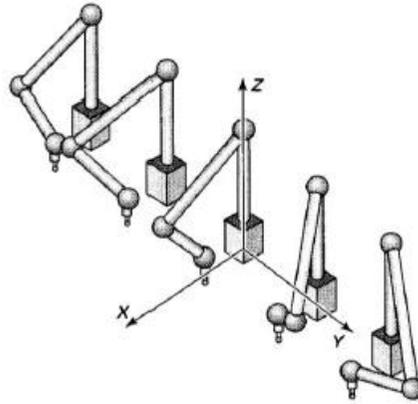


Figura 2.19. Posiciones de articulación del brazo en prueba de repetibilidad de punto. Fuente: (ASME B89.4.22-2004)

El ensayo se realiza materializando el punto fijo a medir mediante un asiento cinemático como el mostrado en la Figura 2.20. El objeto de estos asientos es mantener el contacto entre el asiento y la esfera del palpador montado en el brazo en tres puntos, independientemente de la orientación de la mano del brazo. De este modo se asegura que, para todos los datos capturados, el centro de la esfera palpadora, que representa el punto medido, se encuentre siempre en la misma posición física. Una influencia importante sobre la precisión de los brazos es la del propio operario, específicamente sobre la fuerza de palpado que se ejerce al tomar el punto. La captura de puntos con palpadores pasivos es un procedimiento manual, por lo que la fuerza de palpado varía de una captura a otra, incluso con el mismo operario del brazo. Según [21], la fuerza de contacto ejercida por el operario se centra en el palpador, por lo que la deformación del palpador se debe principalmente a la acción del operario que utiliza dos puntos de apoyo en el proceso de medición, uno en la articulación del codo para posicionar el brazo en la forma deseada y otro en la articulación de la muñeca donde se sitúa el palpador. En este segundo punto de soporte, el operario aplica la fuerza para mantener el contacto con la pieza y realizar la captura del punto, lo que supone que el palpador sufra directamente esta fuerza y pueda sufrir deformaciones, al igual que el objeto palpado. Ambos aspectos afectan directamente a la precisión de la medida. La norma recomienda retirar el palpador del asiento y volverlo a posicionar para la captura del siguiente punto, con objeto de disminuir la fuerza de palpado aplicada.



Figura 2.20. Asiento cinemático y palpador durante prueba de repetibilidad de punto

Tras las diez repeticiones por posición de ensayo definida, se calcula con los puntos medidos (x_i, y_i, z_i) la desviación respecto a la media de cada uno de los diez puntos capturados para cada posición del asiento (x_a, y_a, z_a) . Esta desviación se obtendrá calculando la distancia euclídea de cada punto δ_i a la media en la posición correspondiente. Además, se obtendrá la desviación estándar de la distribución de distancias para cada uno de los tres puntos considerados. Como resultado del ensayo, se calcula el valor máximo de distancia δ_{max} y de $2\sigma_{SPAT}$ entre las tres posiciones ensayadas según ecuación (2-4) y (2-5). Ambos valores deberán encontrarse por debajo del límite fijado por el fabricante.

$$\delta_i = \sqrt{(x_i - x_a)^2 + (y_i - y_a)^2 + (z_i - z_a)^2} \quad (2-4)$$

$$2\sigma_{SPAT} = 2\sqrt{\frac{\sum \delta_i^2}{(n-1)}} \quad n=10 \quad (2-5)$$

Tanto [3] como [4] especifican la realización de las pruebas para evaluación de error de palpado mediante esferas patrón calibradas a diferencia de [2] que especifica el uso de un asiento cinemático.

La prueba para evaluación del error de palpado de posición indicada por VDI/VDE 2617-2009 parte 9 se realiza en las mismas condiciones de ensayo que las pruebas para evaluación del error de palpado de tamaño y de forma explicadas anteriormente, determinando las coordenadas del centro de una esfera estándar colocada en tres posiciones diferentes del volumen de trabajo del brazo. Para cada posición de prueba y repetición, ver Figura 2.16, se calculan las coordenadas de la esfera gaussiana asociada a partir de los cinco puntos capturados por esfera. Las cinco repeticiones por posición se realizan teniendo en cuenta las diferentes orientaciones del palpador y posteriormente se calcula la máxima distancia euclídea δ_i entre dos cualesquiera de los cinco centros de las esferas obtenidos por posición. La mayor distancia euclídea entre las tres posiciones ensayadas determina el error de palpado de posición PL, que se comparará con el máximo valor permitido por el fabricante para asegurar que el error cometido por el brazo está dentro de lo admisible.

El objetivo definido por ISO/CD 10360 parte 12 en esta prueba es la realización de una medición de manera que se incluyan todas las posibles orientaciones del brazo en su volumen de medición. Para

ello se mide una esfera calibrada que se sitúa en dos posiciones de ensayos elegidas por el usuario capturando cinco puntos por esfera con cinco orientaciones ortogonales diferentes del palpador tal y como se muestra en Figura 2.21. El ensayo es similar al realizado en [3] pero reduciendo una posición de ensayo.

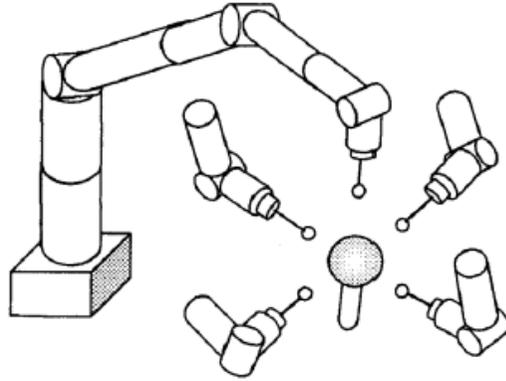


Figura 2.21. Posiciones de palpador del brazo en prueba de evaluación del error de articulación. Fuente: (ISO/CD 10360 parte 12)

Para cada una de las cinco orientaciones del palpador, son capturadas cinco mediciones que permiten calcular el centro de la esfera gaussiana correspondiente. Este conjunto de cinco centros de esfera, idealmente con las mismas coordenadas, son utilizados para evaluar el error de posición de articulación L_{Dia} , valor que se compara con el máximo error suministrado por el fabricante para el equipo en estudio. La siguiente Tabla 2.6 muestra la comparativa entre los distintos ensayos especificados en las normas que se han descrito en el presente apartado.

	VDI/VDE 2617-2009 parte 9	ASME B89.4.22-2004	ISO/CD 10360 parte 12 borrador
	Prueba de error de palpado (posición)	Prueba de repetibilidad de punto (SPAT)	Prueba de error de posición de articulación
Posiciones	3	3	2
Puntos / esfera	5	1 (asiento cinemático)	5
Repeticiones	5	10	1
Orientaciones	5 orientaciones palpador	5 orientaciones / giro muñeca 180°	5 orientaciones palpador
Localización	Centro de esfera patrón (d = 10 – 50mm)	Asiento cinemático	Centro esfera patrón (d < =51mm)
Cálculo del error	Error de palpado de posición, PL	$\delta_{m\acute{a}x}$, 2 σ deviation	Error de posición de articulación, L_{Dia}

Tabla 2.6. Comparativa de ensayos para evaluación del error de palpado de posición según normativa ASME B89.4.22, VDI/VDE 2617 e ISO/CD 10360

d) Grupo 4: prueba de precisión longitudinal volumétrica o rendimiento volumétrico

Los ensayos de rendimiento volumétrico persiguen evaluar la precisión de un brazo de medición por coordenadas en todo su volumen de trabajo. Para ello, se realizan mediciones de distancias materializadas por un artefacto patrón calibrado que se localiza en diferentes posiciones y orientaciones

del volumen de medida del brazo, de manera que sea posible establecer si el brazo es capaz de realizar estas mediciones dentro del error máximo permisible por el fabricante. Los patrones que materializan las distancias pueden ser de distinta forma y naturaleza, siendo los más habituales los patrones escalonados y las barras de esferas. Las longitudes de medida se establecen como distancia entre centros de dos esferas definidas en el patrón. Por todos estos motivos, la prueba de rendimiento volumétrico se considera la más exigente, fiable y efectiva para estimar la precisión del brazo en condiciones de trabajo. A pesar de que las tres normas tienen un objetivo común, existen pequeñas diferencias entre las especificaciones de ensayo indicadas en sus respectivos documentos. Un resumen de las características recogidas en los ensayos especificados en [2], [3] y [4] se incluye en la siguiente Tabla 2.7.

	VDI/VDE 2617-2009 parte 9	ASME B89.4.22-2004	ISO/CD 10360 parte 12 borrador
	Prueba de rendimiento volumétrico (volúmenes de medición totales o parciales)	Prueba de precisión longitudinal volumétrica	Prueba de precisión longitudinal volumétrica
Posiciones	12	20	7
Puntos esfera	5	5	1
Repeticiones	3 por longitud	1 por longitud	3 por longitud
Longitudes	5 por posición	1 por posición	5 por posición
Localización	Centro de esfera patrón (d =10 – 50mm)	Centro de esfera patrón (d =10 – 50mm)	Centro esfera patrón (d < =51mm)
Cálculo del error	Error de medición en distancia, E. Máxima desviación entre distancia centro a centro y longitud calibrada	Máxima desviación entre distancia centro a centro y longitud calibrada Di, rango de desviación y 2RMS	Error de medición en distancia, E _{Uni} , E _{Bi} . Diferencia entre valor de longitud medido y calibrado.

Tabla 2.7. Comparativa de ensayos para evaluación del rendimiento volumétrico según normativa ASME B89.4.22, VDI/VDE 2617 e ISO/CD 10360

Realizando una comparación entre los tres estándares, se puede observar que el mayor número de posiciones de ensayo se define en [2], hecho que genera un aumento de la complejidad, espacio, tiempo requerido en preparación de ensayo y mano de obra asociada. En [3], se incrementa el número de longitudes a medir en el patrón calibrado y el número de repeticiones por línea de medición, de manera que el tiempo de ensayo propiamente dicho se ve incrementado y se puede concluir que VDI es más exigente en términos de evaluación de repetibilidad. Finalmente cabe mencionar que [4] representa un paso intermedio entre [2] y [3], ya que especifica el mismo número de repeticiones y líneas de medida que [3] pero con menos posiciones de ensayo.

El ensayo de evaluación de rendimiento volumétrico indicado por *ASME B89.4.22-2004* pretende, como se ha indicado anteriormente, evaluar el funcionamiento del brazo en todo su volumen. De este modo y para posibilitar la realización del ensayo de manera fraccionada en las veinte posiciones especificadas, se divide el espacio de trabajo del brazo, considerado como una esfera de diámetro dos veces la longitud del brazo a partir del eje de su primera articulación, en dos hemisferios separados por el plano medio a la altura de la base del brazo. Cada uno de estos hemisferios se divide en cuatro cuadrantes, de modo que el espacio total de trabajo del brazo queda dividido en ocho octantes. Según la referencia indicada por el fabricante para establecer la parte frontal del brazo, se establece la numeración de estos octantes tal y como muestra la Figura 2.22.

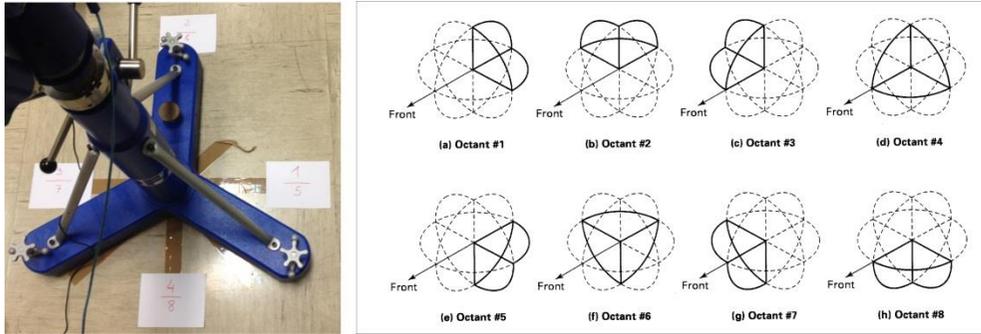


Figura 2.22. Numeración de octantes del volumen de medida de un brazo articulado, ASME B89.4.22-2004

Las barras de esferas que se usan como patrón calibrado sobre el que se medirán las distancias deben ser posicionadas en horizontal, vertical y a 45° con respecto al brazo, tal y como se muestra en la Figura 2.23. Los patrones, barras de esferas en este caso, materializarán dos distancias, una denominada corta que corresponde aproximadamente a un 60% de la longitud del brazo y otra denominada larga que será alrededor de un 130% de esa longitud. La forma de determinar una posición para el ensayo vendrá dada por la especificación del tipo de patrón, largo o corto, los octantes a los que afecta, la inclinación, la distancia a la base del brazo y la dirección. La distancia a la base del brazo se especifica cómo cerca o lejos, entendiendo por cerca, las posiciones en las que la barra se encuentra a una distancia de la base menor que la mitad de la longitud total del brazo, y lejos, las posiciones más allá de la mitad de la longitud del brazo. Con respecto a la dirección, las posiciones horizontales y a 45° quedarán completamente determinadas indicando si deben ser posicionadas radial o tangencialmente al brazo. De esta forma, el procedimiento normalizado establece 20 posiciones de la barra en todo el volumen del brazo, dos en posición vertical, diez en horizontal y ocho a 45° .

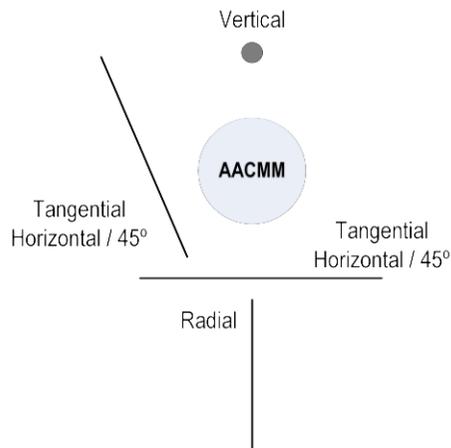


Figura 2.23. Orientación de la barra de bolas respecto al brazo articulado.

En la Figura 2.24 y en la Tabla 2.8 se recogen las posiciones de evaluación. Para cada una de estas posiciones será necesario medir la distancia materializada por el patrón, de forma que se capten cinco puntos por esfera y se evalúe la distancia entre ellas. Es de destacar que en esta prueba no se evalúa el error de medida de diámetros de esferas, dado que se trata de un patrón calibrado en distancias.

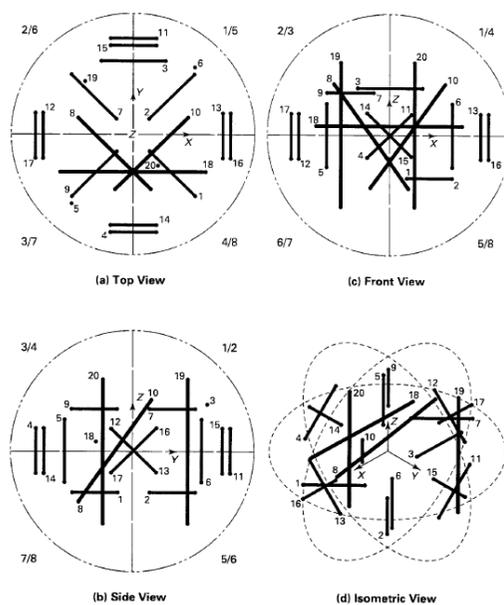


Figura 2.24. Posiciones de ensayo de evaluación de rendimiento volumétrico. ASME B89.4.22-2004

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 2.8. Definición de posiciones y parámetros ensayo de evaluación del rendimiento volumétrico.

Fuente: (ASME B89.4.22-2004)

Para cada una de las posiciones medidas 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 (2-6).

$$D_i = L_i - L_{Cal} \quad (2-6)$$

Como resultado final de esta prueba se obtendrán tres parámetros cuyos límites aceptables deberán estar fijados por el fabricante del brazo. En primer lugar deberá indicarse la máxima desviación obtenida para todas las posiciones $\text{Max } D_i$, el rango de estas desviaciones y una desviación media $2RMS$ calculado como dos veces el valor cuadrático medio de las desviaciones para todas las posiciones consideradas, ver ecuación (2-7).

$$2RMS = 2 \sqrt{\frac{\sum D_i^2}{(n)}} \quad n=20 \quad (2-7)$$

En el caso de *VDI/VDE 2617-2009 parte 9* y al igual que en [2], el ensayo de evaluación de precisión longitudinal volumétrica consiste en la medición de un patrón longitudinal a lo largo del volumen de medida del brazo estimando el error cometido por el brazo al comparar el resultado de la medición con una longitud calibrada. La recomendación técnica define dos posibles ensayos dependiendo de la longitud del patrón calibrado disponible. En caso de que el patrón disponible sea más corto que el 66% de la longitud diagonal del brazo de medida, se realiza el ensayo volumétrico en volúmenes parciales. Si supera el 66% se permite la realización del ensayo volumétrico completo.

En el ensayo de rendimiento volumétrico por volúmenes parciales, se miden cinco longitudes por barra patrón de esferas calibradas, materializándose la longitud como la distancia entre los centros de dos esferas del patrón. El volumen del trabajo del brazo se divide en un mínimo de tres volúmenes parciales uniformemente repartidos, que se solapan, e incorporando la mayor diagonal del volumen de trabajo. Adicionalmente el tamaño del volumen parcial debe ser tal que se pueda evaluar una distancia al menos correspondiente al 40% del alcance del brazo de medición. En la Figura 2.25, se puede observar la recomendación incluida en el documento con cuatro volúmenes parciales.

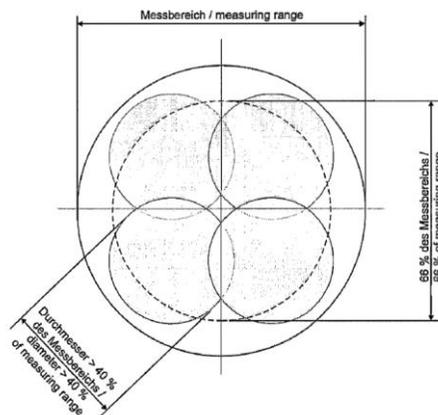


Figura 2.25. Distribución de volúmenes parciales en ensayo de precisión longitudinal volumétrica. (Fuente *VDI/VDE 2617-2009 parte 9*)

En cada volumen parcial, se definirán tres líneas de medida ortogonales entre sí mediante el patrón calibrado, una con orientación radial respecto al brazo y dos con orientación tangencial al brazo e inclinación de 45° opuesta en cada caso, dando un total de 12 posiciones en el volumen de trabajo según se indica en la Tabla 2.9. La recomendación indica que se deben medir cinco longitudes en cada posición realizándose tres repeticiones de cada una de ellas variando la posición de la articulación A. En dos de las repeticiones la posición de la articulación A debe ser opuesta, ver Figura 2.26. Esto proporciona un total de 180 longitudes de medida a realizar a lo largo del ensayo siendo 135 el número mínimo de mediciones a realizar que se indica en [3].

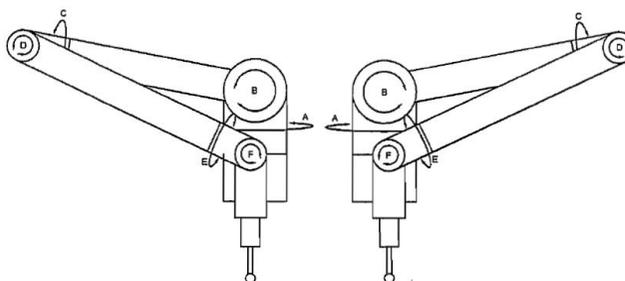


Figura 2.26. Posición de articulaciones del brazo en ensayo de precisión longitudinal volumétrica. Fuente: (VDI/VDE 2617-2009 parte 9)

Posiciones	Volumen parcial	Posición patrón (vs. brazo)	Longitud (mm)
1	1	Radial	
2	1	Ortogonal 1 (patrón inclinado 45°)	
3	1	Ortogonal 2 (patrón inclinado 45°)	
4	2	Radial	
5	2	Ortogonal 1 (patrón inclinado 45°)	A definir dependiendo de longitud del brazo de medición (mínimo 5 por posición)
6	2	Ortogonal 2 (patrón inclinado 45°)	
7	3	Radial	
8	3	Ortogonal 1 (patrón inclinado 45°)	
9	3	Ortogonal 2 (patrón inclinado 45°)	
10	4	Radial	
11	4	Ortogonal 1 (patrón inclinado 45°)	
12	4	Ortogonal 2 (patrón inclinado 45°)	

Tabla 2.9. Posiciones para evaluación del rendimiento volumétrico por volúmenes parciales. Fuente: (VDI/VDE 2617- 9)

Para cada medición realizada, se calcula la distancia centro a centro de las esferas medidas y se obtiene así el error en distancia comparando con la longitud calibrada del patrón. Se reporta como resultado final del ensayo el error de medición en distancia, E, que se representa con los valores máximos de error permitidos para el ensayo MPE_E .

En caso de que el patrón disponible supere el 66% de la longitud diagonal del brazo de medida, se realiza el ensayo volumétrico completo dividiendo el volumen de trabajo completo en siete volúmenes

parciales a definir por el usuario. Al igual que el caso de volúmenes parciales, se indica que se deben medir cinco longitudes en cada posición realizándose tres repeticiones de cada una de ellas variando la posición de la articulación A. En dos de las repeticiones la posición de la articulación A debe ser opuesta, ver Figura 2.26. El número mínimo de mediciones a realizar durante el ensayo será 105.

Las posiciones distribuidas en tres sectores de 120° del volumen de medida, se definirán de manera que la distancia mayor siempre se encuentra en la zona exterior, entre el 70% y 100% del volumen mencionado. En uno de los sectores de 120° se definirá una posición como una línea de medida horizontal y dos líneas de medida oblicuas cruzadas. En los otros dos sectores restantes se crearán una línea de medida horizontal y otra oblicua. Las dos últimas posiciones oblicuas tendrán inclinación opuesta mirando el volumen de medida desde el exterior en la dirección radial. Una vista en planta y alzado de las diferentes posiciones a generar con la barra patrón calibrada en el ensayo de rendimiento volumétrico según la recomendación técnica [3] se muestra en la Figura 2.27. El error en distancia se obtiene para cada medición realizada calculando la distancia centro a centro de las esferas medidas y comparando con la longitud calibrada del patrón. El resultado final del ensayo el error de medición en distancia, E se representa con los valores máximos de error permitidos para el ensayo MPE_E.

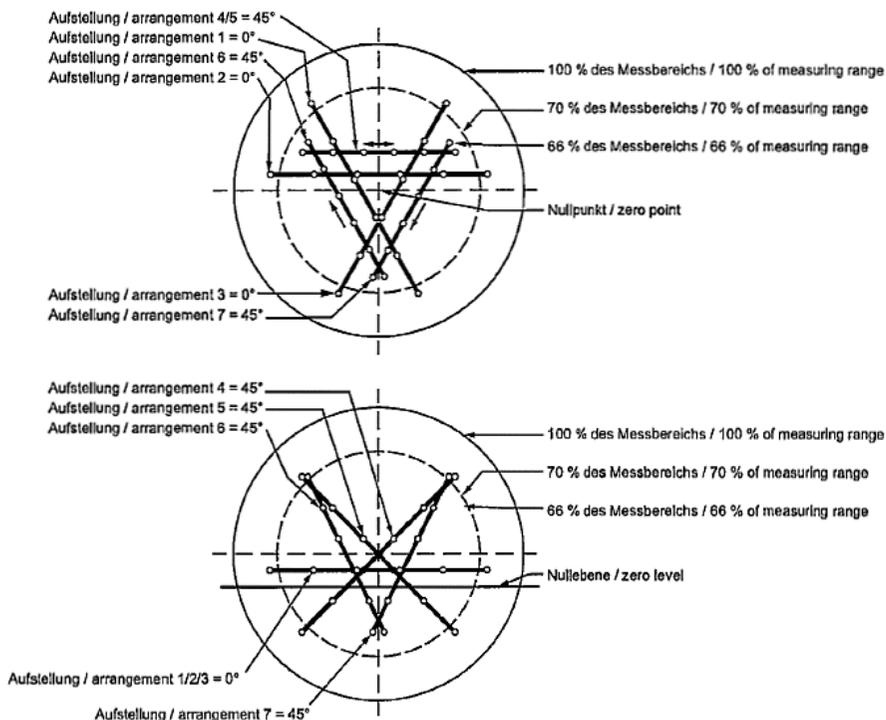


Figura 2.27. Posición patrón en ensayo de precisión longitudinal volumétrica por volúmenes completos.

Fuente: (VDI/VDE 2617-2009 parte 9)

La prueba de evaluación del error de longitud según ISO/CD 10360 parte 12 define la medición de cinco distancias calibradas materializadas en un patrón calibrado y distribuidas en cada una de las siete líneas de medida, cubriendo la más larga de las distancias calibradas un mínimo del 66% del volumen de

medida del brazo. El brazo articulado dispone de un eje z en torno a la articulación la primera articulación a , tal cual se visualiza en la Figura 2.28. Para el ensayo se construye un plano de referencia incluyendo el eje z y un punto seleccionado en la base del brazo. El plano de medición se construye incluyendo el eje z y el punto medio de la distancia calibrada a medir. El ángulo de azimut θ para una determinada medición, se define como el ángulo entre el plano de referencia y el plano de medida, con el ángulo medido a lo largo de un plano perpendicular al eje z .

Las siete líneas de medida se generan en función de la dirección del patrón, horizontal, vertical o diagonal 45° , y del ángulo azimut, siendo éste último 0 grados en la dirección vertical, y 0, 120 y 240 grados en las direcciones horizontal y diagonal – 45 grados, ver Tabla 2.10.

Posiciones	Dirección	Ángulo Azimut ($^\circ$)
1, 2, 3	Horizontal	0, 120, 240
4, 5, 6	Diagonal, 45°	0, 120, 240
7	Vertical	0

Tabla 2.10. Posiciones en ensayo de evaluación de error en longitud. Fuente: (ISO/CD 10360 - 12)

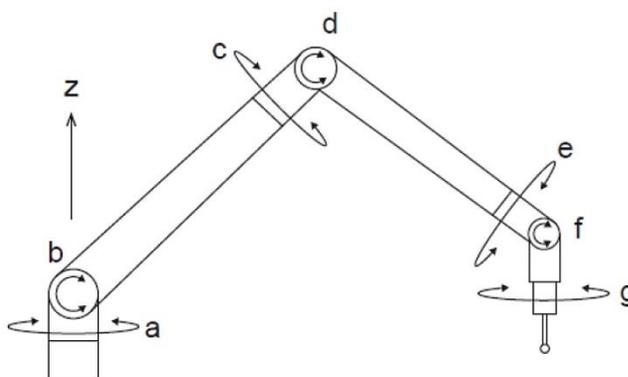


Figura 2.28. Configuración de un brazo de medición por coordenadas de siete ejes. Fuente: (ISO/CD 10360 parte 12)

La norma indica adicionalmente que los extremos de la distancia calibrada más larga a medir deben posicionarse en una esfera que cubra entre el 60% y 100% del rango de medida del brazo, ver Figura 2.29. Respecto al número de repeticiones de medida a realizar, se indica que cada longitud debe medirse tres veces teniendo en cuenta las distintas orientaciones del brazo, dando lugar a un número mínimo de 105 mediciones, al igual que en [3] en el caso de medición del volumen completo.

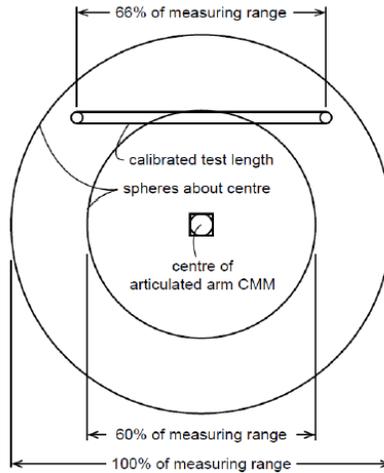


Figura 2.29. Posicionamiento de las distancias calibradas en el volumen de medida del brazo. Fuente: (Normativa ISO/CD 10360 parte 12)

Cada punto debe ser medido con el codo del brazo en una orientación determinada, izquierda (L), superior (O) y derecha (R) tal cual se muestra en la Figura 2.30. Debido a que para la determinación de cada distancia son necesarias las medidas de dos esferas posicionadas sobre el patrón cuya distancia entre centros materializa la longitud mencionada, habrá nueve posibles combinaciones de orientaciones del brazo (L,O,R) para cada dos puntos de medida en el proceso de evaluación la distancia calibrada. Para ello y como se indica en la Tabla 2.11, se definen las siguientes abreviaturas para referenciar las combinaciones de orientaciones del brazo explicadas, LL, LO, LR, OL, OO, OR, RL, RO y RR. Como resultado, se medirán 35 longitudes, siete longitudes de medida con cinco distancias a medir en cada una, incluyendo tres repeticiones por distancia realizadas con la misma combinación de orientación del brazo ejecutada siempre en el mismo orden.

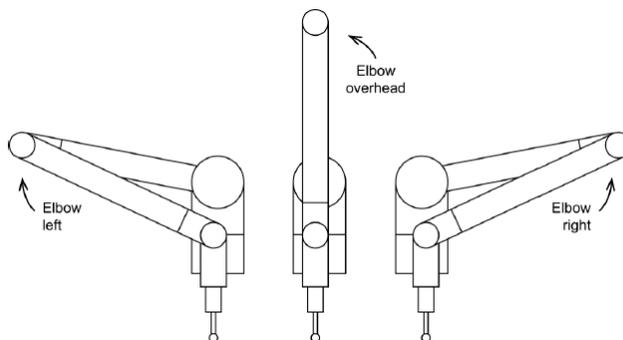


Figura 2.30. Orientaciones del brazo de medida en ensayo de evaluación de error en longitud. Fuente: (ISO/CD 10360 parte 12)

Longitud	Rep 1	Rep 2	Rep 3	Longitud	Rep 1	Rep 2	Rep 3
1	LL	LL	LL	18	RR	RR	RR
2	LO	LO	LO	19	LL	LL	LL
3	LR	LR	LR	20	LO	LO	LO
4	OL	OL	OL	21	LR	LR	LR
5	OO	OO	OO	22	OL	OL	OL
6	OR	OR	OR	23	OO	OO	OO
7	RL	RL	RL	24	OR	OR	OR
8	RO	RO	RO	25	RL	RL	RL
9	RR	RR	RR	26	RO	RO	RO
10	LL	LL	LL	27	RR	RR	RR
11	LO	LO	LO	28	LL	LL	LL
12	LR	LR	LR	29	LO	LO	LO
13	OL	OL	OL	30	LR	LR	LR
14	OO	OO	OO	31	OL	OL	OL
15	OR	OR	OR	32	OO	OO	OO
16	RL	RL	RL	33	OR	OR	OR
17	RO	RO	RO	34	RL	RL	RL
18	RR	RR	RR	35	RO	RO	RO
33	OR	OR	OR	33			
34	RL	RL	RL	34			
35	RO	RO	RO	35			

Tabla 2.11. Orientaciones del brazo de medida en líneas de medida. Fuente: (ISO/CD 10360 - 12)

Para cada una de las 105 mediciones realizadas, se calcula el error de longitud unidireccional E_{Uni} o bidireccional E_{Bi} como la diferencia entre el valor de distancia medido y el valor calibrado, comparando este error con el mayor valor permitido por el fabricante indicado en la especificación del brazo, MPE ($E_{Uni}, MPE, E_{Bi}, MPE$).

2.3.2 Normativa y métodos de evaluación aplicables a láser trackers

Actualmente existen dos estándares aplicables a láser tracker que permiten definir unos estándares de presentación y comparación de resultados en la evaluación de estos equipos que son la norma americana ASME B89.4.19 [5] de 2006 y la recomendación técnica VDI/VDE 2617- parte 10 [6] de 2011. El comité técnico ISO TC 213 WG10 está trabajando en un borrador de un estándar internacional aplicable a laser trackers ISO/CD10360-10 [7] que mantiene los principales puntos de ambas norma y recomendación técnica eliminado pruebas redundantes o consideradas tras evaluación como poco eficaces.

a) Normativa ASME B89.4.19

En la norma ASME B89.4.19 de 2006 se especifican tres pruebas para evaluar el funcionamiento de un láser tracker que son la prueba de medición de distancia absoluta, la prueba de medida de longitud y la prueba a dos caras. La norma verifica el desempeño a nivel angular y en distancia del láser tracker de manera separada. Las mediciones se realizan mediante interferómetro y/o ADM (*absolute distance measurement*).

La *prueba de medición de distancia absoluta* evalúa la capacidad de medición del instrumento. La medición se puede realizar mediante interferómetro o ADM especificándose no exactamente el mismo

tipo de prueba para ambos. Para las pruebas mediante ADM, si el láser tracker dispone de un interferómetro que cumple los requisitos de las pruebas de medición en distancia absoluta, puede utilizarse para calibrar las longitudes de referencia a emplear en la medición mediante ADM.

Las distancias de referencia largas pueden implementarse de varios modos, bien mediante una guía normalmente con longitud superior a 20 m, usando un reflector móvil cuyo desplazamiento es medido mediante el interferómetro, o mediante un nido de retrorreflectores montados sobre estructuras fijas que materialicen las distancias calibradas requeridas.

La disposición de los ensayos que marca la norma puede verse en la Figura 2.31 con varias distancias calibradas alineadas a lo largo de la línea de visión del láser tracker (L1-L4), definidas entre el target a colocado a 3 m del láser tracker y las siguientes posiciones donde se colocará el target b. R es el máximo rango del interferómetro o del ADM incluyendo dos longitudes, y se tiene en consideración en el ensayo también el ángulo azimutal del láser tracker respecto a su eje z "standing axis", ver Tabla 2.12.

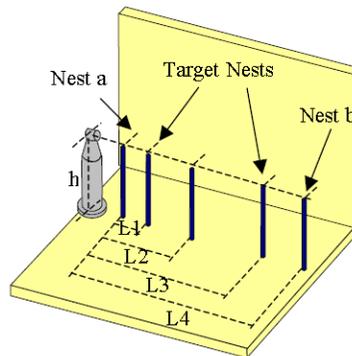


Figura 2.31. ASME B89.4.19 Prueba de medición de distancia absoluta. Fuente: (ASME B89.4.19)

Posición	Distancia (L)	Ángulo azimutal target a y b
1	L1 ~ 18%R	90°
2	L2 ~ 36%R	90°
3	L3 ~ 54%R	90°
4	L4 ~ 72%R	90°
5	A definir	90°
6	A definir	90°

Tabla 2.12. Posiciones en prueba de medición de distancia absoluta. Fuente: (Norma ASME B89.4.19)

Las pruebas de medida para la evaluación del error en longitud son similares a las pruebas de precisión volumétrica establecidas en el caso de brazos articulados de medición por coordenadas. Una longitud nominal calibrada, materializada en artefactos calibrados, dos retrorreflectores o un sistema de guía láser, se coloca en diferentes posiciones y orientaciones del volumen de medida (longitud en horizontal, vertical y diagonal) y es medida por el láser tracker, tal cual se indica en la Figura 2.32 y la Tabla 2.13. La longitud calibrada A debe ser al menos 2.3 m. La altura h del láser tracker debe ser aproximadamente la misma de los targets a y b en caso de medida de longitudes horizontales y la mitad en el caso de

medida de longitudes verticales o diagonales. D representa la distancia entre la longitud de referencia y el láser tracker. En el caso de medición de distancias diagonales el equipo debe estar posicionado equidistante de los dos extremos de la longitud de referencia, a y b . El ángulo horizontal especificado es la rotación azimutal del equipo respecto a su eje z , “standing axis”. El error de medida en longitud se compara con el máximo error permitido por el instrumento MPE evaluando si está dentro de la especificación suministrada por el fabricante. Mediante esta prueba se pueden identificar diversas fuentes geométricas de error en el láser tracker como desalineamientos ópticos y mecánicos en la construcción del equipo.

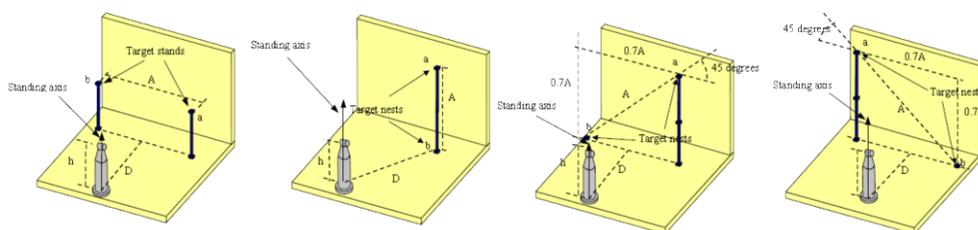


Figura 2.32. ASME B89.4.19 Prueba de medición de longitud horizontal, vertical, diagonal derecha y diagonal izquierda. Fuente: (ASME B89.4.19)

Medición	Longitud horizontal		Longitud vertical		Longitud diagonal derecha y diagonal izquierda	
	Distancia D	Ángulo horizontal medido target a	Distancia D	Ángulo horizontal medido target ab	Distancia D	Ángulo horizontal medido target a
1	$0.1 A$	Cualquiera	$1.2 A$	0°	$1.2 A$	0°
2	$1.2 A$	0°	$1.2 A$	90°	$1.2 A$	90°
3	$1.2 A$	90°	$1.2 A$	180°	$1.2 A$	180°
4	$1.2 A$	180°	$1.2 A$	270°	$1.2 A$	270°
5	$1.2 A$	270°	$2.7 A$	0°	$2.7 A$	0°
6	$2.7 A$	0°	$2.7 A$	90°	$2.7 A$	90°
7	$2.7 A$	90°	$2.7 A$	180°	$2.7 A$	180°
8	$2.7 A$	180°	$2.7 A$	270°	$2.7 A$	270°
9	$2.7 A$	270°				

Tabla 2.13. Posiciones en el ensayo de evaluación del error de medida de longitud. Fuente: (Norma ASME B89.4.19).

La última prueba indicada en la norma es la *prueba a dos caras*, que permite evaluar posibles desalineaciones geométricas entre los ejes del LT que pueden generar errores en los ángulos de medición dependiendo si la medición del retroreflector se realiza en la cara delantera o trasera del láser tracker. Para ello se disponen tres retroreflectores sobre el suelo en tres alturas diferentes, suelo, altura del equipo y a dos veces la altura del equipo. Las posiciones de prueba vienen determinadas por la distancia del equipo a los reflectores D y el ángulo de giro respecto al eje azimut del láser tracker. Las coordenadas del retroreflector se capturan realizando primero la medición en cara delantera y posteriormente trasera del láser tracker. Un esquema de la disposición en el ensayo puede verse en la

Figura 2.33 conjuntamente con los valores de los parámetros de las distintas posiciones mostrados en la Tabla 2.14. El valor de error obtenido en el ensayo se compara con el máximo valor admisible MPE del fabricante.

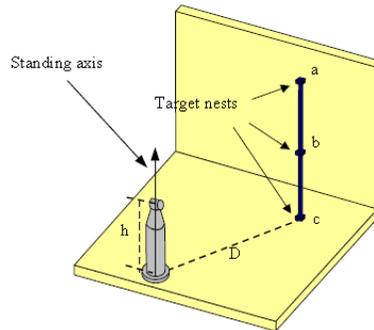


Figura 2.33. ASME B89.4.19 Prueba a dos caras. Fuente: (ASME B89.4.19)

Posición	Distancia (D)	Ángulo horizontal medido target b
1	Minimizar D para maximizar el rango angular vertical entre a y c	0°
2	Igual a posición 1	90°
3	Igual a posición 1	180°
4	Igual a posición 1	270°
5	3 m	0°
6	3 m	90°
7	3 m	180°
8	3 m	270°
9	6 m	0°
10	6 m	90°
11	6 m	180°
12	6 m	270°

Tabla 2.14. Posiciones en el ensayo de evaluación a dos caras. Fuente: (Norma ASME B89.4.19)

b) Normativa ISO/CD10360-10

El borrador existente de la norma ISO/CD10360-10 combina contenidos de ASME B89.4.19 y VDI/VDE 2617- parte 10 tratando de optimizar los puntos mejorables de ambas. El documento ISO incluye una prueba de error de palpado (tamaño y forma) similar a la especificada por VDI/VDE 2617- parte 10, una prueba a dos caras y un ensayo de evaluación del error de medición en longitud. La norma presenta muchas analogías con los ensayos especificados en la norma ISO/CD10360-12 [4] para brazos articulados de medición.

Para la primera de las *prueba de evaluación del error de palpado*, se mide una esfera calibrada en el volumen de trabajo del láser tracker colocada en dos posiciones diferentes: una primera posición a una distancia al láser tracker menor de 2 metros y a la altura del láser, y una segunda posición a una distancia aproximada de 10 metros y altura más de un metro por encima o por debajo de la altura del equipo de medición. Se toman 25 capturas homogéneamente distribuidos en la esfera, ver Figura 2.17, rotando el retrorreflector de manera que se asegure que en cada medición un punto diferente del retrorreflector está en contacto con la esfera. Una vez obtenida la esfera gaussiana asociada con las 25 mediciones realizadas, se calcula el error de palpado tamaño P_s , como la diferencia entre el valor de diámetro obtenido en la medición D_{MEAS} y el valor calibrado nominal de la esfera D_{REF} . El error de palpado de forma P_F , se obtiene como el valor absoluto del rango de los radios calculados de las mediciones realizadas, $R_{max} - R_{min}$.

Adicionalmente se incluye una *prueba de medición a dos caras o prueba de error de posición*, que consiste en la medición de la posición de un retrorreflector dos veces con una rotación del cabezal del láser en torno a su eje azimutal de 180° . La distancia euclídea entre estas dos mediciones genera el resultado del ensayo, P_L . Como los resultados del ensayo dependen claramente de la distancia del retrorreflector al láser tracker y de la orientación angular del mismo, el ensayo se realiza en dos posiciones en distancia y tres orientaciones angulares del equipo, tal y como puede verse en la Tabla 2.15.

Posición	Distancia al LT	Posición del retrorreflector	Angulo respecto LT (°)
1-3	1,5 m	Al menos 1 m por debajo de la altura LT	
4-6	1,5 m	A la altura del LT	0; 120; 240
7-9	1,5 m	Al menos 1 m por encima de la altura LT	
10-12	6 m	Al menos 1 m por debajo de la altura LT	Ángulo nominal azimut del LT cuando apunta al retro reflector
13-15	6 m	A la altura del LT	
16-18	6 m	Al menos 1 m por encima de la altura LT	

Tabla 2.15. Posiciones en el ensayo de evaluación a dos caras. Fuente: (ISO/CD10360-10)

En la *prueba de evaluación del error de medición de longitud* se caracteriza la precisión volumétrica del láser tracker en el volumen de trabajo. Las distancias se materializan en instrumentos calibrados como barras de esferas, bloques patrón o nidos de retrorreflectores colocados en estructuras fijas. Del total de 105 líneas de medición requeridas, se definen 41 ensayos como fundamentales, ver Tabla 2.16, ya que permiten caracterizar los errores opto-mecánicos conocidos de los equipos de láser tracker existentes en el mercado y cubren al menos un 66% del rango de medida cada uno de los ejes del láser tracker. Las 64 posiciones restantes se definen bajo criterio del personal que realiza los ensayos siguiendo unas tablas guía recomendadas que extraen posiciones ya definidas en las pruebas de evaluación de errores de longitud bien de la normativa ASME B89.4.19 (opción 1) o de la recomendación técnica VDI/VDE 2617 (opción 2). Durante los ensayos se utiliza un longitud de referencia calibrada entre 2.25 m a 2.75 m salvo se indique lo contrario en Tabla 2.16. Las mediciones se realizan mediante interferómetro y/o ADM colocando la longitud de referencia calibrada en las distintas posiciones y orientaciones, indicando la norma que también puede ser desplazado y reorientado el láser tracker para cada posición de ensayo si resultara más sencillo que desplazar la longitud de referencia. Algunas de

las posiciones indicadas en la Tabla 2.16 son mostradas en la Figura 2.34, donde A y B son los extremos de la longitud de referencia calibrada.

Position number	Distance from tracker origin	Description of reference length position	Angle(s) with respect to the tracker origin
1	As close as practicable	Horizontal, centered (i.e., the ends of the reference length are equidistant from the tracker), and at tracker height. NOTE This test 66% of the horizontal angle measurement range of the tracker.	At any azimuth
2	As close as practicable	Horizontal, centered (i.e., the ends of the reference length are equidistant from the tracker), and at tracker height. NOTE This test 66% of the horizontal angle measurement range of the tracker.	At any azimuth
3-6	3 m	Horizontal, centered (i.e., the ends of the reference length are equidistant from the tracker), and at tracker height.	0; 90; 180; 270
7	3 m	Vertical, center of the length at tracker height (ends of the reference length equidistant from the tracker).	At any azimuth
8-11	3 m	Right diagonal, centered (i.e., the ends of the reference length are equidistant from the tracker), and the center of the length is at tracker height.	0; 90; 180; 270
12-15	3 m	Left diagonal, centered (i.e., the ends of the reference length are equidistant from the tracker), and the center of the length is at tracker height.	0; 90; 180; 270
16-19	6 m	Horizontal, centered (i.e., the ends of the reference length are equidistant from the tracker), and at tracker height.	0; 90; 180; 270
20-23	As close as practicable	Horizontal, not-centered (i.e. the tracker is directly in front of one end of the length), and at tracker height	0; 90; 180; 270
24	As close as practicable	Vertical, not-centered (i.e. the tracker is directly in front of one end of the length)	At any azimuth
25-28	As close as practicable	Diagonal, one end below or above the point directly in front of the tracker, the other end to the right or left of the point directly in front of the tracker. The range to the two ends of the length are equal.	0; 90; 180; 270
29	As close as practicable	Horizontal, centered (i.e., the ends of the reference length are equidistant from the tracker), and at tracker height. NOTE This tests 66% of the horizontal angle measurement range of the tracker.	At any azimuth
30-35	Long ¹	Horizontal, centered (i.e., the ends of the reference length are equidistant from the tracker), at tracker height	0; 30; 60; 90; 120; 150
36-40	5 Ranging test distances	This tests 66% of the measurement range of the tracker.	At any azimuth
41	Synthetic length test	See annex C (only required for low CTE artifact case)	At any azimuth

¹ In the special "long" case, a longer reference length is measured at a longer distance from the tracker. It is recommended to measure a length of 7-9 m at a distance of 7-9 m.

Tabla 2.16. Posiciones fundamentales en test de evaluación del error de medición de longitud. Fuente: (ISO/CD10360-10)

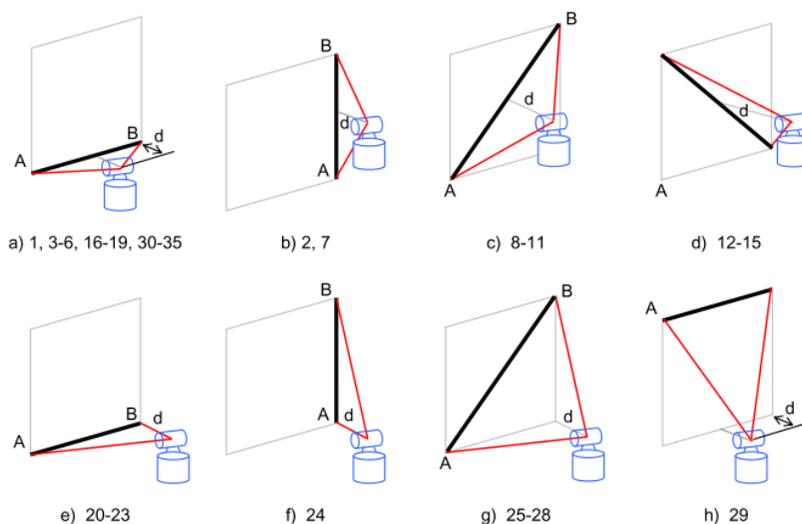


Figura 2.34. Posiciones prueba de evaluación de error de medición de longitud. Fuente: (ISO/CD10360-10)

Un ejemplo de ocho posibles líneas de medición definidas en la opción 2 extraída de la recomendación VDI/VDE 2617- parte 10 pueden verse en la Figura 2.35.

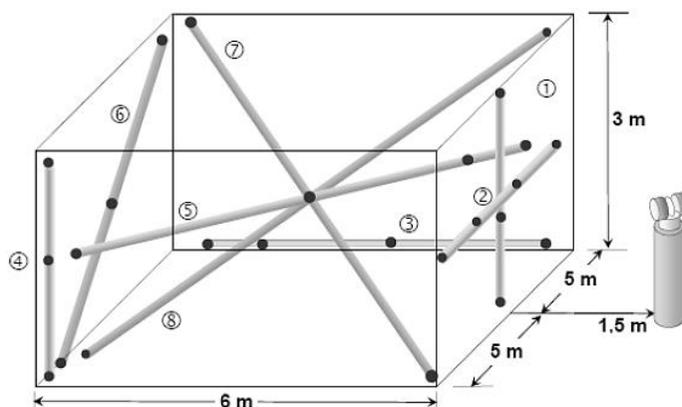


Figura 2.35. Posible disposición de líneas de medición en prueba de evaluación de error de medición de longitud (opción 2). Fuente: (VDI/VDE 2617- parte 10)

Como resultado de la prueba de evaluación, para cada una de las 105 líneas de medición, se calcula el error de medición de longitud, E_L , como la diferencia entre el valor medido y la longitud de referencia calibrada. Finalmente se compara este valor resultado con el valor máximo admisible suministrado por el fabricante, $E_{L,MPE}$.

c) Recomendación técnica VDI/VDE 2617- parte 10

En la recomendación técnica VDI/VDE 2617- parte 10 de 2009 se evalúa la magnitud máxima permitida del error de medición de longitud y de los errores de palpado de forma, tamaño y posición del equipo.

En referencia a los *ensayos para determinar los errores de palpado*, el error de palpado de forma P_F se define como el rango de las distancias radiales de la esfera gaussiana creada a partir de los puntos medidos. El error de palpado de tamaño P_S se calcula como la diferencia entre el diámetro de la esfera gaussiana asociada a las mediciones realizadas D_a y el diámetro calibrado de la esfera D_{Cal} . Finalmente, el error de palpado de posición P_L , se determina como la máxima distancia entre dos centros de la esfera de regresión calculada cuya posición fue medida mediante varios retrorreflectores. La esfera de regresión se calcula siempre por mínimos cuadrados y radio arbitrariamente elegido. Las fórmulas de cálculo de los errores se pueden observar en las ecuaciones (2-8) y (2-9).

$$P_F = R_{max} - R_{min} \quad (2-8)$$

$$P_S = D_a - D_{Cal} \quad (2-9)$$

El patrón que se utiliza en los ensayos de evaluación son esferas de cerámica o acero con diámetro entre 30 y 50 mm, cuyo error de forma debe ser en la medida de lo posible inferior a 1/5 del valor a medir. El número de posiciones a evaluar en el volumen de medida son tres, de manera que la distancia más corta de medida sea inferior a 2 m y la distancia más larga equivalga a 2/3 de la diagonal del volumen de medición del equipo. La tercera posición debe encontrarse aproximadamente en el punto medio de las dos anteriores. Se capturan 25 puntos por esfera uniformemente distribuidos y cubriendo al menos un hemisferio de la esfera, ver Figura 2.17 correspondiente a la norma ISO/CD 10360. Se recomienda la realización de la medida mediante interferómetro si el equipo lo permite.

Los errores de palpado obtenidos se comparan con el máximo error de palpado X_{MPE} suministrado por el fabricante, que es normalmente expresado como un valor dependiente de la longitud $\pm(A_P + D/K_P)$ siendo A_P y K_P constantes y D la distancia entre esfera y láser tracker.

El valor resultado del ensayo de evaluación de error de palpado será válido si se cumplen las siguientes ecuaciones (2-10) y (2-11) siendo U el valor de incertidumbre expandida de la medición según DIN EN ISO 14253-1.

$$|P_x| \leq |X_{MPE}| - U \quad \text{para el fabricante} \quad (2-10)$$

$$|P_x| \leq |X_{MPE}| + U \quad \text{para el usuario} \quad (2-11)$$

La *prueba de precisión volumétrica* caracteriza metrológicamente el láser tracker en su volumen de trabajo mediante la medición de una distancia calibrada. La norma recomienda utilizar un volumen de trabajo de dimensiones 10 m × 6 m × 3 m (largo, ancho, alto) pudiendo en caso de medición de piezas pequeñas reducirse a 5 m × 3 m × 2 m, permitiendo la norma no obstante utilizar volúmenes alternativos, ver Figura 2.35. Durante la medición, el láser tracker se posiciona centrado en el lado de mayor longitud del volumen a una distancia de 1.5 m con su cabezal equidistante de los extremos superior e inferior del volumen de medición.

Para ello se miden puntos colocados en ocho diferentes líneas de medida con un mínimo de tres distancias por línea a verificar, siendo 32 el número mínimo de distancias requeridas. Para cada distancia se deben realizar tres repeticiones, girando el láser tracker en torno a su eje vertical 120° antes de cada repetición. Las distancias a medir por línea se definen del siguiente modo: la distancia más corta debe ser al menos $1/10$ del más corto de los lados del volumen de trabajo y la más larga será mayor o igual a $2/3$ de la diagonal del volumen de trabajo. A lo largo de cada línea de medida, la distancia más larga seleccionada debe ser mayor o igual a $2/3$ de la distancia máxima permitida en la línea de medida analizada. Adicionalmente a estas 32 líneas de medida, se recomienda la medición de tres líneas adicionales de mayor longitud desde una posición central del volumen de trabajo. Durante las mediciones, el equipo puede permanecer fijo en su disposición del volumen de trabajo pero también se permite su reubicación a lo largo de la línea de medida a verificar, siempre que su posición y orientación respecto a la línea de medida se mantenga constante para cada una de las ocho a realizar durante el proceso, tal y como se observa en la Figura 2.36.

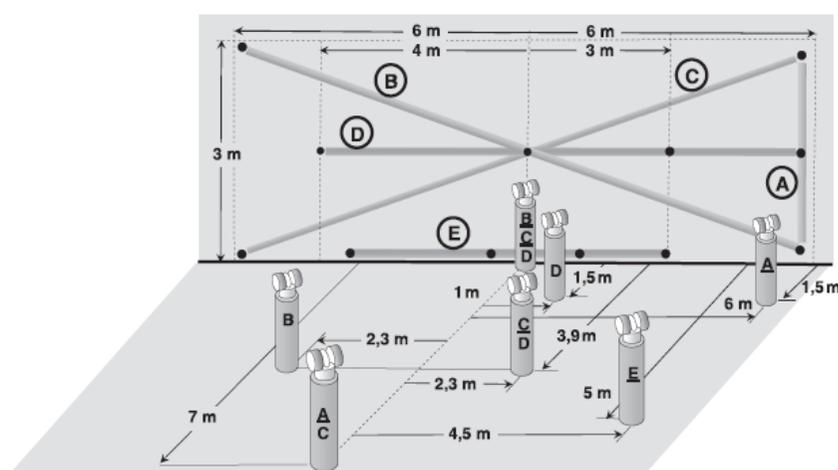


Figura 2.36. Disposición de líneas de medición en prueba de evaluación de error de medición de longitud con láser tracker en posición variable. Fuente: (VDI/VDE 2617- parte 10)

Las distancias a medir se materializan mediante patrones (bloques patrón, barras de bolas, nidos de esferas), comparadores de longitud o longitudes de referencia entre dos puntos de referencia que se colocan en distintas posiciones y orientaciones del volumen de medida. Las longitudes de referencia se determinan mediante equipos calibrados como interferómetros o un láser tracker adicional.

El cálculo del error de medición en distancia, E varía en función de la utilización en el ensayo de bloques patrón, barras de esferas, longitudes de referencia o comparadores de longitud, tal cual se puede apreciar en la Tabla 2.17.

El máximo error de palpado E_{MPE} suministrado por el fabricante, se indica bien como un valor dependiente de la longitud $\pm(A + L/K)$ siendo A y K constantes y L la longitud a medir, un valor máximo $\pm B$ o una combinación de ambos.

La evaluación del error en distancia es independiente de los patrones utilizados y es válida para todas las líneas de medida. Para ello se compara el error de medida en distancia obtenido, E , con su valor

máximo admisible E_{MPE} teniendo en cuenta la incertidumbre expandida de la medición U , según DIN EN ISO 14253-1 de acuerdo a las siguientes ecuaciones (2-12) y (2-13).

$$|E| \leq |E_{MPE}| - U \quad \text{para el fabricante} \quad (2-12)$$

$$|E| \leq |E_{MPE}| + U \quad \text{para el usuario} \quad (2-13)$$

Artefacts/test equipment	Schematic	Calculation of error of indication for size measurement, E (see also Section 4.2.4)
Gauge block or step gauge <ul style="list-style-type: none"> • bidirectional probing of two discrete points • no averaging 		$E = L_a - L_t \cdot (+E_{th})$ $E_{th} \neq 0$, if $\alpha < 2 \times 10^{-6} \frac{1}{K}$
Ball bar/ball beam <ul style="list-style-type: none"> • multiple probing of the spheres • thus: averaging and • elimination of systematic errors 		$E = SD + P_S + (\text{sgn}(SD + P_S)) \cdot P_F + E_{th}$ $E_{th} \neq 0$, if $\alpha < 2 \times 10^{-6} \frac{1}{K}$
Dismountable ball bar <ul style="list-style-type: none"> • multiple probing of the spheres • thus: averaging and • elimination of systematic errors • only segments are calibrated 		$E = \sum SD_i + P_S + (\text{sgn}(SD + P_S)) \cdot P_F + E_{th}$ $E_{th} \neq 0$, if $\alpha < 2 \times 10^{-6} \frac{1}{K}$
Wall with reference lengths/beam with ball nests <ul style="list-style-type: none"> • single-side probing of test length, thus • elimination of systematic errors, but • no averaging 		$E = L_a - L_t + P_S \cdot (+E_{th})$ $E_{th} \neq 0$, if $\alpha < 2 \times 10^{-6} \frac{1}{K}$
Length comparator <ul style="list-style-type: none"> • single-side probing of test length, • thus elimination of systematic errors, but • no averaging 		$E = L_a - L_t + P_S \cdot (+E_{th})$ $E_{th} \neq 0$, if $\alpha < 2 \times 10^{-6} \frac{1}{K}$

Tabla 2.17. Equipos de ensayo y fórmulas de cálculo del error de medición en distancia en prueba de evaluación de error de medición de longitud. Fuente: (VDI/VDE 2617- 10)

2.4 Patrones de calibración y verificación

Dentro de los procesos de calibración y verificación para instrumentos de medición portátiles de medición, es necesario disponer de elementos calibrados o patrones que permitan establecer las dimensiones de referencia con respecto a las cuales se calcularán los errores derivados del proceso de medición. En el caso de los brazos de medición por coordenadas, su uso proviene de los procedimientos de verificación de las máquinas de medición por coordenadas, donde la verificación se lleva a cabo mediante palpado de objetos patrón que materializan longitudes, de modo que el proceso sea lo más parecido posible a las condiciones de medida habituales. Existen una gran variedad de objetos patrón utilizados en la verificación de máquinas de medir por coordenadas, para los que se han desarrollado métodos de verificación y cálculo de los 21 errores geométricos, minimizando el número de posiciones del patrón necesarias, aprovechando la capacidad de movimiento de la máquina de medida en un solo eje del sistema de referencia global [22], [23], [24]. 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 estos ejes, 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 bolas), bidimensionales (placas de bolas o agujeros) y tridimensionales (cubos o tetraedros de bolas) tal y como se puede ver en la Figura 2.37. El uso de patrones que materializan más de una dimensión permite reducir el número necesario de colocaciones del patrón durante los procedimientos de verificación de las máquinas, ahorrando y disminuyendo tiempo y coste respectivamente. Por regla general, en máquinas de medir por coordenadas los patrones más utilizados son los patrones bidimensionales para procedimientos de verificación completa y los tridimensionales para comprobación rápida del estado de la máquina o en procedimientos de verificación interna periódica.

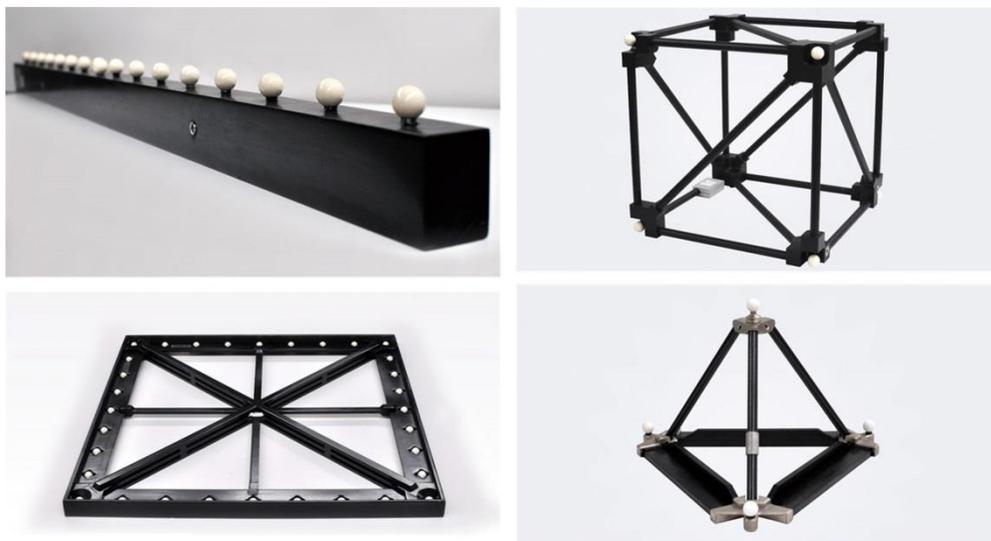


Figura 2.37. Tipos de patrones: barras, cubos, bases y tetraedros de bolas. Fuente: (Unimetrik S.A)

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 utilidad patrones unidimensionales sencillos que puedan moverse fácilmente alrededor del equipo adoptando unas posiciones definidas por la norma aplicable para la evaluación del brazo. Un ejemplo de este tipo de patrones son las barras de esferas rígidas, que permiten la materialización de distancias entre ellas y son de gran utilidad en los procedimientos de calibración y verificación de brazos. Es importante destacar que el sistema de sujeción y soporte debe ser adecuado para que la influencia del amarre y la gravedad sea mucho menor que la provocada por la propia fuerza de palpado. Igualmente el material y diseño del patrón deben ser tales que minimicen la influencia de variables externas. Los patrones unidimensionales deben ser rígidos y térmicamente estables, de modo que mantengan constante la distancia entre bolas o asientos al ser dispuestos en diferentes orientaciones y posiciones dentro del campo de medida del brazo de medida y en ambientes de trabajo donde la temperatura varíe significativamente. Materiales utilizados frecuentemente son la fibra de carbono o el invar. Otra alternativa a los patrones unidimensionales, son los patrones bidimensionales raramente utilizados o tridimensionales utilizados en procedimientos de verificación rápida.

El desarrollo de nuevos patrones y técnicas de verificación y calibración de brazos de medición por coordenadas es un campo de trabajo continuo en el cual se encuentran numerosos trabajos publicados. Como se ha mencionado anteriormente al respecto de los patrones unidimensionales, los patrones de barras de esferas son los más usuales debido a su fácil utilización, flexibilidad de posicionamiento, alta precisión y bajo coste comparado con otros tipos de patrones. Las normas que determinan procedimientos de evaluación de brazos de medición por coordenadas como [2]–[4] especifican este tipo de patrones en sus procedimientos de verificación. En [25] como se muestra en la Figura 2.38, los autores desarrollaron un instrumento de medición de alta precisión basado en una barra, elementos móviles y un interferómetro que mide desplazamientos a lo largo del eje X que servirán posteriormente a modo de distancias para evaluar el error de medición del brazo.

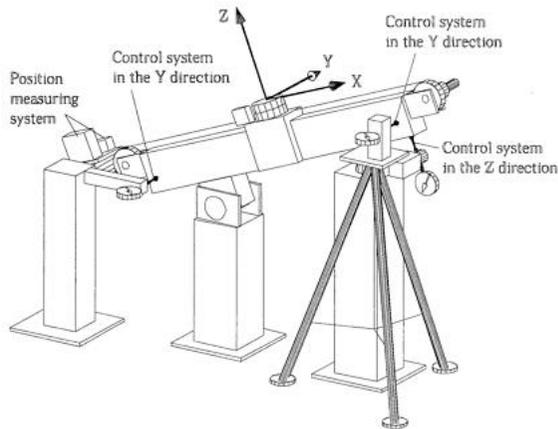


Figura 2.38. Modelo instrumento medición basado en barra e interferómetro. Fuente: (Kovac & Frank, 2001).

En [26] los autores establecen un sistema de simulación denominado brazo articulado virtual que permite la evaluación de la precisión de la medición y la determinación de matrices de compensación usando patrones lineales como barras de esferas. Igualmente Santolaria et al. [9], [27]–[30] han

reportado métodos de calibración para brazos de medición haciendo uso de barras patrón de esferas posicionadas en múltiples posiciones y orientaciones del espacio de trabajo del brazo.

En lo que respecta a patrones tridimensionales, Shimojima et al. [31] presentan un método para estimar la incertidumbre de un brazo de medición, mediante el uso de una placa con nueve esferas fijas localizadas a diferentes alturas sobre la superficie metálica de la placa, la cual es medida con el brazo de medida en cinco posiciones y orientaciones con respecto al brazo. Las distancias entre los centros de las esferas medidas con el brazo se comparan con las distancias nominales obtenidas con una máquina de medir por coordenadas para evaluar la precisión en las mediciones del brazo. Un enfoque similar con patrones tridimensionales es utilizado en [32].

El uso de asientos cinemáticos en procedimientos de calibración de brazos es también común y presenta numerosas ventajas como se observa en trabajos como [33], en el cual se utilizan para estimar la repetibilidad de punto del brazo. En [34] se propone una placa con asientos cinemáticos como patrón para la calibración de un brazo de medición por coordenadas.

Por otra parte, Piratelli [35] introduce el concepto de patrón de geometría virtual, denominada barra de esferas virtuales para evaluar brazos de medición. El patrón propuesto consiste en una barra con cuatro agujeros cónicos en cada extremo de la barra, los cuales sirven como asiento para el palpador del brazo de medida. Para calcular la esfera virtual se capturan con el palpador del brazo cuatro puntos sobre los agujeros cónicos, uno por agujero, y a través de un procedimiento de optimización se ajustan a una esfera virtual. Conocidas las esferas virtuales, el autor calcula las distancias entre ellas y las compara con las distancias nominales para determinar la precisión de medida del brazo tal cual se aprecia en la Figura 2.39.

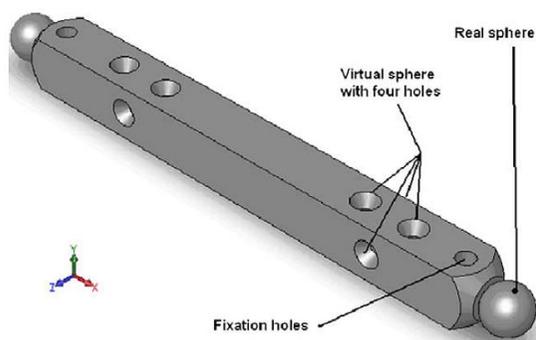


Figura 2.39. Patrón de calibración de geometría virtual. Fuente: (Piratelli & Lesnau, 2010).

En trabajos posteriores del mismo autor, [36], se diseña una placa de esferas virtuales definida por 16 grupos de cuatro agujeros cónicos fabricados sobre ella como se muestra en la Figura 2.40. En cada uno de los grupos de agujeros cónicos se palpan cuatro puntos y se calcula el centro de 16 esferas virtuales colocando la placa en tres orientaciones diferentes con respecto al brazo de medida. La distancia virtual calculada entre el centro de las esferas virtuales ajustadas por mínimos cuadrados en cada una de las orientaciones se compara con la distancia nominal, calculada con una máquina de medir por coordenadas, para determinar la precisión del brazo de medida.

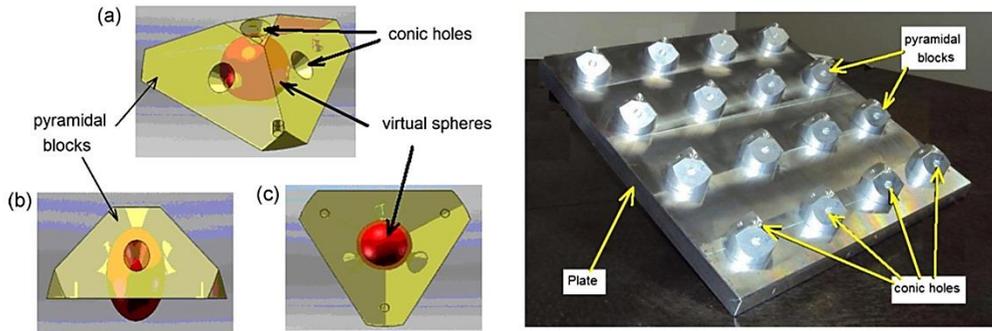


Figura 2.40. Patrón de placa de esferas virtuales. Fuente: (Piratelli et al. 2012).

Como se menciona en [35] el concepto de esfera virtual se desarrolla y aplica para reducir el número de posiciones de ensayo del patrón respecto a lo especificado en los diferentes estándares existentes de evaluación de brazos de medición [2], [3] y [4], incrementando de este modo la eficiencia de estos procedimientos de verificación de brazos. Otra aproximación a este concepto utilizando un círculo virtual en lugar de una esfera virtual como se propone en [35], es presentado por González et al. [37], [38]. Para ello se fabricaron dos patrones de aleación de aluminio anodizado con forma de T invertida y una longitud de 1000mm, en los cuales se mecanizaron cuatro grupos de tres puntos mediante agujeros cónicos que servirán para determinar el círculo virtual, ver Figura 2.41 . Estos cuatro grupos materializan dos distancias 500 mm (círculos 1 y 2) y 920 mm (círculos 3 y 4) respectivamente. El diámetro del círculo virtual no requiere de calibración ya que únicamente la dispersión entre las medidas es tenida en consideración.

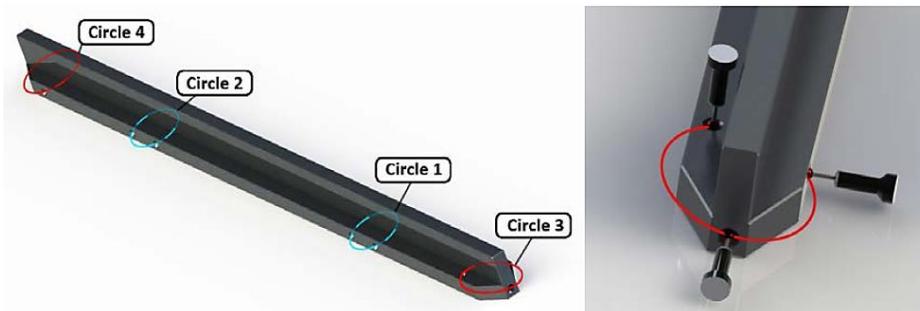


Figura 2.41. Patrón de aluminio con círculos virtuales. Fuente: (González et al. 2013).

El hecho que un brazo de medición sea operado de manera manual y que un mismo punto pueda ser medido desde múltiples posiciones y orientación del brazo, presenta muchas ventajas pero también genera que su repetibilidad y precisión sean menores que en máquinas de medición por coordenadas convencionales. En relación con este punto y con objeto de identificar de manera precisa las características metrológicas del brazo, Cuesta et al. [39] , desarrollan un novedoso patrón para calibración y verificación de brazos de medición de coordenadas que incorpora múltiples geometrías integradas en el mismo patrón físico tal y como se aprecia en la Figura 2.42. Igualmente incorpora agujeros cónicos mecanizados en los extremos del patrón que permitirán la medición de distancias entre centros y obtener los diámetro de las esferas virtuales construidas.

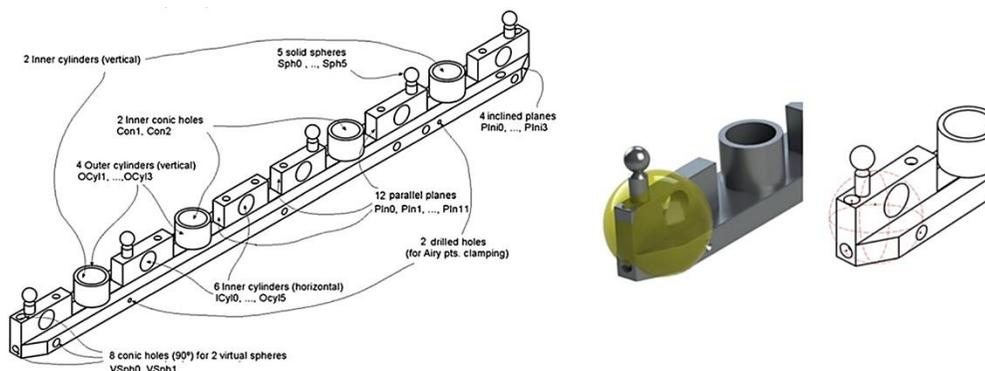


Figura 2.42. Patrón con múltiples geometrías integradas. Fuente: (Cuesta et al. 2014).

En [40] se describe un procedimiento de identificación de parámetros para brazos de medida y se realiza una aproximación al problema de determinación de incertidumbre de medida de brazos articulados. Este estudio se centra en el tipo de patrón a utilizar en función de la configuración del brazo, analizando el mínimo número de posiciones de medida necesarias para identificación y las posibles configuraciones del patrón a utilizar. Hamana et al. [41] utilizan un artefacto consistente en una barra con dos rodamientos esféricos, ver Figura 2.43, que se acoplan a una máquina de medir por coordenadas en un extremo y al brazo de medida en el otro extremo, en ambos casos sustituyendo a un palpador. De este modo el centro de la esfera es medido con la máquina de medir por coordenadas y comparado con la lectura obtenida por el brazo.

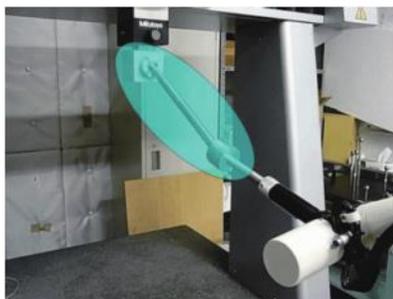


Figura 2.43. Barra con rodamientos esféricos acoplada a CMM y brazo de medición. (Hamana et al. 2011).

En lo que respecta a patrones para *laser trackers*, es en las normas de verificación aplicables a *laser tracker* [5], [6] y [7] donde se encuentran descripciones específicas acerca de los patrones a utilizar en procesos de calibración y verificación de estos equipos de medición.

En primer lugar, se describen los patrones convencionales tales como bloques calibrados o barras de esferas que incluyen esferas individuales u otro tipo de geometrías con caras paralelas o esféricas. Los patrones deben estar fabricados en materiales con bajo coeficiente de expansión térmica y su incertidumbre calibrada debe ser menor que el máximo error permisible especificado por el fabricante del *laser tracker*. Sin embargo, debido a la necesidad de utilización de patrones de gran longitud, en ocasiones estos patrones no son fabricables o no pueden mantener esa alta precisión requerida durante el proceso de medición, debido a influencias como la gravedad o el efecto de las fijaciones en caso de

utilizar patrones físicos de esa longitud. Es por ello que en procedimientos de calibración y verificación de láser tracker se utiliza el concepto de longitudes de referencia, definido como distancia entre dos puntos de referencia. Como norma general, esas distancias deben ser determinadas previamente mediante instrumentos de medición calibrados. Por ejemplo, pueden ser puntos de referencia los centros de retrorreflectores posicionados en soportes rígidos, superficies de apoyo, paredes o similares, creando en caso de utilización de varios retrorreflectores el concepto de nidos de retrorreflectores. Para determinar la longitud de referencia L , se miden las posiciones de los retrorreflectores que materializan el punto inicial P_1 y el final P_2 de la longitud mediante instrumentos de medición como puede ser un interferómetro o un segundo equipo de láser tracker convenientemente calibrados tal cual se muestra en la Figura 2.44. La determinación del punto inicial puede calcularse mediante ADM (*absolute distance measurement*) y la posición final mediante interferómetro, haciendo que el cálculo de la longitud de referencia tenga la precisión necesaria.

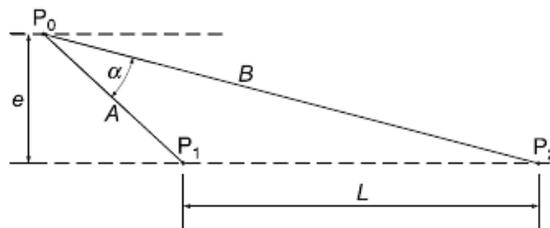


Figura 2.44. Determinación de longitud de referencia L , desde posición de láser tracker P_0 . Fuente: (VDI/VDE 2617- parte 10)

Otro procedimiento alternativo especificado en [6] para generar longitudes de referencia, se basa en desviar el rayo láser emitido por un láser tracker de manera que el rayo pase en línea recta por dos retrorreflectores cuya distancia entre centros determina la longitud de referencia. Cuando un retrorreflector se mueve, la distancia entre el reflector y el láser tracker varía. El desvío del haz del láser se realiza por medio de un espejo inclinado tal y como puede observarse en la Figura 2.45 a continuación.

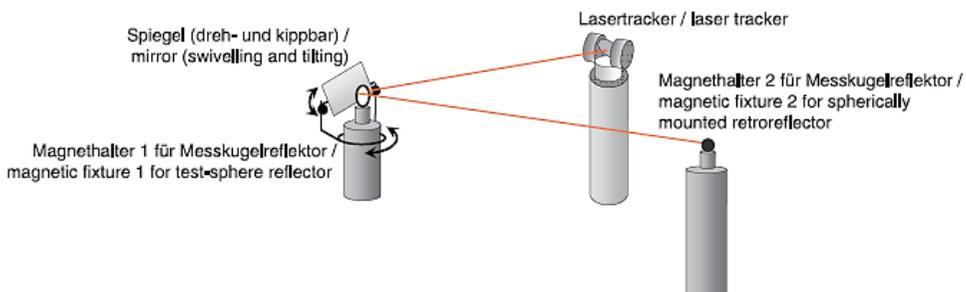


Figura 2.45. Procedimiento para establecer longitud de referencia usando un espejo inclinado. Fuente: (VDI/VDE 2617- parte 10)

Adicionalmente ASME B89.4.19 [5] e ISO/CD10360-10 [7] incluyen conceptos de definición de longitudes de referencia mediante guías láser lineales. Estas guías disponen de soportes móviles donde se colocan los retrorreflectores y las mediciones se realizan mediante un interferómetro independiente

del láser tracker, ver Figura 2.46. Normalmente se utilizan dos retroreflectores en la guía láser, uno es usado por el interferómetro para medir el desplazamiento de la parte móvil de la guía y el segundo es el target para el láser tracker a calibrar. Es importante asegurar la correcta alineación del sistema de guía láser evitando errores de Abbe que impedirían la correcta y análoga medición de interferómetro y láser tracker. Una configuración real de ensayo con láser tracker e interferómetro sobre la guía lineal utilizada en pruebas de medición de longitud según norma [5] realizada en trabajos del NIST (*National Institute of Standards and Technology*) [42] puede observarse en la Figura 2.47.

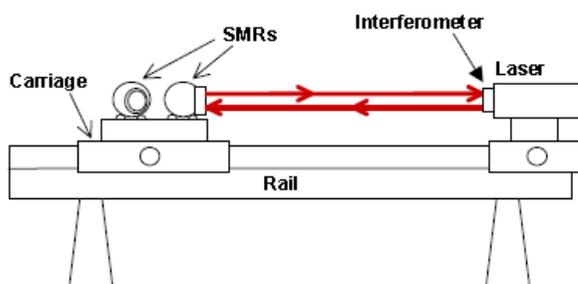


Figura 2.46. Esquema de guía lineal de medición láser en configuración horizontal de medición. Fuente: (ASME B89.4.19)



Figura 2.47. Configuración ensayo de medición de longitud según ASME B89.4.19. Fuente: (Phillips, S.D, 2011)

Unkuri et al. [43] presentan en su trabajo el desarrollo de una guía lineal de 30 m con medición interferométrica desarrollada por el Instituto Nacional de Metrología de Finlandia. La guía está compuesta por dos ejes paralelos con útiles ajustables cada metro, dispone de una bancada móvil donde se posicionan los retroreflectores en función de la tarea de medición a realizar y ofrece una incertidumbre expandida estimada de $2.6 \mu\text{m}$ para 30 m de desplazamiento. Dispone de mecanismo de corrección del error de Abbe y su principal aplicación es la calibración de equipos de medición de alto rango tales como láser trackers o estaciones totales. En la siguiente imagen se puede observar la configuración de un ensayo tipo en la guía lineal para calibración de un equipo de láser tracker.

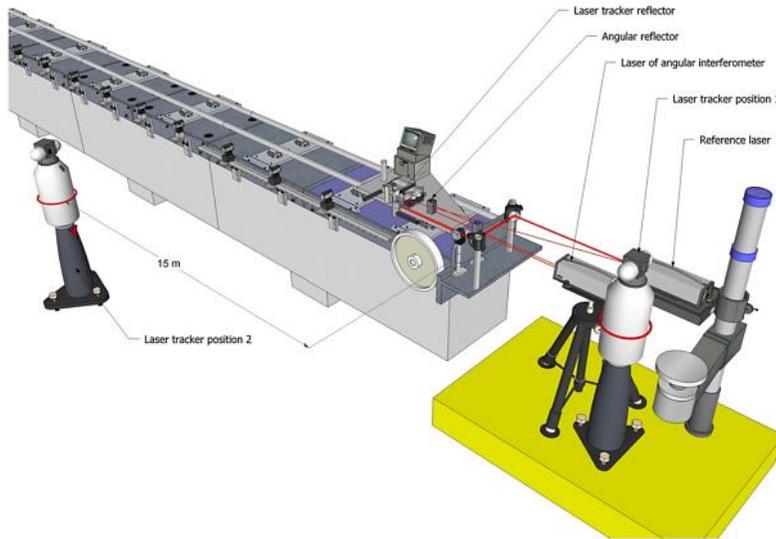


Figura 2.48. Configuración de ensayo para calibración de láser tracker. Fuente: (Unkuri et al, 2012)

Otros ejemplos gráficos de los conceptos de patrones utilizados en calibración de equipos de láser tracker previamente mencionados pueden verse en la Tabla 2.17 extraída de la norma VDI/VDE 2617- parte 10.

2.5 Conclusiones

A lo largo de este capítulo se ha hecho una amplia revisión del estado del arte referente a instrumentos de medición portátiles, brazos de medición por coordenadas y láser trackers, analizando las tecnologías disponibles, prestaciones y características metrológicas de los modelos existentes de los principales fabricantes en el mercado. Adicionalmente se ha presentado el concepto de plataforma multi-registro como método alternativo de evaluación de estos equipos de medición frente a los procedimientos convencionales contemplados en la normativa aplicable. La plataforma, dotada de una alta precisión y repetibilidad de posicionamiento mecánico, permite en su uso conjunto con brazos de medición y láser tracker, reducir el tiempo de ensayos y facilita el procedimiento de evaluación de estos equipos debido a la reducción de movimientos y posiciones de los patrones de verificación utilizados. Como base de estos ensayos de verificación se utilizan las normativas ASME B89.4.19-2006, VDI/VDE 2617-2011 parte 10 y el borrador de ISO/CD10360-10 aplicable a láser trackers y ASME B89.4.22-2004, VDI/VDE 2617-2009 parte 9 y borrador ISO/CD 10360-12 para brazos de medición. Todas ellas se han analizado y comparado creando un marco de referencia base en los procedimientos de verificación. Finalmente, se llevó a cabo una revisión de estado del arte referente a patrones de verificación para brazos articulados de medición por coordenadas y láser trackers.

3 Modelado cinemático de sistemas de medición portátiles

3.1 Introducción

En el presente capítulo se aborda el modelado cinemático de los dos sistemas de medición portátiles objeto de la tesis, brazo de medición por coordenadas y laser tracker, así como de la plataforma multi registro sobre la que se posicionan cada uno de los dispositivos en los procedimientos de calibración y verificación ensayados. El objeto para cada uno de los sistemas de medición portátiles analizados será 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 ello se situarán sistemas de referencia en distintos lugares del brazo, laser tracker y plataforma multi-registro siguiendo una serie de reglas predefinidas que permitan obtener, mediante combinación de parámetros geométricos la relación entre dos sistemas de referencia sucesivos. La posición y orientación del sistema para cualquier posición de sus articulaciones con respecto al sistema de referencia global del equipo, se obtiene enlazando de sistemas de referencia sucesivos mediante 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 finalmente la relación entre el sistema global de referencia y la orientación y posición final del palpador en caso del brazo de medición por coordenadas, del sistema de referencia del rayo reflejado para el láser tracker o la parte móvil de la plataforma multi-registro. Un modelo cinemático directo puede formularse según la siguiente ecuación (3-1).

$$Y = f(\theta_i, p) \quad (3-1)$$

con i desde 1 hasta n para un sistema de n articulaciones giratorias. Este modelo calcula la posición y orientación final del sistema y en función del valor de las variables de articulación θ_i y de las ecuaciones del modelo definidas en f , que dependen del vector de parámetros p . El vector de parámetros contiene los parámetros geométricos del modelo, que deben ser optimizados para obtener el menor error posible de posicionamiento. En función del modelo geométrico escogido, la forma de obtener las ecuaciones en f cambia, así como el número de parámetros geométricos necesarios a incluir en p . Los modelos cinemáticos determinados en este trabajo son modelos cinemáticos directos tanto para el brazo de medición por coordenadas, como para láser tracker y plataforma multi-registro. Los modelos

cinemáticos inversos persiguen obtener las variables de las articulaciones a partir de la posición y orientación final del sistema tal y como aparece en la ecuación 3.2.

$$\theta_i = f^{-1}(y, p) \quad (3-2)$$

A continuación se introducirán los conceptos teóricos fundamentales de la transformación de coordenadas, necesarios para definir el modelo cinemático de los sistemas de medición portátiles previamente mencionados, para pasar posteriormente a la realización del modelado cinemático aplicando el modelo Denavit-Hartenberg a los tres equipos de medición. La obtención del conjunto de parámetros nominales de los tres modelos, servirá como punto de partida para la definición de los valores iniciales de parámetros en el posterior procedimiento de optimización. Los parámetros de los modelos cinemáticos se midieron físicamente en la máquina de medir por coordenadas, hecho que redundará en un mejor resultado de los métodos de optimización.

3.2 Representación de la orientación y posición

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

La expresión matemática para describir la posición de un cuerpo con respecto a su localización en su propia base (referencia) se define por un vector de posición $[3 \times 1]$ que se describe en la ecuación (3-3).

$$p = \begin{pmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{pmatrix} = p_{0x} i_0 + p_{0y} j_0 + p_{0z} k_0 \quad (3-3)$$

Con i, j, k vectores unitarios en la dirección de los ejes x, y, z del sistema de referencia establecido (x_0, y_0, z_0) . La transformación de coordenadas del punto p respecto al sistema (x_1, y_1, z_1) a las coordenadas del sistema de referencia (x_0, y_0, z_0) se pueden representar mediante la matriz de rotación $R_{0/1}$ si los dos sistemas de referencia comparten un origen común.

$$p_0 = R_{0/1} \cdot p_1 \quad (3-4)$$

$$\begin{bmatrix} p_{0x} \\ p_{0y} \\ p_{0z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_1 \cdot i_0 + i_1 \cdot j_0 + i_1 \cdot k_0 \\ i_2 \cdot i_0 + i_2 \cdot j_0 + i_2 \cdot k_0 \\ i_3 \cdot i_0 + i_3 \cdot j_0 + i_3 \cdot k_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_{1x} \\ p_{1y} \\ p_{1z} \end{bmatrix} \quad (3-5)$$

Análogamente se puede encontrar la matriz de transformación inversa del sistema de referencia (x_0, y_0, z_0) al sistema (x_1, y_1, z_1) del siguiente modo.

$$R_{1/0} = (R_{0/1})^{-1} \quad (3-6)$$

Mediante la matriz de rotación R , es posible representar rotaciones del sistema de coordenadas respecto a uno de los ejes del sistema de coordenadas de referencia (x_0, y_0, z_0) . La orientación del

sistema de referencia (x_1, y_1, z_1) , con el eje O_x coincidente con el eje x del sistema de referencia (x_0, y_0, z_0) cuando el sistema de referencia gira un ángulo α respecto al eje O_x viene determinado por la matriz de rotación $R_{x,\alpha}$, ecuación (3-7). Análogamente las matrices de rotación $R_{y,\varphi}$ ecuación (3-8) y $R_{z,\theta}$ ecuación (3-9) que representan las rotaciones respecto al eje O_y con ángulo φ y respecto al eje O_z con ángulo θ .

$$R_{x,\alpha} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (3-7)$$

$$R_{y,\varphi} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & 0 & \sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{bmatrix} \quad (3-8)$$

$$R_{z,\theta} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-9)$$

La Figura 3.1 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) .

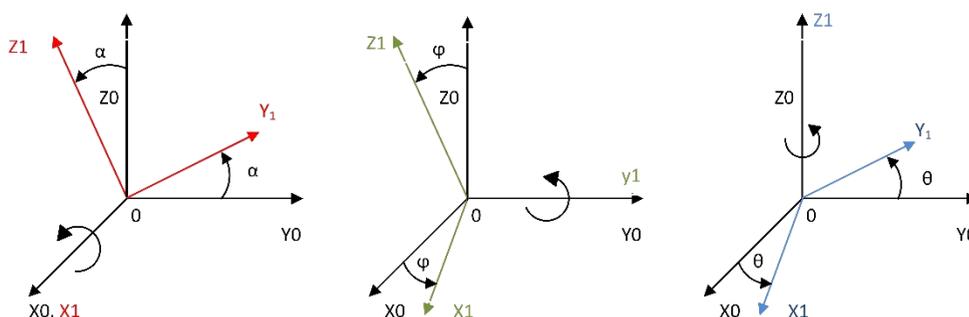


Figura 3.1. Rotaciones del sistema (x_1, y_1, z_1) respecto al sistema (x_0, y_0, z_0) .

Estas tres matrices $R_{x,\alpha}$, $R_{y,\varphi}$ y $R_{z,\theta}$ se denominan matrices de rotación básicas pudiéndose obtener a partir de ellas otras matrices de rotación en caso de rotación compuesta. Considerando un giro del sistema de coordenadas respecto a un sistema ya girado y teniendo en cuenta que el producto de matrices de rotación no es conmutativo, se puede obtener una matriz de rotación $R_{0/2}$, ecuación (3-10), que representa una rotación del sistema (x_1, y_1, z_1) relativo al sistema (x_0, y_0, z_0) para luego girar el sistema (x_2, y_2, z_2) respecto al sistema (x_1, y_1, z_1) previamente girado.

$$R_{0/2} = R_{0/1} \cdot R_{1/2} \quad (3-10)$$

Asimismo la matriz R , ecuación (3-11), representaría un giro de φ grados alrededor del eje y , seguido de un giro de θ grados alrededor del eje z actual ya girado.

$$R=R_{y,\varphi}R_{z,\theta}=\begin{bmatrix} \cos \varphi \cos \theta & -\cos \varphi \sin \theta & \sin \varphi \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ -\sin \varphi \cos \theta & \sin \varphi \sin \theta & \cos \varphi \end{bmatrix} \quad (3-11)$$

3.3 Representación según modelo de Denavit - Hartenberg

El modelo propuesto por Denavit y Hartenberg (D-H) [1] en 1955 es uno de los métodos básicos e iniciales surgidos para modelado cinemático de brazos articulados y otros mecanismos con varios grados de libertad, determinado la relación entre sucesivos sistemas de referencia a partir de sus características geométricas. A pesar de su existencia desde 1955 sigue estando vigente en trabajos actuales y se ha utilizado como base de modelos posteriormente desarrollados. El modelo, como puede verse en la Figura 3.2 determina completamente la configuración cinemática de cada elemento de la cadena mediante cuatro parámetros geométricos d_i , a_i , θ_i y α_i , que permiten conocer la relación entre dos sistemas de referencia. Los dos primeros hacen referencia a dimensiones longitudinales entre sistemas de referencia sucesivos, mientras que los otros dos son ángulos de giro entre dichos sistemas.

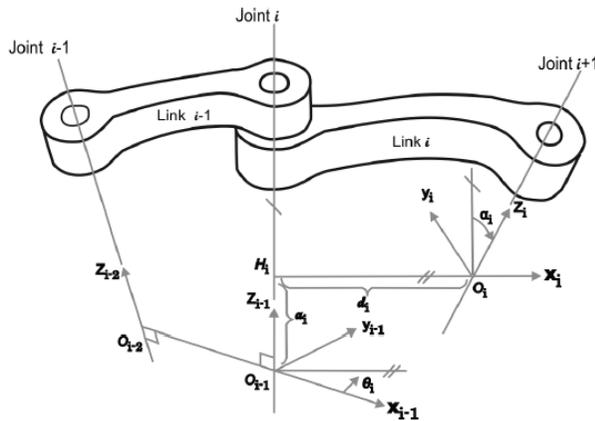


Figura 3.2. Modelo Denavit – Hartenberg. Fuente (Denavit-Hartenberg, 1955)

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

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

En el caso de articulaciones giratorias d_i , a_i , α_i permanecen constantes mientras que θ_i cambia cuando el elemento i gira respecto al $i-1$. En articulaciones prismáticas a_i , α_i , θ_i permanecen constantes mientras

que d_i cambia cuando el elemento i se traslada respecto a $i-1$. Los sistemas de referencia se determinan teniendo en cuenta que el eje z_{i-1} se dispone a lo largo del eje de la articulación, el eje x_i es normal al eje z_{i-1} y el eje y_i se obtiene mediante el producto vectorial de los anteriores.

Mediante estos cuatro parámetros independientes el modelo da lugar a una matriz de transformación homogénea 4×4 (3-12) que representa la relación geométrica entre un sistema de referencia y el anterior cuya forma general es:

$$A = \begin{pmatrix} R_i & T_i \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3-12)$$

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

$$\bar{X}_{i-1} = A_i \bar{X}_i \quad (3-13)$$

Mediante la ecuación (3-13) será posible expresar un punto de coordenadas conocidas en el sistema de referencia i , en el sistema de referencia $i-1$. El uso de matrices homogéneas hace que los vectores X de la ecuación (3-13) 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 representación 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 nuestro caso, permite realizar una transformación de perspectiva de los puntos, mientras que el último elemento de la diagonal principal es un factor de escala. Ambos elementos se usan ampliamente en transformaciones geométricas de modelos CAD, usando una sola matriz que contenga información de la rotación, la traslación, la transformación de perspectiva y el factor de escala a aplicar sobre los puntos que definen el modelo.

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 permitirá obtener en el sistema de referencia global las coordenadas de un punto definido por la esfera del palpador del brazo de medida respecto al último sistema de referencia. 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 a $i-1$, 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) . En el caso de la existencia de n ejes, se definirán $n+1$ sistemas de referencia.

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 con 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 la articulación. Alinear el 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 a lo 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 del eje x_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 siguiente (3-14):

$$\begin{aligned}
{}^{i-1}A_i &= T_{z,d}, T_{z,\theta}, T_{x,a}, T_{x,\alpha} = \\
&= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 & 0 \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_i & -\sin \alpha_i & 0 \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \\
&= \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\cos \alpha_i \sin \theta_i & \sin \alpha_i \sin \theta_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \alpha_i \cos \theta_i & -\sin \alpha_i \cos \theta_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-14)
\end{aligned}$$

La matriz (3-14) 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.

$$P_{i-1} = {}^{i-1}A_i P_i \quad (3-15)$$

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:

$${}^0T_i = {}^0A_1 {}^1A_2 \dots {}^{i-1}A_i \quad (3-16)$$

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 (3-17).

$$\bar{X}_{brazo} = {}^0T_7 \bar{X}_{palpador} \quad (3-17)$$

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.

Si bien el modelo de Denavit – Hartenberg ha sido ampliamente aplicado al modelado cinemático de múltiples sistemas tales como robots o brazos de medición por coordenadas, presenta una indeterminación en caso de existencia de articulaciones consecutivas con ejes paralelos ya que no existiría una única normal común entre ellos. En un sistema que disponga de articulaciones

consecutivas, éste no tendrá en la realidad por construcción ejes perfectamente paralelos y esta falta de paralelismo genera que la normal común esté situada a una distancia mayor que la asumida en el modelo. Por lo tanto, en caso de ejes consecutivos paralelos o casi paralelos, los parámetros geométricos resultantes no son continuos y pequeñas variaciones en las alineaciones de los ejes pueden producir grandes variaciones en los parámetros geométricos, hecho que hace que no se cumplan dos de las características que debe cumplir un modelo matemático para su uso en un proceso de calibración. Numerosos métodos han sido desarrollados a lo largo del tiempo para solucionar esta indeterminación que hace no completo el modelo de D-H, formulando modificaciones al mismo que incluyen cuatro, cinco, seis o más parámetros. La primera aproximación al problema es aportada por Hayati-Mirmirani [44] en 1985. Los 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. Modelos de cinco parámetros fueron también propuestos por Hayati [45] para articulaciones prismáticas. Hsu and Everett [46], [47]–[49] y [50] presentan modelos con cinco parámetros aplicables a cualquier tipo de articulación. En [51] se 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. Se obtiene una solución a la indeterminación del modelo de D-H pero con un modelo no proporcional. Modificaciones al modelo de D-H fueron también aportadas por Driels and Pathr [52]. Los trabajos de investigación recogidos en [53] muestran un modelo mixto basado en D-H y la notación de [45] en el cual se usan diferentes parámetros en función del tipo de articulación para evitar indeterminaciones. El modelo CPC (*complete and parametrically continuous model*) desarrollado en [54], [55] añade dos parámetros adicionales como realiza [51] para modelizar la posición arbitraria de los sistemas de referencia.

Gong et al. [56] 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 [45]. Análogamente y siguiendo este modelo de D-H modificado, Santolaria et al. [57] muestran un nuevo método de calibración aplicado a un robot Kuka KR5 que pretende incrementar la precisión del robot analizando errores cinemáticos y dinámicos. Del mismo autor [58] se presenta un procedimiento de calibración de robots con láser tracker mediante el método de CPA (*circle point analysis*) [59] 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. En [60] los autores proponen la calibración de un robot mediante un hexápodo 3-3 consistente en un barra de bolas telescópica y modelado cinemático del robot basado en el modelo de D-H modificado.

Sin embargo, otros autores propusieron modelos alternativos al modelo de D-H. Chen and Chao [61] incluyen los efectos de los errores no geométricos en la precisión de robots modelizando estos errores mediante el modelo de Sheth-Uicker [62], enfoque que siguen igualmente otros autores [63]

presentando procedimientos de corrección de los errores geométricos de robots y reevaluando sus parámetros cinemáticos con este mismo modelo alternativo. 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 Tau et al. [64] y Yang et al. [65] a generar modelos cinemático de robots basado en POE (*product of exponentials*).

En relación a los procedimientos de calibración para brazos de medición, es necesario destacar que implican la generación de un modelo cinemático del mismo basado en la propia estructura del brazo que por diseño no presenta ejes consecutivos paralelos que generen la indeterminación del modelo de D-H anteriormente mencionada. Por lo tanto, muchos autores utilizan D-H como modelo de referencia para la definición de la cadena cinemática en brazos articulados de medición. Ejemplos de aplicación del modelo de D-H clásico pueden verse en numerosa bibliografía científica relativa a brazos de medición donde se establecen modelos de corrección para fuentes de error no geométricas como la temperatura [28], nuevos procedimientos de calibración mediante multilateralización con cuatro LTs que persiguen optimizar los parámetros del modelo para incrementar la precisión del brazo [29], técnicas de captura de datos para la identificación de parámetros del modelo cinemático de un brazo y la posterior estimación y corrección del error de medida basada en un modelo de repetibilidad de series de Fourier [27] y otros trabajos [9], [66]. Hamana et al. [41] proponen modificaciones a los parámetros de D-H considerando las deformaciones que puede sufrir el brazo dependiendo de su posición y zona afectada del mismo. Igualmente lo incluyen en sus estudios de identificación y compensación de errores en brazos de medida los siguientes autores [26],[31] y [67].

Finalmente también se puede encontrar aplicación del modelo de Denavit – Hartenberg al modelado cinemático de láser trackers en [68], donde se desarrolla el modelo cinemático y se presenta un nuevo algoritmo que permite realizar la identificación de parámetros de un láser tracker, mejorando la precisión del sistema.

3.4 Descripción cinemática del brazo articulado de medición por coordenadas

Los brazos de medida guardan una gran similitud con los brazos robot industriales. Debido a estas similitudes de funcionamiento, mecánicas y constructivas, el modelado matemático de los brazos de medida se ha basado desde sus inicios en los modelos cinemáticos existentes para brazos robot. De este modo, en los brazos articulados de medir por coordenadas, es posible definir un modelo cinemático como una relación matemática sistemática entre todas y cada una de las articulaciones que forman su estructura y la posición y orientación del palpador. Este modelo constituye un estudio analítico de la geometría del movimiento del brazo de medida, basado en colocar sistemas de referencia en distintos lugares del brazo siguiendo una serie de reglas predefinidas que permitan obtener, mediante combinación de parámetros geométricos, la relación entre dos sistemas de referencia sucesivos. Por consiguiente será posible conocer la posición y orientación del palpador en el extremo del brazo para cualquier posición de sus articulaciones, con respecto al sistema de referencia global del brazo de medida. Las relaciones locales entre dos sistemas de referencia sucesivos se representan mediante matrices de giro y traslación que expresan estas relaciones geométricas en función de variables que permiten describir cualquier cambio en la posición y orientación del palpador. Con esto, las entradas del modelo matemático son, por un lado las variables que describen la geometría del brazo y por otro los ángulos girados por cada articulación en cada momento. De este modo, para cada valor de estas variables, es posible determinar la relación entre la posición y orientación del palpador y el sistema de referencia global del brazo de medida.

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.



Figura 3.3. Brazo de medida FARO Platinum montado sobre plataforma multi-registro

3.4.1 Modelo cinemático y determinación de parámetros nominales

Tal como se ha explicado en el apartado 3.3, se va a utilizar el modelo de D-H para la realización del modelado cinemático del brazo FARO Platinum utilizado en este trabajo debido a que puede aplicarse perfectamente para cualquier brazo articulado de medición actual. El objetivo es generar un modelo matemático, con parámetros mensurables y aplicar técnicas de identificación de parámetros para optimizar el error. Para la completa determinación de la cadena cinemática del brazo y considerando que el brazo analizado no tiene articulaciones con ejes paralelos consecutivos, que producirían una indeterminación sobre los parámetros geométricos del modelo D-H, se van a utilizar los cuatro parámetros d_i , a_i , θ_i y α_i necesarios para establecer la transformación geométrica entre sistemas de referencia en el modelo D-H básico.

El procedimiento consistirá en la generación del modelo propiamente dicho, la definición y posicionamiento de los sistemas de referencia en las distintas articulaciones del brazo articulado de medida y la determinación de los valores iniciales de los parámetros geométricos utilizados en el modelo matemático. Ninguno de estos datos son suministrados por el fabricante FARO y deben ser generados en este trabajo. Como primer paso una vez seleccionado el modelo de D-H a utilizar, se debe definir 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. Por lo tanto, se debe utilizar un parámetro más adicional θ_{0i} que 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 del encoder. De este modo, tal como muestra la Figura 3.4 y la ecuación (3-18), el valor de este parámetro θ_{0i} será la referencia para el modelo. El valor de giro de la articulación en el modelo implementado $\theta_{iModelo}$, será la diferencia entre el valor de giro leído por el encoder $\theta_{iEncoder}$ respecto a su posición de referencia y el parámetro θ_{0i} .

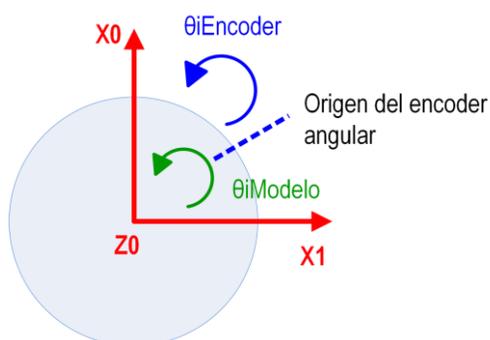


Figura 3.4. Relación entre el origen del sistema de medida y el modelo

$$\theta_{iModelo} = \theta_{iEncoder} - \theta_{0i} \quad (3-18)$$

El establecimiento de los sistemas de coordenadas y su orientación se ha realizado siguiendo la guía presentada por el modelo Denavit-Hartenberg en el apartado 3.3. La elección de la posición inicial se realizó considerando la posición del brazo con todos sus encoders próximos a la posición de referencia. En la figura 3.5 se muestran las siete articulaciones disponibles en el brazo de medición.



Figura 3.5. Disposición de articulaciones en brazo FARO Platinum

A continuación en la Figura 3.6 se presenta una vista del brazo que constituye la posición inicial del modelo, 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 $(x_{\text{palp}}, y_{\text{palp}}, z_{\text{palp}})$. La última articulación corresponde al giro de muñeca del palpador.

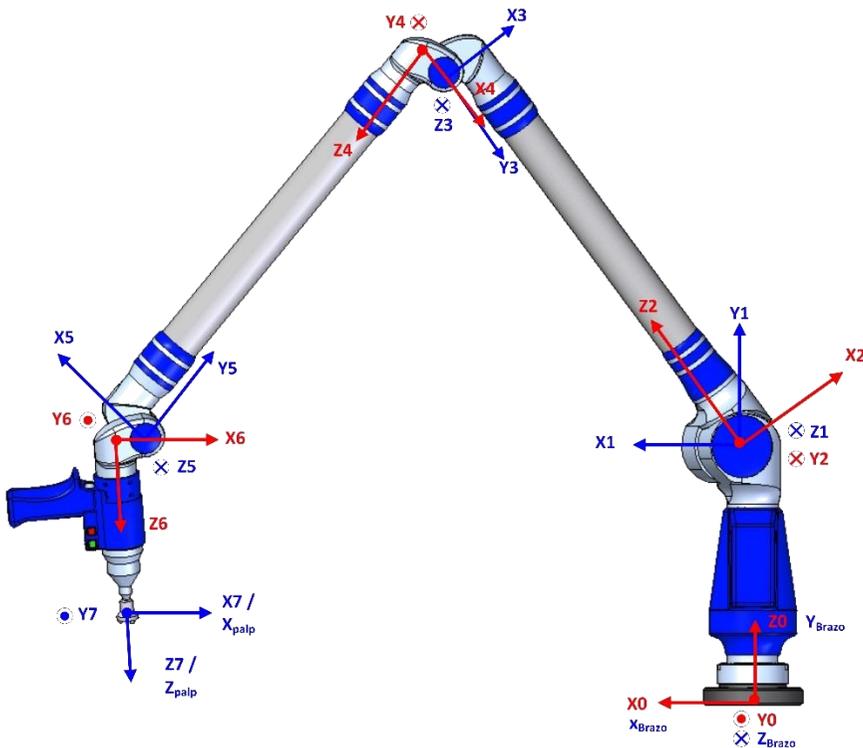


Figura 3.6. Sistemas de coordenadas en posición inicial para brazo FARO Platinum según modelo D-H

Una vez definidos los sistemas de coordenadas del modelo, el siguiente paso es la determinación de 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 finales de estos parámetros, obtenidos mediante métodos de optimización en el proceso de identificación de parámetros, minimizarán el error de medida del brazo. Por lo tanto, es importante que estos valores iniciales de los parámetros geométricos que se utilizarán como variables de entrada del modelo matemático, sean lo más próximos posibles a los valores nominales que en una situación teórica ideal serían los suministrados por el fabricante del brazo. En la Figura 3.7, se muestra un ejemplo de la medición realizada en la MMC de la punta del palpador de referencia, para el cálculo del parámetro d_7 correspondiente a la distancia del origen del sistema de referencia (x_6, y_6, z_6) hasta la intersección del eje z_6 con el eje x_7 a lo largo del eje z_6 .



Figura 3.7. Medición de parámetros geométricos iniciales del modelo con MMC

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 FARO Platinum en estudio se muestran en la tabla Tabla 3.1 siguiente.

Articulaciones	θ_i (°)	α_i (°)	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 3.1. Valores iniciales de los parámetros geométricos del modelo cinemático brazo FARO Platinum

Finalmente se puede concluir que a través de las 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_{Palp} , Y_{Palp} , Z_{Palp} en sistema de referencia global del brazo (x_0, y_0, z_0) tal y como se expresa en la ecuación (3-19).

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}_{x_0, y_0, z_0 (SR0)} = {}^0T_7 \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}_{X_{pal}, Y_{pal}, Z_{pal} (SR7)} \quad (3-19)$$

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:

$${}^0T_7 = {}^0A_1 {}^1A_2 \dots {}^6A_7 \quad (3-20)$$

3.5 Descripción cinemática del láser tracker

Los laser tracker son un sistema de medición portátil de alto rango que mide la posición de un objeto en coordenadas esféricas, utilizando interferometría para la medición de distancias relativas (d) y encoders ópticos para medir los ángulos de azimut (θ) y elevación del haz láser dirigido hacia el objeto a medir (φ) tal y como se observa en la Figura 3.8.

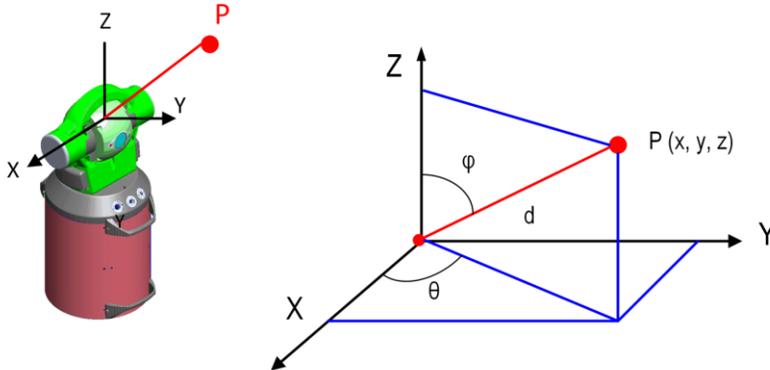


Figura 3.8. Principio de medición de un láser tracker

Las coordenadas del retroreflector correspondientes al punto medido se determinan del siguiente modo:

$$x = d \sin \varphi \cos \theta \quad (3-21)$$

$$y = d \sin \varphi \sin \theta \quad (3-22)$$

$$z = d \cos \varphi \quad (3-23)$$

Tal y como se ha descrito en el apartado 2.2.2, en el mercado existen diversos tipos de láser tracker que se clasifican en función de su configuración dependiendo del origen de la fuente de láser, bien con

origen en el cabezal giratorio del equipo (API / Faro), en la columna soporte del mismo con un espejo reflector en el cabezal giratorio (Leica) o sobre el eje del láser tracker. En este trabajo se usaron dos equipos de láser tracker, el primero un láser tracker marca Leica modelo LEICA LTD600 y el segundo un modelo de la marca API T3-15m. Por lo tanto se presentan a continuación los dos modelos cinemáticos implementados en función de la configuración del láser tracker elegido.

3.5.1 Modelo cinemático de láser tracker basado en errores geométricos

Mediante la definición del modelo cinemático del láser tracker, se establece una relación matemática sistemática entre todas y cada una de las articulaciones que forman su estructura y la posición y orientación del efector final. En este caso se formularán dos modelos cinemáticos para los dos modelos de láser tracker Api y Leica basados en los posibles errores geométricos del equipo. Mediante la calibración, se identificarán los parámetros geométricos óptimos para mejorar la precisión del equipo, siendo para ello necesario definir previamente el modelo cinemático del equipo con sus parámetros geométricos asociados. Según [69] los valores corregidos de las coordenadas de un punto en el espacio medidas por un láser tracker, distancia (d_c) y ángulos de azimut (θ_c) y elevación del haz (φ_c) son función de los errores geométricos propios del láser tracker y de las coordenadas medidas de ese punto (d_m , θ_m , φ_m), ver Figura 3.9. Las correcciones Δd_m , $\Delta\theta_m$ y $\Delta\varphi_m$ en d_m , θ_m , y φ_m respectivamente pueden ser expresadas del siguiente modo con x_i como parámetros de error $i=1$ hasta n .

$$d_c - d_m = \Delta d_m = f(d_m, \theta_m, \varphi_m, x_1, \dots, x_n) \quad (3-24)$$

$$\theta_c - \theta_m = \Delta\theta_m = f(d_m, \theta_m, \varphi_m, x_1, \dots, x_n) \quad (3-25)$$

$$\varphi_c - \varphi_m = \Delta\varphi_m = f(d_m, \theta_m, \varphi_m, x_1, \dots, x_n) \quad (3-26)$$

Este modelo con 15 parámetros de error de un láser tracker, publicado inicialmente por Loser y Kyle [70] para equipos con configuración de fuente láser y espejo en la columna, ha sido extendido a otras configuraciones de láser que han ido apareciendo en el tiempo como los láseres con fuente de haz en cabezal giratorio. En este trabajo se presenta el análisis para las dos configuraciones mencionadas.

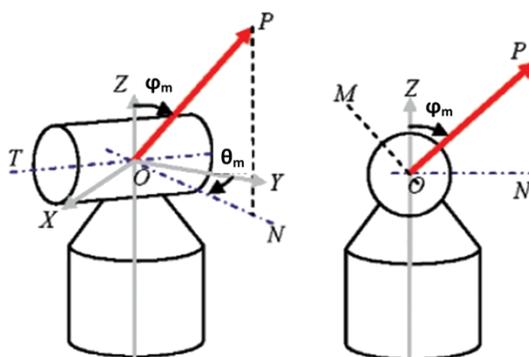


Figura 3.9. Definición de sistemas de coordenadas láser tracker API / FARO. Fuente (Muralikrishnan et al., 2009)

3.5.1.1 Modelo de error para láser tracker con fuente de láser en cabezal giratorio

Este modelo es propio de los modelos de láser tracker comercializados por API y FARO.

Según el modelo de error propuesto por [69], los principales errores geométricos concretos que afectan el error global del equipo son los siguientes y se representan en las Figura 3.10 y Figura 3.11:

- Beam Offset (x_1): Es el desplazamiento del punto de emisión del haz del láser con respecto del sistema de referencia origen. Se divide en dos componentes x_{1m} y x_{1t} como proyección de x_1 sobre el eje de inclinación (T) del láser y sobre el eje normal al eje de inclinación y al haz del láser (M).
- Transit Offset (x_2): Es el desplazamiento del eje de inclinación (T) con respecto al azimutal (Z).
- Vertical Index Offset (x_3): offset vertical o desplazamiento del cero en el encoder vertical.

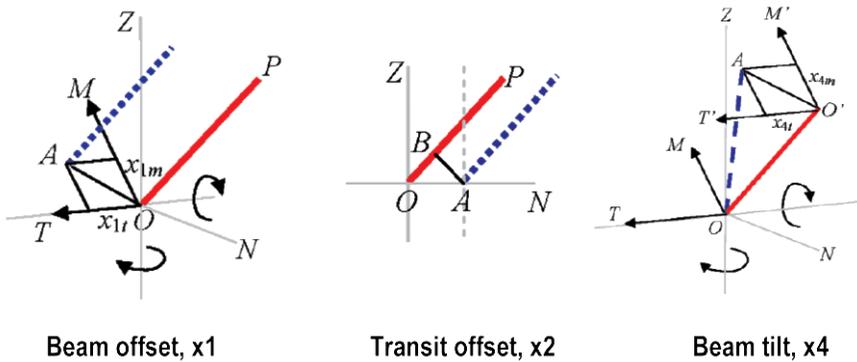
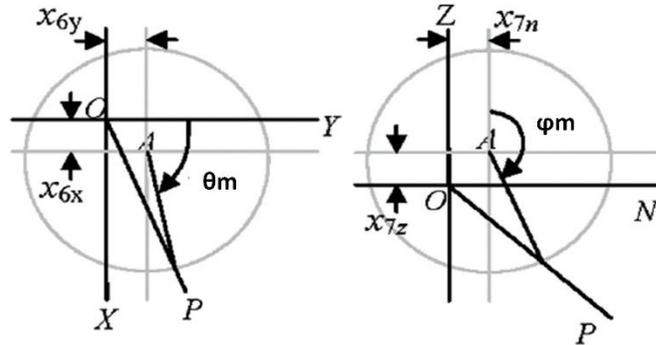


Figura 3.10. Errores geométricos láser tracker API / FARO (parte 1). Fuente (Muralikrishnan et al., 2009)

- Beam Tilt (x_4): inclinación del haz del láser respecto de su trayectoria nominal perpendicular al eje de inclinación (T). Se descompone en sus proyecciones sobre el eje de inclinación (x_{4t}) y sobre el perpendicular al haz del rayo (x_{4m}). Este último no se considera al tener el mismo sentido que x_3 .
- Transit Tilt (x_5): error de perpendicularidad entre el eje de inclinación (T) y el azimutal (Z).
- Encoder Eccentricity (x_6 y x_7): errores de excentricidad de los encoders horizontal y vertical. Se dividen en sus componentes x,y para el azimutal (x_{6x} , x_{6y}) y en componentes z y N (proyección del haz sobre el plano xy para el de inclinación (x_{7n} , x_{7z}).
- Bird Bath Error (x_8): error de calibración en la distancia al nido de reflectores.
- Scale Errors in the encoder (x_9 y x_{10}): Errores de escala en los encoders horizontal y vertical.



Horizontal and vertical angle encoder eccentricity, x6 -x7

Figura 3.11. Errores geométricos láser tracker API / FARO (parte 2). Fuente (Muralikrishnan et al., 2009)

Con estos parámetros de error se establecen las fórmulas que corrigen las medidas del LT (d_m , θ_m , φ_m) para obtener las medidas reales (d_c , θ_c , φ_c).

$$d_c = d_m + x_2 \sin \varphi_m + x_8 \quad (3-27)$$

$$\theta_c = \theta_m + \frac{x_{1t}}{d_m \sin \varphi_m} + \frac{x_{4t}}{\sin \varphi_m} + \frac{x_5}{\tan \varphi_m} + x_6 \cos \theta_m - x_{6y} \sin \theta_m + x_{9a} \sin(2\theta_m) + x_{9b} \cos(2\theta_m) \quad (3-28)$$

$$\varphi_c = \varphi_m - \frac{x_{1m}}{d_m} + \frac{x_2 \cos \varphi_m}{d_m} + x_3 + x_{7n} \cos \varphi_m - x_{7z} \sin \varphi_m + x_{10a} \sin(2\varphi_m) + x_{10b} \cos(2\varphi_m) \quad (3-29)$$

3.5.1.2 Modelo de error para láser tracker con fuente de láser y espejo en columna

Este modelo es propio de los modelos de láser tracker comercializados LEICA y sus errores geométricos fueron analizados y descritos en [70]. Los errores geométricos definidos para la fuente del láser, espejos y encoders incluyen posibles inclinaciones, desplazamientos y excentricidades de los componentes mencionados, ver Figura 3.12, Figura 3.13 y Figura 3.14.

- Transit Axis Offset (e): desplazamiento del eje de inclinación respecto del azimutal.
- Mirror Offset (f): desplazamiento del plano del espejo respecto de su centro de rotación nominal.
- Beam Offset (O_1): desplazamiento del haz del láser respecto del eje vertical en sus componentes x, y (O_{1x} , O_{1y}).
- Cover Plate Offset (O_2): desplazamiento del haz del láser respecto del eje vertical debido a refracción en el cristal de salida en sus componentes x, y (O_{2x} , O_{2y}).

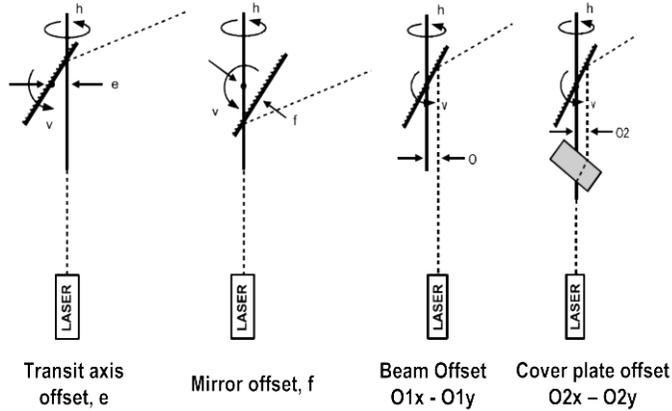


Figura 3.12. Errores geométricos láser tracker Leica (parte 1). Fuente (Loser and Kyle., 1998)

- Mirror Tilt (c): inclinación del espejo respecto del eje de inclinación (T).
- Transit Axis tilt (i): error de perpendicularidad entre el eje de inclinación (T) y el vertical (Z).
- Beam Axis tilt (l): inclinación del haz del láser respecto del eje vertical (Z) en sus componentes x, y (l_x, l_y).

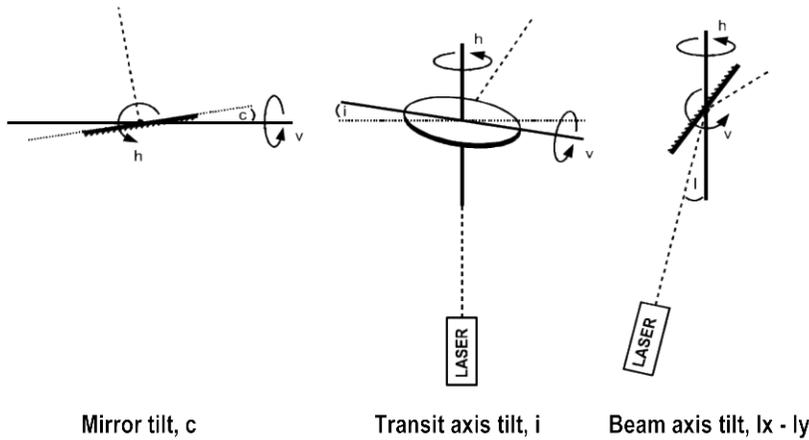


Figura 3.13. Errores geométricos láser tracker Leica (parte 2). Fuente (Loser and Kyle., 1998)

- Horizontal Encoder Eccentricity (E): excentricidad del encóder horizontal en sus componentes x, y (E_x, E_y).

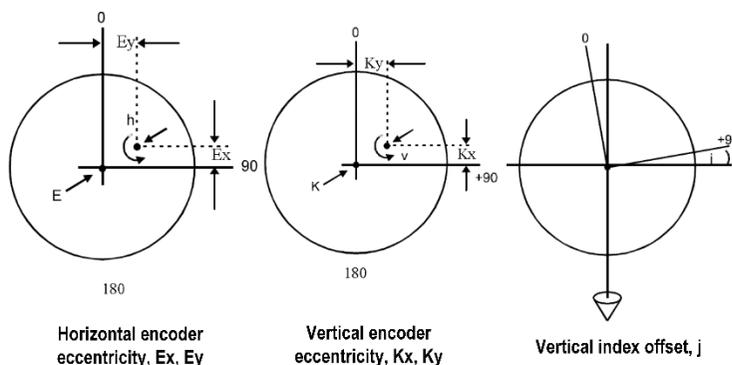


Figura 3.14. Errores geométricos láser tracker Leica (parte 3). Fuente (Loser and Kyle., 1998)

Con estos parámetros de error se establecen las fórmulas que corrigen las medidas del láser tracker (d_m , θ_m , φ_m) para obtener las medidas reales (d_c , θ_c , φ_c) con H_{off} y V_{off} provenientes de la medida corregida del PSD (*position sensor detector*).

$$d_c = d_m - 2 \sin\left(\frac{\varphi_m}{2}\right) \cdot \left(e \cdot \cos\left(\frac{\varphi_m}{2}\right) + f\right) \quad (3-30)$$

$$\varphi_c = \varphi_m - (I_x \sin \theta_m + I_y \cos \theta_m) - \frac{O_{1x} \sin \theta_m + O_{1y} \cos \theta_m + O_{2y} + V_{off}}{d_m} \quad (3-31)$$

$$- \cos\left(\frac{\varphi_m}{2}\right) \left[\frac{2}{d_m} \left(e \cdot \cos\left(\frac{\varphi_m}{2}\right) + f \right) + K_x \right] + K_y \sin\left(\frac{\varphi_m}{2}\right)$$

$$\theta_c = \theta_m + \frac{1}{\sin \varphi_m} \left[I_x \cos \theta_m + I_y \sin \theta_m \right] + \frac{O_{1x} \cos \theta_m - O_{1y} \sin \theta_m + O_{2x} + H_{off}}{d_m} \quad (3-32)$$

$$- \frac{i \sin\left(\frac{\varphi_m}{2}\right) + c}{\cos\left(\frac{\varphi_m}{2}\right)} + E_y \sin \theta_m - E_x \cos \theta_m$$

3.5.2 Modelo cinemático según modelo de Denavit – Hartenberg y determinación de parámetros nominales

En este trabajo, se ha realizado el modelado cinemático según método D-H [1] aplicado a un láser tracker API T3-15m con fuente de láser en cabezal giratorio, ya que es el equipo que se utilizó durante el proceso de verificación. El láser tracker con emisor en el cabezal se compone de dos uniones rotativas y una lineal [71]. Los encoders angulares de los giros horizontal y vertical proporcionan los valores de giro de las uniones rotativas y la medición del interferómetro proporciona el valor de la distancia. Utilizando el modelo de Denavit-Hartenberg D-H [10] se obtienen las coordenadas de un punto medido por el láser tracker en función de los valores de los ángulos y distancia de la cadena cinemática. El modelado del láser tracker mediante el método de D-H se muestra en la Figura 3.15 incluyendo el

sistema de referencia global (x_0, y_0, z_0) , un sistema de referencia en cada una de las articulaciones rotativas y el tercero en el retroreflector que permitirá mediante la medición con el interferómetro conocer la distancia.

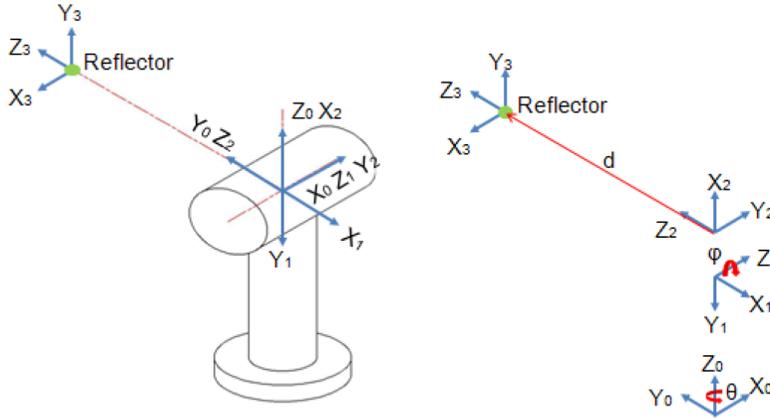


Figura 3.15. Sistemas de coordenadas en posición inicial para láser tracker API T3 según modelo D-H

Los valores iniciales obtenidos para los parámetros geométricos d_i , a_i , θ_i y α_i del modelo D-H se muestran en la Tabla 3.2 con θ , φ y d variables de articulación.

Articulaciones	θ_i (°)	α_i (°)	a_i (mm)	d_i (mm)
1	$\theta - 90^\circ$	-90	0	0
2	$\varphi - 90$	90	0	0
3	-90	0	0	d

Tabla 3.2. Valores iniciales de los parámetros geométricos del modelo cinemático LT API T3

El sistema de ecuaciones obtenido para expresar un punto capturado en el sistema de referencia (x_3, y_3, z_3) correspondiente a la ubicación de reflector, en el sistema de referencia global (x_0, y_0, z_0) coincidente con el origen del láser tracker, expresado en términos de θ , φ y d viene definido por las siguientes ecuaciones:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}_{x_0, y_0, z_0 (SR0)} = {}^0T_3 \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}_{x_3, y_3, z_3 (SR3)} \quad (3-33)$$

Siendo la matriz de transformación homogénea 0T_3 el producto en cadena de matrices de transformación de coordenadas sucesivas ${}^{i-1}A_i$ expresado como:

$${}^0T_3 = {}^0A_1 {}^1A_2 {}^2A_3 \quad (3-34)$$

$${}^0A_1 = \begin{bmatrix} \cos(\theta - 90) & 0 & -\sin(\theta - 90) & 0 \\ \sin(\theta - 90) & 0 & \cos(\theta - 90) & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-35)$$

$${}^1A_2 = \begin{bmatrix} \cos(\varphi - 90) & 0 & \sin(\varphi - 90) & 0 \\ \sin(\varphi - 90) & 0 & -\cos(\varphi - 90) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-36)$$

$${}^2A_3 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-37)$$

donde θ , φ y d , son los ángulos y lectura de las distancias de los encoders angulares y del interferómetro lineal del láser tracker.

3.6 Descripción cinemática de la plataforma multi-registro

En este trabajo y con objeto de optimizar los procedimientos de verificación y calibración de elementos portátiles de medición, se decidió evaluar el uso de una plataforma multi-registro con alta precisión de posicionamiento mecánico, ver Figura 3.16 como método alternativo a los procedimientos clásicos de calibración y verificación de acuerdo a norma para instrumentos de medición portátiles.

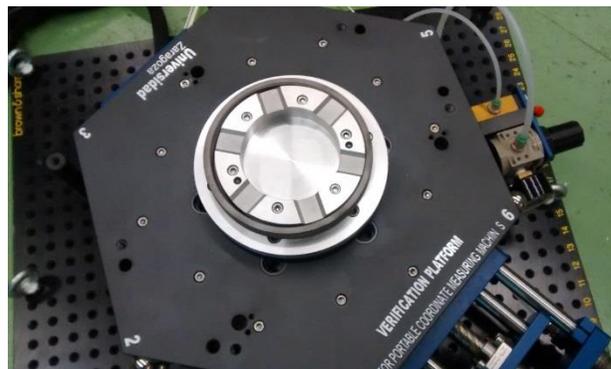


Figura 3.16. Plataforma multi-registro

La plataforma multi-registro tiene una alta repetibilidad de posicionamiento, permitiendo determinar con alta precisión la posición y orientación de la placa superior de la plataforma, donde va colocado el instrumento de medición portátil, respecto a la placa inferior de la plataforma que permanece fija

mediante seis sensores capacitivos. Para cada posición de ensayo, deben capturarse simultáneamente la medida del punto con el instrumento de medición portátil y las lecturas de los sensores capacitivos.

Las coordenadas capturadas de los puntos medidos en el proceso de verificación del instrumento portátil de medición, son obtenidas en un sistema global de referencia fijo localizado en la placa inferior de la plataforma. Mediante un modelo matemático, se obtiene la matriz de transformación homogénea que permita el cambio del sistema de coordenadas del instrumento de medición montado sobre la placa móvil de la plataforma al sistema global de referencia fijo. En este modelo se utilizan los parámetros geométricos óptimos encontrados durante el procedimiento de calibración de la plataforma y las lecturas de los sensores capacitivos capturadas durante el procedimiento de verificación, cuyo procedimiento se explica en capítulos posteriores.

Las placas inferior (fija) y superior (móvil) de la plataforma tienen acopladas tres esferas de caracterización, las cuales son utilizadas para determinar los sistemas de coordenadas de cada una de las placas tal y como se muestra en la Figura 3.17.

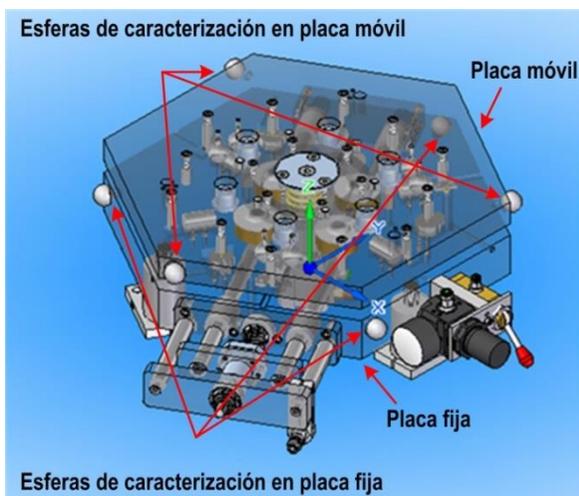


Figura 3.17. Posicionamiento de esferas de referencia en placa móvil y fija de la plataforma multi-registro.

El modelo matemático de la plataforma permite encontrar una matriz de transformación que exprese las lecturas (x, y, z) del sistema de coordenadas de la placa móvil al sistema de coordenadas global de la placa fija, en cada una de las seis posiciones diferentes posibles, utilizando la lectura de los sensores capacitivos obtenida durante el procedimiento de verificación.

3.6.1 Modelo matemático de la plataforma multi-registro

A partir del modelo matemático realizado para la plataforma multi-registro, es posible encontrar las matrices de transformación homogéneas que permiten expresar los puntos capturados en el objeto patrón en el sistema de coordenadas global, utilizando la lectura de los sensores capacitivos en la verificación y el conjunto de datos obtenidos del procedimiento de calibración. En la figura Figura 3.18 se presenta el esquema geométrico de un sensor capacitivo entre la posición de referencia obtenida del procedimiento de calibración y un nuevo posicionamiento de la plataforma durante el procedimiento de verificación.

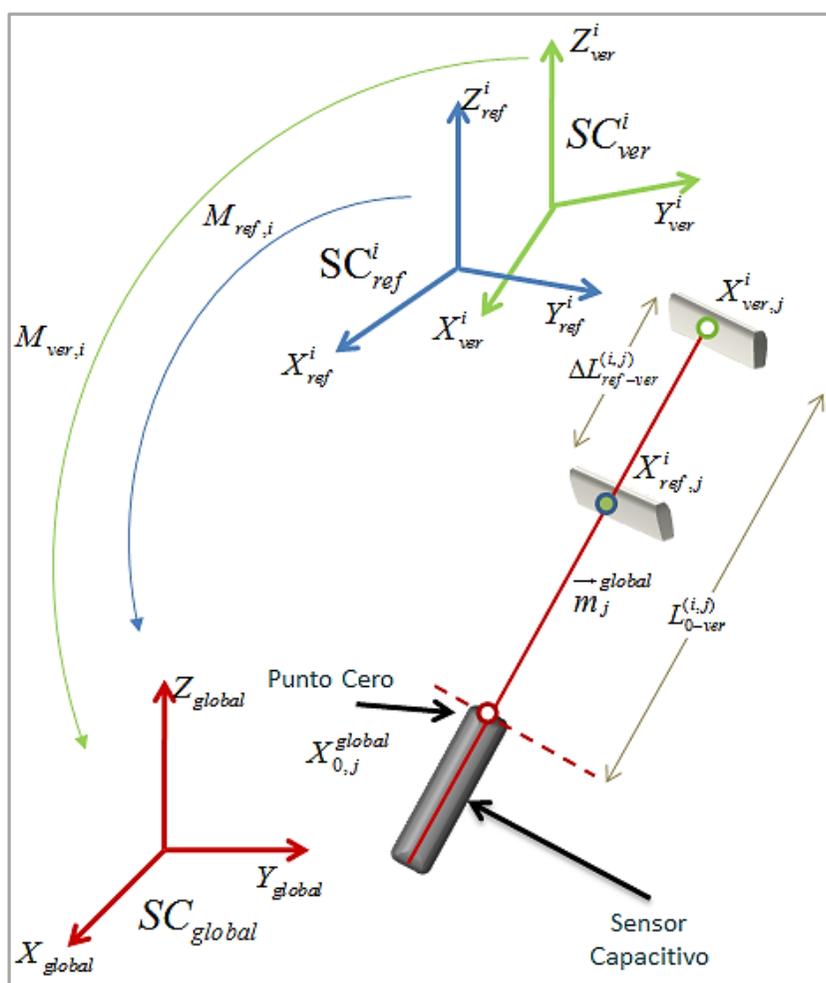


Figura 3.18. Esquema geométrico de un sensor capacitivo entre la posición de referencia de calibración y un nuevo posicionamiento de la plataforma durante el procedimiento de verificación.

La notación correspondiente a la Figura 3.18 que se utiliza para desarrollar el modelo matemático se describe a continuación:

- SC_{global} : Sistema de coordenadas global o inferior $\begin{bmatrix} X_{global} & Y_{global} & Z_{global} \end{bmatrix}$ en la placa fija.

- SC_{ref}^i : Sistema de coordenadas de referencia $\begin{bmatrix} X_{ref}^i & Y_{ref}^i & Z_{ref}^i \end{bmatrix}$, de la posición i en la placa móvil, para $i = 1, 2, \dots, 6$, el cual es determinado en el procedimiento de calibración.

- SC_{ver}^i : Sistema de coordenadas de verificación $\begin{bmatrix} X_{ver}^i & Y_{ver}^i & Z_{ver}^i \end{bmatrix}$, de la posición i en la placa móvil, para $i = 1, 2, \dots, 6$.

- $M_{ref,i}$: Matriz de transformación homogénea de referencia que nos permite expresar lecturas del SC_{ref}^i de la posición i al SC_{global} , para $i = 1, 2, \dots, 6$, la cual se obtiene del procedimiento de calibración.

- $M_{ver,i}$: Matriz de transformación homogénea buscada de la posición i , que permite expresar lecturas del SC_{ver}^i al SC_{global} , para $i = 1, 2, \dots, 6$.

- $X_{0,j}^{global}$: Vector de punto cero de sensores capacitivos $\begin{bmatrix} x_{0,j}^{global} & y_{0,j}^{global} & z_{0,j}^{global} & 1 \end{bmatrix}^T$ expresado en sistema de coordenadas global, SC_{global} , para $j = 1, 2, \dots, 6$ sensores capacitivos.

- $X_{ref,j}^i$: Vector $\begin{bmatrix} x_{ref,j}^i & y_{ref,j}^i & z_{ref,j}^i & 1 \end{bmatrix}^T$ del punto uno de referencia correspondiente al sensor j en la posición i , para $j = 1, 2, \dots, 6$ e $i = 1, 2, \dots, 6$, expresado en sistema de coordenadas de referencia, SC_{ref}^i , obtenido de procedimiento de calibración.

- $X_{ver,j}^i$: Vector $\begin{bmatrix} x_{ver,j}^i & y_{ver,j}^i & z_{ver,j}^i & 1 \end{bmatrix}^T$ del punto uno del procedimiento de verificación del sensor j en la posición i , para $j = 1, 2, \dots, 6$ e $i = 1, 2, \dots, 6$, expresado en el sistema de coordenadas SC_{ver}^i .

- m_j^{global} : Vector de cosenos directores de la dirección de medida de los sensores capacitivos, $\begin{bmatrix} \cos \alpha_j^{global} & \cos \beta_j^{global} & \cos \gamma_j^{global} & 0 \end{bmatrix}^T$, para $j = 1, 2, \dots, 6$ sensores capacitivos, expresado en SC_{global} .

- $\Delta L_{ref-ver}^{(i,j)}$: Diferencia entre $L_{ref}^{(i,j)}$, el valor del sensor capacitivo j (en la posición de referencia i), y $L_{ver}^{(i,j)}$, el valor capturado del sensor capacitivo j en la posición i (de una nueva posición) en el procedimiento de verificación.

- $L_{0-ver}^{(i,j)}$: Valor del sensor capacitivo j (en la posición de referencia i) en el procedimiento de verificación.

Para determinar las coordenadas del punto cero del plano de los sensores capacitivos, se utilizan los valores óptimos encontrados en el procedimiento de calibración de la plataforma de la dirección de medida de los sensores capacitivos y la normal al plano de la cara de los sensores capacitivos. También para determinar el incremento ó decremento entre el punto uno en una nueva posición en el procedimiento de verificación y el punto uno de referencia, se utilizan los cosenos directores de la dirección de medida optimizada.

Como se mencionó anteriormente, el objetivo final del modelo matemático en el procedimiento de verificación, es determinar la matriz de transformación que relacione el sistema de coordenadas de la placa móvil en cada una de las seis posiciones con el sistema de coordenadas global de la placa fija para cada punto capturado por el instrumento de medida portátil. Tomando como ejemplo la posición 1 se puede plantear un modelo matemático basado en la características geométricas optimizadas durante el procedimiento de calibración, el conjunto de datos guardados de la i -ésima posición de referencia (sistema de coordenadas de referencia, matriz de transformación homogénea de referencia, vector del punto de referencia, lectura de sensores capacitivos), definidos durante el procedimiento de calibración [17], y la lectura de los sensores capacitivos durante el procedimiento de verificación para la posición 1. En este modelo se plantea un sistema de ecuaciones no lineales que tiene como incógnitas los parámetros de la matriz de transformación homogénea buscada y las coordenadas del punto uno nuevo correspondiente. Este sistema de ecuaciones utiliza los datos de la lectura de los sensores capacitivos para cada sensor de la posición 1, obteniéndose:

$$M_{ver,1} X_{ver,j}^1 = M_{ref,1} X_{ref,j}^1 + \Delta L_{ref-ver}^{(1,j)} \bar{m}_j^{global} \quad (3-38)$$

$$M_{ver,1} X_{ver,j}^1 = X_{ver,j}^{global} = X_{0,j}^{global} + L_{0-ver}^{(1,j)} \bar{m}_j^{global} \quad (3-39)$$

Denotando:

$$T_{ref-ver}^{(1,j)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \Delta L_{ref-ver}^{(1,j)} \cos \alpha_j^{global} \\ 0 & 1 & 0 & \Delta L_{ref-ver}^{(1,j)} \cos \beta_j^{global} \\ 0 & 0 & 1 & \Delta L_{ref-ver}^{(1,j)} \cos \gamma_j^{global} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3-40)$$

$$T_{0-ver}^{(1,j)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & L_{0-ver}^{(1,j)} \cos \alpha_j^{global} \\ 0 & 1 & 0 & L_{0-ver}^{(1,j)} \cos \beta_j^{global} \\ 0 & 0 & 1 & L_{0-ver}^{(1,j)} \cos \gamma_j^{global} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3-41)$$

y sustituyendo $\Delta L_{ref-ver}^{(1,j)} \bar{m}_j^{global}$ en la ecuación (3-40) por $T_{ref-ver}^{(1,j)}$ y $L_{0-ver}^{(1,j)} \bar{m}_j^{global}$ en la ecuación (3-41) por $T_{0-ver}^{(1,j)}$ se obtienen las ecuaciones equivalentes:

$$M_{ver,1} X_{ver,j}^1 = T_{ref-ver}^{(1,j)} M_{ref,1} X_{ref,j}^1 = Y_{ref-ver}^{(1,j)} \quad (3-42)$$

$$M_{ver,1} X_{ver,j}^1 = T_{0-ver}^{(1,j)} X_{0,j}^{global} = Y_{0-ver}^{(1,j)} \quad (3-43)$$

De esta forma, tomando:

$x = (M_{ver,1}^{11}, M_{ver,1}^{12}, \dots, M_{ver,1}^{44}, x_{ver,1}^1, y_{ver,1}^1, z_{ver,1}^1, \dots, x_{ver,6}^1, y_{ver,6}^1, z_{ver,6}^1)^T$ como el vector de incógnitas que contiene la matriz de cambio deseada, se puede expresar el sistema de ecuaciones no lineales:

$$F(x) = \begin{pmatrix} M_{ver,1} X_{ver,1}^1 - Y_{ref-ver}^{(1,1)} \\ \vdots \\ M_{ver,1} X_{ver,6}^1 - Y_{ref-ver}^{(1,6)} \\ M_{ver,1} X_{ver,1}^1 - Y_{0-ver}^{(1,1)} \\ \vdots \\ M_{ver,1} X_{ver,6}^1 - Y_{0-ver}^{(1,6)} \end{pmatrix} = \mathbf{0} \quad (3-44)$$

que puede resolverse con el algoritmo de Levenberg-Marquardt mediante Matlab.

La matriz de cambio encontrada en el algoritmo debe ser una matriz orto-normal. Esto quiere decir que debe cumplir con las condiciones de ortogonalidad y normalidad. Para cumplir con estas condiciones se agregan las siguientes restricciones al algoritmo matemático (modelo matemático).

$$M_{ver,1}^{11} * M_{ver,1}^{12} + M_{ver,1}^{21} * M_{ver,1}^{22} + M_{ver,1}^{31} * M_{ver,1}^{32} = 0 \quad (3-45)$$

$$M_{ver,1}^{11} * M_{ver,1}^{13} + M_{ver,1}^{21} * M_{ver,1}^{23} + M_{ver,1}^{31} * M_{ver,1}^{33} = 0 \quad (3-46)$$

$$M_{ver,1}^{12} * M_{ver,1}^{13} + M_{ver,1}^{22} * M_{ver,1}^{23} + M_{ver,1}^{32} * M_{ver,1}^{33} = 0 \quad (3-47)$$

$$(M_{ver,1}^{11})^2 + (M_{ver,1}^{21})^2 + (M_{ver,1}^{31})^2 = 1 \quad (3-48)$$

$$(M_{ver,1}^{12})^2 + (M_{ver,1}^{22})^2 + (M_{ver,1}^{32})^2 = 1 \quad (3-49)$$

$$(M_{ver,1}^{13})^2 + (M_{ver,1}^{23})^2 + (M_{ver,1}^{33})^2 = 1 \quad (3-50)$$

Las ecuaciones (3-45) a (3-47) y (3-48) a (3-50) cumplen con la condición de ortogonalidad y normalidad respectivamente de la matriz de cambio encontrada a través del modelo matemático.

3.7 Conclusiones

En este capítulo se ha introducido el concepto de modelado cinemático y se ha aplicado a los dos sistemas de medición portátiles objeto de la tesis, un brazo de medición por coordenadas y un láser tracker. Igualmente se ha realizado el mismo procedimiento para la plataforma multi registro que se utiliza como medio auxiliar y sobre la que se posicionan cada uno de los dispositivos en los procedimientos de calibración y verificación que se verán en capítulos posteriores, obteniéndose el modelo matemático asociado de la misma.

Previamente se llevó a cabo una revisión bibliográfica del estado del arte al respecto de los métodos de modelado cinemático aplicables a brazos de medición por coordenadas y láser tracker como punto inicial de los procedimientos de calibración de estos equipos. Estos procedimientos proseguirán con una captura de datos, la identificación de parámetros óptimos del modelo y la aplicación de la corrección para minimizar el error de medición como último paso del proceso. En ambos casos, se justificó la viabilidad de utilización del extendido modelo de Denavit-Hartenberg, que se aplicó a los modelos de brazo Faro Platinum y láser tracker API T3 utilizados en este trabajo. Tras la definición del modelo de D-H con sus parámetros y sistemas de coordenadas asociados, se determinaron los valores iniciales de los parámetros del modelo.

4 Calibración y verificación de brazos articulados de medición por coordenadas con plataforma multi-registro

4.1 Introducción

Tras la definición y descripción de los modelos cinemáticos asociados a un brazo articulado de medición por coordenadas y la plataforma multi-registro, la determinación de los parámetros nominales del brazo y la presentación del modelo matemático de la plataforma multi-registro, se aborda en este capítulo la definición del procedimientos de calibración y verificación del brazo de medición utilizando la plataforma como medio auxiliar.

Mediante un procedimiento de calibración, debe ser posible obtener modelos de corrección a los resultados de una medición. Sin embargo, un procedimiento de calibración, 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. Los procedimientos de calibración intentan obtener un conjunto de parámetros óptimos, con los cuales es posible obtener el mínimo error posible en el proceso de medida, partiendo de medidas patrón externas conocidas. Comparando estas medidas con los valores obtenidos a través del propio modelo del brazo, es posible utilizar técnicas de optimización no lineal para minimizar el error cometido entre las coordenadas medidas y las coordenadas reales materializadas por un patrón. De este modo se capturan las variables de las articulaciones del brazo comparando el resultado obtenido mediante su modelo matemático, con el medido o materializado con un patrón externo. Así se obtiene un conjunto de variables de articulación medidas y la posición deseada que debería alcanzar el palpador de acuerdo con esas variables

El trabajo presenta una aproximación a procedimientos de verificación y calibración de brazos de medición con una plataforma multi-registro que a modo general sigue los siguientes pasos:

- 1.- Determinación y construcción del modelo cinemático adecuado para la configuración del brazo y plataforma multi-registro, indicando las transformaciones geométricas necesarias, la posición de los sistemas de referencia y el conjunto inicial de parámetros geométricos nominales.
- 2.- Captura de datos de la posición de todos los elementos del brazo mediante palpado de puntos conocidos, materializados por un patrón u otro instrumento de medida.

3.- Identificación u optimización de parámetros geométricos, normalmente se realiza mediante procedimientos de aproximación basados en distintos tipos de ajuste por mínimos cuadrados a los datos medidos.

4.- Evaluación de errores: implementación y evaluación del modelo óptimo en posiciones distintas a las de identificación.

Por lo tanto, se incluye en este apartado un procedimiento de identificación de parámetros del brazo con la plataforma multi-registro, realizando una captura de datos y el posterior proceso de optimización, con objeto de obtener el conjunto de parámetros óptimos del modelo del brazo que permitan minimizar el error de medición conjunto.

En relación con técnicas de verificación de brazos articulados de medición y con objeto de verificar la idoneidad del procedimiento de verificación del brazo de medición establecido usando la plataforma multi-registro, se realiza en este trabajo una comparación entre el procedimiento de verificación de brazos de medición utilizando la plataforma multi-registro propuesto, con los procedimientos que rigen las normativas aplicables a evaluación de brazos articulados de medición por coordenadas, como son la norma ASME B89.4.22 – 2004 [2], VDI/VDE 2617 Parte 9 -2009 [3] y el borrador de ISO/CD 10360 parte12 [4] publicado en 2014, observando ventajas, inconvenientes y diferencias entre ellos mediante la realización de los ensayos correspondientes.

Se introduce también en este capítulo otra técnica de verificación de brazos articulados incluyendo el concepto de utilización de un equipo de láser tracker como instrumento patrón para calibración y verificación de brazos articulados de medición con plataforma multi-registro. Para ello se realizaron los ensayos experimentales necesarios, se compararon los resultados obtenidos con el procedimiento de verificación de brazo con plataforma multi-registro utilizando un patrón de barra de esferas convencional y se confrontaron también con la evaluación de precisión volumétrica aplicable a brazos de medición que indica la normativa ASME B89.4.22 – 2004 [2].

4.2 Integración de modelos cinemáticos de brazo articulado y plataforma multi-registro

Una vez generado el modelo cinemático del brazo articulado según modelo D-H, determinados los parámetros iniciales del modelo y presentado el modelo matemático de la plataforma en el apartado anterior, se integran ambos modelos como siguiente paso, definiendo y situando los sistemas de referencia del brazo, de la plataforma superior y de la plataforma inferior, y siguiendo unas reglas predefinidas que permitan obtener, mediante combinación de parámetros geométricos la relación entre dos sistemas de referencia sucesivos. La posición y orientación del sistema para cualquier posición de sus articulaciones con respecto al sistema de referencia global del equipo, se obtiene enlazando de sistemas de referencia sucesivos mediante 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 finalmente la relación entre el sistema global de referencia y la orientación y posición final del palpador en caso del brazo de medición por coordenadas o la parte móvil de la plataforma multi-registro.

Un modelo cinemático directo puede formularse según la siguiente ecuación.

$$Y = f(\theta_i, p) \quad (4-1)$$

con i desde 1 hasta n para un sistema de n articulaciones giratorias. Este modelo calcula la posición y orientación final del sistema y en función del valor de las variables de articulación θ_i y de las ecuaciones del modelo definidas en f , que dependen del vector de parámetros p . El vector de parámetros contiene los parámetros geométricos del modelo, que deben ser optimizados para obtener el menor error posible de posicionamiento.

En este caso, las coordenadas capturadas de los puntos medidos en el proceso de verificación del brazo portátil de medición, son obtenidas en un sistema global de referencia fijo localizado en la placa inferior de la plataforma. Mediante un modelo matemático, explicado en el apartado 3.6.1, se obtiene la matriz de transformación homogénea que permita el cambio del sistema de coordenadas del brazo montado sobre la placa móvil de la plataforma SR_{Brazo} al sistema global de referencia fijo de la plataforma SR_{Global} , tal cual se expresa en la siguiente ecuación simplificada (4-2).

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}_{SR_{Global}} = {}^{SR_{Global}}T_{SR_{PlacaMovel}} {}^{SR_{PlacaMovel}}T_{SR_{Brazo}} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}_{SR_{Brazo}} \quad (4-2)$$

Haciendo uso de la notación empleada en el desarrollo del modelo matemático explicado en el apartado 3.6.1:

- SC_{global} : Sistema de coordenadas global o inferior $\begin{bmatrix} X_{global} & Y_{global} & Z_{global} \end{bmatrix}$ en la placa fija.
- SC_{ver}^i : Sistema de coordenadas de verificación $\begin{bmatrix} X_{ver}^i & Y_{ver}^i & Z_{ver}^i \end{bmatrix}$, de la posición i en la placa móvil, para $i = 1, 2, \dots, 6$.
- $M_{ver,i}$: Matriz de transformación homogénea buscada de la posición i , que permite expresar lecturas del SC_{ver}^i al SC_{global} , para $i = 1, 2, \dots, 6$.
- $X_{0,j}^{global}$: Vector de punto cero de sensores capacitivos $\begin{bmatrix} x_{0,j}^{global} & y_{0,j}^{global} & z_{0,j}^{global} & 1 \end{bmatrix}^T$ expresado en sistema de coordenadas global, SC_{global} , para $j = 1, 2, \dots, 6$ sensores capacitivos.
- $X_{ver,j}^i$: Vector $\begin{bmatrix} x_{ver,j}^i & y_{ver,j}^i & z_{ver,j}^i & 1 \end{bmatrix}^T$ del punto uno del procedimiento de verificación del sensor j en la posición i , para $j = 1, 2, \dots, 6$ e $i = 1, 2, \dots, 6$, expresado en el sistema de coordenadas SC_{ver}^i .

Se podría expresar un punto en SR_{Global} del siguiente modo, con incógnitas los parámetros de la matriz de transformación homogénea buscada $M_{ver,1}$ y las coordenadas del punto uno nuevo $X_{ver,j}^{global}$ correspondiente.

$$X_{ver,j}^{global} = M_{ver,1} X_{ver,j}^1 \quad (4-3)$$

En este modelo se utilizan los parámetros geométricos óptimos encontrados durante el procedimiento de calibración de la plataforma [72] y las lecturas de los sensores capacitivos capturadas durante el procedimiento de verificación. El modelo matemático desarrollado nos debe permitir encontrar una matriz de transformación que exprese lecturas (x, y, z) del sistema de coordenadas de la placa móvil al sistema de coordenadas global de la placa fija, en cada una de las seis posiciones diferentes posibles, utilizando las lectura de los sensores capacitivos obtenida durante el procedimiento de verificación. Para este fin, se utilizan los datos de referencia guardados de la primera repetición en cada posición durante la calibración de la plataforma. Los datos de referencia son los siguientes:

- Matriz de cambio de coordenadas (matriz de referencia).
- Punto uno de cada pareja sensor-target (punto de referencia).
- Lectura de los sensores capacitivos de la primera repetición.

De este modo el procedimiento de verificación del brazo articulado con plataforma consistirá básicamente en los siguientes pasos:

1. Montaje del brazo de medida sobre la plataforma multi-registro.
2. Posicionamiento de la plataforma en la posición 1. Medición de las esferas de caracterización de la placa móvil con el brazo de medida para determinar la matriz de transformación homogénea que permita expresar lecturas del sistema de coordenadas del brazo de medida en términos del sistema de coordenadas de la placa móvil, Figura 4.1. También se debe resaltar que debido a que el brazo de medida se amarra a la placa móvil de la plataforma, los sistemas de coordenadas de ambos sistemas son solidarios entre sí, por lo que solamente es necesario determinar la matriz de cambio de coordenadas entre ambos sistemas una vez.

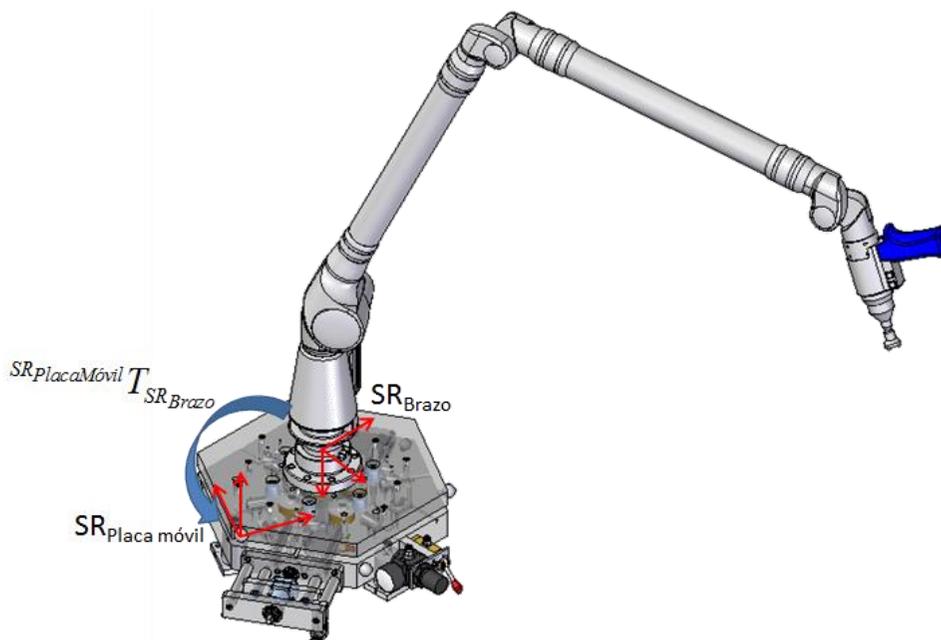


Figura 4.1. Sistemas de coordenadas del brazo de medida y de la placa móvil.

3. Relacionar el sistema de coordenadas actual de la posición 1 con el sistema de coordenadas global de calibración de la placa fija mediante la lectura de los sensores capacitivos en la verificación y el conjunto de datos obtenidos del procedimiento de calibración.
4. Medición de las n esferas de la barra patrón de esferas fijo en una posición.
5. Obtención de la relación geométrica entre el sistema de coordenadas de la placa móvil y el sistema de coordenadas global de la plataforma para cada uno de los puntos medidos en cada una de las n esferas del patrón. Al mover el brazo para alcanzar y palpar una de las esferas del patrón, la plataforma puede cambiar ligeramente la posición de su placa móvil respecto a la fija, siendo esta variación de movimiento controlada mediante los sensores capacitivos y haciendo que sea necesario calcular una matriz de transformación diferente para cada punto palpado, ver Figura 4.2.
6. Giro de la plataforma a otra posición y determinación de la relación geométrica entre el sistema de coordenadas actual de la posición 2 con el sistema de coordenadas global de la placa fija utilizando la lectura de los sensores capacitivos y el conjunto de datos obtenidos del procedimiento de calibración.
7. Medición de las n esferas del objeto patrón.
8. Al igual que en el paso 5, obtención de la relación geométrica entre el sistema de coordenadas de la placa móvil y el sistema de coordenadas global de la plataforma para cada uno de los j -ésimos puntos medidos en cada una de las n esferas del patrón para la posición actual.
9. Repetir los pasos 6, 7 y 8 para cada una de las posiciones restantes de la plataforma.

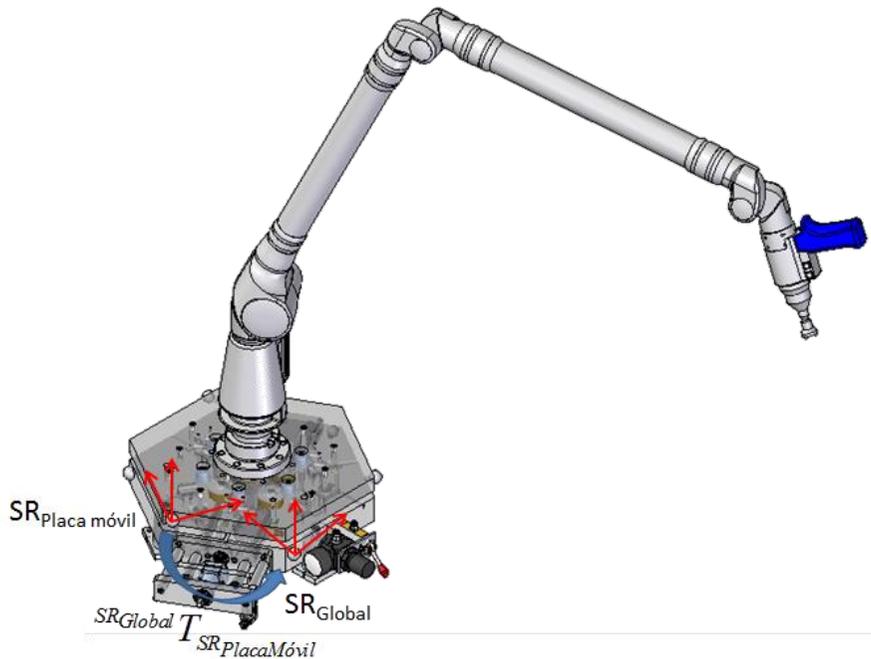


Figura 4.2. Sistema de coordenadas de la placa móvil y sistema de coordenadas de la placa fija

4.3 Captura de datos e identificación de parámetros del brazo articulado

La segunda fase del proceso de calibración o identificación de parámetros geométricos óptimos es la captura de puntos que permitan evaluar el error de posicionamiento cometido por el brazo. El proceso de captura de puntos consiste en obtener los puntos medidos por el brazo, junto con los valores de entrada al modelo matemático correspondientes a la posición medida, habitualmente los valores de las variables de las articulaciones en esa posición. El error será evaluado comparando el punto medido por el brazo en esa posición con el valor real de ese punto. Para ello, es necesaria la introducción de un sistema de medida externo al brazo, que permita obtener las coordenadas reales del punto que serán consideradas como el conjunto de coordenadas nominales reales a utilizar en el procedimiento de calibración.

Un aspecto importante a tener en cuenta es la posible propagación de los errores del instrumento de medida externo a los resultados de la identificación de parámetros. Ya que no existen instrumentos de medida libres de errores, es necesario que el instrumento que sirva como patrón geométrico para el proceso de captura de datos sea mucho más preciso que el brazo cuyos parámetros se pretendan identificar. Es recomendable que cualquier equipo de medida externo o patrón utilizado en captura de datos para identificación de parámetros tenga una precisión al menos un orden de magnitud mayor que la precisión final que se pretenda alcanzar, en este caso con el brazo a caracterizar. En el caso de los brazos articulados de medición por coordenadas está ampliamente extendido el uso de patrones físicos de distancias, que materializan distancias calibradas entre centros de esferas por lo cual en este caso, se utilizará una barra de esferas.

Otra de las consideraciones importantes que deben hacerse a la hora de capturar puntos para identificación es el número de posiciones en las que se tomará este valor de error, ya que es necesario

tomar un número de datos suficiente como para poder generalizar la identificación de parámetros a posiciones distintas a las de captura de datos para identificación. Las posiciones de captura para optimización elegidas, deben ser tales que se garantice la captura de la influencia de todos los parámetros que se pretenden identificar, de modo que se asegure la generalidad de los parámetros finales obtenidos para todo el espacio de trabajo del brazo.

4.3.1 Instrumento patrón

El objeto patrón utilizado en este trabajo durante los procedimientos de calibración y verificación del brazo de medición es un patrón unidimensional de esferas de rango 1400 mm fabricado y calibrado por la empresa UNIMETRIK S.A., número de serie UMTK1605. Se utiliza este patrón debido a su facilidad de manejo y posicionamiento en el volumen del brazo. Esta barra patrón de esferas posee una línea de quince esferas calibradas de cerámica de diámetro de 22 mm, más una esfera auxiliar de las mismas características fuera de la línea principal utilizada para alineación del sistema de referencia del patrón. El perfil de soporte de las esferas es rectangular y está fabricado en fibra de carbono y posee además dos agujeros roscados realizados en los puntos correspondientes a la mínima deflexión debida a su peso, para su montaje en el soporte, posibilitando de este modo su orientación dentro del campo de medida del brazo. La barra materializa quince puntos como el centro de las esferas y catorce distancias entre ellos.

El fabricante ha calibrado el patrón de esferas mediante su procedimiento de calibración interno ISM3D T01-01 acreditado por la Entidad Nacional de Acreditación (ENAC) para calibración de barras de bolas y agujeros en toda su longitud. Esta calibración consiste en determinar la distancia entre centros de una esfera de referencia (esfera 1) y el resto de esferas de la barra. Para ello, el fabricante define el sistema de referencia empleado para calibración tomando como eje X el definido por los centros de la esfera de referencia y la esfera 10 y el eje Z el definido por la normal al plano que pasa por los centros de las esferas 1, 10 y la esfera auxiliar fuera de la línea. En la Tabla 4.1 se presentan los resultados de la calibración del patrón utilizado.

Valor medido (mm)	Incertidumbre expandida, k=2 (μm)
0.0000	0.00
100.7838	0.32
200.0326	0.37
300.0651	0.44
399.9574	0.51
500.0911	0.60
600.1178	0.68
700.1398	0.77
800.1506	0.86
900.1792	0.95
1000.2011	1.04
1100.2174	1.13
1200.2468	1.22
1300.2734	1.31
1400.2939	1.40

Tabla 4.1. Certificado de calibración de la barra de esferas patrón

La incertidumbre asociada a los resultados de calibración para $k=2$ viene dada por la expresión que se muestra en la ecuación (4-4) donde L viene dada en milímetros:

$$U = 0.3\mu m + 0.0000006L \tag{4-4}$$

Además de la calibración en distancia, el procedimiento de calibración especifica las coordenadas medias de todas las mediciones para el centro de las quince esferas que aparece recogida en la siguiente Tabla 4.2. 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, tal y como recomiendan las normas de evaluación.

Esfera	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
1	0	0	0
2	100.7838	-0.3534	1.9078
3	200.0326	-0.0784	0.0282
4	300.0651	-0.0677	0.0645
5	399.9574	0.3921	1.7378
6	500.0911	0.0000	0.0000
7	600.1178	0.0274	0.1181
8	700.1398	0.0937	0.1703
9	800.1506	0.1942	-0.0774
10	900.1792	0.3285	0.0158
11	1000.2011	0.4450	-0.1221
12	1100.2174	0.5279	-0.0340
13	1200.2468	0.5473	-0.1352
14	1300.2734	0.5859	-0.1360
15	1400.2932	0.6107	-0.0675

Tabla 4.2. Coordenadas promedio en la calibración de la barra de esferas patrón

Por último, es muy importante que la barra patrón de esferas sea colocada sobre un soporte que cumpla con los requerimientos de estabilidad y rigidez, ya que esto es indispensable para obtener resultados fiables en el procedimiento de verificación. En la Figura 4.3 se muestra el soporte de precisión KOBA utilizado durante la verificación, que permite mediante fijaciones diseñadas al efecto, amarrar la barra al soporte y orientarla dentro del volumen de trabajo del brazo haciendo posible materializar posiciones del patrón horizontales, verticales y angulares, entre -45° y 45° , dentro del campo de trabajo del brazo cumpliendo con los requerimientos de estabilidad y rigidez.



Figura 4.3. Soporte de precisión KOBA fijación del patrón procedimientos de calibración y verificación

4.3.2 Procedimiento y posiciones de captura.

Tras elegir el patrón que se utilizará para la comparación con las medidas realizadas con el brazo, se deben seleccionar las posiciones del patrón y la distribución de puntos de referencia que servirán de comparación para determinar el error de medida del brazo y como base en el procedimiento de optimización.

La optimización de los parámetros geométricos a partir de los datos capturados se realiza con una aproximación por mínimos cuadrados mediante el método de Levenberg-Marquardt como algoritmo de optimización. Por este motivo, el ajuste de los parámetros que minimizan el error en las posiciones de captura de datos para identificación del brazo, puede hacer que si el número de posiciones y puntos capturados no es muy alto, el resultado pueda no ser generalizable a todas las posiciones. En el procedimiento de identificación de parámetros para la optimización del brazo, se plantearán diferentes funciones objetivo que a su vez tendrán en cuenta diferentes combinaciones de los parámetros de error considerados: minimización de error en distancia entre dos centros de dos esferas, repetibilidad de punto desde distintas orientaciones del palpador y configuraciones de articulación del brazo, minimización del error de punto, entendido el error de punto como la distancia entre las coordenadas de un mismo punto para distintas posiciones de la plataforma en sistema de referencia global y minimización de la diferencia entre el diámetro calculado de las esferas de registro de la plataforma superior y su valor nominal.

En el procedimiento de captura de datos de las esferas del patrón se utiliza un palpador de asiento cinemático de nido de esferas ver Figura 4.4, formado por tres esferas de 6 mm de diámetro dispuestas a 120° sobre el extremo del palpador, que es capaz de palpar directamente el centro de las esferas del patrón para distintas orientaciones del brazo. Además de permitir la captura de datos de un mismo punto en distintas orientaciones espaciales, permitirá la captura de información para un mismo punto obteniendo combinaciones de ángulos para el centro de la esfera palpada sin necesidad de mover el patrón a un número de posiciones elevado.

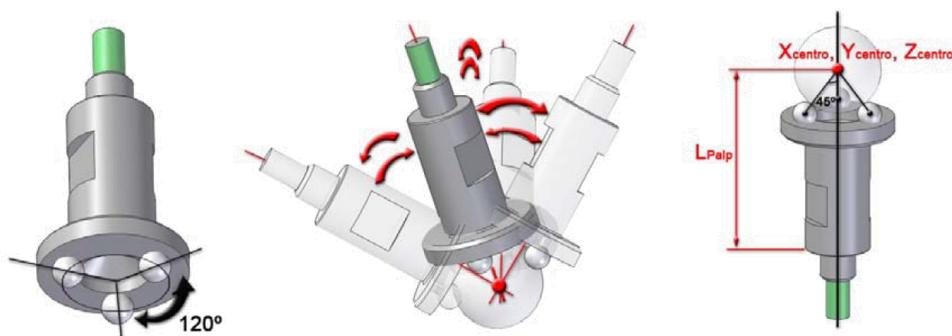


Figura 4.4. Palpador de asiento cinemático de esferas para captura continua

Es importante destacar en este punto la gran influencia en el error de medición que tiene tanto el propio operario que manipula el brazo de medición como la fuerza de palpado aplicada. Por ello es importante tratar de mantener una fuerza aplicada constante durante el palpado. Esta influencia de la fuerza de palpado del operario ha sido analizada por algunos autores en la bibliografía referenciada. En [21] se realiza un estudio de la influencia de la fuerza de contacto en la medición realizada con un brazo,

desarrollando un sensor que permite la medición de la misma y generando un modelo de deformación del palpador mediante elementos finitos.

En el proceso de captura de datos planteado, se pretende cubrir el máximo volumen de trabajo del brazo, es por ello que se aprovecha la rotación de la plataforma para incrementar el número de posiciones de captura, sin tener que generar nuevas posiciones físicas de medida del patrón. Para ello, se utilizará un patrón de barra de esferas que se colocará en dos posiciones angulares a 45° dentro del volumen de trabajo del brazo, Barradiag45arriba y Barradiagos45arriba, con cuatro esferas palpadas (3/5/7/9) por posición y se definirán seis distancias entre ellas, tal cual se describe en las Figura 4.5 y Figura 4.6. Se realizarán entre seis y ocho capturas por esfera en cada medición. Las dos posiciones seleccionadas en el proceso de captura serán dos de las que se utilizarán después en el proceso de verificación del brazo, y están basadas en las posiciones definidas en el ensayo de evaluación de precisión volumétrica aplicable a un brazo de medición según la normativa de evaluación ASME B89.4.22-2004. El hecho de seleccionar estas dos posiciones entre las veinte definidas en el ensayo de la norma [2], se debe a la representatividad de las mismas en el grado de cobertura del ensayo. Adicionalmente, el uso de la plataforma multi-registro con sus seis posiciones rotativas situadas a 60°, permite la evaluación de un número superior de posiciones del patrón sin necesidad de movimiento físico del mismo. En el caso en estudio, se definieron dos posiciones físicas del patrón en las cuales se realizó la captura de puntos de las esferas correspondientes para las seis posiciones de la plataforma, dando lugar a 12 posiciones de ensayo, que aseguran una cobertura del espacio de trabajo del brazo.

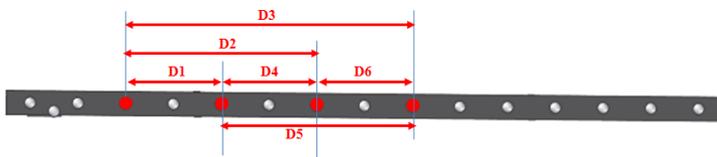
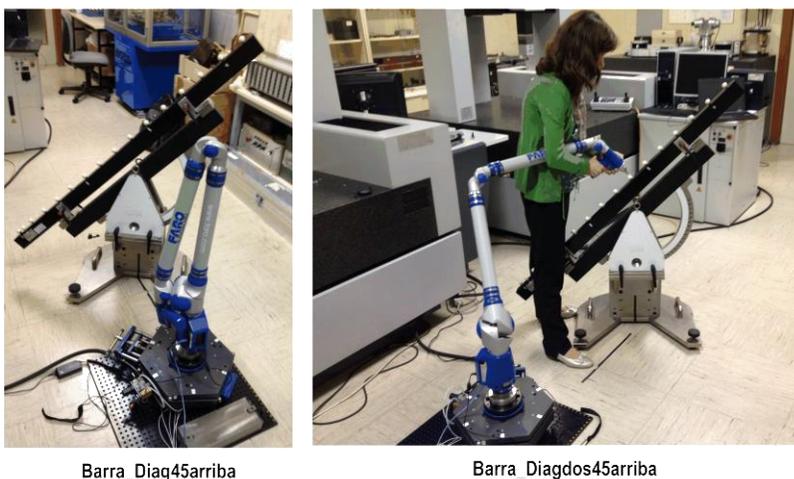


Figura 4.5. Cálculo de distancia entre esferas posición patrón Barradiag45arriba y Barradiagos45arriba



Barra_Diag45arriba

Barra_Diagos45arriba

Figura 4.6. Posiciones de barra patrón en identificación de parámetros

Los procedimientos de optimización basados en ajuste por mínimos cuadrados variarán los valores de los parámetros para acomodarse a los valores de error obtenidos. Por ello, un valor bajo de combinaciones de ángulos de articulación con un valor inicial de parámetros lo suficientemente cercano al valor óptimo, dará lugar a resultados de error finales bajos, aunque no garantiza que en posiciones fuera de las utilizadas para la optimización se mantenga este valor de error. La selección del número mínimo de posiciones del brazo necesarias es un problema complejo que implica una amplia toma de datos y un análisis posterior de la influencia de cada posición capturada sobre el error final, descartando de este modo las posiciones con menor influencia [73], [74]. Sin embargo, definir un tipo y número de posiciones mínimas no sería un concepto extensible a modelos diferentes de brazo. Incluso para un mismo modelo de brazo, los propios errores de fabricación y montaje que pudieran aparecer en esa unidad determinada y que serían diferentes a la siguiente, impedirían la extrapolación de la selección de posiciones para la identificación.

4.3.3 Métodos de evaluación del error y parámetros de calidad

Se hace necesario en este momento fijar una serie de parámetros de calidad que permitan realizar una evaluación del error obtenido a lo largo de las iteraciones del proceso de identificación de parámetros y seleccionar aquellos parámetros óptimos que minimicen el parámetro de calidad definido. Los parámetros a evaluar en este caso serán la distancia euclídea entre los centros de las esferas palpadas por posición del patrón expresados en sistema de referencia plataforma inferior, la desviación estándar de los puntos capturados para cada una de las esferas palpadas en sistema de referencia plataforma inferior, el error de punto o diferencia de coordenadas de una esfera en sistema de referencia plataforma inferior entre diferentes posiciones de la plataforma y el error de diámetro de las esferas de caracterización de la plataforma superior.

○ *Evaluación de error en distancia*

Dado que se dispone de la información de distancias nominales materializadas por el patrón calibrado obtenidas a partir de las coordenadas nominales de sus centros, Tabla 4.2, es posible evaluar el error cometido por el brazo en la medición de estas distancias. El centro de la esfera se calculará como la media de todos los puntos medidos en cada una de las capturas por el brazo expresando las coordenadas de los puntos en sistema de referencia plataforma inferior.

Para cada una de las dos posiciones del patrón, se materializan seis distancias nominales entre los centros de las esferas palpadas. Las distancias nominales del patrón se compararán con las distancias medidas por el brazo resultando como diferencia el error en medición de distancias cometido por el brazo. En total se evalúan seis distancias por posición de la barra y dos posiciones de la barra por posición de la plataforma en las seis posiciones de la plataforma, dando lugar a un total de 72 distancias y sus correspondientes errores en distancia según el esquema mostrado en la Figura 4.5.

La distancia euclídea entre parejas de esferas, a partir de los puntos medios calculados correspondientes al centro de la esfera viene expresada según la ecuación (4-5) donde

$$D_{i,j,k} = \sqrt{(\overline{X_{i,j}} - \overline{X_{i,k}})^2 + (\overline{Y_{i,j}} - \overline{Y_{i,k}})^2 + (\overline{Z_{i,j}} - \overline{Z_{i,k}})^2} \quad (4-5)$$

$D_{i,j,k}$ representa la distancia euclídea entre la esfera j y la esfera k de la posición i del patrón, siendo las coordenadas de su expresión las correspondientes a los puntos medios de los puntos capturados para la esfera j y la esfera k según ecuaciones (4-6), (4-7) y (4-8).

$$\bar{X}_{i,j} = \frac{\sum_{m=1}^{n_{ij}} X(m)_{ij}}{n_{ij}} \quad (4-6)$$

$$\bar{Y}_{i,j} = \frac{\sum_{m=1}^{n_{ij}} Y(m)_{ij}}{n_{ij}} \quad (4-7)$$

$$\bar{Z}_{i,j} = \frac{\sum_{m=1}^{n_{ij}} Z(m)_{ij}}{n_{ij}} \quad (4-8)$$

siendo n_{ij} el número de puntos capturados para la esfera j en posición de identificación i del patrón. De este modo, considerando $D_{n,j,k}$ como la distancia nominal obtenida mediante la tabla de calibración del patrón entre las esferas j y k , es posible calcular el error en distancias cometido entre las esferas j y k en la posición i del patrón según las ecuaciones (4-5) y (4-9). Este error corresponde a la desviación entre la distancia nominal del patrón y la distancia medida entre las esferas palpadas.

$$ED_{i,j,k} = \sqrt{(D_{i,j,k} - D_{n,j,k})^2} \quad (4-9)$$

o *Evaluación de la repetibilidad de medición*

Una vez determinadas las coordenadas de los puntos capturados para cada esfera y sus valores medios, es posible evaluar la repetibilidad de medición del brazo mediante el cálculo de la desviación estándar en cada una de las coordenadas de los puntos palpados expresados en sistema de referencia plataforma inferior. Un ejemplo del cálculo de la desviación estándar para la coordenada X , de la esfera j y posición i del patrón y n_{ij} el número de puntos capturados para la esfera j en posición de identificación i del patrón se muestra en la ecuación (4-10). Análogamente se realiza para la coordenada Y y la coordenada Z .

$$\sigma_{Xij} = \sqrt{\frac{\sum_{m=1}^{n_{ij}} (X(m)_{ij} - \bar{X}_{ij})^2}{n_{ij} - 1}} \quad (4-10)$$

Dentro de las funciones objetivo se introduce la desviación estándar como parámetro que incluye una suma cuadrática de las desviaciones estándar obtenidas en cada coordenada, ver ecuación (4-11).

$$\sigma_{Combij} = \sqrt{(2\sigma_{Xij})^2 + (2\sigma_{Yij})^2 + (2\sigma_{Zij})^2} \quad (4-11)$$

Los parámetros de calidad utilizados en este caso serán la desviación estándar obtenida para cada coordenada ($\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$) de todos los puntos medidos en cada esfera, teniendo en consideración para su cálculo las seis posiciones de la plataforma, dos posiciones del patrón y cuatro esferas por posición del patrón con un número entre seis y ocho puntos capturados por esfera.

○ *Evaluación del error de punto*

Una de las principales características de la plataforma multi-registro es la posibilidad que tiene para generar puntos fijos en un sistema de referencia global. En la evaluación del error de punto se calcula la diferencia en valor absoluto entre las coordenadas del centro de una misma esfera expresadas en sistema de referencia plataforma inferior para dos posiciones diferentes de la plataforma, según esquema mostrado en la Tabla 4.3. En total son quince errores de punto por esfera y posición del patrón, obteniendo un total de 120 errores de punto evaluados. Las coordenadas de un punto medido por el brazo en distintas posiciones de la plataforma expresadas en sistema de referencia plataforma inferior deberían ser las mismas, ya que la plataforma no debe generar ninguna variación en el resultado obtenido. Como parámetro de evaluación se toma el error medio de punto entre todos los valores calculados.

Posición plataforma	2	3	4	5	6
1	1-2	1-3	1-4	1-5	1-6
2		2-3	2-4	2-5	2-6
3			3-4	3-5	3-6
4				4-5	4-6
5					5-6

Tabla 4.3. Esquema de cálculo de errores de punto por esfera 3/5/7/9 y posición del patrón

De este modo, es posible calcular el error de punto para una esfera j , en la posición i del patrón para las k posiciones de la plataforma, como diferencia entre las coordenadas expresadas en sistema de referencia plataforma inferior del centro de la esfera en posición k y el centro de la misma esfera en posición $k-1$ de la plataforma, según se desarrolla en la ecuaciones (4-12), (4-6), (4-7) y (4-8).

$$EP_{i,j,k} = \sqrt{(\overline{X_{i,j,k+1}} - \overline{X_{i,j,k}})^2 + (\overline{Y_{i,j,k+1}} - \overline{Y_{i,j,k}})^2 + (\overline{Z_{i,j,k+1}} - \overline{Z_{i,j,k}})^2} \quad (4-12)$$

$i = 1,2; j = 1, \dots, 4; k = 1, \dots, 6$

○ *Evaluación de error de diámetro en esferas de registro de la plataforma superior.*

El último error que se considera en el procedimiento de optimización de parámetros del brazo, es el error cometido por el brazo en la medición de las esferas de registro de la plataforma superior. La medida de los centros de estas esferas, es necesaria para la determinación del sistema de referencia de la plataforma superior y para el cálculo de la matriz de cambio de sistema de referencia brazo a sistema de referencia plataforma superior. El error de medición en diámetro de la esfera i de registro se define mediante la ecuación (4-13) como la diferencia entre el valor nominal de diámetro calibrado de la esfera

de caracterización, d_{Cal} (20 mm) y d_i , diámetro obtenido de la esfera gaussiana asociada a partir de las mediciones de los puntos de la esfera realizados por el brazo de medición.

$$ER_i = abs(d_i - d_{cat}) \quad i = 1, \dots, 3; \quad (4-13)$$

4.3.4 Optimización de parámetros del modelo cinemático

Tras la definición del procedimiento de identificación y las posiciones de captura, se realiza el procedimiento de identificación u optimización de los parámetros del modelo del brazo para determinar los valores de los parámetros que hacen mínimo el error final de medida del brazo en todas las posiciones capturadas. En este trabajo se utiliza una aproximación por mínimos cuadrados mediante el método de Levenberg-Marquardt como algoritmo de optimización. El brazo articulado de medición utilizado en este trabajo es un brazo modelo Faro Platinum con siete grados de libertad. El modelo matemático implementado en el brazo de medida se puede describir, para una posición del brazo, mediante la ecuación (4-14) basada en el modelo cinemático del brazo descrito en el capítulo 3.

$$p = f(\alpha_i, d_i, \theta_i, \alpha_i) \quad i = 1, \dots, 7 \quad (4-14)$$

donde $p = (x, y, z)$ son las coordenadas del punto medido con respecto al sistema de referencia global del brazo de medida. Son por lo tanto 28 los parámetros del brazo a identificar en este procedimiento, con valores iniciales recogidos en la Tabla 3.1 del capítulo 3 en el modelado cinemático del brazo según modelo de D-H.

En este caso, se incluye en la función de optimización no solamente el modelo del brazo articulado sino también el modelo matemático de la plataforma multi-registro, ya que los términos de error en el caso de la evaluación del error en distancia, el error de punto o la repetibilidad de la medición, se realizarán para puntos capturados por el brazo pero expresados en sistema de referencia plataforma inferior o sistema global de referencia a través del modelo de la plataforma. Es por este motivo, que será necesario obtener las matrices de transformación homogéneas que permitan realizar el cambio de coordenadas del sistema de referencia brazo, al sistema de referencia plataforma superior y del sistema de referencia plataforma superior al sistema de referencia plataforma inferior.

La matriz de transformación homogénea que permite el cambio de sistema de referencia brazo a sistema de referencia plataforma superior, se calcula en cada iteración dentro del procedimiento de optimización a partir de las capturas realizadas por el brazo para las tres esferas de registro de la plataforma superior, cuyos centros permiten definir el sistema de referencia asociado. A partir de los ángulos de articulación $\theta_1 - \theta_7$ capturados en la medición de las esferas realizada con el brazo articulado, se puede calcular las coordenadas de las esferas y sus centros a través del modelo cinemático del brazo, y mediante los tres centros obtenidos, se calcula la matriz de transformación entre sistema de referencia brazo y sistema de referencia plataforma superior. Por lo tanto, esta matriz estará afectada por los parámetros optimizados del brazo obtenidos en el procedimiento de identificación, al igual que lo estarán el cálculo de las coordenadas y diámetros de las esferas de registro, que se utilizan como parámetro de calidad en el procedimiento de optimización.

La matriz de transformación homogénea que permite el cambio de sistema de referencia de la plataforma superior a la plataforma inferior, se calcula dentro del procedimiento de optimización para cada punto capturado en función de las lecturas de los sensores capacitivos obtenidas en la medición del punto por el brazo, pero no es dependiente de los parámetros optimizados.

Una vez expresados los puntos optimizados por el brazo en sistema de referencia plataforma inferior, se procede al cálculo de los diferentes términos de error explicados en el apartado 4.3.3 para todas las esferas (3/5/7/9), posiciones del patrón Barra_Diag45 y Barra_Diag452 y las seis posiciones rotativas de la plataforma. La función objetivo a minimizar suele definirse en términos de sumatorio de componentes del error considerado al cuadrado. En este trabajo se han definido ocho funciones objetivo que incluyen los diferentes términos de error que se han definido en el apartado 4.3.3, de manera individual o una combinación de los mismos tal cual se describe en la siguiente Tabla 4.4.

Función Objetivo	Términos de error incluidos en función objetivo
1	Error en distancia en sistema de referencia plataforma inferior
2	Error en distancia en sistema de referencia plataforma inferior y error de diámetros de esferas de registro en plataforma superior
3	Error en distancia y error de punto en sistema de referencia plataforma inferior
4	Error en distancia, error de punto en sistema de referencia plataforma inferior y error de diámetro de esferas de registro en plataforma superior
5	Error en distancia y desviación estándar combinada en sistema de referencia plataforma inferior
6	Error en distancia y desviación estándar combinada en sistema de referencia plataforma inferior y error de diámetro de esferas de registro en plataforma superior
7	Error en distancia, error de punto y desviación estándar combinada en sistema de referencia plataforma inferior
8	Error en distancia, error de punto, desviación estándar combinada en sistema de referencia plataforma inferior y error de diámetro de esferas de registro en plataforma superior

Tabla 4.4. Funciones objetivo definidas en procedimiento de optimización de parámetros

Los datos capturados en el procedimiento de identificación de parámetros se evaluarán mediante las funciones objetivo definidas y el esquema del procedimiento de optimización se refleja en la Figura 4.7. El criterio de parada para el algoritmo de optimización se ha diseñado basándose en la detección de la convergencia de la función objetivo.

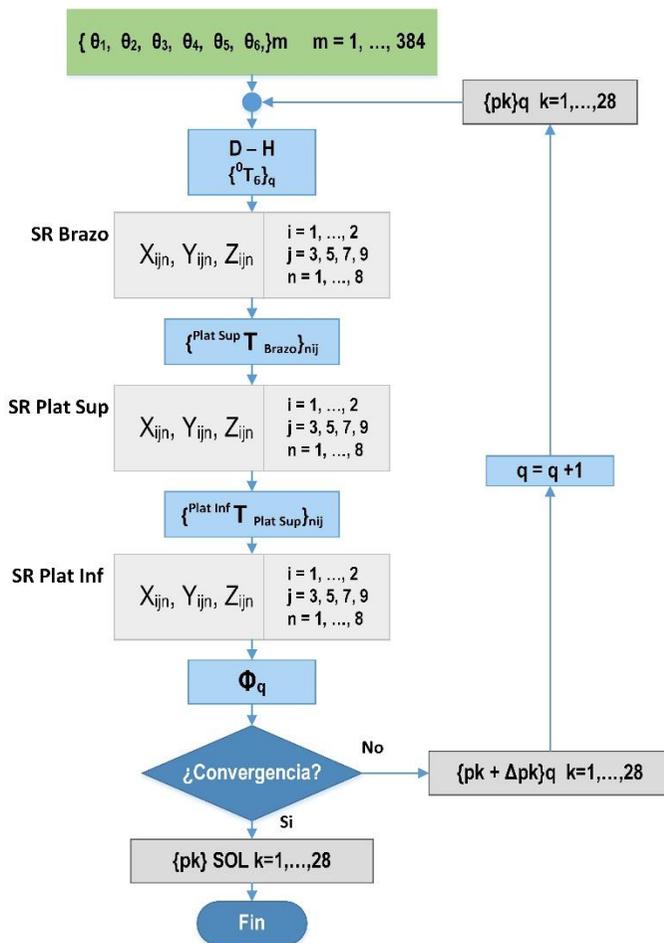


Figura 4.7. Esquema del procedimiento de optimización

La primera de las funciones objetivo definidas cuantifica el error en distancia del brazo para distancia considerada según ecuación (4-9), incluyendo los términos de error en distancia para las cuatro esferas capturadas, dos posiciones del patrón Barra_Diag45 y Barra_Diag452 y seis posiciones de la plataforma. La suma cuadrática de los 72 errores en distancia evaluados en el procedimiento de optimización se define como Función objetivo 1 que se desarrolla según ecuación (4-15).

$$\Phi = \sum_{l=1}^r \sum_{i=1}^p \sum_{j,k=1}^q \sqrt{(D_{i,j,k,l} - D_{n,j,k,l})^2} \quad (4-15)$$

con $p = 2$ posiciones del patrón, $q = 4$ esferas medidas por posición del patrón, esferas 3 / 5 / 7 / 9 y $r = 6$ posiciones de la plataforma.

La segunda función objetivo, *Función objetivo 2*, incluye como término de error adicional al error en distancia, el error de diámetro de cada una de las tres esferas de registro de la plataforma superior que se describe en apartado 4.3.3 según ecuación (4-13). De este modo se pretende incorporar a la

optimización, la minimización del error cometido por el brazo en la proceso de medición de las tres esferas de caracterización de la plataforma superior y su expresión como suma cuadrática de los errores de diámetro cometidos por el brazo en la medición de cada una de las tres esferas de registro, se muestra en la siguiente ecuación (4-16) conjuntamente con el error en distancia.

$$\Phi = \sum_{l=1}^r \sum_{i=1}^p \sum_{j,k=1}^q \sqrt{(D_{i,j,k,l} - D_{n,j,k,l})^2 + ER_1^2 + ER_2^2 + ER_3^2} \quad (4-16)$$

con $p = 2$ posiciones del patrón, $q = 4$ esferas medidas por posición del patrón, esferas 3 / 5 / 7 / 9 y $r = 6$ posiciones de la plataforma.

Como se ha descrito en el apartado anterior, a través del modelo de la plataforma y las lecturas de los sensores capacitivos integrados en ella, es posible obtener la matriz de transformación del sistema de referencia plataforma superior al sistema de referencia plataforma inferior para cada punto medido y posición de la plataforma evaluada. Un mismo punto debería tener las mismas coordenadas en sistema de referencia plataforma inferior, pudiéndose calcular un error de punto como diferencia de las coordenadas de un punto expresadas en sistema de referencia inferior entre dos posiciones de la plataforma, ver ecuación (4-12). La inclusión de este término de error de punto en la función objetivo conjuntamente con el error en distancia, da lugar a la expresión de la *Función objetivo 3* según ecuación (4-17).

$$\Phi = \sum_{l=1}^r \sum_{i=1}^p \sum_{j,k=1}^q \sqrt{(D_{i,j,k,l} - D_{n,j,k,l})^2 + EP_{ijl}^2} \quad (4-17)$$

con $p = 2$ posiciones del patrón, $q = 4$ esferas medidas por posición del patrón, esferas 3 / 5 / 7 / 9 y $r = 6$ posiciones de la plataforma.

El último término de error dentro de los métodos de evaluación de error definidos, a incluir en las funciones objetivo del procedimiento, es la desviación estándar combinada de las capturas de puntos en todas las esferas, posiciones del patrón y posiciones de la plataforma expresados en sistema de referencia plataforma inferior. Este término permite evaluar la repetibilidad de la medición llevada a cabo por el sistema. Por lo tanto puede formularse una nueva función objetivo, *Función objetivo 5* según ecuación (4-18), que combine una minimización del error en distancia entre centros de esferas expresados en sistema de referencia plataforma inferior y una reducción de la desviación estándar combinada, evaluando el comportamiento del brazo tanto en precisión volumétrica como en repetibilidad de punto.

$$\Phi = \sum_{l=1}^r \sum_{i=1}^p \sum_{j,k=1}^q \sqrt{(D_{i,j,k,l} - D_{n,j,k,l})^2 + \sigma_{Combijl}^2} \quad (4-18)$$

La optimización se realizará con $p = 2$ posiciones del patrón, $q = 4$ esferas medidas por posición del patrón, esferas 3 / 5 / 7 / 9 y $r = 6$ posiciones de la plataforma.

Otras posibles funciones objetivo que se han incluido en el procedimiento de optimización de parámetros del brazo realizado, combinan los distintos términos de error mostrados en el apartado 4.3.3 y se muestran a continuación en las ecuaciones (4-19), (4-20), (4-21) y (4-22). Para todas las funciones objetivo, el procedimiento de optimización se llevará a cabo con $p = 2$ posiciones del patrón, $q = 4$ esferas medidas por posición del patrón, esferas 3 / 5 / 7 / 9 y $r = 6$ posiciones de la plataforma.

Función objetivo 4

$$\Phi = \sum_{l=1}^r \sum_{i=1}^p \sum_{j,k=1}^q \sqrt{(D_{i,j,k,l} - D_{n,j,k,l})^2 + EP_{i,j,l}^2 + ER_1^2 + ER_2^2 + ER_3^2} \quad (4-19)$$

Función objetivo 6

$$\Phi = \sum_{l=1}^r \sum_{i=1}^p \sum_{j,k=1}^q \sqrt{(D_{i,j,k,l} - D_{n,j,k,l})^2 + \sigma_{Combi j l}^2 + ER_1^2 + ER_2^2 + ER_3^2} \quad (4-20)$$

Función objetivo 7

$$\Phi = \sum_{l=1}^r \sum_{i=1}^p \sum_{j,k=1}^q \sqrt{(D_{i,j,k,l} - D_{n,j,k,l})^2 + EP_{i,j,l}^2 + \sigma_{Combi j l}^2} \quad (4-21)$$

Función objetivo 8

$$\Phi = \sum_{l=1}^r \sum_{i=1}^p \sum_{j,k=1}^q \sqrt{(D_{i,j,k,l} - D_{n,j,k,l})^2 + EP_{i,j,l}^2 + \sigma_{Combi j l}^2 + ER_1^2 + ER_2^2 + ER_3^2} \quad (4-22)$$

Los resultados obtenidos para el conjunto de parámetros identificados mediante las ocho funciones objetivo mostradas en ecuaciones (4-15), (4-16), (4-17), (4-18), (4-19), (4-20), (4-21) y (4-22), así como los parámetros de calidad de medida correspondientes a la aplicación de estos parámetros sobre las posiciones de identificación, se muestran en las Tabla 4.5, Tabla 4.6 y Tabla 4.7.

Fobjetivo	n - iter	Error medio distancia (mm)	Error max distancia (mm)	Error min distancia (mm)	Error medio punto (mm)	DesvStd X (mm)
Valor inicial	1	16.925689	37.059498	0.932401	5.352900	10.985992
1	3104	0.004480	0.010466	0.000903	0.107532	0.221863
2	349	0.023040	0.046710	0.002468	0.367437	0.505831
3	552	0.006353	0.013552	0.000378	0.028136	0.044889
4	15284	0.077099	0.137631	0.002994	0.047601	0.114761
5	320	0.006946	0.014993	0.000798	0.030079	0.036564
6	958	0.024820	0.069164	0.000340	0.209552	0.239164
7	494	0.006901	0.012825	0.002808	0.028391	0.042739
8	5308	0.079938	0.138188	0.005267	0.047135	0.113303

Fobjetivo	n - iter	DesvStd Y (mm)	DesvStd Z (mm)	Error ER 1 (mm)	Error ER 2 (mm)	Error ER 3 (mm)
Valor inicial	1	11.233169	11.179399	0.301191	0.219957	0.276728
1	3104	0.121318	0.162483	0.162725	0.104396	0.145396
2	349	0.712134	0.584222	0.011953	0.010364	0.008445
3	552	0.042732	0.033180	0.163009	0.105417	0.147457
4	15284	0.116623	0.142431	0.093783	0.043371	0.018735
5	320	0.041649	0.027507	0.161034	0.103399	0.146935
6	958	0.376967	0.250960	0.024254	0.009155	0.001549
7	494	0.038958	0.030951	0.163325	0.105565	0.147043
8	5308	0.115127	0.135399	0.095449	0.044958	0.019288

Tabla 4.5. Parámetros de calidad obtenidos en procedimiento de optimización de parámetros para funciones objetivo 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 8

Revisando los valores de los parámetros de calidad obtenidos para la evaluación de las distintas funciones objetivo planteadas (1-8), se observa claramente que el procedimiento de optimización minimiza claramente el error en distancia en todas las funciones ya que se incluye como término de error a minimizar en todas las funciones objetivo. Se obtienen los mejores valores de error medio en distancia para las funciones 1 con valor 0.004480 mm, función 3 con valor 0.006353 mm, función 5 con valor 0.006946 mm y función 7 con valor 0.006901 mm, valores que pueden considerarse buenos teniendo en cuenta la precisión volumétrica de ± 0.043 mm indicada por el fabricante para el brazo Faro Platinum que se utiliza en este estudio. Coinciden también para estas funciones objetivo 3, 5 y 7, los mejores valores de error de punto obtenidos, siendo 0.028136 mm para la función 3, 0.030079 mm para la función 5 y 0.028391 mm para la función 7. Igualmente en el caso de los resultados de desviación estándar en las coordenadas X,Y,Z con valores 0.044889 mm, 0.042732 mm y 0.033180 mm para la

función 3, 0.036564 mm, 0.041649 mm y 0.027507 mm para la función 5 y 0.042739 mm, 0.038958 mm y 0.030951 mm para la función 7, siendo el valor de repetibilidad suministrado por el fabricante 0.030 mm. Se observan mayores valores de desviación estándar en la coordenada X y los valores más bajos se obtienen en la coordenada Z. Si bien en la función objetivo 3 no se incluyó la desviación estándar combinada, ni el error de punto en la función objetivo 5, es reseñable indicar que los valores de los parámetros de calidad obtenidos son buenos en ambos casos a pesar de no considerarse en la optimización.

En lo que respecta a los errores de diámetro en la medición de las esferas de registro por el brazo, el procedimiento de optimización disminuye el parámetro de calidad correspondiente en los casos de las funciones objetivo 2, 4, 6 y 8 donde se incluyen como término, mostrando los mejores valores en el caso de la optimización con la función objetivo 2. Con esta función se obtienen valores de error en diámetro de la esfera de registro 1 de 0.011953 mm, en la esfera de registro 2 se obtiene un valor de error de 0.0103641 mm y en la esfera de registro 3 un valor de 0.008445 mm, frente a los valores iniciales de 0.301191 mm en la esfera 1, 0.219957 mm en la esfera 2 y 0.276728 mm en la esfera 3.

En estas funciones objetivo 2, 4, 6 y 8 donde el error de diámetro de las esferas se reduce, no se obtienen sin embargo tan buenos resultados para el resto de los parámetros de calidad mencionados. Con lo cual puede concluirse, que las funciones objetivo que mejor funcionan en el procedimiento de identificación de parámetros son las funciones 3, 5 y 7 que incluyen combinaciones de error en distancia, error de punto y desviación estándar combinada, mostrando la función 7 que incluye los tres parámetros de error mencionados un ligero mejor comportamiento.

Parámetro	Valor nominal	Valor identificado FObjetivo1	Valor identificado FObjetivo2	Valor identificado FObjetivo3	Valor identificado FObjetivo4
a1	50 mm	43.274159	51.776041	42.746939	44.237061
a2	0 mm	0.607964	0.395096	0.749638	0.006606
a3	30 mm	28.392579	19.473669	28.849326	28.339672
a4	30 mm	30.358800	23.989842	29.192761	30.004843
a5	30 mm	28.561514	27.795473	28.412357	28.390246
a6	30 mm	30.373941	30.283693	31.622402	7.465460
a7	0 mm	0.258559	0.121056	-0.333306	-0.199152
α 1	90°	89.994365	90.417739	89.955337	90.023963
α 2	90°	89.844935	90.356394	89.758108	89.841253
α 3	-90°	-90.152820	-90.436800	-90.134967	-90.311468
α 4	-90°	-89.551441	-89.400897	-89.527035	-89.364591
α 5	-90°	-89.991538	-89.964820	-89.944076	-90.018747
α 6	-90°	-90.068252	-90.210698	-88.346853	-103.805250
α 7	0°	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
d1	75 mm	74.985618	75.008158	232.250742	236.127190
d2	0 mm	0.361919	2.098472	1.283254	0.385010
d3	590 mm	592.011143	591.799140	591.416303	590.811790
d4	0 mm	1.265343	7.103493	0.919921	0.653912
d5	590 mm	591.400886	589.675643	591.443917	590.673239
d6	0 mm	1.055822	1.504482	-6.170236	59.881326
d7	225 mm	243.837663	244.567164	243.787367	252.904976
θ 1	0°	0.199443	0.068451	4.340318	5.816687
θ 2	135°	134.700999	135.056125	134.794556	134.974633
θ 3	0°	4.223837	4.158953	4.321587	4.434773
θ 4	90°	84.575428	85.729530	84.618928	84.647793
θ 5	180°	180.167185	180.101049	180.114780	179.782792
θ 6	135°	144.538119	144.630466	144.714473	139.030820
θ 7	0°	-8.857028	-6.154120	37.686597	-18.382726

Tabla 4.6. Valores de parámetros cinemáticos identificados mediante funciones objetivo 1-4 para todas las posiciones capturadas

Parámetro	Valor nominal	Valor identificado FOBJetivo5	Valor identificado FOBJetivo6	Valor identificado FOBJetivo7	Valor identificado FOBJetivo8
a1	50 mm	42.936153	50.088534	42.703906	44.194289
a2	0 mm	0.811410	0.685293	0.752060	0.035346
a3	30 mm	28.700404	23.446007	28.861675	28.353346
a4	30 mm	29.519460	24.959100	29.203858	29.950610
a5	30 mm	28.519632	28.158644	28.432982	28.398542
a6	30 mm	28.537627	30.088899	31.217075	14.376503
a7	0 mm	-0.319660	0.013519	-0.330134	-0.209582
α 1	90°	89.937551	89.977645	89.954349	90.025240
α 2	90°	89.746520	89.874178	89.755459	89.838638
α 3	-90°	-90.137604	-90.501400	-90.136722	-90.307342
α 4	-90°	-89.505795	-89.074222	-89.525964	-89.372858
α 5	-90°	-89.961950	-89.897358	-89.943932	-90.014392
α 6	-90°	-89.696078	-89.945164	-88.283833	-105.382549
α 7	0°	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
d1	75 mm	204.491670	75.005223	233.681508	236.069150
d2	0 mm	1.279169	4.036096	1.261773	0.362146
d3	590 mm	591.131055	588.756089	591.412029	590.815119
d4	0 mm	0.727994	2.495117	0.898744	0.657839
d5	590 mm	591.483260	589.390092	591.443186	590.663693
d6	0 mm	-0.620549	0.629536	-6.423540	67.096979
d7	225 mm	243.989792	244.016579	243.816002	254.394384
θ 1	0°	3.229200	1.368063	4.466953	5.813352
θ 2	135°	134.793068	135.230290	134.795225	134.971487
θ 3	0°	4.323799	4.395343	4.319706	4.427240
θ 4	90°	84.611076	85.387424	84.616967	84.650531
θ 5	180°	180.076061	179.850183	180.113957	179.796598
θ 6	135°	144.017766	144.493621	144.622085	140.646131
θ 7	0°	35.956984	-0.580897	38.352903	-15.126713

Tabla 4.7. Valores de parámetros cinemáticos identificados mediante funciones objetivo 5-8 para todas las posiciones capturadas

4.3.5 Evaluación de los parámetros identificados

El proceso de optimización de parámetros debe concluir con una evaluación del comportamiento del brazo con el conjunto de parámetros óptimos identificados en una posición o posiciones diferentes a las utilizadas en la optimización. En este caso se ha elegido como posición de test la disposición de la barra patrón Barra_Diag45Abajo para la posición 4 de la plataforma, por ser una posición diagonal que permite una superposición de los volúmenes de trabajo en dos octantes del brazo. Para esta posición se han capturado entre seis y ocho puntos de las esferas 3, 5, 7 y 9 análogamente al procedimiento realizado en la optimización girando la plataforma hasta la posición 4. Como parámetros de calidad se han elegido los mismos que se han utilizado en el procedimiento de identificación de parámetros, ver apartado 4.3.3

aplicados a la posición de evaluación: error en distancia, error de punto, desviación estándar y error de diámetro de las esferas de caracterización de la plataforma superior.

Los resultados de los parámetros de calidad obtenidos para el conjunto de parámetros óptimos en la evaluación de las ocho funciones objetivo según ecuaciones (4-15), (4-16), (4-17), (4-18), (4-19), (4-20), (4-21) y (4-22) en la posición de prueba del patrón se incluyen en la Tabla 4.8.

Fobjetivo	n - iter	Error medio distancia (mm)	Error max distancia (mm)	Error min distancia (mm)	Error medio punto (mm)	DesvStd X (mm)
Valor inicial	1	16.560583	28.719948	0.076849	10.734906	9.607196
1	3104	0.004380	0.011066	0.000797	0.107732	0.221663
2	349	0.023240	0.047710	0.002561	0.366437	0.505731
3	552	0.005853	0.012452	0.000413	0.029036	0.044389
4	15284	0.077999	0.138931	0.002991	0.047901	0.116461
5	320	0.005546	0.015693	0.000816	0.030179	0.035664
6	958	0.025320	0.069064	0.000183	0.210052	0.238664
7	494	0.006101	0.012625	0.002799	0.028691	0.042039
8	5308	0.079638	0.137988	0.005427	0.046235	0.112103

Fobjetivo	n - iter	DesvStd Y (mm)	DesvStd Z (mm)
Valor inicial	1	7.827397	7.827397
1	3104	0.121118	0.160983
2	349	0.711834	0.583822
3	552	0.044232	0.032980
4	15284	0.116423	0.142731
5	320	0.040549	0.027207
6	958	0.378567	0.251360
7	494	0.040158	0.031351
8	5308	0.114927	0.134099

Tabla 4.8. Resultados de evaluación con el juego de parámetros identificado en procedimiento de optimización para posición de prueba del patrón.

Como se puede comprobar en los resultados obtenidos en la posición de prueba, se obtienen valores en el mismo orden que en las posiciones de optimización para los errores medios en distancia, error de punto y desviación estándar para las funciones que mejor funcionan en la optimización 3, 5 y 7. Observando la función objetivo 7, se obtienen valores de error medio en distancia de 0.006101 mm, error de punto de 0.028691 mm y desviaciones estándar en coordenada X 0.042039 mm, coordenada Y 0.040158 mm y coordenada Z 0.031351 mm. El error máximo en distancia en esta función 7 0.012625 mm, se encuentra por debajo del valor máximo obtenido en la identificación 0.012825 mm.

4.4 Procedimiento de verificación de brazo articulado de medición por coordenadas con plataforma multi - registro.

Se presenta a continuación el procedimiento de verificación planteado para un brazo articulado de medición por coordenadas conjuntamente con la plataforma multi-registro. Para ello, se realizó una verificación volumétrica del brazo con la plataforma siguiendo las recomendaciones de la norma ASME B89.4.22-2004 usando una barra patrón de esferas calibrada de longitud 1400 mm y un palpador rígido esférico de material cerámico de 3 mm de diámetro. La precisión volumétrica indicada por el fabricante para este modelo de brazo articulado de medición por coordenadas es de ± 0.043 mm.

Como se ha mencionado anteriormente, el objeto patrón utilizado en este trabajo durante los procedimientos de calibración y verificación del brazo de medición es un patrón unidimensional con esferas con distancias entre sus centros calibradas con una alta precisión. Tomando como referencia la normativa ASME B89.4.22 – 2004 [2], en la cual el ensayo para evaluar la precisión volumétrica del brazo se realiza definiendo veinte posiciones diferentes de ensayo que permiten cubrir el volumen de trabajo del brazo, se procede a la definición de las posiciones del patrón para la verificación a realizar con la plataforma multi-registro.

Con el uso de la plataforma, el brazo se posiciona encima de la plataforma, la cual permite un giro del brazo definiendo seis posiciones de rotación del brazo con respecto al sistema global de la plataforma, ver Figura 4.8. En este caso, se evaluaron únicamente cinco posiciones del patrón de las especificadas por ASME, ver Figura 4.9, pero teniendo en cuenta las seis posiciones de rotación que permite la plataforma, el número total de posiciones evaluadas es equivalente a treinta posiciones del patrón. Cada vez que la plataforma rota a una nueva posición permitiendo al brazo medir la misma esfera, los valores de los encoders angulares del brazo varían y por lo tanto un nuevo volumen de trabajo es evaluado para cada posición de la plataforma. El uso conjunto de la plataforma y el brazo permite evaluar un número superior de diferentes posiciones y orientaciones de la barra patrón en comparación con los definidos en la norma, pudiendo concluir que la evaluación del volumen de trabajo del brazo se realizará de manera satisfactoria. La principal ventaja de la plataforma es la reducción que permite en el número de posiciones físicas del patrón en los ensayos, compensadas por las posiciones de rotación, hecho que genera una importante reducción en tiempo de ensayo, esfuerzo físico, personal y espacio necesario en la realización de los ensayos.

La plataforma multi-registro tiene una alta repetibilidad de posicionamiento, permitiendo determinar con alta precisión la posición y orientación de la placa superior de la plataforma donde va colocado el brazo, respecto a la placa inferior de la plataforma que permanece fija. Esto se consigue por medio de seis sensores capacitivos con resolución nanométrica. Para cada posición de ensayo, se capturaron simultáneamente la medida de la esfera con el brazo y las lecturas de los sensores capacitivos. El hecho de que la plataforma tenga una alta repetibilidad de posicionamiento, asegura que los sensores capacitivos se mantengan en su rango de trabajo (100-200 μm) en cada una de las seis posiciones de la plataforma durante el proceso de verificación del brazo.

Las diferentes posiciones de la barra patrón que fueron evaluadas con el brazo de medición y con la plataforma se denominan: posición1_Barra_Vertical, posición2_Barra_Horizontal, posición3_Barra_Diag45abajo, posición4_Barra_Diag45arriba y posición5_Barra_Diagdos45arriba y se muestran en las Figura 4.9 a continuación:

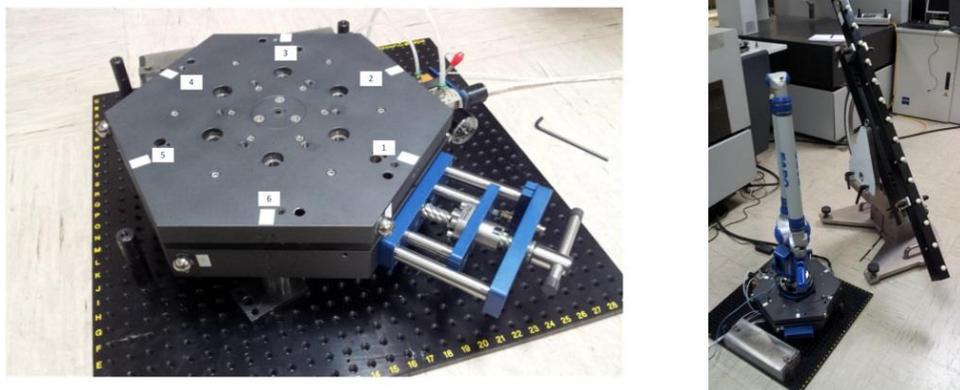


Figura 4.8. Plataforma multi-registro y ensayo de verificación de brazo con plataforma multi-registro

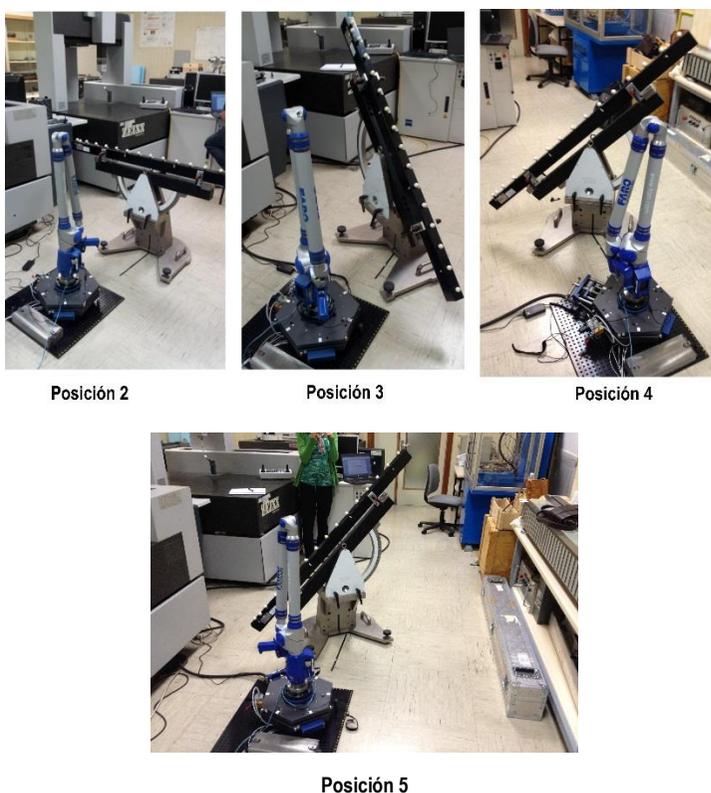


Figura 4.9. Posiciones del patrón en verificación brazo articulado con plataforma multi-registro

Asimismo dependiendo de la posición del patrón evaluada, se miden cuatro o cinco esferas según disposición en Figura 4.10, Figura 4.11, Figura 4.12, Figura 4.13 y Figura 4.14. Se capturaron nueve puntos por esfera determinando el centro de la esfera gaussiana asociada, y calculando a partir de ellos la distancia entre esferas y la desviación en distancia resultante respecto a la longitud calibrada. Se materializaron 252 distancias entre centros para las seis posiciones de la plataforma, obteniendo 252

errores en distancia. Estos errores fueron utilizados para evaluar la precisión volumétrica del brazo en su volumen de trabajo calculando como valores resultado el máximo error en distancia, el error medio y dos veces su valor cuadrático medio, 2RMS.

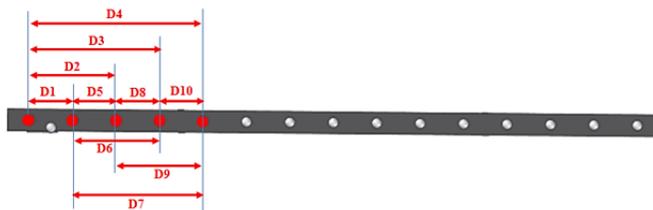


Figura 4.10. Esferas medidas y distancias entre esferas para la posición 1 Barra Vertical.

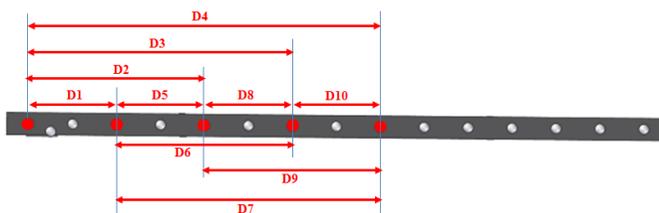


Figura 4.11. Esferas medidas y distancias entre esferas para la posición 2 Barra Horizontal

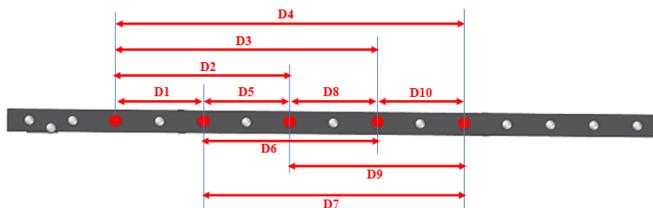


Figura 4.12. Esferas medidas y distancias entre esferas para la posición 3 Barra Diag45abajo.

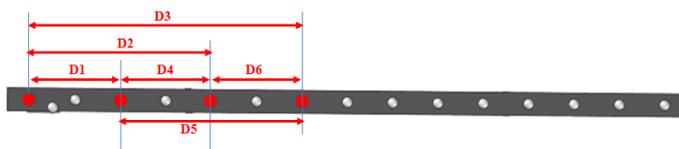


Figura 4.13. Esferas medidas y distancias entre esferas para la posición 4 Barra Diag45arriba

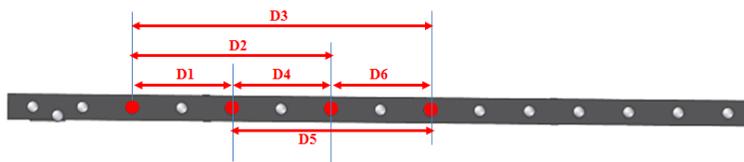


Figura 4.14. Esferas medidas y distancias entre esferas para la posición 5 Barra_Diagdos45arriba

Tras la presentación en este apartado del procedimiento de verificación de un brazo articulado utilizando la plataforma multi-registro, se procederá en el capítulo 5, a la extrapolación de su utilización en la definición de nuevos procedimientos de verificación de equipos de medición de alto rango, láser tracker, donde no solamente se presentará el procedimiento de verificación conjunto láser tracker - plataforma, sino que se mostrará una nueva técnica de generación de distancias patrón virtuales en mallas patrón virtuales de medición. La técnica desarrollada en esta tesis, se basa en el conocimiento del giro de la plataforma con gran precisión de una posición a otra, para la generación de un punto virtual conocido un punto medido y cuantificado el giro realizado por la plataforma. El concepto de verificación de instrumentos portátiles de medición con plataforma multi-registro mediante distancias virtuales, se presenta como una línea futura de trabajo con aplicación igualmente a brazos articulados de medición, si bien se decide desarrollarla en primer lugar para láser tracker, debido a que para estos equipos de alto rango, las distancias patrón y espacios necesario en procedimientos de verificación y calibración son mayores que en brazos articulados y el impacto de la utilización de esta nueva técnica podría ser inicialmente más elevado.

4.4.1 Resultados del procedimiento de verificación del brazo con plataforma multi-registro.

Los resultados de la verificación del brazo realizada con la plataforma en las diferentes posiciones y orientaciones de la barra de esferas patrón se muestran en la Figura 4.15. En el ensayo de evaluación de la precisión volumétrica del brazo recogido en la normas [2] que se explica en el capítulo 2, se calcula la distancia centro a centro entre esferas medidas de la barra patrón y se obtiene el error en distancia como la diferencia de la medida al valor calibrado. Los parámetros resultado del ensayo son la desviación máxima en distancia, el rango de desviaciones en distancia y dos veces el error cuadrático medio 2RMS. El error máximo en distancia es 0.09016 mm correspondiente a la posición seis de la plataforma en la orientación vertical del patrón. El error medio en distancia y el valor de 2RMS son 0.02034 mm y 0.05909 mm respectivamente. Estos valores resultado con el valor de error máximo permisible suministrado por el fabricante del brazo tal cual se muestra en la Tabla 4.9.

	Brazo - Plataforma	Fabricante FARO
Max error distancia (mm)	0.09016	
Rango error distancia (mm)	0.08987	
2RMS (mm)	0.05909	±0.04300

Tabla 4.9. Resultados comparativos de la prueba de evaluación de precisión volumétrica en procedimiento verificación brazo con plataforma multi-registro y especificación fabricante

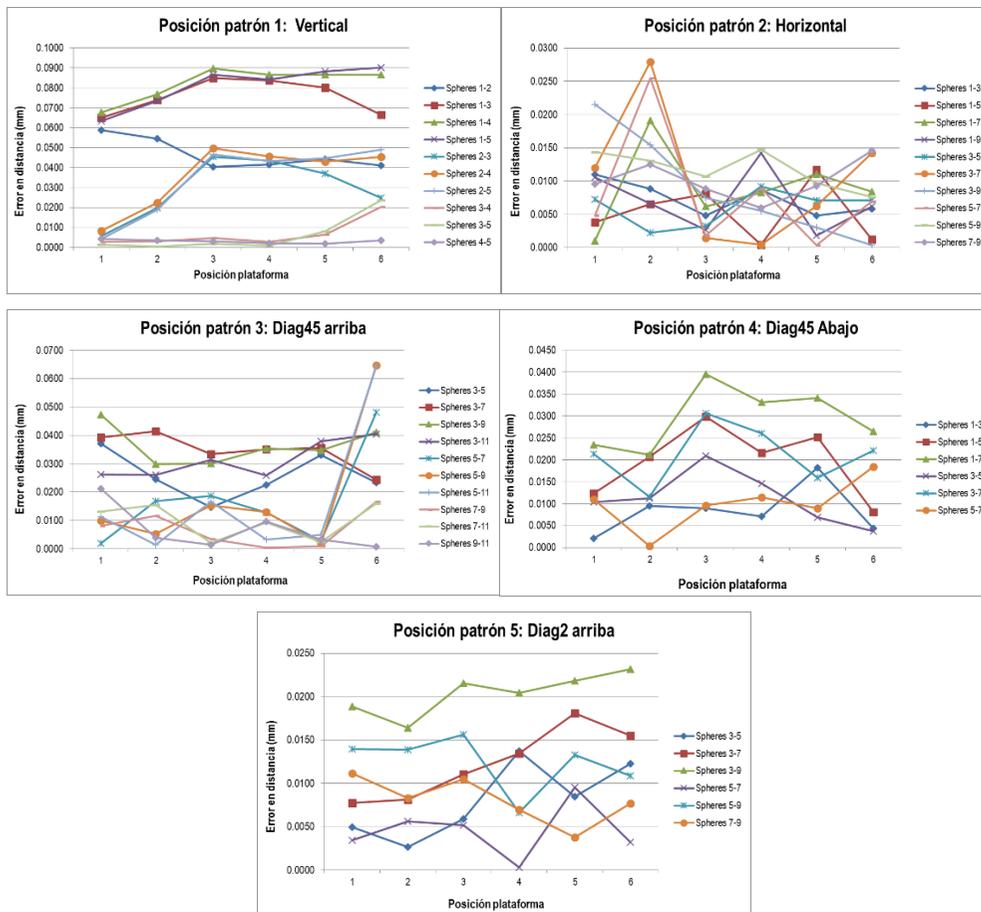


Figura 4.15. Error en distancia por posición de barra patrón y posición rotativa de la plataforma

Como puede observarse en la Tabla 4.9, el valor de error 2RMS obtenido en la verificación del brazo articulado de medición por coordenadas conjuntamente con la plataforma multi-registro es muy próximo al valor de error volumétrico suministrado por el fabricante FARO para el brazo utilizado, hecho que puede corroborar la precisión y repetibilidad de posicionamiento de la plataforma.

4.5 Comparativa de procedimientos de evaluación de brazos articulados de medición por coordenadas con plataforma multi-registro.

En este capítulo se presenta el análisis comparativo realizado de los resultados obtenidos en el procedimiento de verificación de un brazo articulado de medición por coordenadas de acuerdo a las normas ASME B89.4.22 – 2004 [2], VDI/VDE 2617 Parte 9 -2009 [3] y el borrador de ISO/CD 10360 parte 12 [4] publicado en 2014, y los valores obtenidos en la verificación volumétrica del mismo brazo usando una plataforma multi-registro, ver apartado 4.4, para estimar su precisión y repetibilidad. La principal ventaja de esta plataforma radica en la importante reducción del tiempo y esfuerzo físico del ensayo y la consecuente minimización de personal necesario para la realización del mismo. En este nuevo enfoque, el brazo de medición por coordenadas se fija en la parte superior de la plataforma que permite la rotación del mismo a diversas posiciones fijas según el procedimiento de verificación explicado en el apartado 4.4, ver Figura 4.16. El brazo de medición usado en este trabajo es un brazo de siete ejes modelo FARO Platinum con un volumen de medida de diámetro 2.4 m y una configuración 2-2-3. Para la realización de las pruebas definidas en las normas y la verificación con la plataforma, se hace uso de un objeto patrón calibrado que se dispone en diferentes posiciones y orientaciones del volumen de trabajo del brazo. El objeto patrón calibrado, una barra de esferas patrón de longitud 1400 mm en este caso, materializa la dimensión de referencia usada para determinar el error de medida del brazo a lo largo del proceso de medición.



Figura 4.16. Disposición del brazo en ensayos de normativa y brazo con plataforma multi-registro.

Los ensayos realizados evaluaron la capacidad del brazo para realizar mediciones de tamaño, forma y posición de una serie de esferas situadas en una barra patrón calibrada, así como la estimación de la precisión longitudinal volumétrica del brazo en su volumen de trabajo, comparando los valores obtenidos en los ensayos de acuerdo a los estándares [2], [3], [4] y los resultados de la verificación del brazo con la plataforma multi-registro. Finalmente se establecieron las pertinentes conclusiones que remarcaron el potencial uso de la plataforma multi-registro en procedimientos de calibración y verificación de brazos de medición por coordenadas.

4.5.1 Normativa aplicable

Como primera fase del trabajo, se analizó la normativa existente al respecto de procedimientos de verificación de brazos articulados de medición por coordenadas, ASME B89.4.22-2004, VDI/VDE 2617-2009 parte 9 e ISO/CD 10360 parte 12 -2014, ver apartado 2.3.1, identificando sus principales requerimientos, similitudes y diferencias en los ensayos especificados que se listan en la Tabla 4.10. Todos estos documentos especifican pruebas para caracterizar metrologicamente un brazo en términos de precisión y repetibilidad volumétrica. En relación con estas pruebas, ASME B89.4.22-2004 requiere la realización de los siguientes ensayos: prueba de diámetro efectivo, prueba de repetibilidad de punto o SPAT y prueba de precisión longitudinal volumétrica o rendimiento volumétrico. Por otra parte, VDI/VDE 2617-2009 parte 9 incluye las pruebas de error de palpado de tamaño, forma, posición y la prueba de rendimiento volumétrico teniendo en cuenta volúmenes de medición totales o parciales. Adicionalmente es importante mencionar el borrador de la norma ISO/CD 10360 parte 12 -2014 que mantiene los principales aspectos de ASME B89.4.22-2004 y VDI/VDE 2617-2009 parte 9, incluyendo algunas modificaciones que simplifican el proceso de verificación para los ensayos definidos: pruebas de error de palpado de tamaño y forma, prueba de error de posición de articulación y prueba de rendimiento volumétrico.

Sin embargo, los procesos de verificación que recomiendan las normas suelen implicar un largo tiempo de ensayo y gran carga de trabajo, ya que consisten en la captura repetitiva de puntos localizados sobre un patrón que adopta diversas posiciones y orientaciones cubriendo el máximo volumen de medida del brazo de medición. Para ello, el patrón debe moverse hasta adoptar una nueva posición, amarrándose firmemente a un soporte de medida que fije el patrón y asegure la distancia y altura requerida con respecto al brazo, repitiéndose el proceso tantas veces como posiciones de ensayo se definen en la prueba a realizar. Los ensayos experimentales se llevaron a cabo en este trabajo de acuerdo a [2] y [3] mientras que la verificación volumétrica del brazo con la plataforma multi-registro tomó como referencia la norma [2].

Grupo	VDI/VDE 2617-2009 parte 9	ASME B89.4.22-2004	ISO/CD 10360 parte 12 borrador
1	Prueba de error de palpado (tamaño)	Prueba de diámetro efectivo	Prueba de error de palpado (tamaño)
2	Prueba de error de palpado (forma)		Prueba de error de palpado (forma)
3	Prueba de error de palpado (posición)	Prueba de articulación de punto sencillo o repetibilidad de punto	Prueba de error de posición de articulación
4	Prueba de rendimiento volumétrico (volúmenes de medición totales o parciales)	Prueba de precisión longitudinal volumétrica o rendimiento volumétrico	Prueba de precisión longitudinal volumétrica

Tabla 4.10. Comparativa de ensayos para verificación y calibración de brazos según ASME B89.4.22, VDI/VDE 2617 e ISO/CD 10360

4.5.2 Ensayos de evaluación

A continuación se describen algunas de las principales características de los diferentes ensayos de las normas aplicables. Todos los ensayos incluidos en las normas que permiten la evaluación de la precisión de un brazo en la medición de un tamaño son similares, consistiendo en los tres casos en la medición de una esfera calibrada de diámetro entre 10 y 50 mm, localizada en una o varias posiciones del volumen de trabajo del brazo. Posteriormente se compara el resultado de la medición realizada con el valor de un diámetro de esfera calibrado, realizándose la medición una o varias veces. La desviación máxima respecto al valor calibrado obtenida en las posiciones y repeticiones llevadas a cabo en el ensayo, $D_i - D_{cal}$, es considerada como *error de palpado de tamaño*. En la siguiente Tabla 4.11 se pueden observar los principales parámetros incluidos en cada una de las tres normas [2], [3] y [4]. Puede remarcarse que en el caso de la norma VDI, el número de posiciones y repeticiones de ensayo es mayor que en ASME e ISO, hecho que puede generar una evaluación de repetibilidad de la medición más precisa. Las posiciones de ensayo adoptadas en la fase experimental para ambas normas se muestran en la Figura 4.17.

	VDI/VDE 2617-2009 parte 9	ASME B89.4.22-2004	ISO/CD 10360 parte 12 borrador
	Prueba de error de palpado (tamaño)	Prueba de diámetro efectivo	Prueba de error de palpado (tamaño)
Posiciones	3	1	2
Puntos por esfera	5	9	25
Repeticiones	5	3	1
Orientaciones	5 orientaciones palpador	Minimizar cambios	Minimizar cambios
Patrón	Esfera patrón (d =10 – 50mm)	Esfera patrón (d=10 – 50mm)	Esfera patrón (d < =51mm)
Cálculo del error	Máxima diferencia entre el diámetro medido y el valor del diámetro calibrado para todas las posiciones, PS	Máxima diferencia entre el diámetro medido y el valor del diámetro calibrado	Máxima diferencia entre el diámetro medido y el valor del diámetro calibrado por posición, P _{Size}

Tabla 4.11. Comparativa de ensayos para evaluación del error de palpado de tamaño según normativa



Figura 4.17. Posiciones ensayo de error de palpado tamaño / diámetro efectivo ASME B89.4.22-2004 VDI/VDE 2617-2009

La evaluación de la capacidad de un brazo de medición para determinar valores similares de las coordenadas de un punto en el espacio, adoptando diversas posiciones y orientaciones, se realiza con el ensayo de repetibilidad de punto (SPAT) en el caso de la norma ASME, con la prueba para determinar

el error de palpado de posición en el caso de la norma VDI y la prueba de prueba de error de posición de articulación en ISO. El principal objetivo de esta prueba es determinar la repetibilidad de medida del brazo teniendo en cuenta diferentes configuraciones del brazo para un mismo punto de medida. De acuerdo a [3], para cada posición de prueba y repetición de medida, se calculan las coordenadas de la esfera gaussiana asociada a partir de cinco puntos capturados por esfera. Las cinco repeticiones por posición se realizan teniendo en cuenta las diferentes orientaciones del palpador y posteriormente se calcula la máxima distancia euclídea δ_i entre dos cualesquiera de los cinco centros de las esferas obtenidos por posición. La mayor distancia euclídea entre las tres posiciones evaluadas determina el *error de palpado de posición, PL*.

La principal diferencia con el ensayo de repetibilidad de punto SPAT realizado en [2], es que la prueba se realiza materializando el punto fijo a medir mediante un asiento cónico. El objeto de estos asientos es mantener el contacto entre el asiento y la esfera del palpador montado en el brazo en tres puntos, independientemente de la orientación de la mano del brazo. De este modo se asegura que, para todos los datos capturados, el centro de la esfera palpadora que representa el punto medido, se encuentre siempre en la misma posición física. Tras diez repeticiones, se calculan los siguientes parámetros: δ_{max} (distancia máxima entre los puntos capturados y la distancia media para las tres posiciones de ensayo, δ_i), rango de δ_i y la desviación en distancia $2\sigma_{SPAT}$.

El objetivo definido por [4] en esta prueba es la realización de una medición de manera que se incluyan todas las posibles orientaciones del brazo en su volumen de medición. Para ello se mide una esfera calibrada que se sitúa en dos posiciones de ensayo elegidas por el usuario, capturando cinco puntos por esfera con cinco orientaciones ortogonales diferentes del palpador. El ensayo es similar al realizado en [3] pero reduciendo una posición de ensayo. Para cada una de las cinco orientaciones del palpador, son capturadas cinco mediciones que permiten calcular el centro de la esfera gaussiana correspondiente, valor que es utilizado para evaluar el *error de posición de articulación, L_{Dia}*. Todos los valores de error obtenidos en los ensayos de cada una de las normas, se comparan con el máximo error suministrado por el fabricante. La Tabla 4.12 muestra la comparativa entre los distintos ensayos especificados en las normas que se han descrito anteriormente.

	VDI/VDE 2617-2009 parte 9	ASME B89.4.22-2004	ISO/CD 10360 - 12 borrador
	Prueba de error de palpado (posición)	Prueba de repetibilidad de punto (SPAT)	Prueba de error de posición de articulación
Posiciones	3	3	2
Puntos / esfera	5	1 (asiento cinemático)	5
Repeticiones	5	10	1
Orientaciones	5 orientaciones palpador	5 orientaciones / giro muñeca 180°	5 orientaciones palpador
Localización	Centro de esfera patrón (d =10 – 50mm)	Asiento cinemático	Centro esfera patrón (d < =51mm)
Cálculo del error	Error de palpado de posición, PL	δ_{max} , 2σ deviation	Error de posición de articulación, L _{Dia}

Tabla 4.12. Comparativa de ensayos para evaluación del error de palpado de posición según normativa

Las posiciones de ensayo adoptadas en la fase experimental para el ensayo de repetibilidad de punto SPAT con asiento cinemático se muestra en la Figura 4.18.

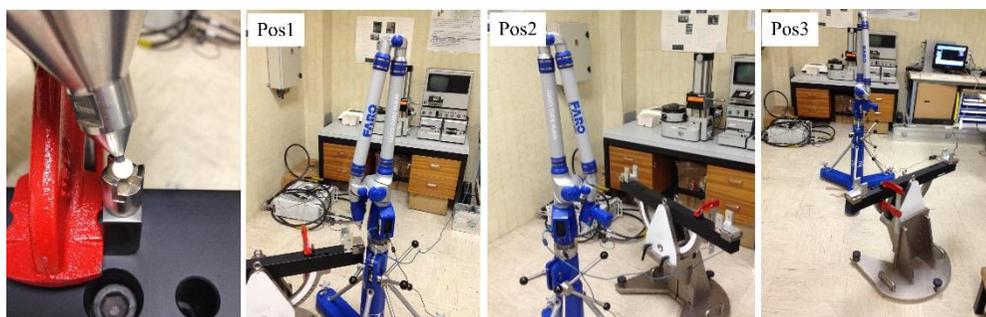


Figura 4.18. Disposición ensayo de repetibilidad de punto SPAT ASME B89.4.22-2004

Los ensayos de *rendimiento volumétrico* persiguen evaluar la precisión de un brazo de medición por coordenadas en todo su volumen de trabajo. Para ello, se realizan mediciones de distancias materializadas por un artefacto patrón calibrado que se localiza en diferentes posiciones y orientaciones del volumen de medida del brazo, de manera que sea posible establecer si el brazo es capaz de realizar estas mediciones dentro del error máximo permisible por el fabricante. Las longitudes de medida se establecen como distancia entre centros de dos esferas en la barra patrón utilizada de longitud 1400 mm. Por todos estos motivos, la prueba de rendimiento volumétrico se considera la más exigente, fiable y efectiva para estimar la precisión del brazo en condiciones de trabajo. A pesar de que las tres normas tienen un objetivo común, existen pequeñas diferencias entre las especificaciones de ensayo indicadas en sus respectivos documentos que se incluye en la Tabla 4.13 a continuación.

	VDI/VDE 2617-2009 parte 9	ASME B89.4.22-2004	ISO/CD 10360 -12 borrador
	Prueba de rendimiento volumétrico (volúmenes de medición totales o parciales)	Prueba de precisión longitudinal volumétrica	Prueba de precisión longitudinal volumétrica
Posiciones	12	20	7
Puntos esfera	5	5	1
Repeticiones	3 por longitud	1 por longitud	3 por longitud
Longitudes	5 por posición	1 por posición	5 por posición
Localización	Centro de esfera patrón (d =10 – 50mm)	Centro de esfera patrón (d =10 – 50mm)	Centro esfera patrón (d < =51mm)
Cálculo del error	Error de medición en distancia, E. Máxima desviación entre distancia centro a centro y longitud calibrada	Máxima desviación entre distancia centro a centro y longitud calibrada D_i , rango de desviación y 2RMS	Error de medición en distancia, E_{Uni} , E_{Bi} . Diferencia entre valor de longitud medido y calibrado.

Tabla 4.13. Comparativa de ensayos para evaluación del rendimiento volumétrico según normativa

Para cada una de las posiciones medidas, se obtiene la diferencia entre la longitud medida L_i y la longitud calibrada L_{Cal} , siendo esta diferencia el error de medida en distancia. Como resultado final de esta prueba, en [2] se obtendrán tres parámetros. En primer lugar deberá indicarse la máxima desviación obtenida para todas las posiciones $Max D_i$, el rango de estas desviaciones y el valor 2RMS calculado como dos veces el valor cuadrático medio de las desviaciones para todas las posiciones consideradas. En [3] se recomienda un mínimo de 135 longitudes de medida en volúmenes parciales frente a 105 en

[4], obteniendo en ambos casos como resultado del ensayo un error de medición en distancia, E . En este trabajo se comparan los resultados de los ensayos volumétricos realizados de acuerdo a [2] y [3] con los valores obtenidos en la verificación del brazo utilizando la plataforma multi-registro y los valores máximos admisibles de error suministrados por el fabricante. En la Figura 4.19 pueden observarse posiciones de ensayo volumétrico según ASME B89.4.22-2004.

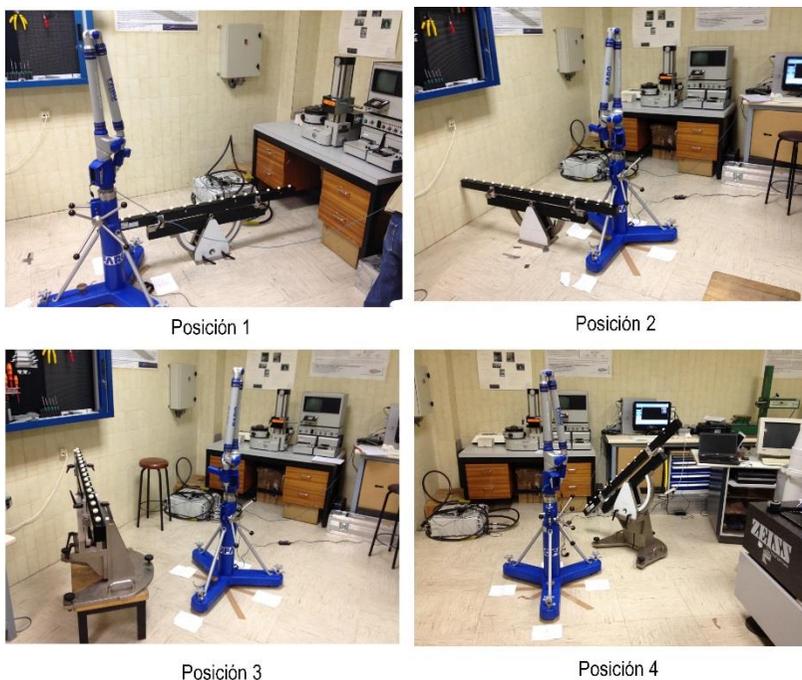


Figura 4.19. Muestra de posiciones de ensayo volumétrico según ASME B89.4.22-2004

4.5.3 Resultados de la comparativa de procedimientos de verificación

○ Prueba de error de palpado de tamaño

Los resultados de los ensayos realizados según normativa [2] y [3] se muestran en la Tabla 4.14 y en la Figura 4.20 y corresponden a la mayor desviación de diámetro de la esfera patrón medida respecto al valor calibrado, ($D1, D2, D3 - D_{cal}$) y la desviación estándar asociada. El mayor valor de desviación se obtiene en la evaluación del brazo según VDI pudiendo ser debido al hecho de que las mediciones se realizan en tres posiciones diferentes. En el caso de ASME, la barra patrón permanece fija en una posición de ensayo y solo se evalúa la repetibilidad de medición con las tres repeticiones realizadas.

	VDI/VDE 2617-2009 parte 9	ASME B89.4.22-2004	
	Prueba de error de palpado de tamaño	Prueba de diámetro efectivo	
Posición 1 (VDI)	0.059770	-0.008160	Repetición 1
Posición 2 (VDI)	0.076000	-0.006160	Repetición 2
Posición 3 (VDI)	0.024700	-0.010260	Repetición 3
Max desviación / PS (mm)	0.076000	0.010260	
Desviación estándar (mm)	0.041246	0.002050	

Tabla 4.14. Resultados prueba de error de palpado de tamaño según ASME B89.4.22 y VDI/VDE 2617-2009

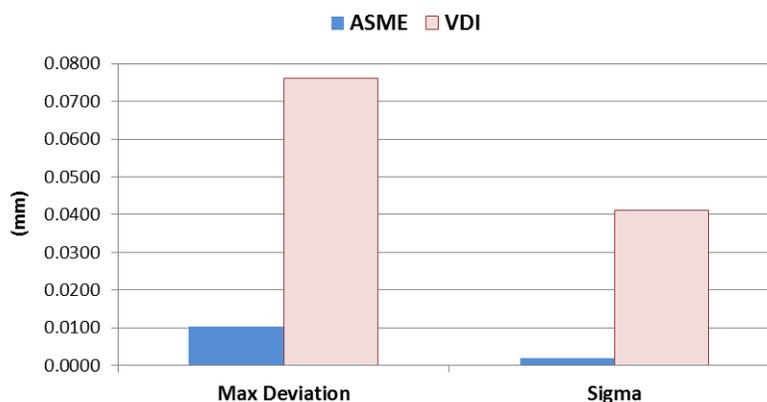


Figura 4.20. Resultados prueba de error de palpado de tamaño ASME B89.4.22-2004 y VDI/VDE 2617-2009

○ Prueba de error de palpado de posición y repetibilidad de punto (SPAT)

Para cada posición definida en el ensayo de acuerdo a la norma VDI, se calcula la distancia euclídea δ_i entre dos cualesquiera de los cinco centros de las esferas medidas. La mayor distancia euclídea entre las tres posiciones ensayadas determina el error de palpado de posición, PL. En el caso de ASME se explora la repetibilidad del brazo palpando un punto fijo. Después de diez repeticiones, se obtienen los parámetros δ_{max} , $2\sigma_{SPAT}$ y rango de δ_i , donde δ_{max} es el máximo valor entre todas las posiciones ensayadas de la diferencia de la distancia euclídea calculada para cada punto (δ_i) a la media. $2\sigma_{SPAT}$

se calcula de acuerdo a la siguiente fórmula $2\sigma_{SPAT} = 2 \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \delta_i}{n-1}}$. Las mayores distancias por posición en ensayo SPAT de ASME se representan en la Figura 4.21 y los resultados comparativos entre los ensayos realizados de acuerdo a VDI y ASME se listan en la Tabla 4.15.

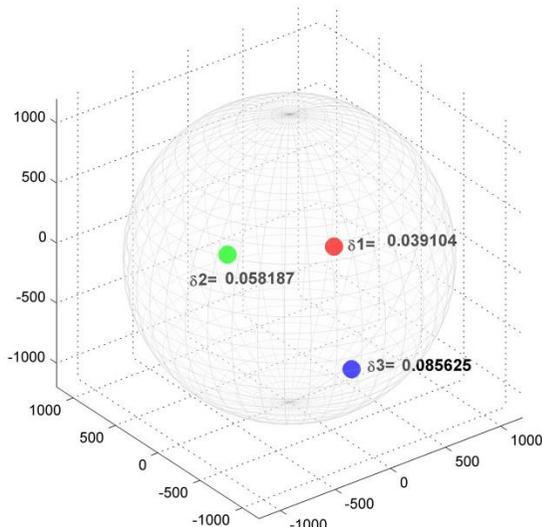


Figura 4.21. Máxima distancia en ensayo SPAT según ASME B89.4.22-2004

ASME B89.4.22-2004			VDI/VDE 2617-2009 parte 9	
Prueba de repetibilidad de punto SPAT			Prueba de error de palpado (posición)	
	2σ SPAT (mm)	δi rango (mm)	Max distancia por posición (mm)	Max distancia por posición (mm)
Posicion 1	0.06216	0.01727	0.03910	0.03108
Posicion 2	0.08022	0.03893	0.05819	0.06390
Posicion 3	0.12192	0.07079	0.08563	0.12523
Max	0.12192	0.07079	0.08563	0.12523

Tabla 4.15. Resultados de prueba de repetibilidad de punto según ASME B89.4.22-2004, VDI/VDE 2617-2009

Si se compara en ambos ensayos el valor máximo de error, ver Tabla 4.15 y Figura 4.22, se puede concluir que es mayor en el caso de VDI que en ASME. En ambos casos, el mayor valor de error aparece en la posición 3 de la barra patrón cuando ésta se encuentra en una posición más lejana del brazo de medición, 1000 mm en caso de VDI y 1200 mm en caso de ASME respectivamente, tal y como se aprecia en la Figura 4.23. Este resultado puede considerarse lógico debido al hecho de que en esta posición más lejana, el brazo se encuentra en una configuración más extrema a su frontera de trabajo, pudiendo dar lugar a la aparición de errores propios del brazo y aumentando la posibilidad de cometer fallos por parte del operario que realiza la medición.



Figura 4.22. Resultados de SPAT y prueba de error de palpado de posición

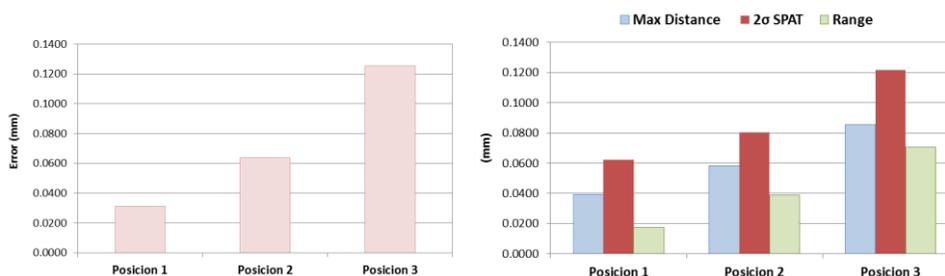


Figura 4.23. VDI/VDE 2617-2009 parte 9 y ASME B89.4.22-2004: resultados por posición de ensayo

○ Prueba de evaluación de precisión volumétrica.

En el ensayo de evaluación de la precisión volumétrica del brazo se calcula la distancia centro a centro entre esferas medidas de la barra patrón y se obtiene el error en distancia como la diferencia de la medida al valor calibrado. Los parámetros resultado del ensayo son la desviación máxima en distancia, el rango de desviaciones en distancia y dos veces el error cuadrático medio 2RMS. Estos valores resultado de los ensayos según norma [2] y [3], son comparados con los resultados de la verificación del brazo usando la plataforma multi-registro y el valor de error máximo permisible suministrado por el fabricante del brazo tal cual se muestra en la Tabla 4.16.

	ASME B89.4.22-2004	VDI/VDE 2617-2009 parte 9	Plataforma multi-registro	Fabricante
Max error distancia (mm)	0.08957	0.04767	0.09016	
Rango error distancia (mm)	0.14565	0.10095	0.08987	
2RMS (mm)	0.07656	0.03833	0.05909	0.04300

Tabla 4.16. Resultados comparativos de la prueba de evaluación de precisión volumétrica

El error máximo en distancia obtenido en la verificación del brazo usando la plataforma 0.09016 mm es muy próximo al valor obtenido en el ensayo según ASME B89.4.22-2004 con valor 0.08957 mm como se muestra en la Tabla 4.16 y la Figura 4.24. Este resultado es lógico teniendo en cuenta que tal y como

se explica en el apartado 4.5.2, en los ensayos de verificación con la plataforma multi-registros se toma como documento de referencia la norma ASME B89.4.22-2004.

Como se ha comentado anteriormente, según la norma ASME B89.4.22-2004, en la prueba de evaluación de la precisión volumétrica es necesario definir veinte posiciones de ensayo para la barra patrón, mientras que la norma VDI/VDE 2617-2009 parte 9 especifica doce posiciones de ensayo.

En la evaluación del brazo de medición por coordenadas conjuntamente con la plataforma se prueban cinco posiciones de la barra patrón que combinadas con seis (1-6) posiciones rotativas de la plataforma, dan lugar a un total de treinta posiciones de ensayo. Cada vez que la plataforma rota a una nueva posición permitiendo que el brazo mida la misma esfera de la barra patrón, los valores de los encoder angulares del brazo varían y por lo tanto un nuevo volumen de trabajo es explorado en cada posición de la plataforma. El uso conjunto de la plataforma y el brazo de medición permite chequear un número mayor de posiciones de la barra patrón en comparación con el número mínimo de posiciones requeridas en los ensayos de evaluación de norma, explorando de este modo un volumen de trabajo superior del brazo. Este hecho puede explicar que el valor de error máximo usando la plataforma sea el mayor de los ensayados. Es importante destacar que el valor de 2RMS obtenido en la evaluación con la plataforma fue 0.05909 mm y es menor que en el caso de ASME con resultado 0.07656 mm y muy próximo al valor de VDI resultante 0.03833 mm y el suministrado por el fabricante del brazo 0.04300 mm.

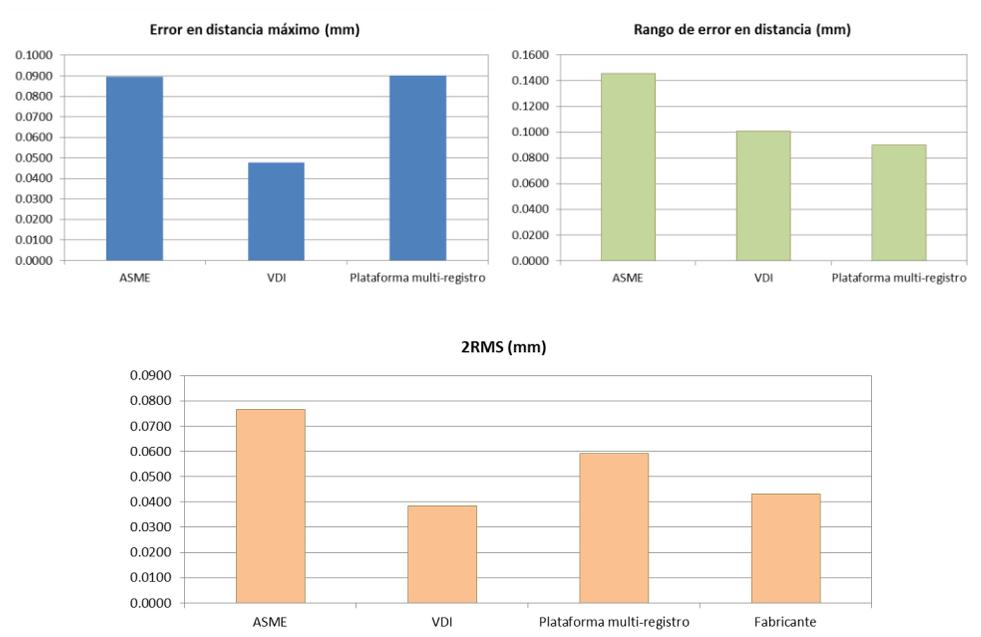


Figura 4.24. Resultados comparativos de la prueba de evaluación de precisión volumétrica (máxima desviación distancia, rango y 2RMS) según norma en verificación con plataforma multi-registro y especificación fabricante

Las Figura 4.25 y Figura 4.26 muestran el error obtenido y la desviación frente al valor calibrado para cada posición de ensayo según ASME B89.4.22-2004 y VDI/VDE 2617-2009 parte 9. Además es importante mencionar que los errores obtenidos no tienen relación con las diferentes distancias evaluadas en los ensayos.

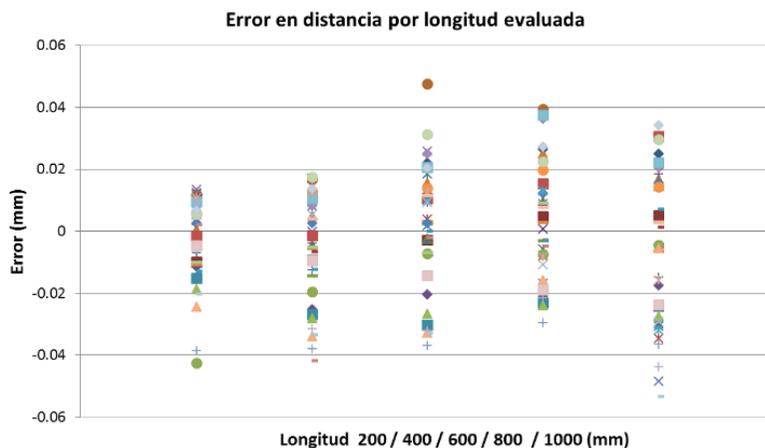


Figura 4.25. VDI/VDE 2617-2009 parte 9: error en distancia según longitud evaluada

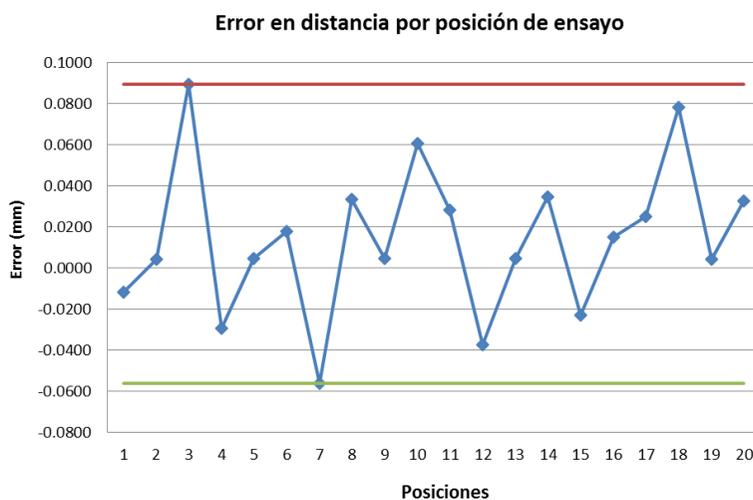


Figura 4.26. ASME B89.4.22-2004 Error en distancia por posición ensayo (1-20)

Las Figura 4.27 y Figura 4.28 incluidas a continuación muestra la distribución de error volumétrico obtenida en los ensayos de acuerdo a ASME B89.4.22-2004 y VDI/VDE 2617-2009 parte 9. Ambas figuras representan la posición de la barra patrón en el volumen de trabajo del brazo incluyendo una escala de colores que indica el nivel de error en distancia obtenido en el ensayo. En el caso de VDI se muestra para cada longitud de medida el máximo error obtenido de las tres repeticiones realizadas por posición tal como indica la normativa.

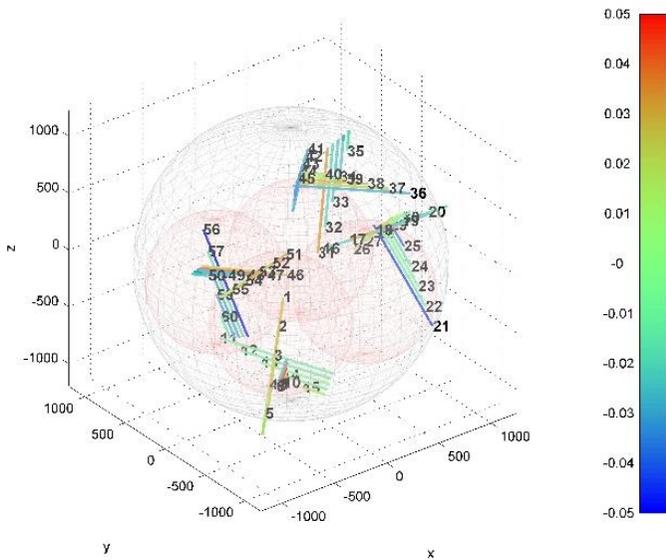


Figura 4.27. VDI/VDE 2617-2009 parte 9 representación de error volumétrico

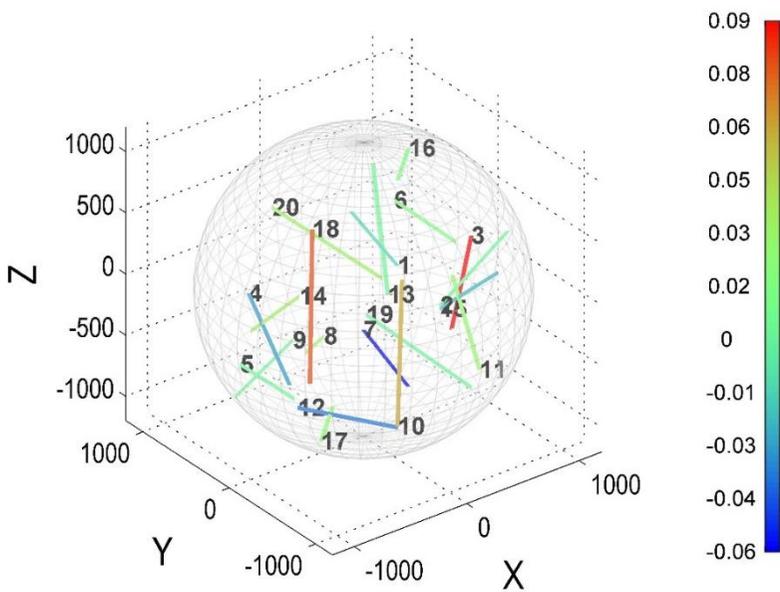


Figura 4.28. ASME B89.4.22-2004 representación de error volumétrico

4.5.4 Análisis de productividad del uso de una plataforma multi-registro en procesos de verificación de brazos articulados de medición por coordenadas

El concepto de productividad es una medida de la eficiencia de una persona, máquina o sistema y puede definirse como la relación entre cantidad de bienes o servicios producidos frente a la cantidad de recursos utilizados. Se calcula dividiendo la cantidad media producida en el periodo entre el total de costes incurridos o recursos consumidos en el mismo. En este trabajo, el procedimiento de verificación del brazo se evalúa en términos de horas trabajadas por el operario que realizará las tareas de verificación. Es importante mencionar que un incremento en la eficiencia del proceso de verificación, sería claramente apreciado en cualquier ámbito industrial o científico. La gran ventaja de la plataforma multi-registro es la importante reducción de tiempo invertido en la verificación y la reducción de esfuerzo de personal derivado. Como se ha explicado anteriormente, en este caso el objeto patrón calibrado permanece fijo durante la verificación, siendo el instrumento de medición posicionado sobre la plataforma multi-registro, el que se mueve con respecto al patrón durante el procedimiento de verificación, cubriendo el mayor volumen del espacio de trabajo del instrumento de medición. Este hecho supone una mejora notable debido a que se reducen drásticamente el número de posiciones físicas del patrón a evaluar, y de este modo el tiempo de definición e implementación del ensayo se ve claramente disminuido.

En comparación con el ensayo de precisión volumétrica definido en la normativa ASME, la reducción de posiciones físicas de ensayo del patrón es de un 75%, siendo necesaria únicamente la definición de cinco posiciones de ensayo con la plataforma frente a las veinte definidas en la norma que se ven compensadas por las seis posiciones rotativas de la plataforma. El tiempo de ensayo en la verificación del brazo con la plataforma multi-registro es aproximadamente 3.5 horas frente a las 12.6 horas invertidas en la verificación volumétrica del brazo según norma ASME y las 12.5 horas en el caso de VDI. Este hecho puede ser destacado como una clara mejora frente a los procedimientos convencionales de verificación de brazos articulados de medición por coordenadas.

La Tabla 4.17 muestra una evaluación del tiempo invertido en los ensayos según normas ASME, VDI y verificación del brazo con plataforma multi-registro incluyendo los conceptos de tiempo de preparación y definición de ensayo y tiempo de ensayo. Asimismo se proporciona una estimación de coste de los ensayos considerando un coste hora medio de operario. Adicionalmente los tiempos de ensayo se dividen atendiendo al tipo de test definido por la normativa y se muestran en la Figura 4.29. Los ensayos de evaluación volumétrica son los más intensivos en tiempo debido al amplio número de posiciones del patrón a evaluar y longitudes de medición necesarias. Relativo a la evaluación de tiempo y personal necesario en los ensayos, la mayor parte del tiempo se invierte en definición y montaje del ensayo.

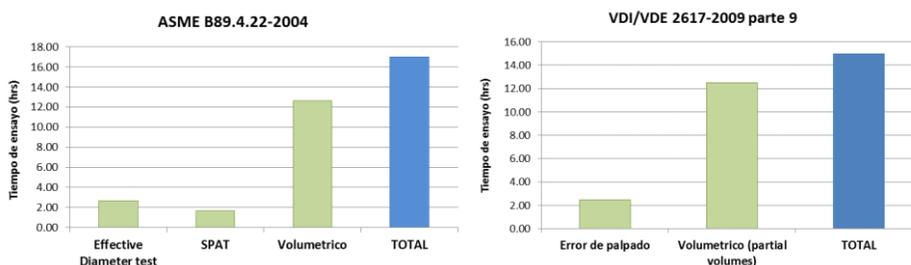


Figura 4.29. Comparativa tiempos de ensayo ASME B89.4.22, VDI/VDE 2617 y plataforma multi-registro

ASME B89.4.22-2004				
	Tiempo set up (min)	Tiempo medición (min)	Total (hrs)	Coste (EUR)
Ensayo de diámetro efectivo	150	10	2.67	
SPAT	60	40	1.67	
Ensayo volumétrico	660	100	12.67	
TOTAL	870	150	17	1020
VDI/VDE 2617-2009 parte 9				
Ensayo de evaluación de error de palpado	90	60	2.5	
Ensayo volumétrico (volúmenes parciales)	390	360	12.5	
TOTAL	480	420	15	900
Plataforma multi-registro				
TOTAL	80	130	3.5	210

Tabla 4.17. Evaluación de ensayos según ASME B89.4.22-2004, VDI/VDE 2617-2009 - 9, plataforma multi-registro en términos de tiempo y coste

Finalmente es igualmente importante mencionar el análisis realizado al respecto de número de mediciones necesarias por tipo de ensayo. VDI enfatiza en el número de repeticiones por ensayo que puede derivar en una mejor evaluación de la repetibilidad de medición del brazo, mientras que ASME incrementa el número de posiciones de prueba según se detalla en la Tabla 4.18.

ASME B89.4.22-2004					
	Posición patrón	Longitudes	Esferas	Repeticiones	Nº medidas
Ensayo de diámetro efectivo	1		1	3	3
SPAT	3			10	30
Ensayo volumétrico	20	1	2	1	40
VDI/VDE 2617-2009 parte 9					
Ensayo de evaluación de error de palpado	1		1	3	15
Ensayo volumétrico (volúmenes parciales)	12	5	2	5	180

Tabla 4.18. Número de mediciones por tipo de ensayo ASME B89.4.22-2004 y VDI/VDE 2617-2009

4.6 Análisis de uso de un equipo de láser tracker como patrón en procedimientos de evaluación de brazos articulados de medición por coordenadas.

Dentro de los procesos de calibración y verificación para instrumentos de medición portátiles de medición, es necesario disponer de elementos calibrados o patrones que permitan establecer las dimensiones de referencia con respecto a las cuales se calcularán los errores derivados del proceso de medición. En el caso de brazos articulados de medición por coordenadas, es importante analizar el máximo rango del volumen de trabajo del brazo durante la verificación, por lo cual son de utilidad patrones unidimensionales sencillos que puedan moverse fácilmente alrededor del equipo, adoptando unas posiciones definidas por la norma aplicable para la evaluación del brazo [2], [3] y [4]. Sin embargo, la naturaleza física del propio patrón, presenta limitaciones a la hora de materializar varias distancias en los ensayos pertinentes, ya que el número de longitudes a generar está restringido a la longitud del patrón o a las combinaciones de distancias entre centros de las esferas del patrón. Este hecho hace que en ocasiones se tengan que utilizar varios patrones, en caso de disponibilidad de los mismos.

Con objeto de desarrollar nuevos patrones y técnicas de verificación y calibración de brazos de medición por coordenadas, se ha analizado en este trabajo la viabilidad de utilización de un equipo de láser tracker como instrumento patrón en estos procedimientos, en sustitución de los patrones unidimensionales utilizados habitualmente como barras patrón de esferas. El hecho de hacer uso de un láser tracker como patrón, permite no tener que materializar físicamente la dimensión requerida en un patrón convencional, aumentando la flexibilidad en la generación de posiciones de ensayo y pudiendo definir un amplio abanico de distancias patrón de diferentes dimensiones, en función de los requerimientos de calibración o verificación del equipo de medida.

Los primeros desarrollos relativos a mediciones basadas en laser tracker datan de la década de los ochenta y fueron aplicados en la evaluación de precisión de robots [10], [75], [76]. Pero la necesidad surgida en sectores como construcción o en el sector aeronáutico [11] para verificación de piezas o estructuras de grandes dimensiones, ha empujado fuertemente el desarrollo de la tecnología de medición por láser tracker en las dos últimas décadas. Igualmente destacable es la aplicación de equipos de medición sin contacto de alto rango como láser trackers o lacer tracers a verificación y calibración de máquina herramienta [77]. Existe numerosa bibliografía relacionada con la aplicación de láser tracker en procedimientos de evaluación y calibración de máquinas de medición por coordenadas. El uso de estos equipos permite evitar alguno de los inconvenientes existentes en verificaciones realizadas con patrones convencionales. En [78] se muestra un ejemplo de aplicación de láser tracker en calibración de máquinas de medición por coordenadas alcanzando incertidumbres de medición por debajo de $0.3 \mu\text{m}$. [79] describe igualmente el uso de estos equipos en procesos de calibración de máquinas de medición por coordenadas obteniéndose en los resultados experimentales desviaciones estándar de $1 \mu\text{m}$ comparando la estimación de errores paramétricos realizada por el láser tracker con los datos medidos en la calibración usando una placa de esferas como patrón convencional. En [80] se explica cómo calibrar una máquina con un láser tracer con resultados de incertidumbre en el rango de $1 \mu\text{m}$.

Para ello, se dispone en el ensayo de varios retrorreflectores, cuya distancia entre centros materializará la dimensión a medir por el equipo de láser tracker y que será definida como medida nominal en el procedimiento de calibración del brazo. Sin embargo, es importante destacar que uno de los factores de incertidumbre a tener en cuenta en esta propuesta, es el hecho de que estos equipos de medición

de alto rango como es el láser tracker, no dispongan de la suficiente precisión para permitir la calibración y verificación de un brazo de medición por coordenadas.

4.6.1 Evaluación de la precisión de láser tracker

La precisión de los equipos de láser tracker actualmente disponibles en el mercado se encuentra alrededor de $20\ \mu\text{m} + 5\ \mu\text{m}/\text{m}$ de precisión angular, $16\ \mu\text{m} + 0.8\ \mu\text{m}/\text{m}$ de precisión en distancia (ADM) y en torno a $4\ \mu\text{m} + 0.8\ \mu\text{m}/\text{m}$ de precisión en distancia en medición con interferómetro, tal y como se aprecia en la tabla siguiente Tabla 4.19 para equipos comercialmente disponibles de los fabricantes más representativos:

Fabricante	Modelo	MPE	Volumen medición	Resultados de evaluación		
				Precisión angular	Precisión distancia (ADM)	Precisión distancia (IFM)
LEICA	AT401	MPE	320m	$15\ \mu\text{m} + 6\ \mu\text{m}/\text{m}$	$\pm 10\ \mu\text{m}$	
	AT901	MPE	50/160m	$15\ \mu\text{m} + 6\ \mu\text{m}/\text{m}$	$\pm 10\ \mu\text{m}$	$\pm 0.4\ \mu\text{m} + 0.3\ \mu\text{m}/\text{m}$
FARO	Ion	MPE	30/40/55m	$20\ \mu\text{m} + 5\ \mu\text{m}/\text{m}$	$16\ \mu\text{m} + 0.8\ \mu\text{m}/\text{m}$	$4\ \mu\text{m} + 0.8\ \mu\text{m}/\text{m}$
	Vantage	MPE	30/60/80m	$20\ \mu\text{m} + 5\ \mu\text{m}/\text{m}$	$16\ \mu\text{m} + 0.8\ \mu\text{m}/\text{m}$	
API	Tracker 3	MPE	15/40/60m	$3.5\ \mu\text{m}/\text{m}$	$\pm 15\ \mu\text{m}$ or 1.5ppm	$> \pm 0.5\ \text{ppm}$
	Radian	MPE	40/100/160m	$3.5\ \mu\text{m}/\text{m}$	$\pm 10\ \mu\text{m}$ or 1ppm	$> \pm 0.5\ \text{ppm}$
	Omnitrack 2	MPE	160/200m	$\pm 18 + 5\ \text{ppm}$	$\pm 15\ \mu\text{m} + 1.5\ \mu\text{m}/\text{m}$	

Tabla 4.19. Comparativa de precisiones disponibles en equipos de láser tracker comerciales

El equipo de láser tracker utilizado en este ensayo es un modelo Leica LTD600 con precisión angular de $\pm 25\ \mu\text{m}$ para distancias inferiores a 2.5 m y target fijo, precisión en distancia (ADM) de $\pm 25\ \mu\text{m}$ y precisión en distancia con interferómetro de $\pm 10\ \mu\text{m} \pm 0.5\ \mu\text{m}/\text{m}$. Es importante destacar que los equipos que se muestran en la Tabla 4.19, ofrecen precisiones para medición en distancia con interferómetro mejores que la ofrecida por el láser tracker Leica LTD600, siendo estas precisiones válidas en caso de medición de distancias cortas, inferiores a 2 m y aplicación a brazos de medición con precisiones de medición volumétricas superiores aproximadamente a $50\ \mu\text{m}$.

Para corroborar los datos de precisión de equipos de láser tracker suministrados por fabricante y verificar su viabilidad de uso como patrón para calibración de brazos de medición, se realizaron ensayos experimentales con el láser tracker en estudio, Leica LTD600.

4.6.2 Ensayos de evaluación en máquina herramienta

En primer lugar, se realizaron mediciones de distancias de 0 a 500 mm, ida y vuelta, sobre bancada de máquina herramienta con el láser tracker. En paralelo se realizaron las mismas mediciones con un interferómetro. El objeto de este ensayo fue verificar el error de medición en distancia cortas del láser tracker frente a las mediciones realizadas con el interferómetro, que se consideraron como nominales. La disposición del ensayo realizado puede verse en la siguiente Figura 4.30:



Figura 4.30. Disposición ensayo láser tracker e interferómetro sobre bancada máquina herramienta

En la siguiente Tabla 4.20 se muestran los valores obtenidos en el ensayo realizado mediante la medición con interferómetro y con el láser tracker:

Interferómetro			Láser tracker		
Nominal (mm)	Ida (mm)	Vuelta (mm)	Nominal (mm)	Ida (mm)	Vuelta (mm)
0	0.002	0.025	0	0.000	0.030
-50	-50.002	-49.976	50	49.998	49.974
-100	-100.000	-99.975	100	99.993	99.971
-150	-149.999	-149.971	150	149.990	149.965
-200	-200.000	-199.972	200	199.995	199.969
-250	-250.005	-249.981	250	250.000	249.972
-300	-300.011	-299.981	300	300.005	299.979
-350	-350.018	-349.995	350	350.012	349.990
-400	-400.025	-400.002	400	400.022	399.995
-450	-450.043	-450.013	450	450.037	450.006
-500	-500.045	-500.017	500	500.040	500.009

Tabla 4.20. Mediciones distancias sobre máquina herramienta mediante láser tracker e interferómetro

El cálculo de errores en distancia asumiendo la medición del interferómetro como nominal se listan en la Tabla 4.21, siendo los errores medios de ± 0.005 mm y ± 0.005 mm para las mediciones realizadas en la serie de ida y vuelta respectivamente en la bancada de la máquina herramienta. Los errores máximos obtienen valores de 0.009 mm y 0.009 mm.

	$L_{iLT}-L_{int}$ (mm) Ida	$L_{iLT}-L_{int}$ (mm) Ida abs	$L_{iLT}-L_{int}$ (mm) Vuelta	$L_{iLT}-L_{int}$ (mm) Vuelta abs
	-0.002	0.002	0.005	0.005
	-0.004	0.004	-0.002	0.002
	-0.007	0.007	-0.004	0.004
	-0.009	0.009	-0.006	0.006
	-0.005	0.005	-0.003	0.003
	-0.005	0.005	-0.009	0.009
	-0.006	0.006	-0.002	0.002
	-0.006	0.006	-0.005	0.005
	-0.003	0.003	-0.007	0.007
	-0.006	0.006	-0.007	0.007
	-0.005	0.005	-0.008	0.008
Error medio (mm)		0.005		0.005
Error máximo (mm)		0.009		0.009

Tabla 4.21. Resultados comparativos mediciones interferómetro y láser tracker LEICA LTD600 en MH

4.6.3 Ensayos de evaluación en guía lineal

Como segundo ensayo de verificación de la precisión del equipo de láser tracker disponible, se planificaron ensayos de medición sobre el patín de una guía lineal, en uno de cuyos extremos se situó un interferómetro y en el otro extremo el equipo de láser tracker Leica LTD600. La barra se colocó en dirección radial para asegurar el menor movimiento de la cabeza del interferómetro y la disposición del ensayo se aprecia en la Figura 4.31 siguiente:



Figura 4.31. Disposición ensayo láser tracker e interferómetro sobre guía lineal

Las distancias a verificar fueron de 0 a 1200 mm y los valores obtenidos en la medición con interferómetro, con el láser tracker y el error en distancia cometido por el láser tracker si se consideran las medidas del interferómetro como nominales se muestran en la Tabla 4.22.

	Interferómetro (mm)	Láser tracker (mm)	$L_{LT}-L_{int}$ (mm)	$L_{LT}-L_{int}$ (mm) abs
1	0.000	0.000	0.000	0.000
2	56.439	56.448	0.009	0.009
3	106.408	106.409	0.001	0.001
4	156.522	156.522	0.001	0.001
5	206.451	206.445	-0.006	0.006
6	256.453	256.456	0.003	0.003
7	306.389	306.394	0.005	0.005
8	356.520	356.527	0.007	0.007
9	406.385	406.383	-0.003	0.003
10	456.375	456.375	0.000	0.000
11	506.055	506.051	-0.004	0.004
12	606.358	606.352	-0.006	0.006
13	655.991	655.996	0.005	0.005
14	706.237	706.243	0.007	0.007
15	756.295	756.299	0.004	0.004
16	806.249	806.256	0.007	0.007
17	856.224	856.229	0.005	0.005
18	906.277	906.285	0.008	0.008
19	956.249	956.252	0.003	0.003
20	1006.240	1006.250	0.010	0.010
21	1056.275	1056.281	0.006	0.006
22	1106.247	1106.250	0.003	0.003
23	1156.232	1156.227	-0.005	0.005
24	1206.231	1206.243	0.012	0.012
Error medio (mm)				0.005
Error máximo (mm)				0.012

Tabla 4.22. Resultados comparativos mediciones interferómetro y láser tracker LEICA LTD600 sobre guía de medición

Los errores en distancia obtenidos para el láser tracker en el ensayo fueron de ± 0.005 mm como error medio y 0.012 mm como error máximo, valores muy similares a los obtenidos en el primer ensayo anteriormente descrito realizado con ambos equipos de medición sobre bancada de máquina herramienta. La obtención de un valor de error medio de ± 0.005 mm para el interferómetro en distancias cortas inferiores a 1200 mm en los ensayos realizados, valida el posible uso del mismo como patrón en procedimientos de verificación de brazos de medición con precisiones de medición de 50 μm o superiores. El instrumento patrón, láser tracker en este caso, dispondría de una precisión un orden de magnitud superior al brazo de medición a calibrar o verificar con el patrón. Igualmente se muestra que la precisión real media del equipo obtenida ± 0.005 mm, es superior a la especificada por el fabricante en medición de distancia con interferómetro $\pm 10 \mu\text{m} \pm 0.5 \mu\text{m/m}$ para el modelo LTD600D, correspondiendo a $\pm 10,6 \mu\text{m}$ para una distancia de 1,2 m.

Una posible opción para solucionar la posible falta de precisión de algunos equipos de láser tracker para calibración de brazos de medición, es la utilización de múltiples equipos de láser tracker mediante multilateración [81], [29] reduciendo de este modo la incertidumbre de la medición mediante eliminación del ruido angular generado por los encoder angulares. Las técnicas de multilateración permiten capturar puntos con una incertidumbre mucho menor que la obtenida con el brazo de medición por coordenadas,

de modo que los puntos capturados pueden considerarse como valores nominales en el procedimiento de calibración del brazo. La multilateración se define [82] como un método para determinar las coordenadas de un punto mediante mediciones de longitud realizadas desde puntos fijos. En [83] los autores muestran un método de medida basado en trilateración donde la colocación de los laser tracker es arbitraria. La determinación de las posiciones óptimas de los láser tracker y el volumen de medida adecuado en el procedimiento a definir son descritas en [84] y [85]. En [86], se definen técnicas de multilateración aplicadas a calibración de pequeños instrumentos de alta precisión y se muestran procedimientos de medición y disposiciones de ensayo optimizadas para minimización de la incertidumbre de medición con esta técnica. Hughes et al. [87] desarrollan una estación de medición por multilateración basada en interferometría con ocho estaciones de medición y cuatro targets.

4.6.4 Procedimiento experimental de evaluación del láser tracker como patrón

En este trabajo se utilizaron los siguientes equipos dentro de la fase experimental de ensayo: un equipo láser tracker Leica LTD600, un brazo de medición por coordenadas FARO arm Platinum, la plataforma multi-registro y seis retro reflectores modelo HALLOW 40M de diámetro 1.5" (38,1 mm) y esfericidad grado $50 \pm 0.00005''$ ($\pm 1.3\mu\text{m}$). Los retrorreflectores se colocaron distribuidos en una malla cuyo área materializa el volumen de cobertura de medición del brazo de medición, correspondiente al ángulo de giro de 60° que realiza la plataforma multi-registro desde una posición a la siguiente.

Para ello, se disponen seis retrorreflectores en seis posiciones diferentes, que vienen definidas por la altura a la que se coloca el retrorreflector (suelo, medio, alto) y la distancia del retrorreflector al centro del volumen de trabajo del brazo de medición (cerca, lejos) tal y como se refleja en la Tabla 4.23. La disposición del ensayo con los dos equipos de medición y el esquema de los retrorreflectores en la malla puede observarse en la Figura 4.32.

Número retrorreflector	Altura	Distancia al brazo
1	Alto	Lejos
2	Medio	Lejos
3	Bajo	Lejos
4	Alto	Cerca
5	Medio	Cerca
6	Bajo	Cerca

Tabla 4.23. Definición de las posiciones de los retrorreflectores en el ensayo



Figura 4.32. Disposición de retroreflectores, brazo articulado de medición y láser tracker en el ensayo

En primer lugar, se lleva a cabo una calibración del brazo de medición haciendo uso de un asiento cinemático que se fija en un soporte Koba, Figura 4.33, utilizando un palpador rígido esférico de material cerámico de 6 mm de diámetro tal y como se aprecia en la figura siguiente. El error máximo obtenido en la calibración fue de 0.072 mm y desviación estándar de 0.0295 mm quedando el palpador calibrado.



Figura 4.33. Procedimiento de calibración del brazo mediante asiento cinemático.

El procedimiento de ensayo se inicia con una medición con el láser tracker de las tres esferas de referencia situadas en la placa superior de la plataforma multi-registro, que permiten la generación de la matriz de transformación homogénea que relaciona el sistema de referencia del láser tracker con el sistema de referencia de la plataforma superior. En el caso de las mediciones de los retroreflectores con el láser tracker, el apoyo es totalmente estable y este hecho permite aumentar el número de capturas por punto hasta 500. Para ello, comenzando con la posición 1 según se indica en la Tabla 4.23, se realizan las mediciones con el láser tracker con el retroreflector fijo en el apoyo correspondiente a la posición 1, repitiéndose este procedimiento para el resto de las posiciones pendientes (2-6) y capturándose los centros de cada uno de los seis retroreflectores. Las mediciones de los retroreflectores realizadas con el láser tracker, permiten calcular el centro de los mismos, valor que conjuntamente con las distancias euclídeas entre sus centros y el diámetro nominal indicado por el fabricante, serán considerados como medidas calibradas en el procedimiento de verificación del brazo. La disposición de los retroreflectores en la malla según la medición realizada por el láser tracker se muestra en la Figura 4.34.

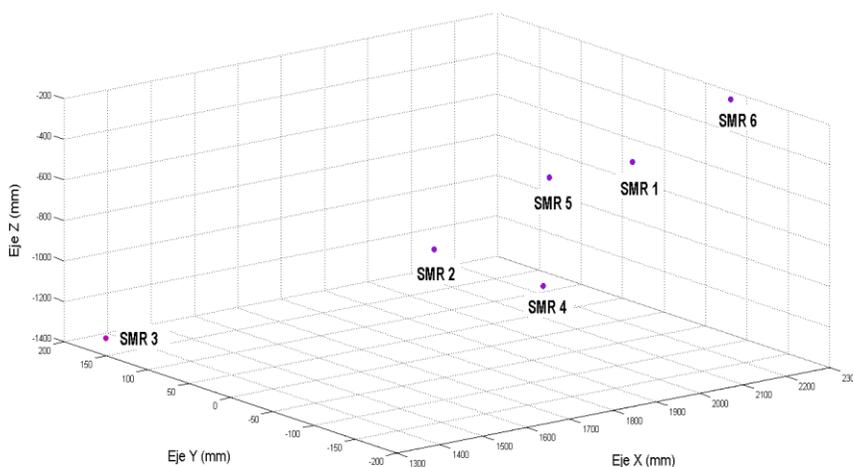


Figura 4.34. Disposición de retroreflectores en la malla según medición del láser tracker

Posteriormente se miden con el brazo articulado de medición por coordenadas, las esferas superiores e inferiores de referencia localizadas en la placa superior e inferior de la plataforma multi-registro. De este modo, se puede obtener la matriz de transformación homogénea que relaciona el sistema de referencia del brazo de medición y el sistema de referencia de la plataforma superior capturando simultáneamente las lecturas de los sensores capacitivos. Posteriormente y para cada posición de la plataforma (1-6), se realiza la medición de los seis retroreflectores situados en las seis posiciones de medida previamente definidas, donde se han dejado fijos tras la medición realizada con el láser tracker. Se toman siete puntos por retroreflector con el brazo de medición y adicionalmente en paralelo a las mediciones del brazo se registra la lectura de los capacitivos. Con objeto de analizar la influencia del operario que realiza los ensayos, factor que tanto afecta a las mediciones en el caso de utilización de un brazo de medición, se realizan dos series de medición llevadas a cabo cada una de ellas por un operario diferente. La disposición de los retroreflectores en la malla según la medición realizada con el brazo por el operario 1 y operario 2, y expresadas las coordenadas de los centros de los retroreflectores en sistema de referencia plataforma inferior o sistema de referencia global, para cada una de las seis posiciones rotativas de la plataforma se muestran en la Figura 4.35 y Figura 4.36.

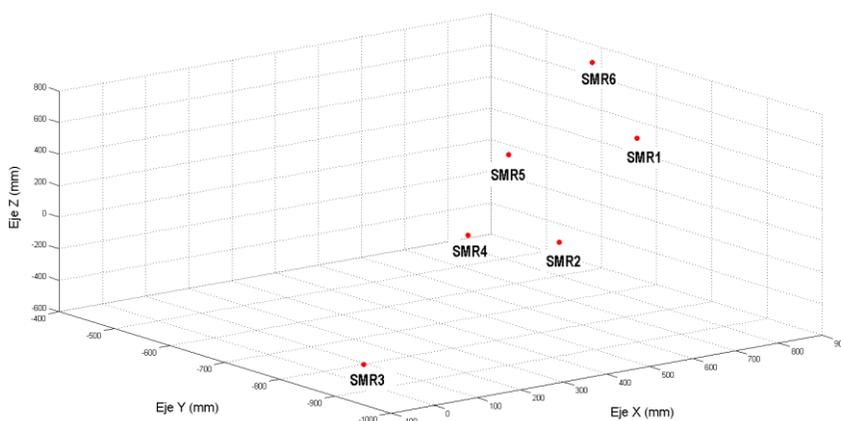


Figura 4.35. Disposición de retroreflectores en la malla según medición del brazo para 6 posiciones de la plataforma (operario 1)

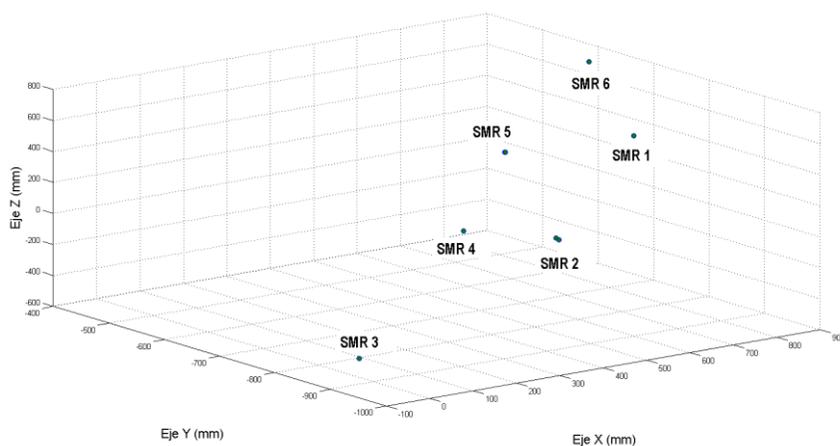


Figura 4.36. Disposición de retroreflectores en la malla según medición del brazo para 6 posiciones de la plataforma (operario 2)

Una vez capturadas las posiciones de los retroreflectores con ambos equipos de medición portátiles, brazo articulado de medición por coordenadas y láser tracker, se comparan los valores obtenidos realizándose la evaluación de error se realiza de dos maneras distintas. En primer lugar, se lleva a cabo una evaluación del error en la medición del diámetro del retroreflector, similar a las pruebas de diámetro efectivo o de error de palpado de tamaño especificadas en las normas [2], [3] y [4]. En segundo lugar, se realiza un cálculo del error en distancia que permite mostrar la precisión volumétrica del brazo en el volumen de trabajo definido.

En lo referente al cálculo del error de medición de diámetro del retroreflector, en este caso se tomarán como valores calibrados de referencia el diámetro nominal de los retroreflectores utilizados que es 1.5"

(38,1 mm). De esta manera, se permite calcular el error en la medición de diámetro cometido por el brazo, como $d_i - d_{Cal}$, siendo d_i el diámetro medido por el brazo y d_{Cal} el diámetro nominal del retrorreflector. El siguiente enfoque se basa en el cálculo de las distancias entre los centros de dos retrorreflectores cualesquiera de la malla que serán medidos con los dos instrumentos. El error en distancia se calculará como longitud entre centros medida por el brazo de medición menos la longitud entre centros calibrada, correspondiente en este caso a los valores medidos con el láser tracker, considerado como elemento patrón en este análisis tal y como se muestra en la ecuación (4-23).

$$D_i = L_i - L_{Cal} \tag{4-23}$$

En el caso en estudio, se calcularán quince distancias entre centros de los seis retrorreflectores disponibles según se indica en la Tabla 4.24 siguiente:

Retrorreflector origen	SMR1	SMR2	SMR3	SMR4	SMR5
	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6
	1-3	2-4	3-5	4-6	
Distancias	1-4	2-5	3-6		
	1-5	2-6			
	1-6				

Tabla 4.24. Definición de distancias entre retrorreflectores para evaluación de error en distancia

Como resultado final de esta prueba se obtendrán tres parámetros. En primer lugar deberá indicarse la máxima desviación obtenida para todas las posiciones $\text{Max } D_i (L_{med} - L_{Cal})$, el rango de estas desviaciones y una desviación media 2RMS calculado como dos veces el valor cuadrático medio de las desviaciones para todas las posiciones consideradas, ver ecuación (4-24).

$$2RMS = 2 \sqrt{\frac{\sum D_i^2}{n}} \quad n=6 \tag{4-24}$$

4.6.5 Resultados de evaluación del láser tracker como patrón

Los resultados obtenidos en los ensayos experimentales permiten evaluar la idoneidad de utilización del equipo de medición de láser tracker como elemento patrón en un procedimiento de calibración o verificación de un brazo articulado de medición por coordenadas.

Como se ha explicado en el apartado anterior, en primer lugar se realiza una evaluación del error del brazo articulado en la medición de un diámetro, definido como diferencia entre diámetro medido por el brazo, d_i , y el diámetro calibrado nominal d_{Cal} de 1.5" (38.1 mm). En segundo lugar, se realiza una evaluación del error de medición en distancia del brazo articulado de medición. Para ello, se determinan como distancias nominales las distancias entre centros de dos cualquiera de los retrorreflectores medidos por el láser tracker y posicionados en la malla. En total, tal como se muestra en la Tabla 4.25

se calculan quince distancias asociadas, cuyos valores nominales obtenidos como distancia euclídea entre centros de retrorreflectores medidos por el láser tracker son los siguientes:

Distancias (mm) – Longitud calibrada									
SMR		SMR		SMR		SMR		SMR	
1-2	523.8045	2-3	775.0102	3-4	864.5993	4-5	691.9169	5-6	493.8272
1-3	1286.0485	2-4	927.2232	3-5	1016.9956	4-6	1124.4904		
1-4	1182.3727	2-5	496.1383	3-6	1490.7376				
1-5	512.0332	2-6	825.0015						
1-6	427.8762								

Tabla 4.25. Distancias nominales entre centros de retrorreflectores medidas con equipo láser tracker

○ *Evaluación del error de palpado de tamaño de diámetro*

Mediante este ensayo se pretende evaluar el error cometido por el brazo en la medición de una dimensión, diámetro del retrorreflector en este caso, comparando con el diámetro nominal del retrorreflector que es 1,5" (38.1 mm). El retrorreflector tiene una esfericidad según fabricante grado $50 \pm 0.00005''$ ($\pm 1.3\mu\text{m}$). Para cada posición de la plataforma (1-6) se miden con el brazo los seis retrorreflectores posicionados en la malla realizando un total de 36 mediciones. Los resultados de los ensayos realizados se muestran en la Tabla 4.26, Figura 4.37, Figura 4.38 y corresponden al mayor error o desviación máxima en diámetro del retrorreflector medido respecto al valor calibrado por posición de la plataforma ($d_i - d_{cal}$), la desviación estándar asociada por posición de la plataforma y la desviación estándar de todas las posiciones ensayadas.

Posición plataforma	Desviación estandar (mm)	Error máximo (mm)
Posición 1	0.01206	0.02046
Posición 2	0.00962	0.02069
Posición 3	0.00980	0.02301
Posición 4	0.04357	0.09254
Posición 5	0.01033	0.02080
Posición 6	0.01022	0.02481
Máximo		0.0925
Media		0.0337
Total	0.0198	

Tabla 4.26. Resultados prueba de evaluación de error de palpado de tamaño (diámetro)

El promedio de las desviaciones máximas en diámetro de todas las posiciones ensayadas es 0.0337 mm y la desviación máxima 0.0925 mm, valor correspondiente a la posición 4 de la plataforma donde parece observarse una anomalía en los valores de medición en comparación con el resto de posiciones de la plataforma ensayadas. La desviación estándar calculada para todas las medidas de diámetro

realizadas tiene un valor de 0.0198 mm, valor considerado como razonable en un brazo de medición por coordenadas de las características del empleado en estos ensayos.

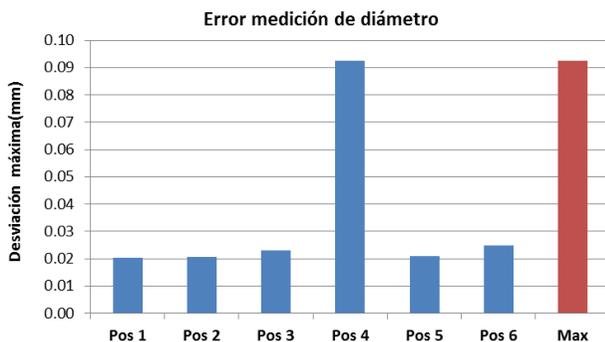


Figura 4.37. Error de palpado de tamaño (diámetro) por posición plataforma: desviación máxima.

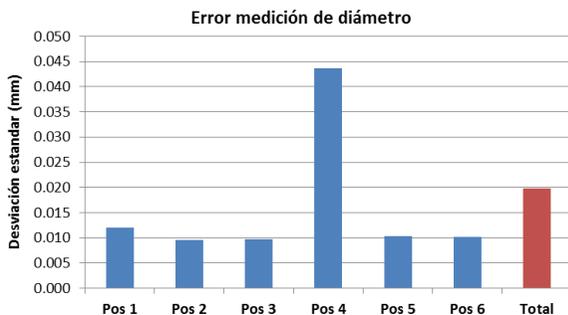


Figura 4.38. Error de palpado de tamaño (diámetro) por posición plataforma: desviación estándar

Adicionalmente se muestra la desviación en diámetro frente al valor calibrado por SMR (1-6) y posición de la plataforma ensayada en la Figura 4.39. Las desviaciones en la medición del diámetro respecto al valor calibrado no sobrepasan los 0.030 mm salvo en el caso correspondiente al SMR1 en la posición 4 de la plataforma.

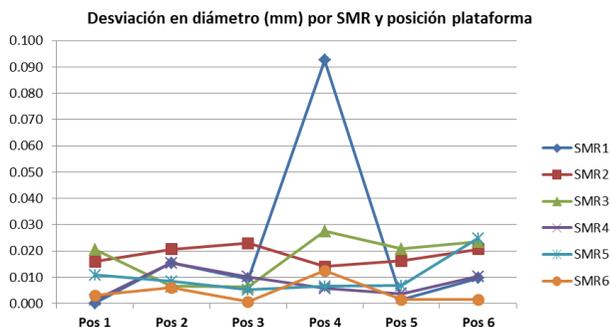


Figura 4.39. Desviación en diámetro por SMR y posición de la plataforma

La precisión de un brazo de medición está intrínsecamente unida a la habilidad y competencia del operario que realiza la medición con el brazo, y por consiguiente a la fuerza aplicada por la persona en la medición [88]. Con objeto de mostrar la influencia del operario en la medición realizada con el brazo, se incluyen en los ensayos realizados en este trabajo un análisis de reproducibilidad mediante una duplicidad de las mediciones realizadas por dos operarios diferentes. Como puede observarse en la Figura 4.40, el operario 1 resulta más repetible que el operario 2 salvo en el caso de la posición 4 de la plataforma mencionado.

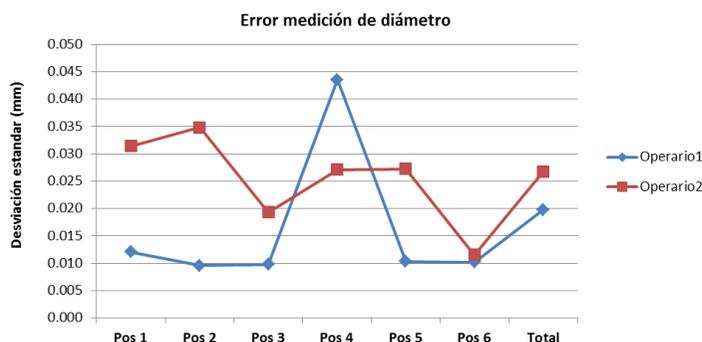


Figura 4.40. Error de medición en diámetro por operario

○ *Prueba de evaluación de precisión volumétrica.*

En el ensayo de evaluación de la precisión volumétrica del brazo se realiza una evaluación del error de medición en distancia del brazo articulado utilizando como elemento patrón las mediciones de los retrorreflectores realizadas por el láser tracker. Para ello, se determinan como distancias nominales las distancias euclídeas entre centros de dos cualquiera de los retrorreflectores posicionados en la malla medidos con el láser según se muestra en la Tabla 4.24. A continuación se calculan las distancias mostradas en la Tabla 4.24 tras la medición con el brazo articulado de los retrorreflectores, obteniéndose el error en distancia como la diferencia de la medida al valor calibrado. Los parámetros resultado del ensayo son la desviación máxima en distancia $D_i = L_i - L_{Cal}$, el rango de desviaciones en distancia y dos veces el error cuadrático medio 2RMS tal y como se muestran en la Tabla 4.27, Figura 4.41, Figura 4.42 y Figura 4.43.

Posición plataforma	2RMS	Error medio distancia (mm)	Error max distancia (mm)	Rango error distancia (mm)
Posición 1	0.0670	0.0226	0.1043	0.1401
Posición 2	0.0671	0.0243	0.0949	0.1284
Posición 3	0.0603	0.0194	0.0903	0.1348
Posición 4	0.1440	0.0615	0.1388	0.2139
Posición 5	0.0879	0.0243	0.1541	0.1905
Posición 6	0.0782	0.0280	0.1257	0.1859
Máximo			0.1541	0.2139
Media		0.0300		
Total	0.0902			

Tabla 4.27. Resultados prueba de evaluación de precisión volumétrica

Como puede observarse en la tabla anterior, el valor de 2RMS total calculado para todas las mediciones realizadas es 0.0902 mm y el error medio 0.0300 mm. Los valores máximos de error se siguen evidenciando para la posición 4, análogamente al ensayo anterior, lo cual parece indicar que puede existir algún problema relacionado con la medición en esta posición de la plataforma.

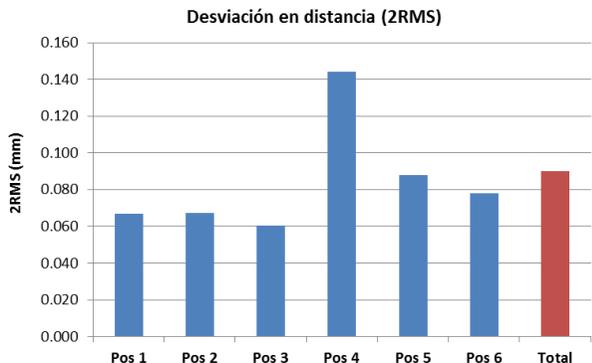


Figura 4.41. Error en distancia 2RMS por posición de la plataforma

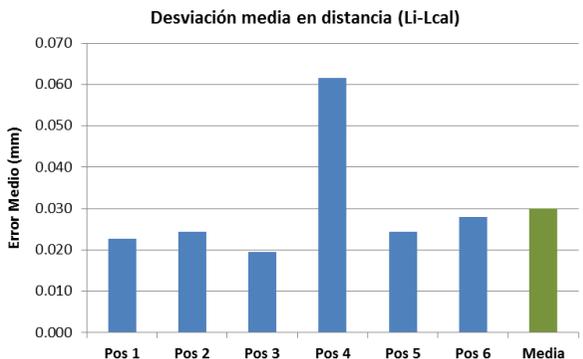


Figura 4.42. Error medio en distancia por posición de la plataforma

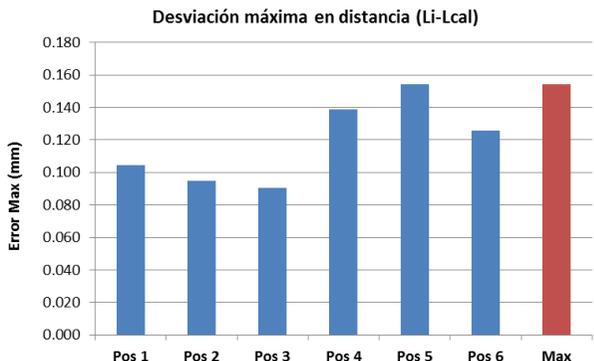


Figura 4.43. Error máximo en distancia por posición de la plataforma

Análogamente al procedimiento realizado para la evaluación del error de palpado de tamaño cometido por el brazo de medición, dos operarios realizan los ensayos de evaluación de precisión volumétrica con el láser tracker como patrón con objeto de mostrar la influencia del operario en la medición realizada con el brazo. En la Figura 4.44 se muestra que al igual que en el ensayo anterior, el operario 1 es más repetible que el operario 2 salvo en el caso de la posición 4 de la plataforma.

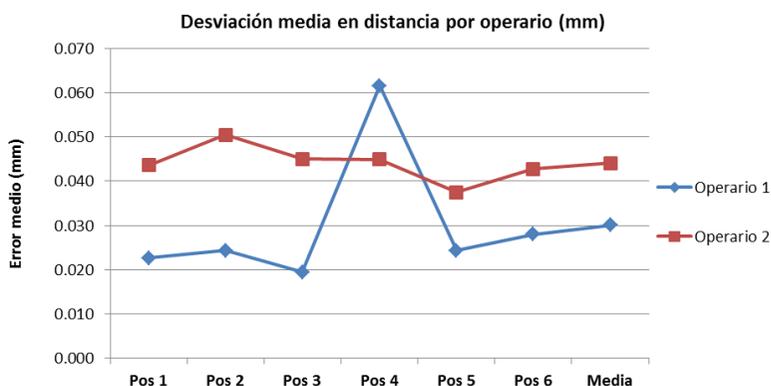


Figura 4.44. Error medio en distancia por posición de la plataforma y operario

La Figura 4.45 muestra el error en distancia obtenido como desviación frente al valor calibrado para cada posición de ensayo de la plataforma y cada una de las distancias entre centros de retrorreflectores evaluadas. El error en distancia en la mayoría de las mediciones está por debajo de los 0.040 mm con la excepción de la posición 4 de la plataforma. La distancia entre los retrorreflectores 3 y 4 para todas las posiciones de la plataforma adopta los valores más altos de todas las distancias evaluadas. Este hecho puede ser debido a que los retrorreflectores 3 y 4 se encuentran posicionados en el suelo, siendo estas posiciones las más forzadas y complejas de medición con el brazo y consecuentemente con mayor posibilidades de error en la medición realizada.

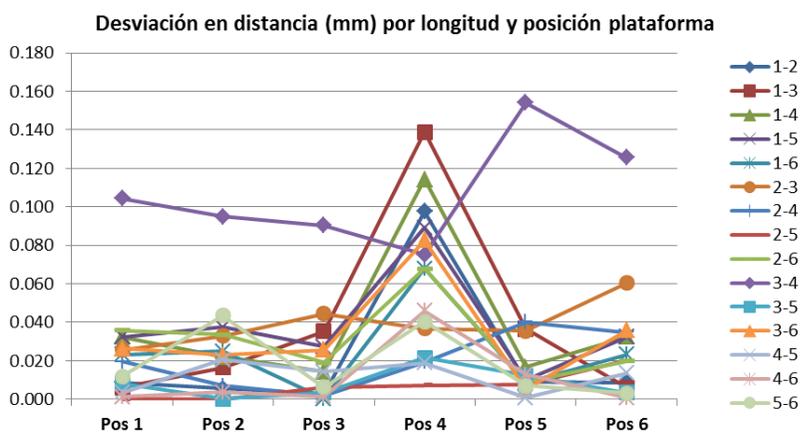


Figura 4.45. Error en distancia por posición de la plataforma y longitud evaluada

Los valores resultado de los ensayos de verificación del brazo usando el láser tracker como patrón y la plataforma multi-registro, son comparados con los resultados de la verificación del brazo usando la plataforma multi-registro con un patrón convencional y con el valor de error máximo permisible suministrado por el fabricante del brazo tal cual se muestra en la Tabla 4.28.

	Plataforma – LT Operario 1	Plataforma – LT Operario 2	Plataforma – Barra esferas	Fabricante
Error medio distancia (mm)	0.0300	0.0440	0.0203	
Max error distancia (mm)	0.1541	0.1684	0.0902	
Rango error distancia (mm)	0.2139	0.2541	0.0899	
2RMS (mm)	0.0902	0.1217	0.0591	0.0430

Tabla 4.28. Resultados comparativos de la prueba de evaluación de precisión volumétrica con láser tracker como patrón, plataforma multi-registro y patrón convencional y datos fabricante

Los errores medio y máximo en distancia obtenidos en la verificación del brazo usando la plataforma y un patrón de esferas convencional son 0.0203 mm y 0.0902 mm respectivamente, mientras que los valores obtenidos en los ensayos de verificación del brazo con plataforma utilizando el láser tracker como elemento patrón de medición son 0.0300 mm y 0.1541 mm para el operario 1, y 0.0440 mm y 0.1684 mm para el operario 2, en las dos tandas de ensayos realizadas. Los valores del error cuadrático medio 2RMS obtenidos en los ensayos con el láser tracker por el operario 1 y el operario 2 son 0.0902 mm y 0.1217 mm respectivamente, mientras que en la evaluación con el patrón convencional 0.0591 mm y el dato suministrado por el fabricante 0.0430mm.

Interesante también parece comparar los resultados de los ensayos realizados con el láser tracker como patrón, con los obtenidos en una verificación del brazo articulado de medición según norma ASME B89.4.22-2004 en el caso de la prueba de precisión longitudinal volumétrica indicada en el apartado 4.5.2. En la Tabla 4.29 siguiente se muestran los resultados obtenidos:

	Plataforma – LT Operario 1	Plataforma – LT Operario 2	ASME B89.4.22-2004
Error medio distancia (mm)	0.0300	0.0440	0.0298
Max error distancia (mm)	0.1541	0.1684	0.0896
Rango error distancia (mm)	0.2139	0.2541	0.1456
2RMS (mm)	0.0902	0.1217	0.0766

Tabla 4.29. Resultados comparativos de la prueba de evaluación de precisión volumétrica con láser tracker como patrón y verificación brazo según ASME B89.4.22-2004

En este caso los errores medios en distancia obtenidos por el operario 1 y en la verificación del error volumétrico del brazo de medición según ASME B89.4.22-2004 son muy similares, 0.0300 mm es el valor obtenido en la evaluación del láser tracker como patrón y 0.0298 mm en ASME, lo cual puede dar indicios de la idoneidad del uso del láser tracker como elemento patrón en un procedimiento de verificación de un brazo articulado de medición de estas características.

4.7 Conclusiones

De acuerdo a los resultados obtenidos en este trabajo, puede concluirse que la plataforma multi-registro es un instrumento adecuado para su utilización en procesos de verificación de brazos articulados de medición por coordenadas, presentando claras mejoras en términos de reducción de tiempo de ensayo y complejidad de montajes de prueba asociados respecto a los procedimientos indicados en las normas [2], [3] y [4]. Relativo a los resultados de los ensayos comparativos con norma, la definición de cinco posiciones físicas para la barra patrón, unido a las seis posiciones rotativas que permite la plataforma, aseguran una evaluación completa del brazo en todo su volumen de trabajo realizada con un alto nivel de precisión y repetibilidad. La simplificación de los montajes necesarios para los ensayos es una de las principales mejoras aportadas por la plataforma teniendo en cuenta el espacio de ensayo controlado necesario, las dimensiones de los patrones de verificación y útiles de fijación con la complejidad derivada. El tiempo de ensayo es reducido claramente en un 75% frente a los procedimientos de verificación establecidos en normativa aplicable. Los errores máximos en distancia obtenidos en la verificación del brazo con la plataforma fueron 0.09016 mm y los obtenidos en los ensayos volumétricos según norma ASME 0.08957 mm y VDI 0.04767 mm, remarcan la probada precisión de posicionamiento de la plataforma y su repetibilidad en procesos de verificación de brazos. Es importante destacar que los resultados de error máximo en distancia obtenidos con la plataforma 0.09016 mm, están muy próximos a los obtenidos en la verificación según ASME 0.08957 mm, hecho esperable debido a que la definición de las posiciones de ensayo en la verificación con el brazo están basadas en este documento. El uso conjunto del brazo y plataforma multi-registro permite evaluar un número mayor de posiciones y orientaciones de la barra patrón que las marcadas en norma, explorando de este modo un volumen de trabajo mayor del brazo de medición. Este hecho puede explicar que el valor mayor de error en distancia fue obtenido en los ensayos de verificación con la plataforma. Igualmente reafirma su viabilidad de uso el valor de 2RMS obtenido en el ensayo con plataforma multi-registro que fue de 0.05909 mm, inferior al valor calculado tras la realización de los ensayos según ASME 0.07656 mm y próximo a los valores de VDI 0.03833 mm y fabricante 0.0430 mm.

En este capítulo se realizó un proceso de optimización de parámetros del modelo del brazo articulado de medición por coordenadas con plataforma multi-registro mediante el método de Levenberg-Marquardt como algoritmo de optimización, que persigue determinar los valores de los parámetros que hacen mínimo el error final de medida del brazo en todas las posiciones de captura. Tras la definición y medición de las esferas en las posiciones de captura correspondientes a dos posiciones diagonales del patrón y seis posiciones rotativas de la plataforma multi-registro, se llevó a cabo la selección de los parámetros de calidad y términos de error a incluir en las funciones objetivo. Las funciones objetivo que obtuvieron los mejores valores de parámetros de calidad fueron la 3, 5 y 7 donde se incluyeron como términos de error a minimizar, errores en distancia, errores de punto en sistema de referencia plataforma inferior y desviaciones estándar en coordenadas X,Y,Z de manera individual o una combinación de ellos. En el caso del error medio en distancia los valores obtenidos fueron 0.006353 mm (función 3), 0.006946 mm (función 5) y 0.006901 mm (función 7), valores buenos teniendo en cuenta la precisión volumétrica de ± 0.043 mm indicada por el fabricante para el brazo Faro Platinum que se utiliza en este estudio. Coinciden también para estas funciones objetivo 3, 5 y 7, los mejores valores de error de punto obtenidos, siendo 0.028136 mm para la función 3, 0.030079 mm para la función 5 y 0.028391 mm para la función 7. Igualmente en el caso de los resultados de desviación estándar en las coordenadas X,Y,Z con valores 0.044889 mm, 0.042732 mm y 0.033180 mm para la función 3, 0.036564 mm, 0.041649 mm y 0.027507 mm para la función 5 y 0.042739 mm, 0.038958 mm y 0.030951 mm para la función 7,

siendo el valor de repetibilidad suministrado por el fabricante 0.030 mm. El último parámetro de calidad evaluado, el error en las esferas de registro muestra los mejores valores en la evaluación con las funciones objetivo 2, 4, 6 y 8 donde se incluye como término de error, sin embargo los resultados con estas funciones empeoran para el resto de los parámetros de calidad, con lo cual se desestiman en la selección. La función 7 que incluye los tres parámetros de error en distancia, error de punto y desviación estándar combinada es la que muestra el mejor comportamiento, no obstante sin mucha diferencia respecto a la función 3 y 5.

Para finalizar este procedimiento de optimización, se evaluaron los parámetros óptimos del brazo obtenidos en el procedimiento de identificación con una posición de prueba del patrón distinta de las incluidas en la optimización. En este caso, se obtienen valores en el mismo orden que en las posiciones de optimización para los errores medios en distancia, error de punto y desviación estándar para las funciones objetivo que mejor funcionan en la optimización 3, 5 y 7. Observando la función objetivo 7, se obtienen valores de error medio en distancia de 0.006101 mm, error de punto de 0.028691 mm y desviaciones estándar en coordenada X 0.042039 mm, coordenada Y 0.040158 mm y coordenada Z 0.031351 mm. El error máximo en distancia en esta función 7, 0.012625 mm, se encuentra por debajo del valor máximo obtenido en la identificación 0.012825 mm.

Otra de las técnicas que se evaluó en este trabajo, fue la posible utilización de un láser tracker como instrumento patrón en la verificación de brazos articulados de medición. Teniendo en cuenta los resultados obtenidos, podría validarse la utilización de un equipo de láser tracker como patrón, asegurando la precisión del equipo patrón por medio de una correcta calibración y verificación. Igualmente, hay que tener en consideración la precisión del brazo que se pretende calibrar, de manera que se asegure la viabilidad de la metodología y la validez de los resultados obtenidos. Es necesario destacar el hecho de que utilizar un láser tracker como patrón en estos procedimientos, evita la necesidad de materializar la longitud requerida en un patrón físico, con la consecuente versatilidad y flexibilidad que aporta su uso en la generación de infinitas distancias y posiciones de ensayo sin necesidad de un patrón físico.

Los valores obtenidos en los ensayos de evaluación del brazo articulado de medición montando sobre la plataforma multi-registro usando el láser tracker como patrón, se compararon con los resultados de una verificación del brazo de medición registrado igualmente sobre la plataforma multi-registro pero usando una barra patrón de esferas convencional calibrada. Se obtuvieron valores medios y máximos de errores en distancia comparables con ambos procedimientos. Adicionalmente, y con el objetivo de incluir los requerimientos de normativa de evaluación de brazos existentes, se realizó una comparativa entre el ensayo de precisión volumétrica de acuerdo a ASME B89.4.22-2004 para un brazo de medición y la verificación llevada a cabo en este caso con brazo de medición, plataforma multi-registro y laser tracker patrón obteniendo valores de error medio en distancia comparables. Es importante resaltar, que el uso del láser tracker como patrón conjuntamente con la plataforma multi-registro con las ventajas que ésta aporta previamente mencionadas, permite evaluar un volumen de trabajo mayor del brazo reduciendo todavía más el tiempo de ensayo y la mano de obra requerida en los procedimientos de calibración y verificación de estos equipos.

Finalmente mencionar, que las principales aportaciones de la plataforma integrada en procesos de calibración o verificación que constituyen un avance pueden resumirse en dos conceptos. El primero, la posibilidad de generación de un punto fijo en sistema de referencia plataforma inferior, con las mejoras y simplificaciones que aporta en los procedimientos de calibración y verificación mostrados en este

capítulo aplicados a brazos articulados de medición por coordenadas. Y en segundo lugar, la posibilidad de generación de distancias virtuales, metodología que se aplicará y describirá en el capítulo 5 aplicada a láser trackers. En este capítulo se presenta esta nueva técnica de verificación de instrumentos portátiles mediante plataforma multi-registro y distancias patrón virtuales, calculadas a partir puntos virtuales generados dado un punto medido y conocido con gran precisión el giro de la plataforma que se aplica a ese punto medido. Esta técnica es especialmente potente ya que permite la generación de un número indefinido de puntos virtuales y distancias virtuales de diferentes longitudes, posiciones y orientaciones, sin necesidad de materialización física en un elemento patrón. Se realizará una aplicación inicial de la técnica a láser trackers, generando mallas virtuales de reflectores, pudiéndose extrapolar en un segundo paso a brazos articulados de medición por coordenadas.

Capítulo 5

5 Verificación de láser tracker con plataforma multi-registro

5.1 Introducción

En este capítulo una vez definidos y descritos los modelos cinemáticos asociados a diferentes configuraciones de láser tracker y plataforma multi-registro, determinados los parámetros nominales del láser tracker y presentado el modelo matemático de la plataforma multi-registro, se realiza la definición de un nuevo procedimiento de verificación de un equipo de láser tracker con la plataforma multi-registro. El objetivo, análogamente al procedimiento realizado en el capítulo 4 para un brazo articulado de medición por coordenadas, es verificar la idoneidad del procedimiento de verificación de este instrumento portátil de medición de alto rango usando la plataforma, mostrando las principales ventajas que aporta esta nueva técnica e identificando puntos de mejora a desarrollar en futuros trabajos. Para ello, se toman como referencia las siguientes normativas aplicables a evaluación de láser trackers: norma ASME B89.4.19 de 2006, la recomendación técnica VDI/VDE 2617- parte 10 de 2011 y el borrador del estándar ISO/CD10360-10 [5]–[7].

En el caso en estudio, el proceso de verificación se lleva a cabo utilizando la plataforma multi-registro previamente descrita, el equipo de láser tracker modelo API T3-15 m montado sobre ella y una malla de grandes dimensiones de aproximadamente 6 x 6 x 6 m compuesta de 23 retrorreflectores dispuestos en el volumen de trabajo del láser tracker y un patrón que incluye cuatro retrorreflectores adicionales.

Se presenta en este capítulo el concepto de verificación de instrumentos portátiles de medición mediante evaluación de distancias virtuales, una nueva técnica que posibilita la definición de un número ilimitado de distancias patrón calibradas sin necesidad de materialización de las mismas en un patrón físico. Esta técnica, desarrollada en este trabajo de tesis a partir del uso de la plataforma como instrumento de medición y el conocimiento de su giro con gran precisión, es de especial utilidad en procedimientos de verificación de láser trackers, donde las distancias a medir y materializar en un elemento patrón son grandes, aportando gran versatilidad en la generación de un número ilimitado de distancias independientemente de su dimensión.

5.2 Integración de modelos cinemáticos de láser tracker y plataforma multi-registro

En el capítulo 3 se presenta el modelado cinemático del láser tracker a utilizar en este trabajo, así como el modelo matemático de la plataforma multi-registro sobre la que se posiciona el equipo de medición en los procedimientos de calibración y verificación ensayados. El objeto de la integración de los modelos cinemáticos de láser tracker y plataforma, será determinar la relación matemática entre todas y cada una de las articulaciones que forman su estructura, conjuntamente con la posición y orientación final del sistema.

En este trabajo, se realizó el modelado cinemático según el método D-H [1] aplicado a un láser tracker API T3-15m con fuente de láser en cabezal giratorio. El láser tracker con emisor en el cabezal se compone de dos uniones rotativas y una lineal [71]. Los encoders angulares de los giros horizontal y vertical proporcionan los valores de giro de las uniones rotativas y la medición del interferómetro proporciona el valor de la distancia. Utilizando el modelo de Denavit-Hartenberg D-H se obtienen las coordenadas de un punto medido por el láser tracker en función de los valores de los ángulos y distancia de la cadena cinemática. El modelado del láser tracker mediante el método de D-H se muestra en la Figura 3.15, incluyendo el sistema de referencia global (x_0, y_0, z_0) , un sistema de referencia en cada una de las articulaciones rotativas y el tercero en el retroreflector que permitirá mediante la medición con el interferómetro conocer la distancia.

Las coordenadas capturadas de los puntos medidos en el proceso de verificación del láser tracker, son obtenidas en un sistema global de referencia fijo localizado en la placa inferior de la plataforma. Mediante el modelo matemático de la plataforma multi-registro explicado en el capítulo 3, se obtiene la matriz de transformación homogénea que permita el cambio del sistema de coordenadas de láser tracker SR_{LT} montado sobre la placa móvil de la plataforma, al sistema global de referencia fijo SR_{Global} , tal cual se expresa en la siguiente ecuación simplificada (5-1).

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}_{SR_{Global}} = {}^{SR_{Global}}T_{SR_{PlacaMovil}} {}^{SR_{PlacaMovil}}T_{SR_{LT}} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}_{SR_{LT}} \quad (5-1)$$

Haciendo uso de la notación empleada en el desarrollo del modelo matemático explicado en el capítulo 3:

- SC_{global} : Sistema de coordenadas global o inferior $[X_{global} \ Y_{global} \ Z_{global}]$ en la placa fija.
- SC_{ver}^i : Sistema de coordenadas de verificación $[X_{ver}^i \ Y_{ver}^i \ Z_{ver}^i]$, de la posición i en la placa móvil, para $i = 1, 2, \dots, 6$.
- $M_{ver,i}$: Matriz de transformación homogénea buscada de la posición i , que permite expresar lecturas del SC_{ver}^i al SC_{global} , para $i = 1, 2, \dots, 6$.
- $X_{0,j}^{global}$: Vector de punto cero de sensores capacitivos $[x_{0,j}^{global} \ y_{0,j}^{global} \ z_{0,j}^{global} \ 1]^T$ expresado en sistema de coordenadas global, SC_{global} , para $j = 1, 2, \dots, 6$ sensores capacitivos.

- $X_{ver,j}^i$: Vector $\begin{bmatrix} x_{ver,j}^i & y_{ver,j}^i & z_{ver,j}^i & 1 \end{bmatrix}^T$ del punto uno del procedimiento de verificación del sensor j en la posición i , para $j = 1, 2, \dots, 6$ e $i = 1, 2, \dots, 6$, expresado en el sistema de coordenadas SC_{ver}^i .

Se podría expresar un punto en SR^{Global} del siguiente modo, con incógnitas los parámetros de la matriz de transformación homogénea buscada $M_{ver,1}$ y las coordenadas del punto uno nuevo $X_{ver,j}^{global}$ correspondiente.

$$X_{ver,j}^{global} = M_{ver,1} X_{ver,j}^1 \quad (5-2)$$

En este modelo se utilizan los parámetros geométricos óptimos encontrados durante el procedimiento de calibración de la plataforma [72] y las lecturas de los sensores capacitivos capturadas durante el procedimiento de verificación, generando para cada punto capturado una matriz de transformación que exprese las lecturas (x, y, z) del sistema de coordenadas de la placa móvil al sistema de coordenadas global de la placa fija, en cada una de las seis posiciones diferentes posibles. Para este fin, se utilizan los datos de referencia guardados de la primera repetición en cada posición durante la calibración de la plataforma. Los datos de referencia son los siguientes:

- Matriz de cambio de coordenadas (matriz de referencia).
- Punto uno de cada pareja sensor-target (punto de referencia).
- Lectura de los sensores capacitivos de la primera repetición.

De este modo los pasos del procedimiento de verificación consistirán básicamente en:

1. Montaje del láser tracker sobre la plataforma multi-registro.
2. Posicionamiento de la plataforma en la posición 1. Medición de las esferas de caracterización de la placa móvil con el láser tracker para determinar la matriz de transformación homogénea que permita expresar lecturas del sistema de coordenadas del láser tracker en términos del sistema de coordenadas de la placa móvil, ver Figura 5.1. Como ambos sistemas de referencia son solidarios, la matriz de cambio de coordenadas se determina una única vez en el procedimiento.
3. Relacionar el sistema de coordenadas actual de la posición 1 con el sistema de coordenadas global de calibración de la placa fija mediante la lectura de los sensores capacitivos en la verificación y el conjunto de datos obtenidos del procedimiento de calibración.
4. Medición de los n retroreflectores de la malla patrón en la posición 1 de la plataforma.
5. Obtención de la relación geométrica entre el sistema de coordenadas de la placa móvil y el sistema de coordenadas global de la plataforma para cada uno de los puntos medidos en los n retroreflectores de la malla patrón. Es necesario calcular una matriz de transformación diferente para cada punto medido, ver Figura 5.2, debido a la pequeña variación que puede sufrir la posición de las placas que es controlada mediante los sensores capacitivos.
6. Giro de la plataforma a otra posición y determinación de la relación geométrica entre el sistema de coordenadas actual de la posición 2 con el sistema de coordenadas global de la placa fija utilizando la lectura de los sensores capacitivos y el conjunto de datos obtenidos del procedimiento de calibración.

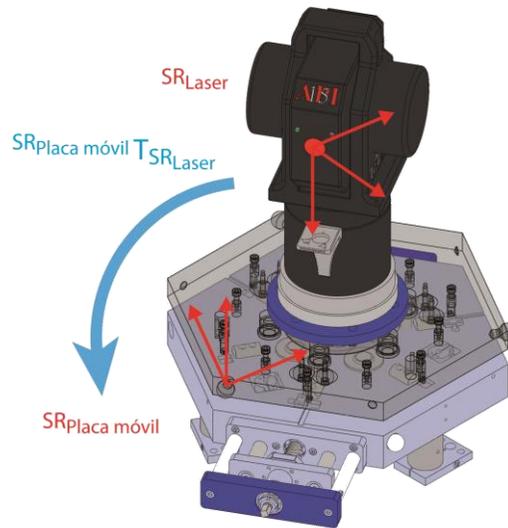


Figura 5.1. Sistemas de coordenadas del láser tracker y sistema de coordenadas de la placa móvil.

7. Medición de los n retrorreflectores de la malla patrón.

8. Al igual que en el paso 5, obtención de la relación geométrica entre el sistema de coordenadas de la placa móvil y el sistema de coordenadas global de la plataforma para cada uno de los j -ésimos puntos medidos en cada una de los n retrorreflectores de la malla patrón para la posición actual.

9. Repetir los pasos 6, 7 y 8 para cada una de las posiciones restantes de la plataforma.



Figura 5.2. Sistema de coordenadas de la placa móvil y sistema de coordenadas de la placa fija.

En la siguiente Figura 5.3. se aprecia un desglose explosionado del conjunto formado por el láser tracker, la plataforma multi-registro y el soporte de amarre del láser tracker a la plataforma diseñado para la fijación del equipo sobre la plataforma.

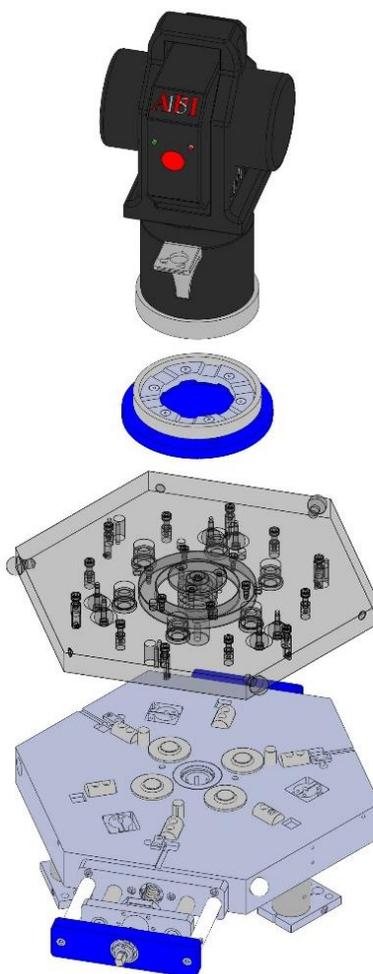


Figura 5.3. Ensamblaje plataforma multi-registro, láser tracker API T3-15 y soporte fijación láser tracker

5.3 Procedimiento de verificación de láser tracker con plataforma multi-registro.

Tal y como se realizó con el brazo de medición por coordenadas, se ilustra en este apartado el procedimiento de verificación para un equipo de láser tracker consistente en una verificación volumétrica del láser tracker colocado sobre la plataforma multi-registro. Se utiliza para ello una malla de retroreflectores cuya área materializa una parte del volumen de cobertura de medición del láser tracker. El equipo de láser tracker utilizado en este ensayo es un modelo API T3 15m con precisión angular de $3.5 \mu\text{m/m}$, precisión en distancia (ADM) de $\pm 15 \mu\text{m}$ y precisión en distancia con interferómetro de ± 0.5

ppm. Adicionalmente se hace uso de 27 retrorreflectores modelo HALLOW 40M de diámetro 1.5" (38,1 mm) y esfericidad grado $50 \pm 0.00005''$ ($\pm 1.3 \mu\text{m}$).

La malla de nidos generada para el ensayo tiene unas dimensiones de 6 x 6 x 6 m aproximadamente y las posiciones de los retrorreflectores fueron definidas tras la realización de un análisis de sensibilidad [71] que permite conocer cómo afecta cada error individual al error total del láser tracker y determinar aquellas posiciones más sensibles a la generación de errores con el láser tracker. Para ello se evaluaron la rotación, inclinación del cabezal y distancia al cabezal definiéndose 27 posiciones distribuidas de los retrorreflectores a diferentes distancias del centro del láser tracker y alturas. Las posiciones de los retrorreflectores vienen determinadas por la altura a la que se coloca el retrorreflector (suelo, medio, alto) y la distancia del retrorreflector al centro del volumen de trabajo del láser tracker tal y como se refleja en la Tabla 5.1.

Número retrorreflector	Altura	Número retrorreflector	Altura	Número retrorreflector	Altura
1	Alto 6m	10	Medio 2m	19	Medio 1m
2	Alto 6m	11	Medio 2m	20	Suelo
3	Alto 6m	12	Medio 2m	21	Medio 1m
4	Alto 6m	13	Medio 2m	22	Suelo
5	Alto 6m	14	Medio 2m	23	Medio 1m
6	Alto 6m	15	Medio 2m	24 patrón	Suelo
7	Alto 6m	16	Medio 2m	25 patrón	Suelo
8	Alto 6m	17	Suelo	26 patrón	Suelo
9	Medio 2m	18	Suelo	27 patrón	Suelo

Tabla 5.1. Definición de las posiciones de los retrorreflectores en el ensayo

En la Figura 5.4. puede verse la disposición física de los retrorreflectores en la malla de trabajo utilizada en el procedimiento de verificación:

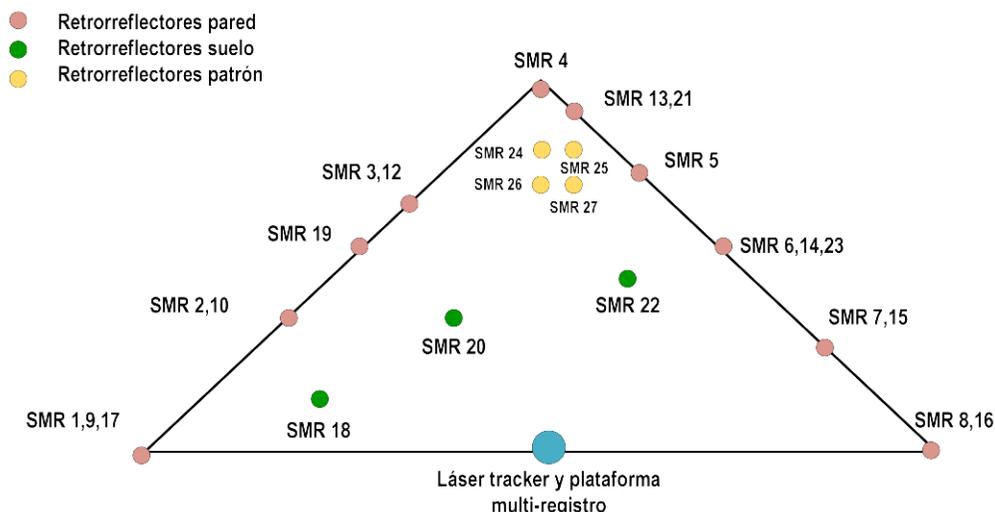


Figura 5.4. Disposición de retrorreflectores, láser tracker y plataforma multi-registro en el ensayo

Las distancias del láser tracker a las que se encuentran posicionados los retrorreflectores en la malla considerando una altura del láser tracker de 1,5 m se muestran en la Figura 5.5 y Figura 5.6.

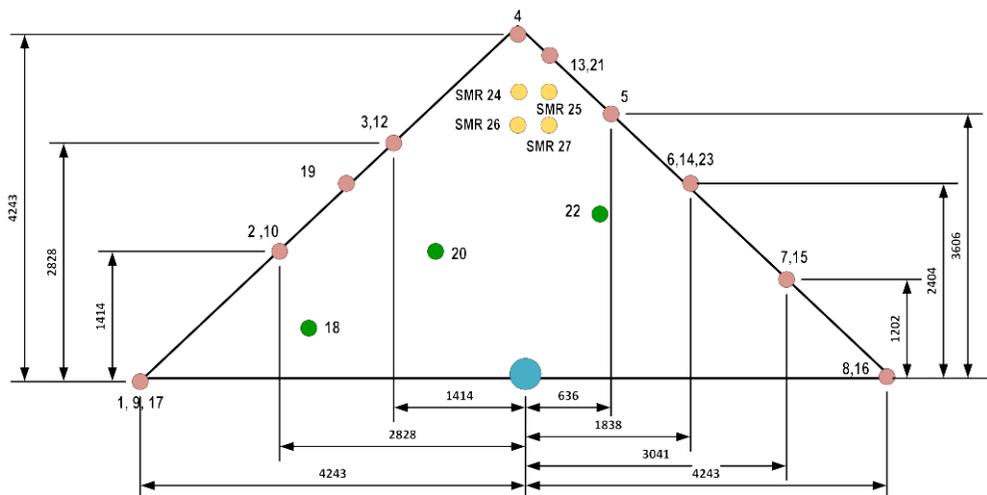


Figura 5.5. Posiciones de retrorreflectores al láser tracker en malla de ensayo (1)

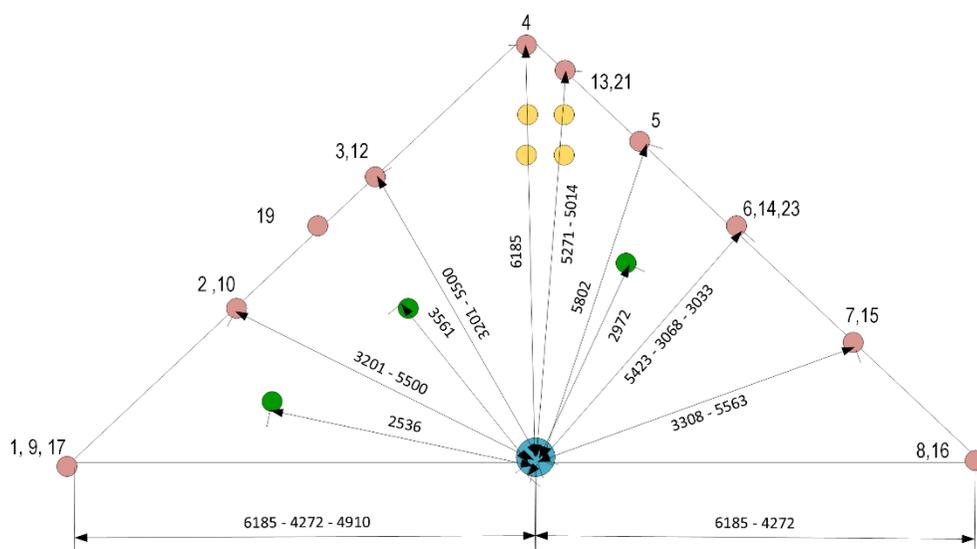


Figura 5.6. Distancias de retrorreflectores al láser tracker en malla de ensayo (2)

En este procedimiento de verificación, el láser se posiciona encima de la plataforma, la cual permite un giro del equipo definiendo seis posiciones de rotación del láser con respecto al sistema global de referencia de la plataforma, ver Figura 5.7. En este caso, se capturaron las coordenadas de los 27 retrorreflectores que configuran la malla de medición, pero teniendo en cuenta las seis posiciones de rotación que permite la plataforma, el número total de mallas evaluadas se eleva a seis, cada una con los 27 retrorreflectores que configuran la malla física original. Cada vez que la plataforma rota a una

nueva posición permitiendo al láser tracker medir el mismo retrorreflector, un nuevo volumen de trabajo es evaluado para cada posición de la plataforma. El uso conjunto de la plataforma y el láser tracker permite evaluar un número superior de diferentes posiciones de la malla, pudiendo concluir que la evaluación del volumen de trabajo del láser tracker se realizará de manera satisfactoria. La principal ventaja de la plataforma como medio auxiliar en procedimientos de verificación de equipos de medición de alto rango como un láser tracker, es que las posiciones de rotación de la misma permiten evaluar diferentes volúmenes de trabajo del láser tracker sin la necesidad de generar una nueva malla física, las cuales en el caso de estos equipos, suele ser de grandes dimensiones con el espacio necesario asociado.

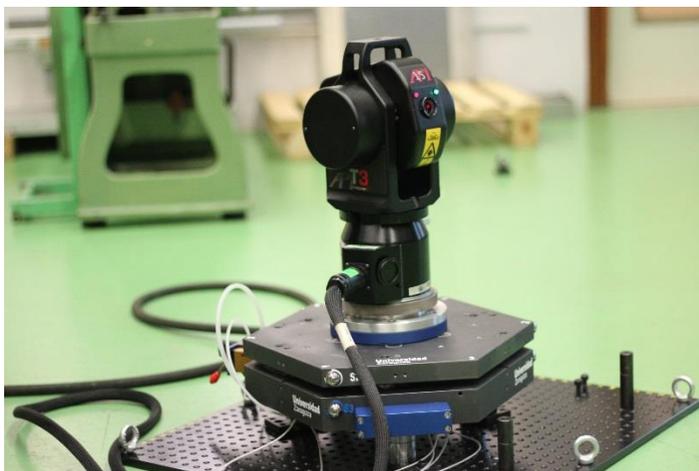


Figura 5.7. Láser tracker sobre plataforma multi-registro en el ensayo

Además se hizo uso de un patrón físico configurado por cuatro retrorreflectores (24-27) tal y como se muestra en la Figura 5.8. Este patrón sirvió como referencia para la generación de distancias patrón nominales definidas en la Tabla 5.2, y que se compararán a posteriori con las mediciones realizadas por el láser tracker. Las distancias nominales fueron determinadas mediante medición del patrón en una máquina de medición por coordenadas en el laboratorio a temperatura controlada de $20^{\circ}\text{C} \pm 0,1^{\circ}\text{C}$ y mediante fotogrametría, permitiendo de este modo la comparación de resultados con ambos sistemas en la medición de una distancia calibrada.

El software utilizado en la medición por fotogrametría es del fabricante AICON, la cámara modelo Nikon 3dx y los reflectores de fotogrametría son reflectores esféricos modelo Hubbs W1.5-S con marcador reflectante del mismo diámetro 1,5" (38,1 mm) que los reflectores del láser tracker. De este modo, se posibilita su intercambiabilidad materializando ambos reflectores el mismo centro con un tolerancia del plano respecto al centro según fabricante de $\pm 0.0005"$ (0.0127 mm). El hecho de plantear el concepto de la medición por fotogrametría con targets intercambiables en esta aplicación, podría permitir la calibración de mallas de reflectores de láser tracker mediante fotogrametría, dadas las similares características de precisión de láser tracker y fotogrametría alcanzables a una determinada distancia del láser tracker. Para validar esta técnica de obtención de distancias patrón de grandes dimensiones con fotogrametría, que no podrían ser medidas en una máquina de medición por coordenadas, se comparan los resultados obtenidos en la medición del patrón en fotogrametría, con los generados en la

medición con la máquina de medición por coordenadas de las mismas distancias patrón. En el caso de la medición por fotogrametría del patrón, se coloca el patrón de fotogrametría así como las dianas necesarias en el espacio adyacente al patrón físico como se aprecia en la disposición del ensayo en la Figura 5.9.



Figura 5.8. Patrón físico con cuatro retrorrefletores y medición del patrón con máquina de medición por coordenadas



Figura 5.9. Patrones de fotogrametría y disposición en la malla de medición

Retrorreflector origen	SMR24	SMR25	SMR26
	24-25	25-26	26-27
Distancias	24-26	25-27	
	24-27		

Tabla 5.2. Definición de distancias nominales entre retrorreflectores en el patrón

Las Tabla 5.3 y Tabla 5.4 muestran los resultados de las mediciones del patrón obtenidas con ambos sistemas, máquina de medición por coordenadas y fotogrametría.

Retrorreflector origen	SMR24	SMR25	SMR26
	357.6578	590.0766	355.9700
Distancias (mm)	387.8870	386.8024	
	454.4279		

Tabla 5.3. Medición de distancias entre retrorreflectores patrón en máquina medición por coordenadas

Retrorreflector origen	SMR24	SMR25	SMR26
	357.6066	590.1060	355.9437
Distancias (mm)	388.0144	386.7815	
	454.4203		

Tabla 5.4. Medición de distancias entre retrorreflectores patrón por fotogrametría

El procedimiento de ensayo se inicia con una medición con el láser tracker de las tres esferas de referencia situadas en la placa superior de la plataforma multi-registro, procedimiento que permiten la generación de la matriz de transformación homogénea que relaciona el sistema de referencia del láser tracker con el sistema de referencia de la plataforma superior. A continuación se realiza el proceso de medición con el láser tracker montado sobre la plataforma de todos retrorreflectores colocados en la malla incluyendo el patrón físico. Para ello, comenzando por el retrorreflector 1 de la malla según se indica en la Tabla 5.1 y posición 1 de la plataforma, se realizan las mediciones con el láser tracker, repitiéndose este procedimiento para el resto de las posiciones de la plataforma (2-6) y capturándose los centros de cada uno de los 27 retrorreflectores.

En paralelo a las mediciones de los puntos con el tracker, se toman las lecturas de los sensores capacitivos montados en la plataforma para cada posición de la plataforma (1-6) y retrorreflector medido. Estas lecturas, tal y como se explica en el modelo de la plataforma incluido en el capítulo 3, permite obtener la matriz unitaria de transformación por punto capturado que se utiliza en el cambio de sistema de referencia de plataforma superior a plataforma inferior, pudiendo de este modo conjuntamente con la matriz de cambio de sistema referencia láser tracker a plataforma superior, expresar un punto medido por el láser tracker en sistema de referencia plataforma inferior.

Las mediciones de los retrorreflectores realizadas con el láser tracker, posibilitan calcular el centro de los mismos y su diámetro, valores que conjuntamente con las distancias euclídeas entre sus centros, serán considerados como parámetros en el procedimiento de verificación volumétrica del láser tracker. La disposición de los retrorreflectores en la malla según la medición realizada por el láser tracker y con coordenadas expresadas en sistema de referencia láser tracker para cada posición de la plataforma multi-registro se muestra en la Figura 5.10.

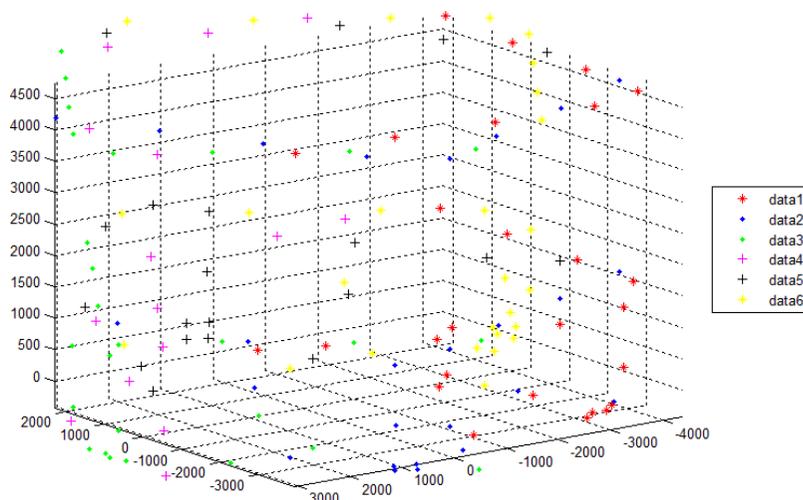


Figura 5.10. Disposición de retroreflectores en malla de medida, puntos expresados en sistema referencia láser tracker, posiciones plataforma 1-6.

La disposición de los retroreflectores en la malla según la medición realizada por el láser tracker, y expresadas las coordenadas de los centros de los retroreflectores en sistema de referencia plataforma inferior o sistema de referencia global, para cada una de las seis posiciones rotativas de la plataforma se muestran en la Figura 5.11. En este caso se puede apreciar que las coordenadas de los retroreflectores para cada una de las posiciones de la plataforma son muy similares y son estas coordenadas en sistema de referencia plataforma inferior las que se utilizarán para evaluación del error del láser tracker en el procedimiento de verificación con plataforma multi-registro que se detallará a continuación.

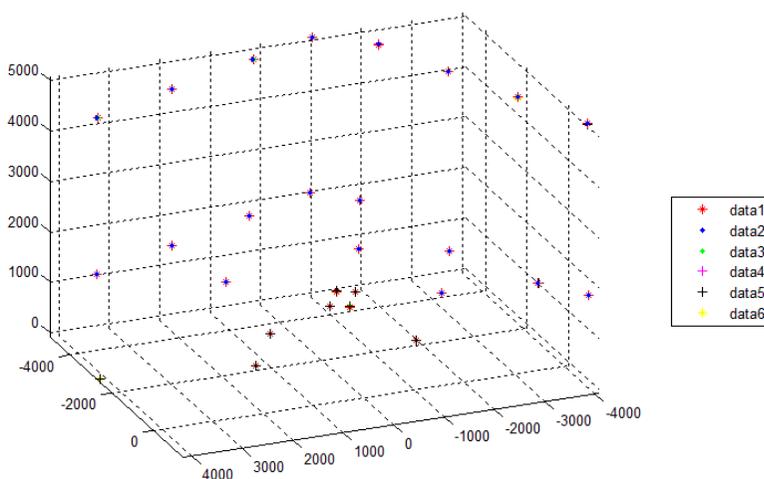


Figura 5.11. Disposición de retroreflectores en malla de medida, puntos expresados en sistema de referencia plataforma inferior, posiciones plataforma 1-6.

Una vez capturadas las posiciones de los retrorreflectores con el láser tracker, se realiza una evaluación de la precisión volumétrica del láser tracker en el volumen de trabajo definido.

Los estándares aplicables a láser tracker que permiten definir unos modelos de presentación y comparación de resultados en la evaluación de estos equipos, son la norma americana ASME B89.4.19 [5] de 2006, la recomendación técnica VDI/VDE 2617- parte 10 [6] de 2011 y el borrador del estándar internacional ISO/CD10360-10 [7]. Según se indica en estas normas, las pruebas de medida para la evaluación del error en longitud permiten evaluar la precisión volumétrica del equipo. Las distancias se materializan en instrumentos calibrados como barras de esferas, bloques patrón, nidos de retrorreflectores colocados en paredes o estructuras fijas o similares, y son medidas por el láser tracker. El error de medida en longitud se compara con el máximo error permitido por el instrumento MPE evaluando si está dentro de la especificación suministrada por el fabricante. Mediante esta prueba se pueden identificar diversas fuentes geométricas de error en el láser tracker como desalineamientos ópticos y mecánicos en la construcción del equipo.

Para cada una de las seis mallas generadas correspondientes a las seis posiciones rotativas de la plataforma (1-6), se midieron los 27 SMR dispuestos en la malla realizando 500 capturas por punto y registrando en paralelo las lecturas de los sensores capacitivos de la plataforma para cada retrorreflector y posición de la plataforma. El cálculo de los errores cometidos por el láser tracker en estudio en el procedimiento de verificación con plataforma multi-registro se realizó de los siguientes modos que se detallan a continuación:

○ *Evaluación de repetibilidad en distancia por posición del láser tracker con plataforma multi-registro*

En primer lugar, para cada posición de la plataforma y a partir de las coordenadas medidas para cada retrorreflector, se calcularon las distancias euclídeas entre los centros de los 27 retrorreflectores por posición de plataforma, dando lugar a la materialización en total de 351 distancias entre centros o líneas de medida por posición de la plataforma. Con ello se obtuvieron 351 errores en distancia por posición, comparando los valores en distancia obtenidos en cada posición de la plataforma (2-6) respecto a los obtenidos en la posición 1 y calculando como valores resultado el máximo error en distancia y el error medio en distancia. Los valores obtenidos permiten establecer conclusiones más allá de una repetibilidad convencional, que se obtendría midiendo varias veces la misma malla sin mover el equipo de láser tracker. En este caso la plataforma multi-registro rota y por lo tanto el láser tracker montado sobre ella, con lo cual el error debería ser superior al obtenido en la evaluación de repetibilidad convencional del equipo, si bien la plataforma actúa solo como un medio de giro repetible no influenciando el procedimiento ni el cálculo de error.

○ *Evaluación de la precisión volumétrica del láser tracker con plataforma multi-registro*

El enfoque utilizado en este apartado se basa en el cálculo de un error en distancia como desviación en distancia medida resultante entre dos retrorreflectores colocados sobre el patrón de referencia respecto a la longitud calibrada, considerando como longitud calibrada la medición de distancias entre retrorreflectores del patrón realizada en una máquina de medición por coordenadas, ver Tabla 5.3, o la medición llevada a cabo por fotogrametría, ver Tabla 5.4. La desviación en distancia se calcula según

se muestra en la ecuación (5-3) siendo L_i la longitud entre centros de los retrorreflectores del patrón medida por el láser tracker y L_{Cal} la longitud calibrada.

$$D_i = L_i - L_{Cal} \quad (5-3)$$

En el caso en estudio, se calcularán seis distancias entre centros de los cuatro retrorreflectores que configuran el patrón según se indica en la Tabla 5.2. Como resultado final de esta evaluación se obtendrán tres parámetros. En primer lugar deberá indicarse la máxima desviación obtenida para todas las posiciones $\text{Max } D_i (L_i - L_{Cal})$, el rango de estas desviaciones y una desviación media 2RMS, calculado como dos veces el valor cuadrático medio de las desviaciones para todas las posiciones consideradas, ver ecuación (5-4). Estos errores fueron utilizados para evaluar la precisión volumétrica del láser tracker en su volumen de trabajo

$$2RMS = 2 \sqrt{\frac{\sum D_i^2}{n}} \quad n=36 \quad (5-4)$$

○ *Evaluación de error de punto del láser tracker con plataforma multi-registro*

En la evaluación del error de punto se calcula la distancia euclídea entre las coordenadas de un mismo retrorreflector obtenidas en su medición en dos posiciones diferentes de la plataforma tomando como referencia la posición 1. Las coordenadas de un punto medido por el láser tracker en distintas posiciones de la plataforma expresadas en sistema de referencia plataforma inferior deberían ser las mismas, ya que la plataforma no debe generar ninguna variación en el resultado obtenido. Se obtienen como valores resultado el error máximo y el error medio de punto.

5.3.1 Resultados del procedimiento de verificación de láser tracker con plataforma multi-registro.

Se incluyen a continuación las siguientes gráficas Figura 5.12, Figura 5.13, Figura 5.14, Figura 5.15 y Figura 5.16 donde puede verse una representación de los vectores de error correspondientes a las coordenadas de los 27 retrorreflectores expresados en sistema de referencia plataforma inferior para las diferentes mallas medidas, tomando como referencia la malla 1. La malla 1 corresponderá a las mediciones realizadas por el láser tracker en la posición 1 de la plataforma y así sucesivamente para el resto de posiciones. En todos los casos se aprecia una tendencia aleatoria de los valores de error para cada pareja de coordenadas por retrorreflector medido en ambas mallas seleccionadas.

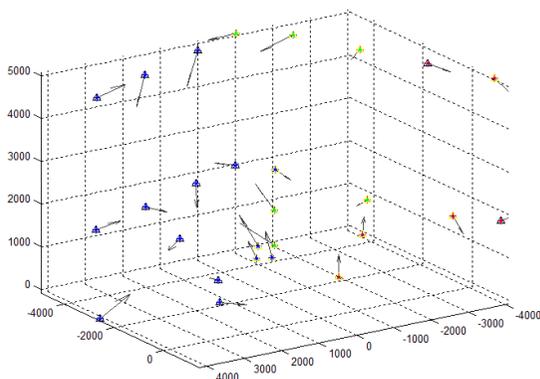


Figura 5.12. Representación vectorial de errores en coordenadas de retrorreflectores en malla 1 y malla 2
(factor amplificación 50)

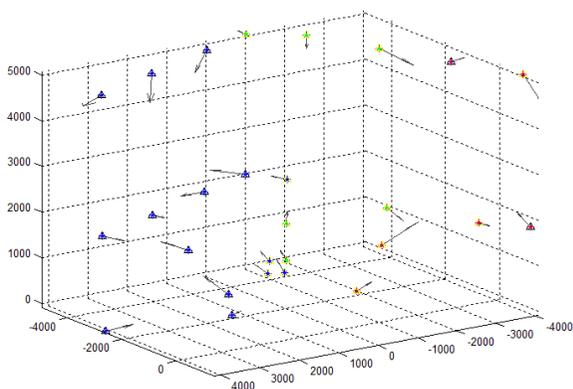


Figura 5.13. Representación vectorial de errores en coordenadas de retrorreflectores en malla 1 y malla 3
(factor amplificación 50)

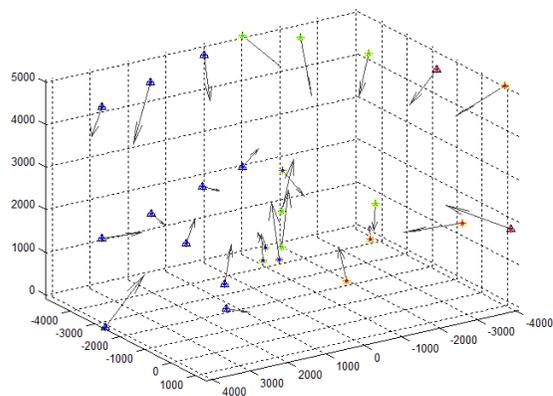


Figura 5.14. Representación vectorial de errores en coordenadas de retroreflectores en malla 1 y malla 4
(factor amplificación 50)

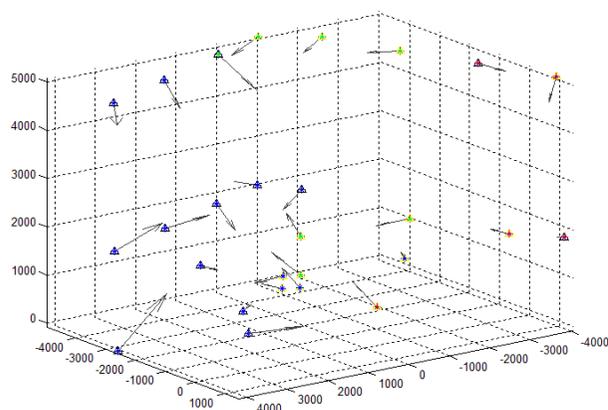


Figura 5.15. Representación vectorial de errores en coordenadas de retroreflectores en malla 1 y malla 5
(factor amplificación 50)

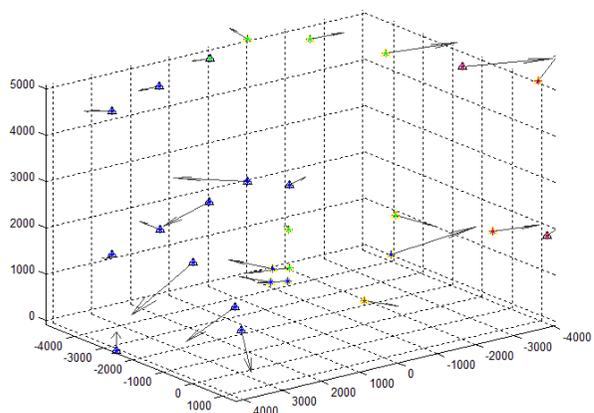


Figura 5.16. Representación vectorial de errores en coordenadas de retroreflectores en malla 1 y malla 6
(factor amplificación 50)

- *Resultados de evaluación de repetibilidad en distancia por posición del láser tracker con plataforma multi-registro*

Los parámetros resultado de los ensayos realizados que permite evaluar la repetibilidad del láser tracker basándonos en el cálculo del error en distancia obtenido al comparar las 351 distancias generadas por posición entre diversas posiciones de la plataforma, son el error medio y máximo en distancia que obtienen valores de 0.0410 mm y 0.1651 mm respectivamente tal y como se incluye en la Tabla 5.5.

Láser tracker y plataforma multi-registro	
Error medio de repetibilidad en distancia por posición (mm)	0.0410
Error máximo de repetibilidad en distancia por posición (mm)	0.1651

Tabla 5.5. Error en distancia, verificación láser tracker con plataforma multi-registro

Los 351 errores en distancias entre retrorreflectores, derivados de comparar las distancias medidas en posición 1 de la plataforma multi-registro con los valores de distancia obtenidos en el resto de posiciones (2-6) se muestran en la siguiente gráfica Figura 5.17. De este modo se generan cinco series de datos de error para cada una de las mediciones realizadas por el LT en cada una de las posiciones de la plataforma (2-6) y se toma como referencia las distancias calculadas en la posición 1 (malla 1). Adicionalmente se incluyen los errores medios en distancia por malla de puntos comparada para las posiciones 1-6 de la plataforma en la Figura 5.18.

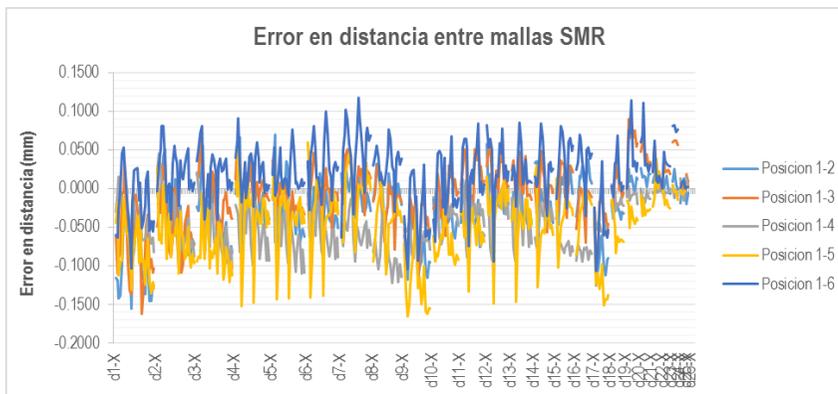


Figura 5.17. Errores en distancia entre mallas de puntos comparadas (posiciones plataforma 1-6)

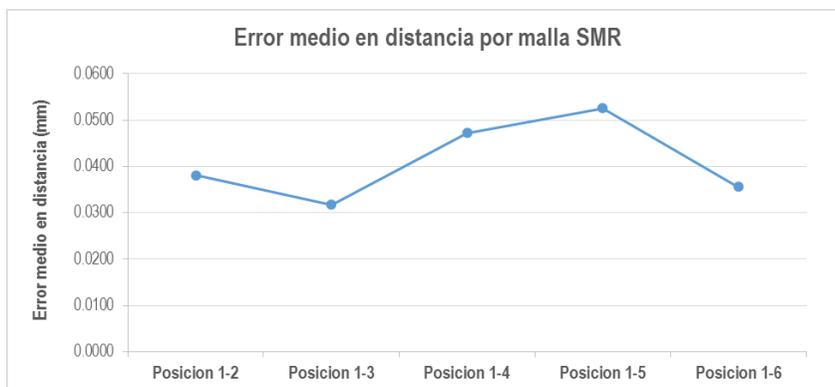


Figura 5.18. Error medio en distancia por malla de puntos comparada (posiciones plataforma 1-6)

○ *Resultados de evaluación de la precisión volumétrica del láser tracker con plataforma multi-registro*

En el ensayo de evaluación de la precisión volumétrica del láser tracker con la plataforma multi-registro que se explica en este apartado, se calcula la distancia centro a centro entre retrorreflectores medidos en el objeto patrón, ver Figura 5.8 y se obtiene el error en distancia como la diferencia de la longitud medida y la longitud nominal calibrada. Los parámetros resultado del ensayo son la desviación máxima en distancia, el rango de desviaciones en distancia y dos veces el error cuadrático medio 2RMS y se muestran en la Tabla 5.6. Estos valores se obtienen tomando como valores calibrados las mediciones realizadas con la máquina de medir por coordenadas y las mediciones llevadas a cabo por fotogrametría del patrón.

En el caso del cálculo considerando como valores nominales las distancias entre centros de los retrorreflectores medidos en la máquina de medición por coordenadas, el error medio en distancia es 0.0650 mm. El error máximo en distancia, el rango en distancia y el valor de 2RMS son 0.1768 mm, 0.1595 mm y 0.1768 mm respectivamente.

Atendiendo a las mediciones de las distancias patrón realizadas por fotogrametría, el error medio en distancia es 0.0548 mm. El error máximo en distancia, el rango en distancia y el valor de 2RMS son 0.1078 mm, 0.0830 mm y 0.1164 mm respectivamente. Los valores de error medio obtenidos con ambos sistemas de medición son similares, si bien el resto de los valores resultado, error máximo, rango y 2RMS son superiores en el caso de la medición realizada con la máquina de medición por coordenadas. De este modo se podrían considerar estos datos como un primer paso para la validación de la fotogrametría como técnica para la obtención de distancias patrón, siendo necesario un análisis exhaustivo de la influencia de la tolerancia de materialización del centro de la esfera en el caso de los reflectores de fotogrametría para concluir si es posible considerarlo como un procedimiento de medida válido para la calibración de este tipo de patrones.

	Medición MMC	Medición Fotogrametría
Error en distancia medio (mm)	0.0650	0.0548
Error en distancia máximo (mm)	0.1768	0.1078
Rango error en distancia (mm)	0.1595	0.0830
2RMS (mm)	0.1750	0.1164

Tabla 5.6. Resultados de la prueba de evaluación de precisión volumétrica, verificación láser tracker con plataforma multi-registro frente a valor nominal calibrado

Los errores en distancia definidos según Tabla 5.2 que se obtienen para cada posición de la plataforma como diferencia entre las distancias patrón medidas por el láser tracker y las distancias nominales del patrón medidas en la máquina de medición por coordenadas según Tabla 5.3, se muestran en la Figura 5.19.

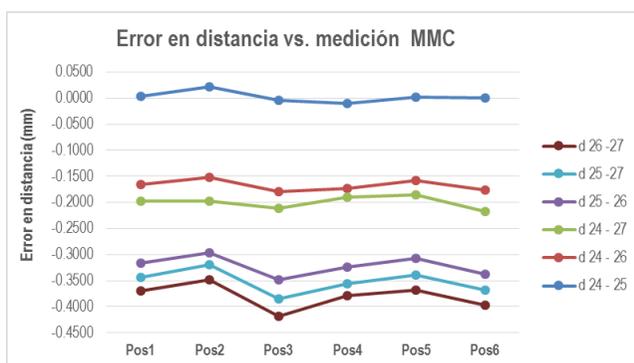


Figura 5.19. Error en distancia frente a valor nominal en MMC por posición de plataforma

Los errores en distancia generados tomando como distancia nominal calibrada los valores de medición del patrón por fotogrametría, se muestran en la Figura 5.20. Los valores más altos de error se obtienen siempre para las distancias entre retroreflectores 26 y 27 según disposición en Figura 5.4.

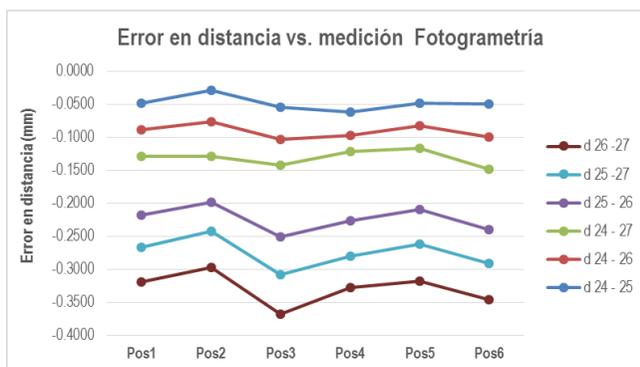


Figura 5.20. Error en distancia frente a valor nominal fotogrametría por posición de plataforma

○ *Resultados de evaluación de error de punto del láser tracker con plataforma multi-registro*

Los resultados obtenidos en la evaluación del error de punto cometido por el láser tracker en la verificación con la plataforma multi-registro se incluyen en la Tabla 5.7 y son los siguientes:

Láser tracker y plataforma multi-registro	
Error de punto medio (mm)	0.0439
Error de punto máximo (mm)	0.1296

Tabla 5.7. Error de punto, verificación láser tracker con plataforma multi-registro

Los valores de error medio y máximo calculados en este caso son 0.0439 mm y 0.1296 mm, similares a los obtenidos en la evaluación del error en distancia 0.0410 mm y 0.1651 mm respectivamente.

En la Figura 5.21 se muestra el error medio de punto por malla de retrorreflectores correspondiente a las mediciones realizadas para las diversas posiciones de la plataforma (1-6) tomando como referencia las coordenadas de los retrorreflectores medidas en la posición 1 de la plataforma.

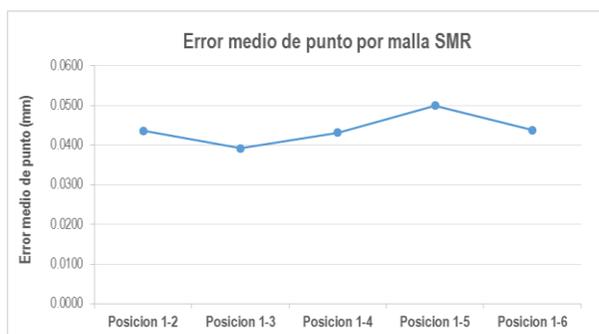


Figura 5.21. Error medio de punto por malla de retrorreflector

La siguiente gráfica Figura 5.22 muestra el error medio de punto por retrorreflector (1-27) entre las diversas mediciones realizadas correspondientes a las seis posiciones de la plataforma.

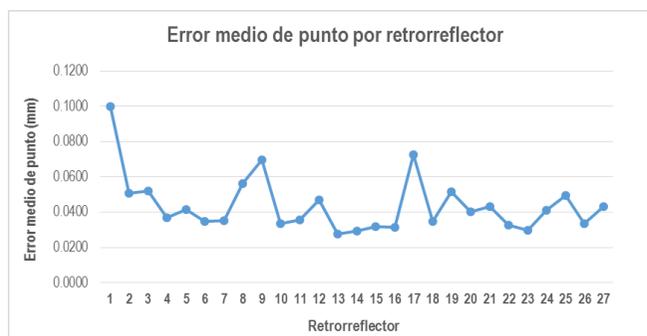


Figura 5.22. Error medio de punto por retrorreflector

5.4 Procedimiento de verificación de láser tracker con plataforma multi-registro mediante distancias virtuales

Se presenta en este capítulo un nuevo procedimiento de verificación para instrumentos portátiles de medición mediante la generación y evaluación de distancias virtuales que posibilita la definición de un número ilimitado de distancias patrón sin necesidad de materialización de las mismas en un patrón físico. En este caso se va a proceder a la aplicación de este nuevo procedimiento de verificación a un equipo de láser tracker modelo API T3-15m montado sobre una plataforma multi-registro. La técnica es especialmente de utilidad en verificación de láser trackers, donde las distancias a medir y materializar en un elemento patrón son grandes, aportando gran versatilidad en la generación de un número ilimitado de distancias independientemente de su dimensión. Para ello, se parte del procedimiento de verificación de láser tracker con plataforma multi-registro explicado en el apartado 5.3, donde se utiliza una malla de grandes dimensiones con 27 retrorreflectores distribuidos en diferentes posiciones tal cual se indica en la Figura 5.4 y en la Tabla 5.1.

El concepto de generación de mallas virtuales está intrínsecamente unido al concepto de utilización de la plataforma multi-registro como medio auxiliar en calibración y verificación de instrumentos portátiles de medición. Sus seis posiciones rotativas (1-6), dispuestas a 60°, permiten en un procedimiento de medición con el láser tracker montado sobre la plataforma, la captura de seis mallas de puntos correspondientes a las coordenadas de los centros medidas para los 27 retrorreflectores que definen la malla de medición. Estas mallas de puntos configuran lo que a continuación se denominarán *puntos medidos* y las distancias euclídeas calculadas entre sus centros se designarán como *distancias medidas*, utilizándose como parámetro en la verificación volumétrica del equipo.

En paralelo a las mediciones de los puntos con el láser tracker, se toman las lecturas de los sensores capacitivos montados en la plataforma para cada posición de la plataforma (1-6) y retrorreflector medido. Estas lecturas, tal y como se explica en el modelo de la plataforma incluido en el capítulo 3, permiten obtener la matriz unitaria de transformación por punto capturado, que se utiliza en el cambio de sistema de referencia de plataforma superior a plataforma inferior, pudiendo de este modo conjuntamente con la matriz de cambio de sistema referencia láser tracker a plataforma superior, expresar un punto medido por el láser tracker en sistema de referencia plataforma inferior.

Una vez obtenidos los puntos y las distancias medidas, se procede a la generación de los *puntos virtuales* que configuran las *mallas virtuales* correspondientes a cada posición de la plataforma. A partir de una malla medida para una posición de la plataforma, tómesese como referencia la malla correspondiente a la medición realizada para la primera posición de la plataforma, *malla 1 medida*, es posible generar, pasando por el modelo matemático de la plataforma, un conjunto de puntos virtuales que determinarán la malla virtual correspondiente a la posición 1 de la plataforma multi-registro, *malla virtual 1*. El procedimiento se repite sucesivamente para las seis posiciones de la plataforma (1-6) dando lugar en este caso a la generación de seis mallas virtuales, tal cual se muestra en la Figura 5.23. Es la plataforma multi-registro con su sistema de referencia global asociado la que permanece fija, girando los puntos virtuales alrededor de la misma y del equipo de láser tracker montado sobre ella. En este análisis se tomará el sistema de referencia láser tracker 1 como referencia, asociado a la posición 1 de la plataforma, haciendo que cualquier punto medido en SR LT1 tendrá las mismas coordenadas de su homólogo virtual expresado igualmente en SR LT1.

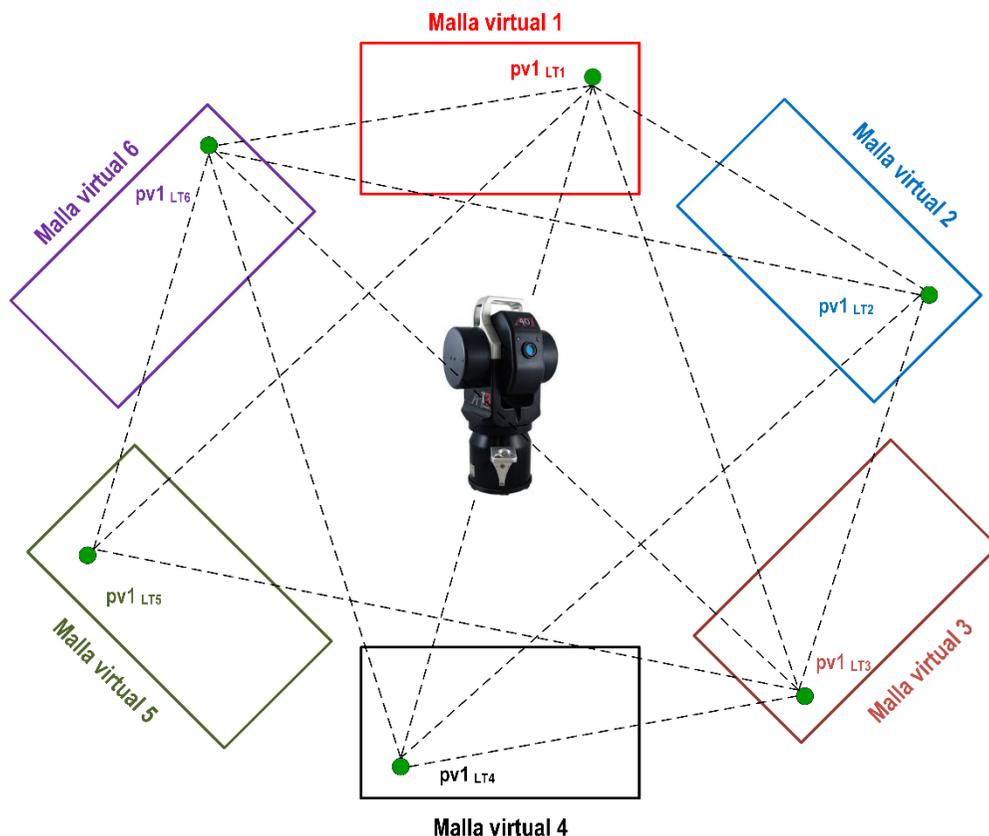


Figura 5.23. Generación de mallas de medición virtuales 1 - 6

El procedimiento empleado en la generación de un *punto virtual* se explica a continuación:

1. Dado un punto en la malla denominado como *punto 1* cuyas coordenadas son medidas por el láser tracker montado en la plataforma y con la plataforma colocada en posición 1, ver Figura 5.24 el sistema de referencia asociado en el cual se expresarán las coordenadas de ese centro del punto capturado es el sistema de referencia láser tracker 1, SR LT1.
2. Se realiza un giro de la plataforma de 60° hasta la posición 2 de la misma con el láser tracker girando solidario con la plataforma. Las coordenadas de cualquier medición realizada ahora por el láser tracker se expresarán en sistema de referencia láser tracker 2, SR LT2.
3. Se mide desde esta nueva posición 2 de la plataforma el *punto 1* de nuevo expresando las coordenadas del mismo en sistema de referencia láser tracker 2, SR LT2.
4. Ésta medición sería equivalente a medir un punto virtual, denominado *punto 1'* desde la posición 1 de la plataforma con sus coordenadas medidas expresadas en sistema de referencia láser tracker 1, SR LT1. Ese punto virtual estaría afectado de la rotación equivalente al movimiento de la plataforma pasando de la posición 1 a la posición 2.

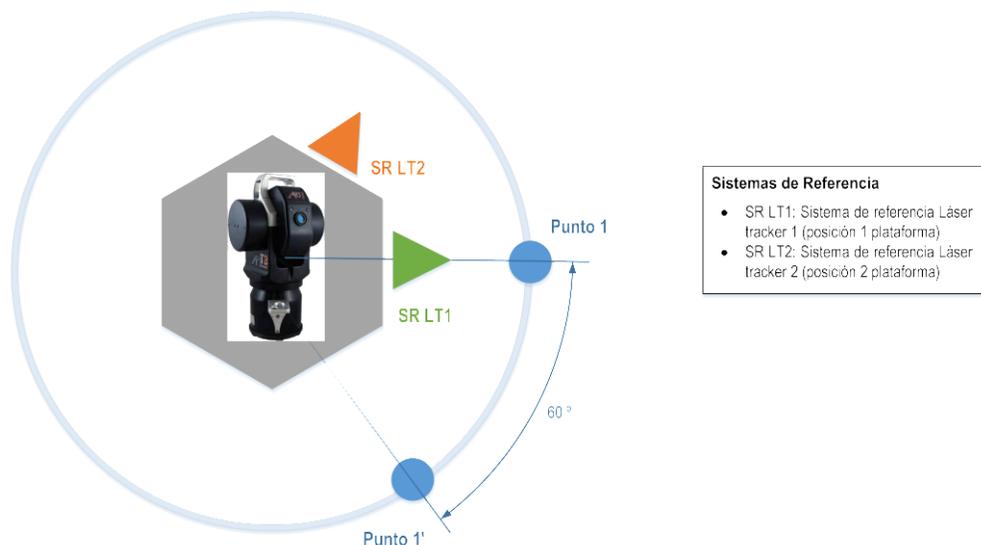


Figura 5.24. Explicación del concepto de distancia virtual con plataforma multi-registro aplicado a equipo de láser tracker

El procedimiento permite conociendo el giro de la plataforma de una posición a otra con gran precisión, aplicar este giro a los puntos medidos por el conjunto láser tracker y plataforma, para que a partir de un conjunto de puntos con coordenadas conocidas y medidas por el equipo, generar un conjunto de puntos virtuales.

De este modo, tomando como referencia un punto medido en la posición 1 de la plataforma donde coinciden punto medido y punto virtual en lo que denominaremos malla virtual 1, y expresado en sistema de referencia láser tracker 1, es posible generar un punto virtual en una malla virtual 2, pasando por el modelo matemático de la plataforma y teniendo en cuenta las componentes de rotación y traslación de la matriz de transformación que permite pasar de la posición 1 a la posición 2 de la plataforma, pero asumiendo que las coordenadas del punto virtual estarán expresadas en sistema de referencia láser tracker 1, ver ecuación (5-5).

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}_{SR_{LT2}} = {}^{SR_{LT2}}T_{{}^{SR_{LT1}}} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}_{SR_{LT1}} \tag{5-5}$$

La matriz T es una matriz de transformación homogénea que permite un cambio de coordenadas entre los sistemas de referencia láser tracker 1, SR LT1 correspondiente en este caso al punto virtual o medido en la malla virtual 1 y el sistema de referencia laser tracker 2, SR LT2 en el cual se creará el punto virtual en la malla virtual 2 correspondiente afectado por el giro cuantificado de la plataforma. La diferencia en este caso es que se asume que las coordenadas del punto virtual generado en la malla virtual 2 están expresadas en sistema de referencia láser tracker 1, es decir como si el láser tracker estuviera realizando la medición desde la posición 1 de la plataforma.

La matriz T de transformación homogénea se desarrolla del siguiente modo, ver Figura 5.25:

$${}^{SR_{LT2}}T_{SR_{LT1}} = ({}^{SR_{PlatSup}}M_{SR_{LT2}})^{-1} ({}^{SR_{Global}}M_{i,j}{}^{SR_{PlatSup}})^{-1} {}^{SR_{Global}}M_{i,j}{}^{SR_{PlatSup}} {}^{SR_{PlatSup}}M_{SR_{LT1}}$$

Siendo:

- ${}^{SR_{PlatSup}}M_{SR_{LT2}}$: matriz de cambio de coordenadas de sistema de referencia láser tracker 2 al sistema de referencia plataforma superior.
- ${}^{SR_{PlatSup}}M_{SR_{LT1}}$: matriz de cambio de coordenadas de sistema de referencia láser tracker 1 al sistema de referencia plataforma superior.
- ${}^{SR_{Global}}M_{i,j}{}^{SR_{PlatSup}}$: matriz de cambio de coordenadas de sistema de referencia plataforma superior a plataforma inferior o sistema de referencia global. Esta matriz es unitaria para cada captura de punto realizada ya que se obtiene a partir de las lecturas unitarias de los sensores capacitivos integrados en la plataforma.

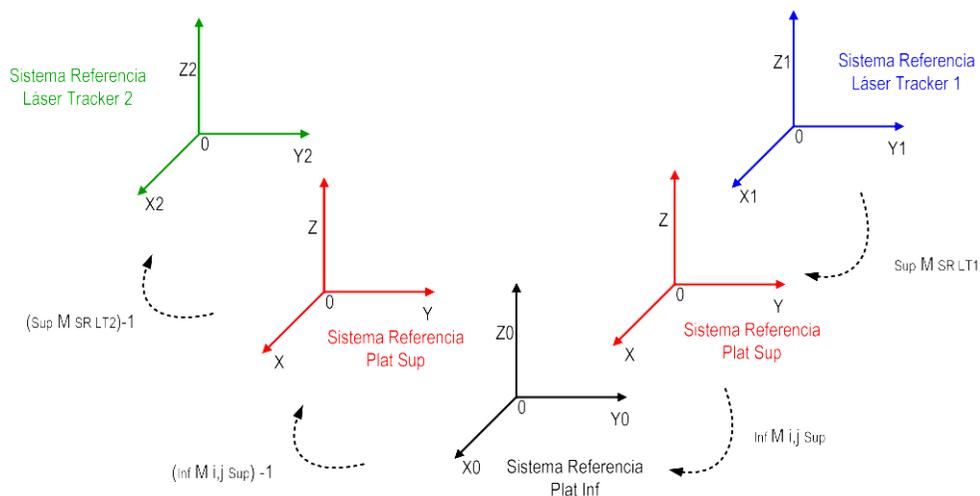


Figura 5.25. Cambio de sistemas de coordenadas para la obtención de un punto virtual

Mediante este procedimiento es posible generar un número determinado de *puntos virtuales* agrupados en seis *mallas virtuales*, una por cada una de las posiciones de la plataforma, ver Figura 5.23, y un número ilimitado de *distancias virtuales* calculadas como distancia euclídea entre centros de dos puntos virtuales cualesquiera posicionados en una misma malla virtual o en diferentes mallas virtuales.

Tomando como referencia la posición 1 de la plataforma, sistema de referencia láser tracker 1, una representación gráfica de los conceptos de distancia medida y distancia virtual se muestra en la Figura 5.26, donde la *distancia medida* se define como distancia euclídea entre los centros del punto 1 medido desde la posición 2 de la plataforma pero asumiendo sus coordenadas expresadas en sistema de referencia láser tracker 1, SR LT1 y sus coordenadas capturadas desde la posición 1 de la plataforma y expresadas en sistema de referencia láser tracker 1, SR LT1. La *distancia virtual* se define a su vez

como distancia euclídea entre los centros del punto virtual 1 generado en la malla virtual 2 y expresado en SR LT1 y el punto 1 medido o virtual expresado en sistema de referencia láser tracker 1, SR LT1. La desviación en distancia se calcula según se muestra en la ecuación (5-6) como diferencia entre $L_{Virtual}$ y L_{Medida} , siendo $L_{Virtual}$ la longitud o distancia virtual entre centros de los puntos virtuales y L_{Medida} la longitud o distancia medida entre los correspondientes puntos medidos.

$$D_i = L_{Virtual} - L_{Medida} \quad (5-6)$$

Son los errores del láser tracker, más el error introducido por la plataforma multi-registro que se considera mínimo o despreciable frente al error del láser tracker, los que dan lugar a la desviación entre las coordenadas del punto 1 virtual en la malla 2 virtual y el punto 1 medido desde la posición 2 de la plataforma, ambos expresados en sistema de referencia láser tracker 1. Esta desviación de coordenadas de los dos puntos, da lugar a su vez a la consiguiente desviación entre la distancia virtual $L_{Virtual}$ y la distancia medida L_{Medida} .

Como resultado final de esta evaluación se obtendrán tres parámetros. En primer lugar deberá indicarse la máxima desviación D_i obtenida para todas las posiciones, el rango de estas desviaciones y una desviación media en distancia. Estos errores fueron utilizados para evaluar la precisión volumétrica del láser tracker en su volumen de trabajo.

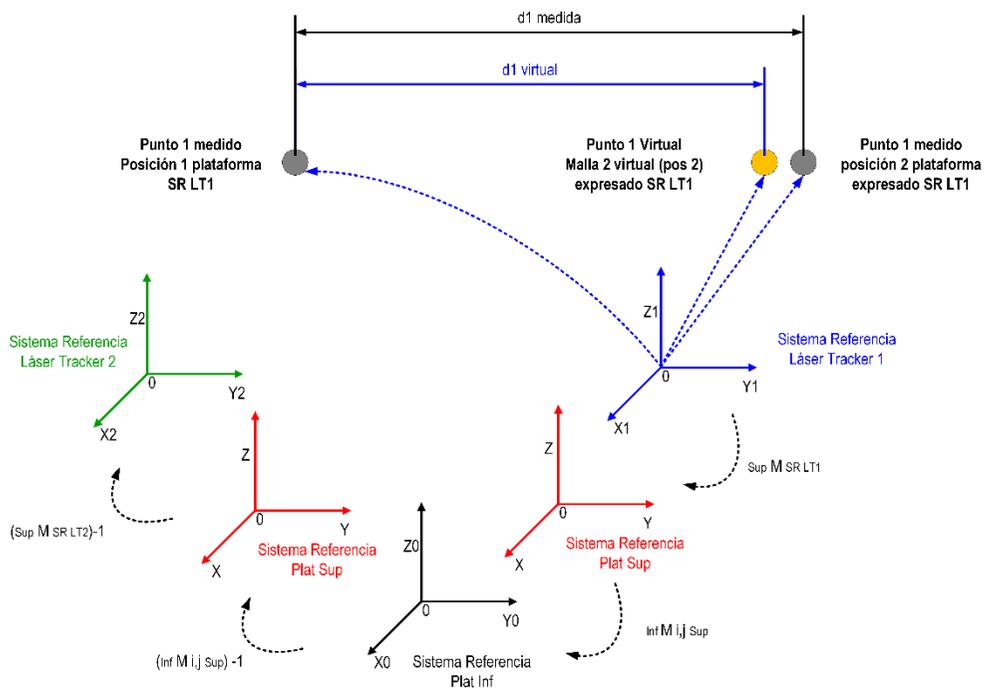


Figura 5.26. Representación del concepto de distancia medida y distancia virtual

Para proceder a la validación del procedimiento de verificación del láser tracker y la plataforma multi-registro descrito mediante distancias virtuales, se plantearon varias alternativas de evaluación en función de las distancias virtuales definidas y seleccionadas, permitiéndose en todos los casos cuantificar la precisión volumétrica del láser tracker. Las alternativas analizadas se exponen a continuación considerándose en todas ellas el sistema de referencia láser tracker 1 como referencia, asociado a la posición 1 de la plataforma, hecho que lleva a la asunción de que cualquier punto medido en SR LT1 tendrá las mismas coordenadas de su homólogo virtual expresado igualmente en SR LT1.

- *Método evaluación 1: evaluación mediante distancias virtuales entre puntos virtuales en malla 1 y sus homólogos virtuales en mallas 2-6.*

En este caso se realiza una definición de distancias virtuales basada en el cálculo de distancias entre las coordenadas de los centros de los retrorreflectores 1-27 en la malla virtual 1 y sus coordenadas en el resto de las diferentes mallas virtuales generadas, malla virtual 2 a 6. De este modo se calculan 135 distancias virtuales cuya representación geométrica puede verse en la siguiente Figura 5.27 tomando como ejemplo los seis puntos 1 virtuales $pv_{1LT1} - pv_{1LT6}$ generados en las seis mallas virtuales correspondientes.

La distancia euclídea entre parejas de puntos virtuales situados en la malla virtual 1 como referencia y el resto de las mallas virtuales generadas para cada posición i de la plataforma viene expresada según la ecuación (5-7) donde:

$$D_{i,j} = \sqrt{(X_{i,j} - X_{1,j})^2 + (Y_{i,j} - Y_{1,j})^2 + (Z_{i,j} - Z_{1,j})^2} \quad i = 2, \dots, 6; j = 1, \dots, 27 \quad (5-7)$$

$D_{i,j}$ representa la distancia euclídea entre el punto virtual j en cada una de las i posiciones de la plataforma o mallas virtuales y el punto virtual j en la posición 1 de la plataforma expresado en sistema de referencia láser tracker 1 correspondiente a la malla virtual 1.

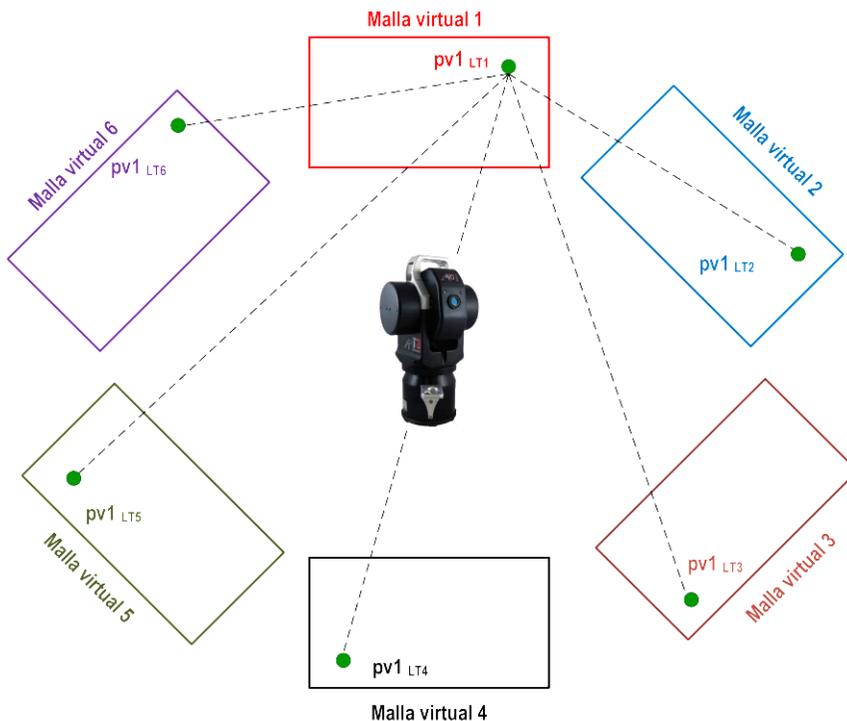


Figura 5.27. Método evaluación 1: distancia virtual entre punto virtual en malla 1 y sus puntos virtuales homólogos en mallas virtuales 2-6

○ Método evaluación 2: hexágono virtual, evaluación mediante distancias virtuales entre puntos virtuales en mallas consecutivas.

La definición de las distancias virtuales a evaluar en el método 2 consiste en la definición de distancias virtuales entre los centros de un mismo retroreflector en mallas virtuales consecutivas, creando de este modo hexágonos a diferentes alturas según la altura de posicionamiento de los 27 puntos virtuales generados por malla virtual. De este modo se calculan 135 distancias virtuales cuya representación geométrica puede verse en la siguiente Figura 5.28 tomando como ejemplo los seis puntos 1 virtuales $pv1_{LT1} - pv1_{LT6}$ generados en las seis mallas virtuales correspondientes.

La distancia euclídea entre parejas de puntos virtuales situados en una malla virtual i y en su consecutiva viene expresada según la ecuación (5-8) donde:

$$D_{i,j} = \sqrt{(X_{i+1,j} - X_{i,j})^2 + (Y_{i+1,j} - Y_{i,j})^2 + (Z_{i+1,j} - Z_{i,j})^2} \quad i = 1, \dots, 6; j = 1, \dots, 27 \quad (5-8)$$

$D_{i,j}$ representa la distancia euclídea entre el punto virtual j en cada una de las i posiciones de la plataforma o mallas virtuales y el punto virtual j en la posición consecutiva de la plataforma, $i+1$.

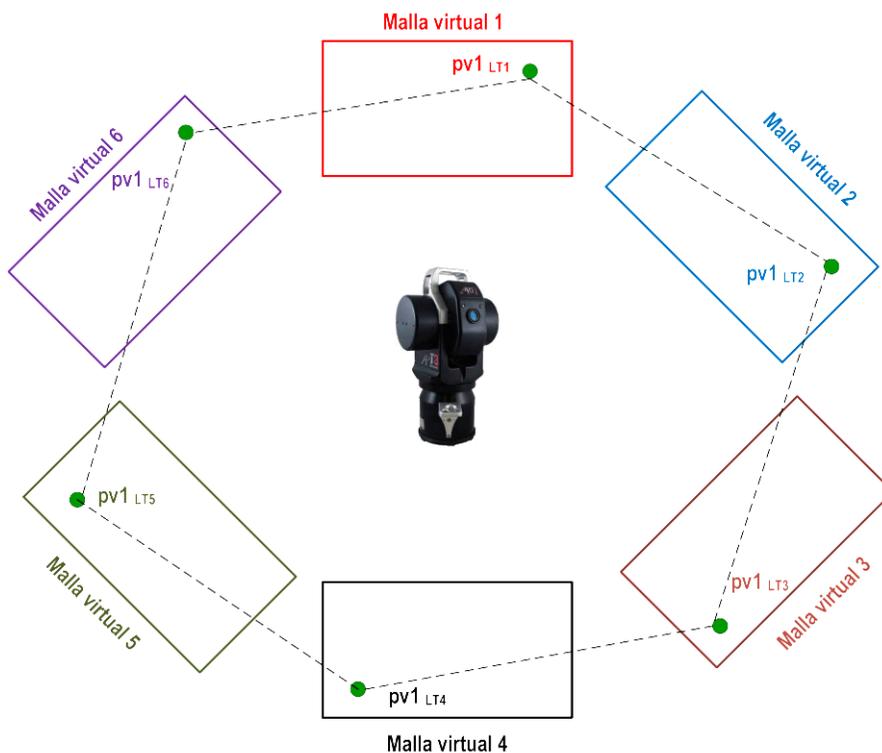


Figura 5.28. Método evaluación 2: distancia virtual entre punto virtual en malla 1 y sus homólogos en mallas virtuales consecutivas

En la siguiente Figura 5.29 se aprecia la configuración del hexágono virtual formado a partir de las distancias euclídeas calculadas entre los centros de retrorreflectores homólogos situados en mallas consecutivas. Se toman a modo de ejemplo los hexágonos virtuales que se formarían para cuatro retrorreflectores colocados en alturas de 6 m, 2 m, 1 m y en el suelo. Esta forma de evaluación permite establecer una comparativa entre el error cometido por el equipo a diferentes alturas, y por tanto a diferentes ángulos del eje de elevación del láser tracker, además del error de azimut que es el que más influye en este caso, ya que el equipo de láser tracker gira solidariamente con la plataforma multi-registro en las diferentes posiciones de evaluación (1-6).

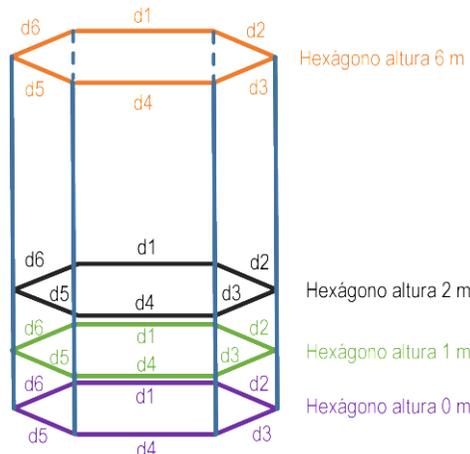


Figura 5.29. Generación de hexágono virtual a partir de las distancias entre retroreflectores homólogos en mallas virtuales consecutivas (alturas 0/1/2/6m)

- Método evaluación 3: evaluación mediante distancias virtuales cruzadas entre malla 1 y mallas 2-6

En el siguiente método de evaluación presentado en este trabajo se generan distancias virtuales cruzadas, entre grupos de puntos virtuales asociados a una malla virtual con grupos de puntos virtuales asociados a otra malla virtual, aplicando este conceptos para las seis mallas virtuales definidas. Bajo esta premisa, se permite la evaluación de 25 distancias cruzadas que se muestran graficamente en la Figura 5.30 y en la Tabla 5.8.

La distancia euclídea entre parejas de puntos virtuales situados en la malla virtual 1 como referencia y el resto de las mallas virtuales generadas para cada posición i de la plataforma viene expresada según la ecuación (5-9) donde:

$$D_{i,j} = \sqrt{(X_{i,j+1} - X_{1,j})^2 + (Y_{i,j+1} - Y_{1,j})^2 + (Z_{i,j+1} - Z_{1,j})^2} \quad i = 2, \dots, 6; j = 1, \dots, 5 \quad (5-9)$$

D_{ij} representa la distancia euclídea entre el punto virtual $j+1$ en cada una de las i posiciones de la plataforma o mallas virtuales y el punto virtual j en la posición 1 de la plataforma expresado en sistema de referencia láser tracker 1 correspondiente a la malla virtual 1.

Distancia	Punto Virtual Malla 1	Punto Virtual Mallas 2-6
1	1	2
2	2	3
3	3	4
4	4	5
5	5	6

Tabla 5.8. Definición de distancias virtuales cruzadas desde malla virtual 1 a mallas virtuales 2-6.

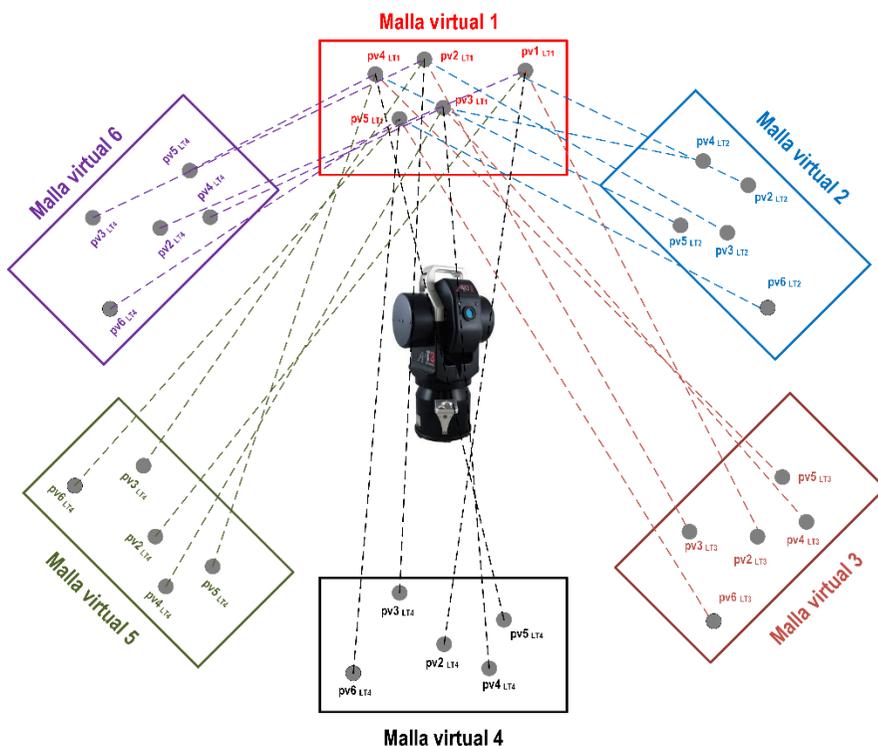


Figura 5.30. Método evaluación 3: distancias virtuales cruzadas entre malla virtual 1 y mallas virtuales 2-6

- Método evaluación 4: evaluación mediante distancias horizontales, verticales y diagonales por malla 1-6.

Adicionalmente se considera necesario la evaluación de distancias virtuales por malla teniendo en cuenta únicamente los puntos virtuales situados en el volumen de la malla a analizar. Para ello se definen un conjunto de nueve distancias virtuales clasificadas en función de su posición en la malla, horizontal, vertical o diagonal que se muestran en la Tabla 5.9 a continuación y gráficamente en la Figura 5.31 para la malla 1 virtual a modo de ejemplo. La misma selección de distancias virtuales se realiza para el resto de las mallas virtuales 2 a 6 mostrándose una representación conjunta de toda la definición de distancias para las diferentes mallas en la Figura 5.32.

Distancia	Punto Virtual A	Punto Virtual B	Posición	Altura
1	1	3	Horizontal	6m
2	13	14	Horizontal	2m
3	20	22	Horizontal	suelo
4	1	17	Vertical	6m
5	9	17	Vertical	2m
6	7	15	Vertical	4m
7	1	22	Cruzada	6m-suelo
8	4	22	Cruzada	6m-suelo
9	8	18	Cruzada	suelo-6m

Tabla 5.9. Definición de distancias virtuales por malla (1-6)

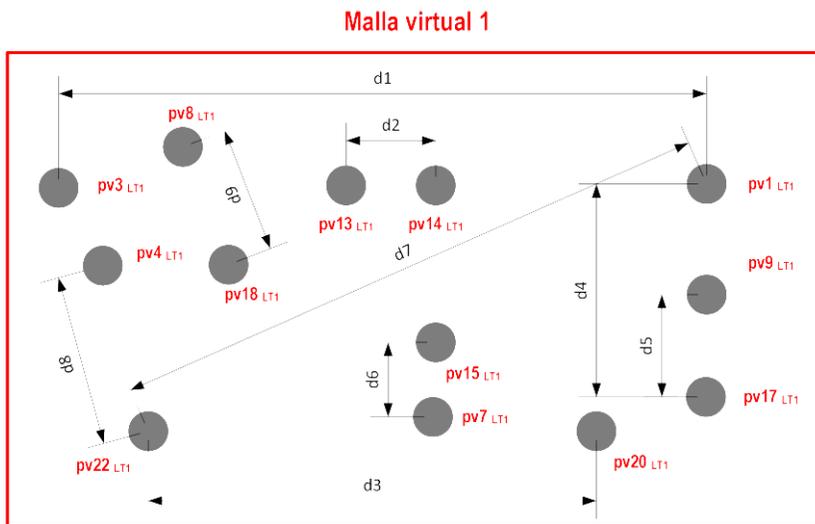


Figura 5.31. Método evaluación 4: distancias virtuales verticales, horizontales y diagonales en malla virtual 1

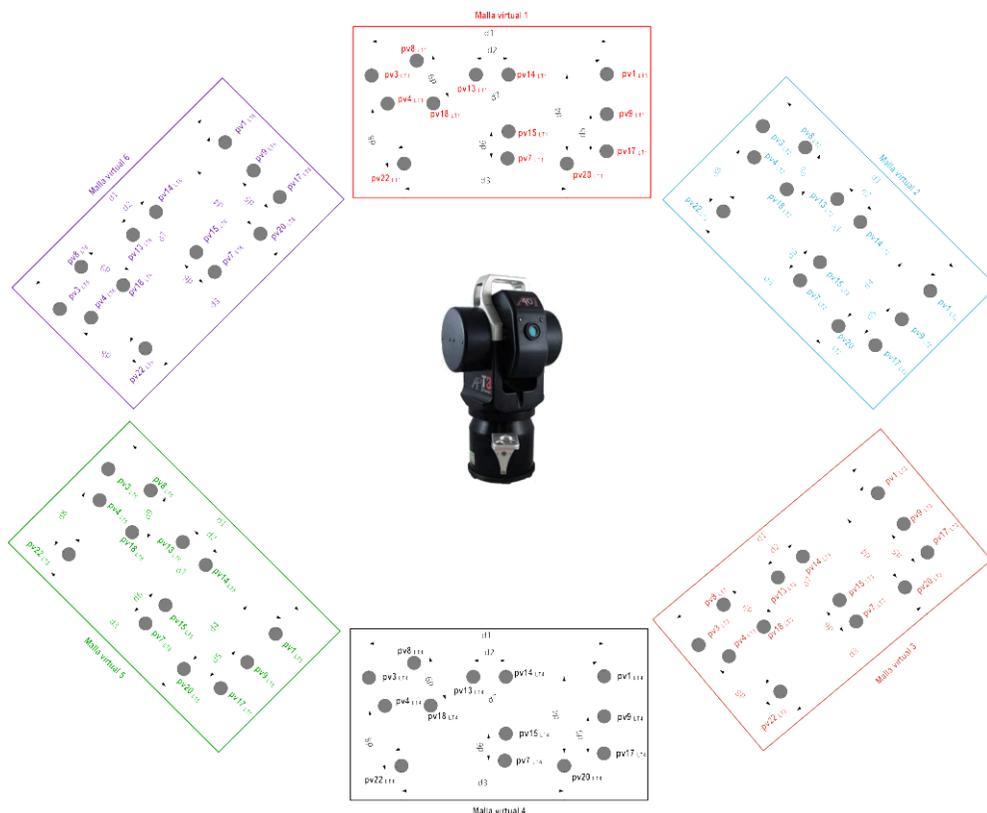


Figura 5.32. Método evaluación 4: distancias virtuales verticales, horizontales y diagonales por malla virtual

La selección, disposición (horizontal, vertical y diagonal) y distribución de las distancias a evaluar en las mallas virtuales se ha realizado teniendo en consideración los estándares de aplicación para evaluación de equipos de láser tracker que son la norma americana ASME B89.4.19 [5] de 2006, la recomendación técnica VDI/VDE 2617- parte 10 [6] de 2011 y el borrador del estándar internacional aplicable a laser trackers ISO/CD10360-10 [7].

En las pruebas de evaluación del error de medición de longitud que caracterizan la precisión volumétrica del láser tracker en el volumen de trabajo, se materializan las distancias en instrumentos calibrados como barras de esferas, bloques patrón, nidos de retrorreflectores colocados en paredes o estructuras fijas. Las mediciones se realizan mediante interferómetro y/o ADM colocando la longitud de referencia calibrada en las distintas posiciones y orientaciones, indicando la norma que también puede ser desplazado y reorientado el láser tracker para cada posición de ensayo si resultara más sencillo que desplazar la longitud de referencia. En este trabajo el láser tracker permanece siempre en una posición fija sobre la plataforma, girando solidariamente con ella en las seis posiciones rotativas de la misma situadas a 60° cada una.

Las posiciones de prueba vienen determinadas por la distancia del láser tracker a los puntos que determinan los extremos de la longitud de referencia, el ángulo de giro respecto al eje azimut del láser tracker que en este caso está asociado al giro de la plataforma y la posición de la longitud de referencia.

Algunas de las posiciones indicadas en la norma y que son consideradas como referencia para la definición de las distancias virtuales por malla son mostradas en la Figura 5.33 donde A y B son los extremos de la longitud de referencia definida por las coordenadas de los puntos medidos o virtuales generados.

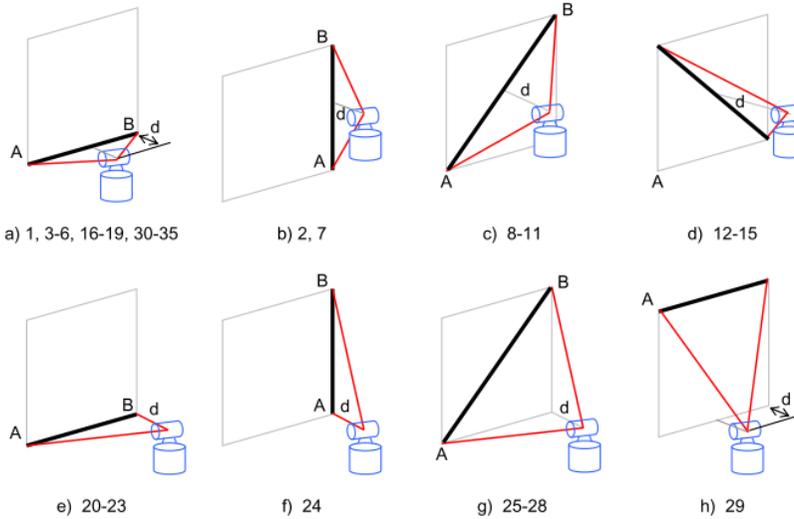


Figura 5.33. Posiciones en prueba de evaluación de error de medición de longitud. Fuente: (ISO/CD10360-10)

Un ejemplo de ocho posibles líneas de medición extraídas de la recomendación VDI/VDE 2617- parte 10 que se han tomado en consideración para la definición de distancias virtuales por malla incluidas en la Figura 5.31, se muestra en la Figura 5.34 a continuación.

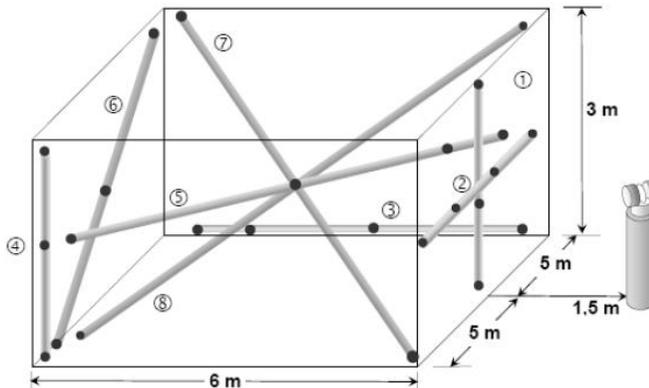


Figura 5.34. Posible disposición de líneas de medición en prueba de evaluación de error de medición de longitud (opción 2). Fuente: (VDI/VDE 2617- parte 10)

5.4.1 Resultados del procedimiento de verificación de láser tracker con plataforma multi-registro mediante distancias virtuales.

Realizando una comparativa de los cuatro métodos de evaluación del error del equipo láser tracker y plataforma multi-registro mediante distancias virtuales descritos en el apartado 5.4, se observa que los valores de error medio en distancia obtenidos son similares en todos los métodos evaluados, siendo el valor promedio de 0.0275 mm. El valor máximo del error en distancia es 0.1185 mm correspondiente al método 4 de evaluación y el rango medio es 0.0859 mm. El método 3 que evalúa distancias cruzadas entre mallas virtuales presenta los valores más bajos de error en distancia y menor dispersión de los resultados. El resumen de resultados se muestra en la siguiente Tabla 5.10 y la comparativa gráfica en la Figura 5.35.

	Método 1	Método 2	Método 3	Método 4	Promedio	Máximo
Error medio en distancia (mm)	0.0223	0.0317	0.0156	0.0404	0.0275	
Error máx. en distancia (mm)	0.1031	0.0811	0.0475	0.1185		0.1185
Rango en distancia (mm)	0.1027	0.0797	0.0468	0.1146	0.0859	
Desviación estándar (mm)	0.0186	0.0212	0.0135	0.0309		

Tabla 5.10. Errores en distancia por método de evaluación distancias virtuales

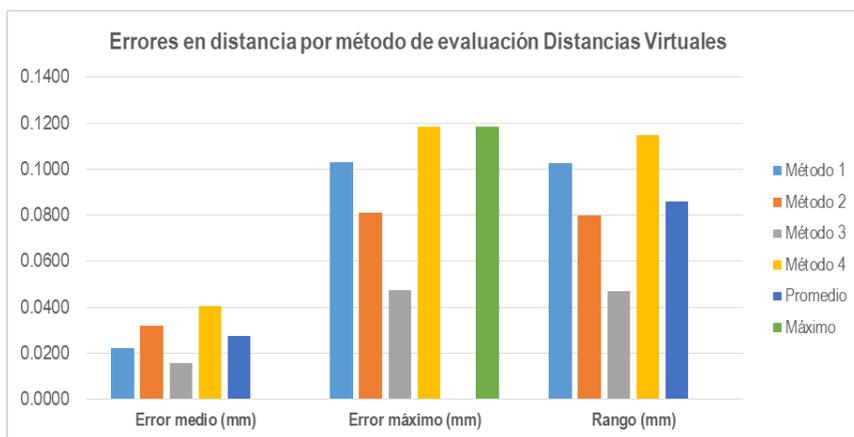


Figura 5.35. Comparativa de errores en distancia según método de evaluación distancias virtuales

La metodología de evaluación mediante distancias virtuales permite una evaluación del error cometido por el instrumento de medida, láser tracker y plataforma multi-registro en los siguientes aspectos:

- Error en θ : estimación del error de giro azimutal θ del equipo de medición asociado al giro de la plataforma y del cabezal del láser tracker.
- Error en φ : estimación del error cometido por el equipo de medición a diferentes ángulos de elevación φ del láser tracker.
- Error en distancia: asociado a la medición de la distancia virtual y comparación con la distancia medida para esa misma pareja de puntos evaluados.

Realizando una comparativa de los resultados obtenidos en la evolución de la precisión volumétrica del láser tracker con la plataforma multi-registro mediante el cálculo del error en distancia con la técnica de distancias virtuales presentada en este apartado, y el procedimiento de verificación convencional de láser tracker con plataforma multi-registro utilizando medición de patrón con MMC y fotogrametría realizado en el apartado 5.3, se obtienen los siguientes resultados que se resumen en la Tabla 5.11 y Figura 5.36.

	Virtuales Método 1	Virtuales Método 2	Virtuales Método 3	Virtuales Método 2	Láser tracker IMP (MMC)	Láser tracker IMP (foto)
Error medio distancia (mm)	0.0223	0.0317	0.0156	0.0404	0.0650	0.0548
Error máx. distancia (mm)	0.1031	0.0811	0.0475	0.1185	0.1768	0.1078
Rango distancia (mm)	0.1027	0.0797	0.0468	0.1146	0.1595	0.0830
Desviación estándar (mm)	0.0186	0.0212	0.0135	0.0309		

Tabla 5.11. Comparativa resultados de errores en distancia mediante distancias virtuales y procedimiento verificación convencional con plataforma multi-registro

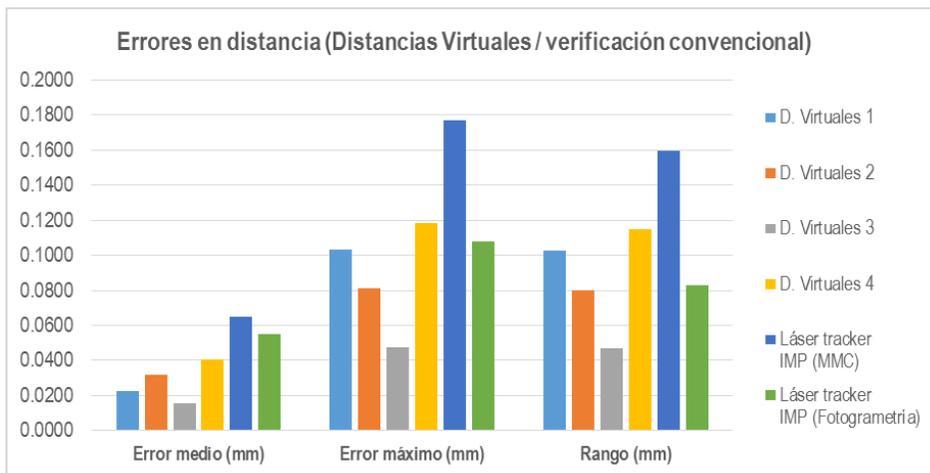


Figura 5.36. Comparativa resultados de errores en distancia mediante distancias virtuales y procedimiento verificación convencional con plataforma multi-registro

Los valores obtenidos en error medio, máximo y rango en distancia con el procedimiento convencional de verificación de láser tracker y plataforma multi-registro son mayores que con el procedimiento de distancias virtuales, pero dentro de la verificación convencional con plataforma, más bajos y próximos a distancias virtuales en el caso de la utilización del patrón de fotogrametría. Por ejemplo, analizando el valor de error medio, el valor promedio obtenido mediante distancias virtuales considerando los resultados obtenidos con los cuatro métodos de evaluación es 0.0275 mm (ver Tabla 5.10) y mediante el procedimiento convencional 0.0650 mm con medición en MMC y 0.0548 mm con medición mediante fotogrametría. En el caso del error máximo, el error máximo en distancia obtenido en los cuatro métodos de evaluación con distancias virtuales fue 0.1185 mm (ver Tabla 5.10) y mediante verificación convencional 0.1768 mm con medición en MMC y 0.1078 mm con medición mediante fotogrametría.

valor del mismo nivel que con distancias virtuales. En relación con el rango medio en distancias, mediante distancias virtuales el valor promedio de los cuatro métodos es 0.0859 mm, 0.1595 mm en verificación convencional MMC y 0.0830 mm mediante fotogrametría.

Atendiendo a los resultados comparativos obtenidos, puede concluirse que ambos métodos serían válidos en un procedimiento de verificación de láser tracker utilizando la plataforma multi-registro, con lo cual se valida la utilización de la plataforma como medio auxiliar de verificación y calibración de láser trackers. Adicionalmente la técnica de distancias virtuales obtiene resultados de un nivel comparable o incluso mejores que el procedimiento de verificación convencional con plataforma y la precisión obtenida con la metodología se considera suficiente para la verificación de un equipo como el láser tracker con la precisión de medición de la que dispone.

A continuación se detallan los resultados obtenidos en los ensayos de verificación de láser tracker con plataforma multi-registro para los cuatro métodos de evaluación de distancias virtuales propuestos:

- *Método evaluación 1: evaluación mediante distancias virtuales entre puntos virtuales en malla 1 y sus homólogos virtuales en mallas 2-6.*

Con el primer método de evaluación se obtiene el error en distancia cometido por el láser tracker como diferencia entre la distancia virtual y la distancia medida por el equipo, definiendo como distancia virtual la distancia entre los centros de los retrorreflectores virtuales SMR 1-27 en la malla virtual 1 y sus homólogos virtuales en el resto de las mallas virtuales generadas, 2 a 6, tal cual se muestra en la Figura 5.27. Igualmente se define el concepto de distancia medida entre un SMR 1-27 y su homólogo en el resto de las mallas medidas 2-6 para cada una de las seis posiciones rotativas de la plataforma.

La Figura 5.37 muestra el error en distancia virtual entre SMRs homólogos situados en las mallas virtuales 1-2,1-3,1-4,1-5,1-6, obteniéndose los valores máximos de error en distancia para los SMR 9 y 17 en las distancias calculadas entre mallas virtuales 1 y 5. El error medio en distancia cometido por el conjunto láser tracker y plataforma multi-registro por pares de mallas virtuales consideradas se grafica en la Figura 5.38, donde se observa que el error disminuye linealmente desde la posición 2 a la 4, y aumenta linealmente desde la posición 4 a la posición 6. Finalmente la Figura 5.39 muestra el error medio en distancia por distancia virtual evaluada entre un SMR y su homólogo en las diferentes mallas virtuales. Se observa claramente que los mayores valores de error medio corresponde a los puntos 1, 9, 17 situados en la esquina izquierda de la malla donde el ángulo del láser tracker respecto al reflector está en el límite, hecho que genera una medición del láser tracker más dificultosa y en el punto 19 situado a una altura media de 1m del equipo de medición, como se observa en la distribución de los SMR en la malla en la Figura 5.4 y la Tabla 5.1.

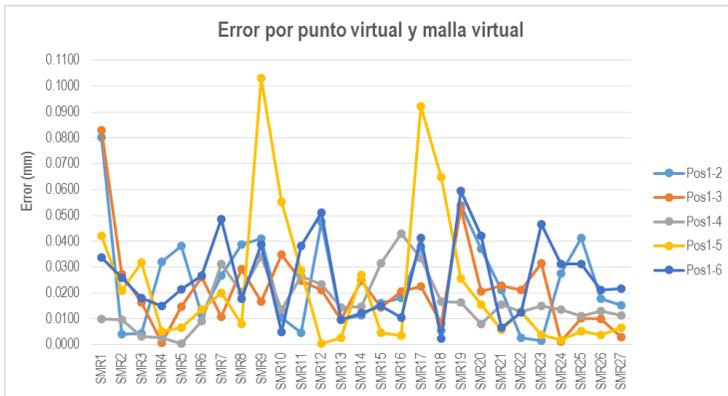


Figura 5.37. Error en distancia por punto y malla virtual (método 1)

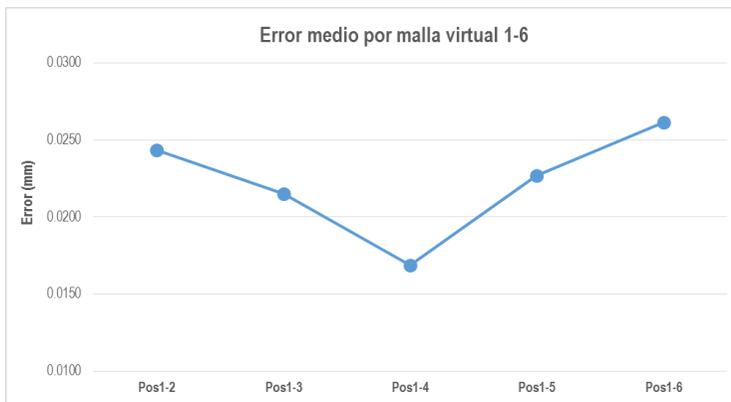


Figura 5.38. Error medio en distancia por malla virtual (método 1)



Figura 5.39. Error medio en distancia por puntos virtuales homólogos (método 1)

La Figura 5.40 muestra la evolución del error por distancia evaluada en orden decreciente de magnitud para cada una de las seis mallas virtuales, observándose en algunas mallas una ligera correlación entre el error y el incremento en magnitud de la distancia.

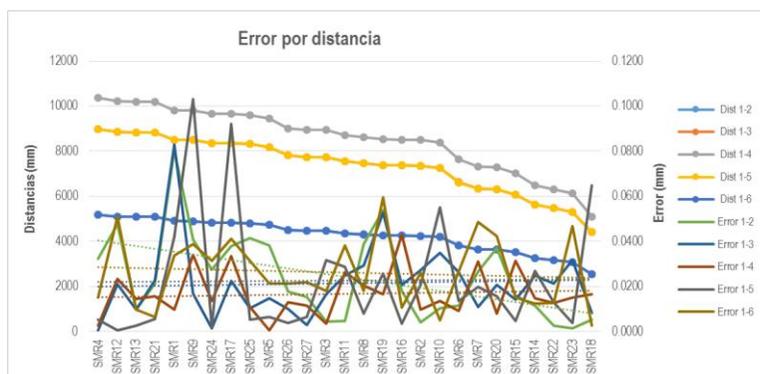


Figura 5.40. Error por distancia virtual evaluada en orden decreciente (método 1)

- *Método evaluación 2: hexágono virtual, evaluación mediante distancias virtuales entre puntos virtuales en mallas consecutivas.*

El segundo método de evaluación de error mediante lo que se ha denominado hexágono virtual, permite realizar una estimación del error de giro azimutal θ del equipo de medición asociado al giro de la plataforma y del cabezal del láser tracker. Para ello se comparan los valores de error cometidos por el equipo al generar distancias virtuales entre posiciones consecutivas de la plataforma, tal cual se muestra en la Figura 5.28. Se genera un hexágono virtual formado por distancias virtuales evaluadas a diferentes alturas en función del posicionamiento de los puntos virtuales que se utilizan para el cálculo de la distancia, ver Tabla 5.1.

En la Figura 5.41 se grafican los errores entre puntos virtuales homólogos en mallas consecutivas mientras la Figura 5.42 muestra la evolución del error de giro entre una posición y otra consecutiva de la plataforma, observándose claramente que al aumentar el ángulo de giro de la plataforma aumenta linealmente el error cometido por el equipo de medición.

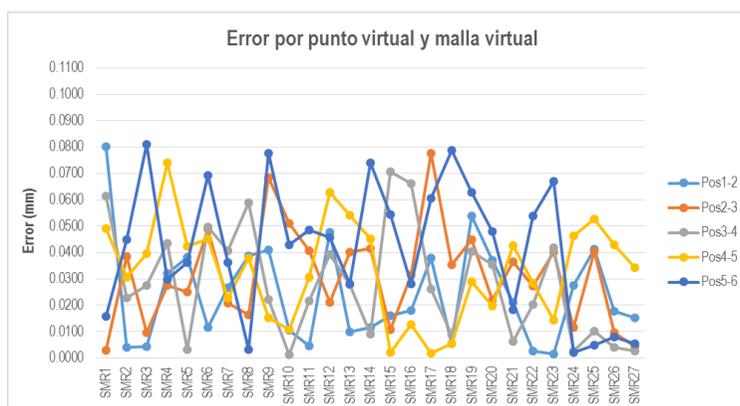


Figura 5.41. Error en distancia por punto y malla virtual (método 2)

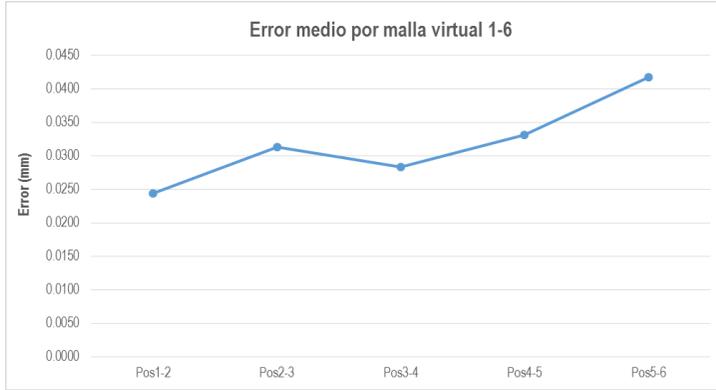


Figura 5.42. Error medio en distancia por malla virtual (método 2)

La Figura 5.43 revela el error en distancia medio por punto o retrorreflector virtual evaluado que en este caso dependiendo del posicionamiento en altura del punto virtual según Tabla 5.12, permite una estimación del error cometido por el equipo de medición a diferentes ángulos de elevación ϕ del láser tracker, posicionado el equipo a una altura de 1,5 m respecto al suelo. No se observa una clara tendencia de aumento del error con el incremento de la cota en altura de posicionamiento de los puntos virtuales, y por lo tanto relacionada con el ángulo de elevación ϕ del láser tracker.

Altura posicionamiento retrorreflector	Número retrorreflector
6 m	1 - 8
2 m	9- 16
1 m	19, 21, 23
0 m	17, 18, 20, 22, 24-25 (patrón)

Tabla 5.12. Agrupación de posiciones de retrorreflectores en la malla por altura

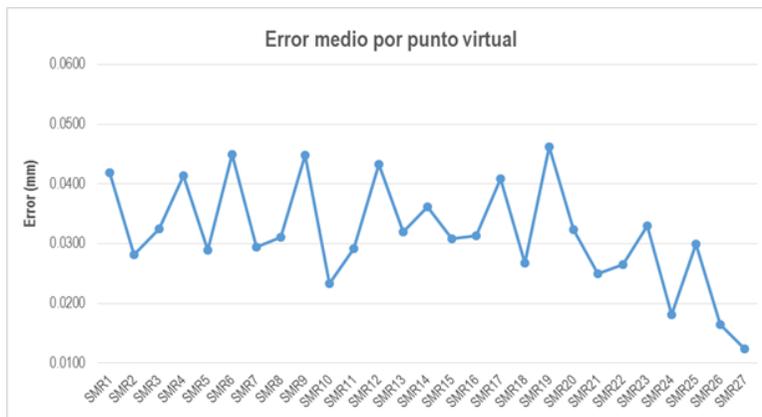


Figura 5.43. Error medio en distancia por puntos virtuales homólogos (método 2)

La Figura 5.44 muestra la evolución del error por distancia evaluada en orden decreciente de magnitud para cada una de las seis mallas virtuales que configuran el hexágono virtual, observándose en algunas mallas un incremento del error cometido por el láser con el incremento de la distancia evaluada.

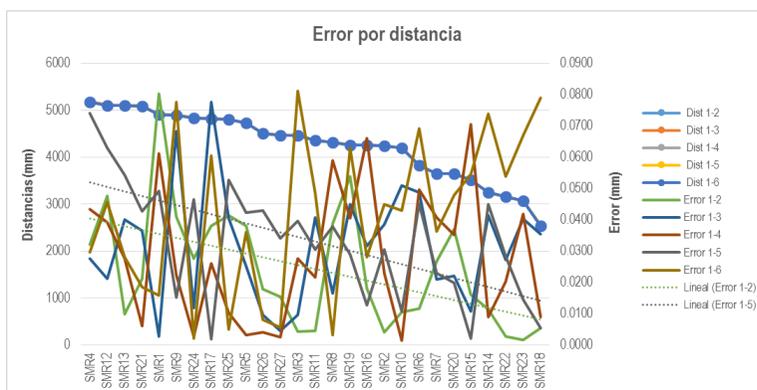


Figura 5.44. Error por distancia virtual evaluada en orden decreciente de magnitud (método 2)

- *Método evaluación 3: evaluación mediante distancias virtuales cruzadas entre malla 1 y mallas 2-6*

Los resultados de evaluación en el método 3 donde se generan distancias virtuales cruzadas entre grupos de puntos virtuales asociados a la malla virtual 1 con grupos de puntos virtuales asociados a mallas virtuales 2-6, se incluyen en las Figura 5.45, Figura 5.46 y Figura 5.47.

La primera gráfica muestra los errores en distancia para las cinco distancias evaluadas entre malla virtual 1 y mallas 2 a 6. La Figura 5.46 muestra resultados similares de tendencia de error a los observados para el método de evaluación 1 en la evaluación del error por malla virtual. El error en distancia disminuye de la malla virtual 2 a la 4 y se incrementa de la malla virtual 4 a la 6. Este hecho es coherente ya que la metodología de cálculo de las distancias virtuales entre mallas es análoga en los métodos de evaluación 1 y 3.

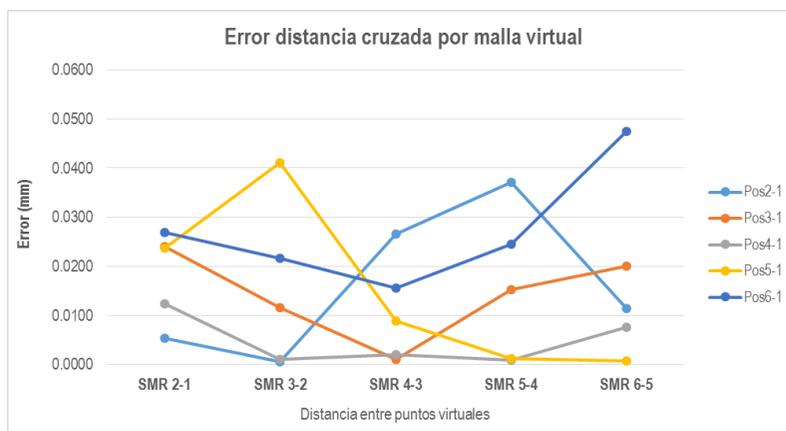


Figura 5.45. Error en distancia cruzadas por malla virtual (método 3)



Figura 5.46. Error medio en distancia cruzada por malla virtual (método 3)

Los errores medios en distancia obtenidos por parejas de puntos virtuales evaluados en Figura 5.47 presentan los menores valores de desviación estándar 0.0135 mm y rango 0.0468 mm entre los cuatro métodos evaluados. Las parejas de puntos evaluados están situados en mallas cruzadas pero siempre situados en un mismo plano de altura, 6m en este caso, con lo cual el giro de elevación del haz láser dirigido hacia el objeto a medir (φ) permanece constante en las mediciones, generando una mayor estabilidad en la medición del láser tracker en este ensayo de evaluación.

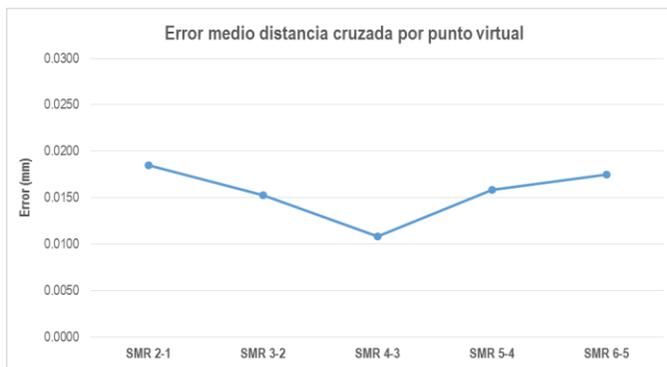


Figura 5.47. Error medio en distancia cruzada por parejas de puntos virtuales (método 3)

- *Método evaluación 4: evaluación mediante distancias horizontales, verticales y diagonales por malla 1-6.*

En el último método de evaluación del láser tracker de medición implementado en este trabajo, se crean distancias virtuales por malla a partir de puntos virtuales situados exclusivamente en el volumen de la malla virtual a evaluar, mallas virtuales 2-6 en el ensayo. La malla virtual 1 no se considera en el análisis ya que al ser la malla de referencia, el error en distancia entre distancia virtual y medida para puntos situados en la malla 1 es cero, debido a que ambas distancias coinciden. Para ello, se definen un conjunto de nueve distancias virtuales clasificadas en función de su posición, horizontal, vertical o diagonal en el volumen de la malla que se muestran a modo de ejemplo en la Figura 5.31. Los resultados de error obtenidos para cada una de las mallas virtuales 2-6 en las nueve distancias virtuales evaluadas

por malla se incluyen en la figura Figura 5.48 a continuación, así como los errores medio por malla virtual y distancia evaluada en las Figura 5.49 y Figura 5.50. El mayor error medio se observa en la malla 5, con un valor de 0.0537 mm. Son las distancias SMR1-3, horizontal a una altura de 6m y SMR1-22, distancia diagonal más grande de las evaluadas, las que presentan mayores valores de error medio, 0.0628 mm y 0.0623 mm respectivamente, hecho que puede corroborar el efecto del incremento de la distancia en magnitud en el error cometido por el láser tracker.

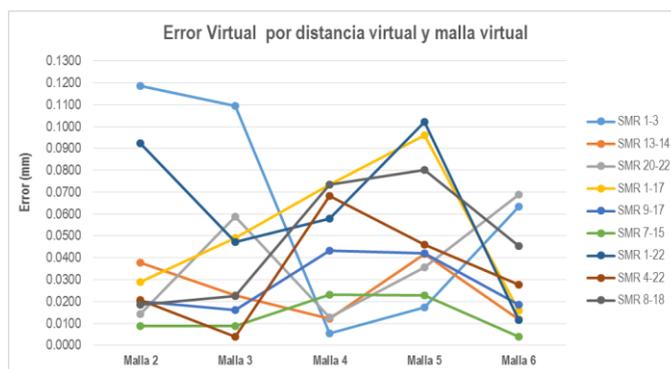


Figura 5.48. Error por distancia virtual evaluada y malla virtual (método 4)

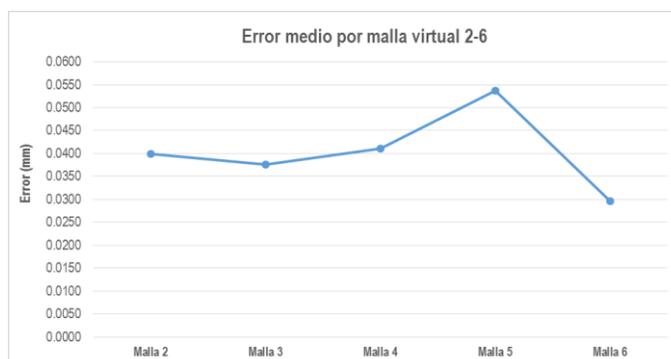


Figura 5.49. Error medio en distancia por malla virtual (método 4)

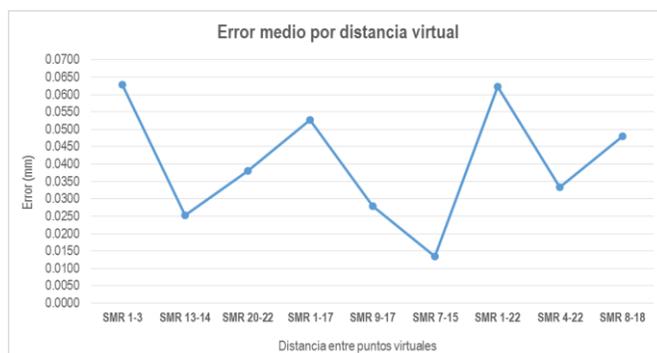


Figura 5.50. Error medio en distancia por distancia virtual (método 4)

La Figura 5.51 muestra la evolución del error por distancia evaluada en orden decreciente de magnitud en cada una de las seis mallas virtuales, observándose correlación entre el error y el incremento en magnitud de la distancia, siendo los valores de error más altos para distancias mayores.

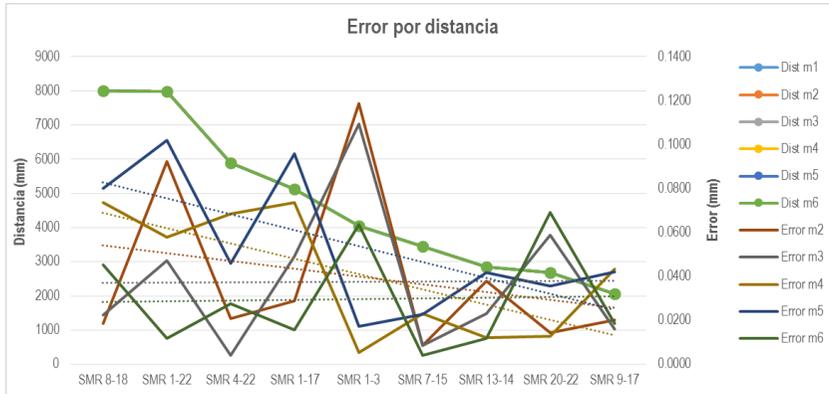


Figura 5.51. Error por distancia virtual evaluada en orden decreciente y malla (método 4)

5.5 Conclusiones

A lo largo de este capítulo se ha desarrollado y explicado el procedimiento de verificación de un láser tracker modelo API T3-15 m montado sobre una plataforma multi-registro de alta precisión de posicionamiento y las ventajas que supone el uso de la plataforma en el procedimiento de verificación propiamente dicho. Para ello se utilizó una malla de grandes dimensiones formada por 27 retrorreflectores que se midieron para cada una de las seis posiciones rotativas de la plataforma, dando lugar a seis mallas de medida. Una vez capturadas las posiciones de los retrorreflectores con el láser tracker, se realizó un análisis y se calculó del error cometido por el láser tracker en el procedimiento conjunto de verificación con la plataforma mediante la evaluación de los siguientes parámetros: repetibilidad en distancia por posición, precisión volumétrica y error de punto del equipo.

Los 351 errores en distancias entre retrorreflectores, derivados de comparar las distancias medidas en posición 1 de la plataforma multi-registro con los valores de distancia obtenidos en el resto de posiciones (2-6) permiten calcular unos valores medio y máximo del *error de repetibilidad en distancia* con resultados obtenidos de 0.0410 mm y 0.1651 mm respectivamente. Este valor de repetibilidad en distancia por posición permite estimar el error que comete el láser tracker para una misma posición física de rotación de la plataforma, al medir un conjunto de distancias entre puntos posicionados en una misma malla física, con lo cual es un error no afectado del propio giro de la plataforma, pero sí de la incertidumbre de la misma por ejemplo debida a los sensores capacitivos. El *error volumétrico* se obtuvo como desviación en distancia medida resultante entre dos retrorreflectores colocados sobre un patrón de referencia respecto a la longitud calibrada, considerando como longitud calibrada la medición de distancias entre retrorreflectores del patrón realizada en una máquina de medición por coordenadas y mediante fotogrametría, con objeto de validar la utilización de esta última técnica. Los valores de error medio, máximo y rango en distancia obtenidos fueron con ambas técnicas, 0.0650 mm, 0.1768 mm y

0.1595 mm frente a medición en MMC y 0.0548 mm, 0.1078 mm y 0.0830 mm mediante fotogrametría respectivamente. Finalmente el cálculo del *error de punto*, pretende corroborar que las coordenadas de un punto medido por el láser tracker en distintas posiciones de la plataforma y expresadas en sistema de referencia plataforma inferior, sean las mismas ya que la plataforma no introduce idealmente ningún error en el resultado. El valor medio del error de punto obtenido fue 0.0439 mm. Con estos resultados previamente descritos se puede concluir la validación del uso de la plataforma multi-registro en procedimientos de verificación de equipos de láser tracker con las ventajas que aporta a nivel de disminución de tiempo, esfuerzo de ensayo y necesidad de espacio físico para la materialización de las mallas patrón, que en el caso de láser trackers suelen ser de grandes dimensiones.

Sin embargo, la principal aportación de la plataforma en procedimientos de verificación de instrumentos portátiles no es su mero uso como elemento auxiliar, que con una alta precisión de posicionamiento permite una rotación del equipo portátil evitando la necesidad de mover la malla patrón con la consiguiente dificultad, sino la posibilidad de generación de puntos virtuales distribuidos en sus correspondiente mallas virtuales que funcionan a modo de malla patrón. Este hecho permite la definición de un número ilimitado de distancias patrón sin necesidad de materialización de las mismas en un patrón físico. La generación de estos puntos virtuales se basa en el conocimiento del giro de la plataforma con gran precisión. Una vez conocido y cuantificado ese giro de una posición a otra, es posible aplicar ese giro a un punto medido por el láser tracker y generar un punto virtual con sus correspondientes coordenadas conocidas. De este modo, en este trabajo, se generan un conjunto de seis mallas virtuales distribuidas alrededor de la plataforma con un número determinado de puntos virtuales a partir de los puntos medidos, entre cuyos centros es posible calcular un número infinito de distancias virtuales. Para proceder a la validación del procedimiento de verificación, se plantearon varias alternativas de evaluación en función de las distancias virtuales definidas y seleccionadas, realizándose para cada caso una cuantificación de la precisión volumétrica del láser tracker. Para ello, se calcula la desviación en distancia como diferencia entre la distancia virtual entre centros de los puntos virtuales y la distancia medida entre centros de los puntos medidos. Como base del procedimiento, se toma como sistema de referencia el sistema de referencia láser tracker 1, asociado a la posición 1 de la plataforma, hecho que lleva a la asunción de que cualquier punto medido en sistema de referencia láser tracker 1, tendrá las mismas coordenadas de su homólogo virtual expresado igualmente en sistema de referencia láser tracker 1. La selección, disposición y distribución de las distancias a evaluar en las mallas virtuales, se realizó teniendo en cuenta los estándares de aplicación para evaluación de equipos de láser tracker [5], [6] y [7]. Los resultados comparativos mostrados en Tabla 5.10 entre los cuatro métodos de evaluación, no presentan grandes diferencias, siendo el error medio en distancia promedio de los cuatro métodos 0.0275 mm, el error máximo en distancia 0.1185 mm correspondiente al método 4 de evaluación y el rango medio 0.0859 mm.

Para finalizar se realizó una comparativa de los resultados obtenidos en la evolución de la precisión volumétrica del láser tracker con la plataforma multi-registro mediante el cálculo del error en distancia con la técnica de distancias virtuales presentada en este apartado, y el procedimiento de verificación convencional de láser tracker con plataforma multi-registro utilizando medición de patrón con MMC y fotogrametría, obteniendo resultados comparables e incluso mejores con la técnica de distancias virtuales. Los valores obtenidos en error medio, máximo y rango promedio en distancia con el procedimiento de procedimiento de distancias virtuales con plataforma multi-registro analizando los cuatro procedimientos de evaluación fueron 0.0275mm, 0.1185mm y 0.0859 mm. Mientras que en la

verificación convencional con plataforma multi-registro 0.0650 mm, 0.1768 mm y 0.1595 mm con medición en MMC y 0.0548 mm, 0.1078 mm y 0.0830 mm con medición mediante fotogrametría.

Como resultado de este trabajo puede concluirse la validación del uso de la metodologías de distancias virtuales con plataforma multi-registro y verificación convencional con plataforma multi-registro en procedimientos de verificación y calibración de equipos de medición portátiles de láser tracker.

6 Modelo de cálculo de incertidumbre de medición de la plataforma multi-registro

6.1 Introducción

La plataforma multi-registro, como elemento auxiliar a utilizar en un proceso de medición conjunto con instrumentos de medición portátiles tales como brazos articulados de medición o láser tracker, tiene una determinada incertidumbre de medición que es necesario estimar para conocer su influencia en el resultado de la medición final obtenido y validar su uso como instrumento adecuado para su utilización en procedimientos de verificación de sistemas de medida portátiles teniendo en cuenta la precisión de los mismos. En el caso de la plataforma multi-registro se identifican como posibles fuentes de error que afectan a la incertidumbre de la medición los siguientes factores: el error de calibración de la plataforma, el error del equipo de medición portátil que se posiciona sobre la plataforma, los sensores capacitivos integrados en la plataforma y la deformación que puede sufrir la plataforma debido al peso del equipo de medición portátil y el movimiento del mismo durante el procedimiento de medición.

Para analizar el efecto de la posible deformación de la plataforma en el resultado de la medida, se realiza en este capítulo un análisis de la plataforma mediante elementos finitos y un posterior análisis modal de la plataforma multi-registro basado en este modelo de elementos finitos, que permita caracterizar el comportamiento del sistema cuando es sometido a excitaciones ajenas que pudieran suceder durante el uso real. De este modo, es posible analizar la influencia de estas excitaciones en las medidas realizadas por los sensores capacitivos integrados en la plataforma. El análisis modal se realizará computacionalmente mediante el software Abaqus, haciendo previamente un mallado de la estructura mediante elementos finitos que genere un modelo simplificado de la plataforma, y también de forma experimental para corroborar los resultados de frecuencias naturales y modos de vibración obtenidos de manera teórica.

La estimación de la incertidumbre de la plataforma, debido a la imposibilidad que supondría un cálculo convencional de propagación de incertidumbres dado el complejo modelo de la misma, se realiza mediante la aplicación del método de simulación de Monte Carlo. La estimación de incertidumbres mediante propagación de distribuciones utilizando como herramienta el método de Monte Carlo, permite resolver este problema con modelos donde la magnitud de salida se describe mediante una variable real, que se estima con una función modelo que depende de n magnitudes de entrada. Definiendo un número determinado de iteraciones, este procedimiento genera el valor más probable de la magnitud de salida con un intervalo de cobertura asociado que permite la definición de la incertidumbre del

modelo. En este caso, para un número determinado n de magnitudes de entrada, lecturas de los sensores capacitivos que siguen una determinada distribución de probabilidad, y pasando por el modelo de la plataforma, es posible generar un número determinado de n matrices de transformación homogéneas, que permiten el cambio de sistema de referencia de plataforma superior a plataforma inferior, a través del modelo matemático de la plataforma multi-registro, y obtener la distribución de probabilidad de estas matrices, a partir de la cual estimar la incertidumbre en una situación concreta de medición. Considerando estas matrices homogéneas de transformación y dado un punto medido con la plataforma y el brazo de medición expresado en sistema de referencia brazo, es posible generar un número n de puntos en sistema de plataforma inferior o global, construir las esferas asociadas a esos puntos y estimar la incertidumbre de la plataforma en la generación de esos puntos y en la medición de las distancias entre ellos.

6.2 Análisis de la plataforma multi-registro mediante método de elementos finitos

Dada la complejidad y el número de elementos que componen la plataforma multi-registro, se ha decidido proceder a una simplificación de la geometría de la misma para el análisis del modelo con el método de elementos finitos (MEF). De este modo, se obtendrá un modelo simplificado que permita visualizar de manera cualitativa el comportamiento de la estructura en los sucesivos ensayos computacionales que sean necesarios realizar, reduciendo los cálculos y costes computacionales asociados. Para la simplificación del modelo se utilizarán una serie de criterios de simplificación donde se omiten elementos sin requerimientos técnicos específicos, se suprimen masas despreciables en comparación con el global del sistema o se eliminan elementos no rigidizadores del comportamiento global de la estructura de la plataforma multi-registro.

6.2.1 Simplificaciones del modelo de la plataforma multi-registro

○ *Uniones atornilladas*

Esta simplificación consiste en la consideración de las uniones atornilladas donde se unen dos o varias piezas sueltas a través de elementos de unión estandarizados tornillos y tuercas, como uniones soldadas. Las uniones roscadas se elaboran con el fin de mantener en la posición deseada las piezas que se van a unir creando fuerzas necesarias para esta unión y manteniendo la misma posición durante el tiempo necesario. Por ello, una simplificación de acuerdo con unas exigencias similares son las uniones soldadas, donde la unión de las piezas es solidaria de modo que se mantiene la posición deseada entre las piezas y se genera una unión que permite la transmisión de las solicitaciones requeridas. Por tanto, las uniones atornilladas serán sustituidas por uniones entre elementos soldadas, suponiendo sin cordón de soldadura que modifique la rigidez de la unión.

Un ejemplo ilustrativo de elementos atornillado simplificado por uniones rígidas en los asientos se muestra en la Figura 6.1, donde se eliminan los orificios de alojamiento para los elementos roscados y se simplifica la geometría eliminando aspectos no relevantes para su uso en el cálculo posterior.

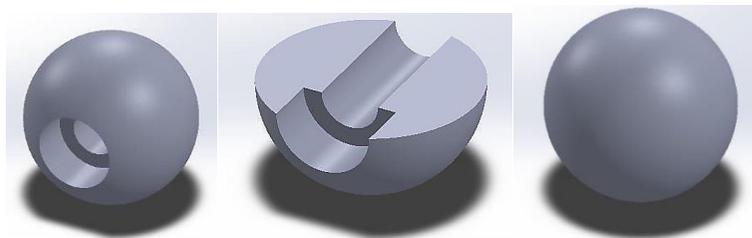


Figura 6.1. Ejemplo de simplificación esfera posicionamiento, original- sección original-cuerpo simplificado

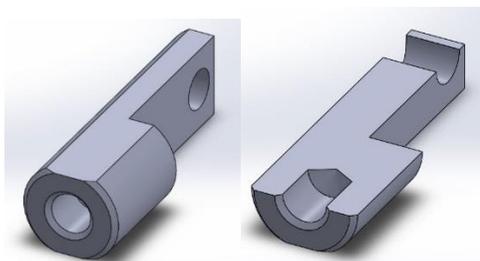
○ *Simplificación de geometrías*

El diseño planteado posee una serie de geometrías complejas para el mallado y cálculo por el método el método de elementos finitos. De este modo, reduciendo estas geometrías a cuerpos base de geometrías mucho más simples se reducirá la complejidad geométrica del modelo.

En elementos que se deban considerar en las simulaciones de resultados y que por consiguiente no pueden ser obviados, es necesario seguir una serie de criterios durante las simplificaciones a realizar que son los siguientes:

- Respetar la geometría base en elementos comerciales.
- Eliminar orificios de roscado, bajo la consideración del apartado anterior.
- Reducir elementos no comerciales a geometrías base.
- Eliminar rebajes, resaltes u operaciones sobre elementos que generen complicaciones de cálculo.

En el caso de elementos comerciales estándar, tales como soportes y sensores, se puede ver un ejemplo de la evolución de las simplificaciones aplicadas a un soporte del sensor capacitivo horizontal en la Figura 6.2. Para ello, se eliminan chaflanes, taladros y posibles orificios sin repercusiones técnicas, es decir, sin generar posibles concentradores de tensión o disminuciones de las propiedades en alguno de los ejes principales del cuerpo singular. De este modo se obtiene un elemento más próximo a un cuerpo simple de geometría más fácilmente mallable y con un menor coste computacional.



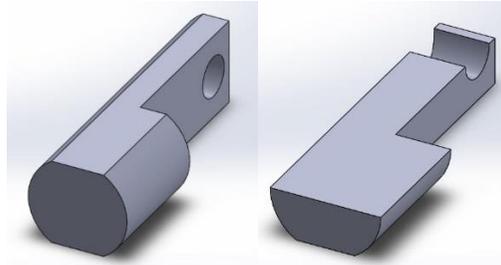


Figura 6.2. Ejemplo de simplificación soporte sensor capacitivo horizontal, original- sección original – simplificación - sección simplificada

○ *Eliminación de elementos de masa despreciable*

La existencia de elementos reducidos de masas no significativas en el conjunto total, permite que puedan ser eliminados sin afectar sustancialmente los resultados globales reales del modelo. De esta forma, pequeños elementos de unión, alimentadores, clip, racores, manguitos o casquillos de reducidas dimensiones quedan omitidos de los ensamblajes globales de simulación.

6.2.2 Resultado global de las simplificaciones en el modelo final para cálculo

A partir del modelo total, en este apartado de la memoria se describen todas las simplificaciones realizadas para obtener un modelo básico de cálculo. Inicialmente, se dispone de un modelo CAD general como el que se puede apreciar en la Figura 6.3, compuesto por la propia plataforma multi-registro más el brazo articulado de medición por coordenadas atornillado sobre la plataforma.

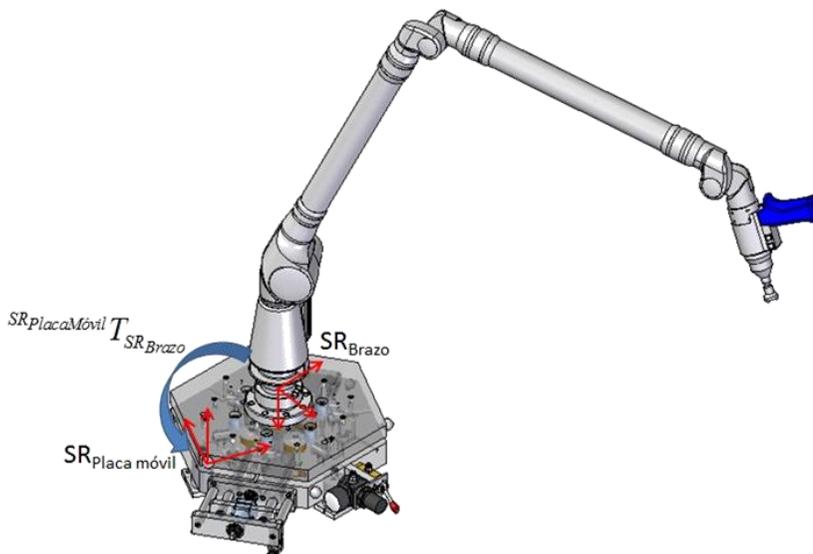


Figura 6.3. Modelo CAD completo, plataforma multi-registro y brazo articulado de medición

Se decide eliminar del modelo de cálculo el brazo articulado de medición por coordenadas, debido a que su repercusión en el comportamiento real en relación a la masa total del conjunto se considera despreciable. El posicionamiento del brazo sobre la plataforma genera una mayor rigidez del sistema y un posible desplazamiento del rango de frecuencias naturales. En la Figura 6.4 se muestra una imagen del modelo CAD completo de la plataforma multi-registro.

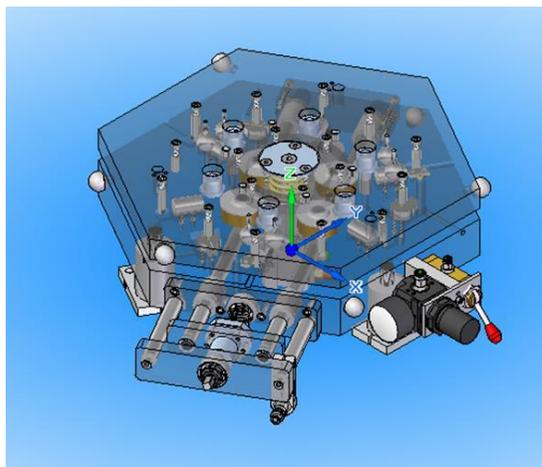


Figura 6.4. Modelo CAD completo de la plataforma multi-registro

La *placa fija* o base de la *plataforma* consta de los siguientes componentes mecánicos que se muestran en la Figura 6.5 asociados a la siguiente numeración:

1. Sensores capacitivos horizontales con sus soportes.
2. Sensores capacitivos verticales con sus soportes.
3. Cilindros de acoplamiento cinemáticos de 18 mm de diámetro y 30 mm de longitud.
4. Pasadores de registro.
5. Rodamientos esféricos.
6. Rodamiento axial a bolas.
7. Rodamientos lineales.
8. Barras para desplazamiento lineal.
9. Husillo a bolas.
10. Sistema neumático para generar precarga.
11. Esferas de caracterización de sistema de coordenadas de placa fija de 20 mm de diámetro.
12. Esferas de elevación de placa móvil de 16 mm de diámetro.
13. Postizos centrales para evitar rozamiento.
14. Patas de amarre de la placa fija.

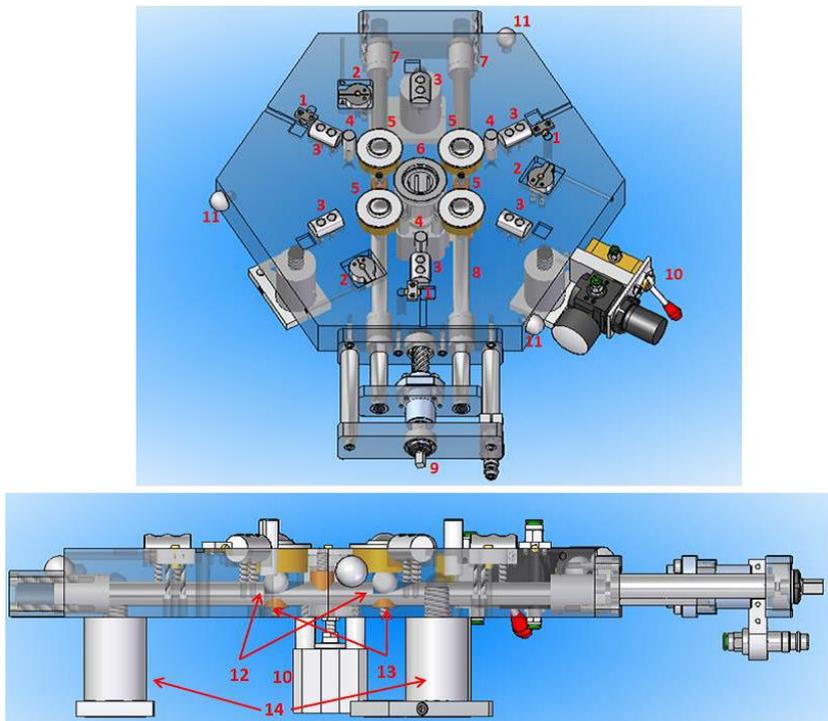


Figura 6.5 Componentes mecánicos de la placa fija de la plataforma multi-registro

Haciendo uso de las consideraciones de simplificación mencionadas anteriormente, se obtiene un modelo de placa fija con un número más reducido de elementos, explicando a continuación cada uno de ellos:

1. *Sensores capacitivos horizontales con sus soportes.*

Se mantienen en el modelo simplificado para visualizar su comportamiento simulado, aplicando las consideraciones en las cuales se respeta la geometría base del elemento comercial, eliminando rebajes, resaltes u operaciones sobre elementos que generen complicaciones de cálculo.

2. *Sensores capacitivos verticales con sus soportes:* se mantienen con criterios análogos al caso anterior.

3. *Cilindros de acoplamiento cinemáticos de 18 mm de diámetro y 30 mm de longitud.*

Son eliminados los orificios de atornillado, ver Figura 6.6, considerados solidarios y con unión rígida a la base de la plataforma.

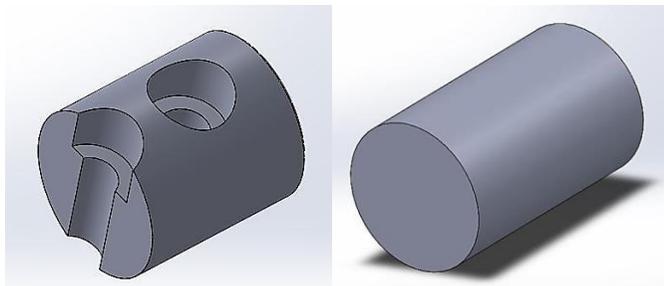


Figura 6.6 Simplificación de cilindro de acoplamiento

4. Pasadores de registro.

Estos elementos garantizan el correcto posicionamiento final del sistema una vez desplazado sobre su eje. Son obviados en los primeros análisis, pero sería interesante incluirlos en posteriores análisis a pesar del aumento del coste computacional.

5. Rodamientos esféricos.

Son eliminados del modelo simplificado debido a que no presentan una relevancia en los análisis a realizar.

6. Rodamiento axial a bolas.

Son eliminados del modelo simplificado debido a que no presentan una relevancia en los análisis a realizar.

7. Rodamientos lineales.

Son eliminados del modelo simplificado debido a que no presentan una relevancia en los análisis a realizar.

8. Barras para desplazamiento lineal.

Serán eliminados de las simplificaciones debido a la complejidad que implica su inclusión y que no presentan una relevancia en los análisis a realizar.

9. Husillo a bolas.

Eliminado al no ser considerado como un elemento que en el conjunto simplificado modifique la estructura base.

10. Sistema neumático para generar precarga.

Obviado en el modelo de la plataforma por ser un elemento externo a la estructura elemental del sistema.

11. Esferas de caracterización de sistema de coordenadas de placa fija de 20 mm de diámetro.

Masas despreciables y externas a la estructura, son obviadas en los cálculos.

220 Capítulo 6. Modelo de cálculo de incertidumbre de medición de la plataforma multi-registro

12. Esferas de elevación de placa móvil de 16 mm de diámetro.

Sistema de elevación eliminado para los primeros análisis, pudiéndose considerar para posteriores análisis de sensibilidad de los cálculos y observar su influencia en la rigidez conjunta del sistema.

13. Postizos centrales para evitar rozamiento.

Elemento de masa despreciable solidarios a la estructura pueden ser eliminados en el modelo.

14. Patas para amarre de la placa fija.

Simplificadas a cilindros solidarios a la superficie inferior de la placa base, en condiciones de contorno serán considerados igualmente empotrado al suelo.

Tras las simplificaciones aplicadas en los elementos previamente mencionados, el conjunto de la placa fija de la plataforma multi-registro queda reducido a los siguientes componentes que se listan a continuación y se pueden visualizar en la Figura 6.7:

1. Sensores capacitivos horizontales con sus soportes.
2. Sensores capacitivos verticales con sus soportes.
3. Cilindros de acoplamiento cinemáticos de 18 mm de diámetro y 30 mm de longitud
4. Barras para desplazamiento lineal.
5. Husillo a bolas.
6. Patas de amarre de la placa fija.

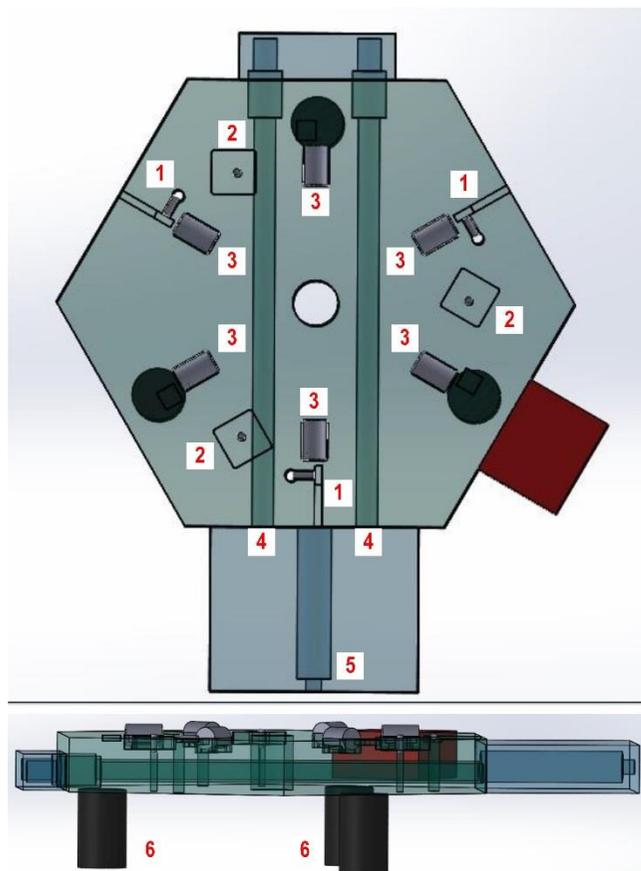


Figura 6.7 Componentes mecánicos y geometría final de la placa fija simplificada

La *placa móvil* de la plataforma multi-registro consta de los siguientes componentes que se muestran en la Figura 6.8 asociados a la siguiente numeración:

1. Targets de los sensores capacitivos horizontales.
2. Targets de los sensores capacitivos verticales.
3. Par de esferas de los acoplamientos cinemáticos de 20 mm de diámetro.
4. Casquillos para pasadores de registro.
5. Anillo de rodadura.
6. Eje.
7. Muelle de precarga.
8. Esferas de caracterización de sistema de coordenadas de placa móvil de 20 mm de diámetro.

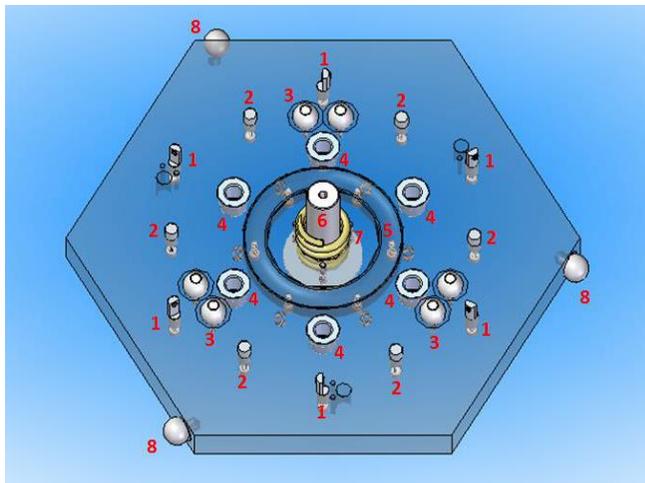


Figura 6.8 Componentes mecánicos de la placa móvil

Aplicando los criterios de simplificación del modelo de manera semejante al caso de la simplificación de la placa fija, se obtiene un modelo simple de elementos con geometrías elementales y con uniones semejantes al modelo real que se puede apreciar en la Figura 6.9. Los elementos considerados en este modelo simplificado de la placa móvil son los siguientes:

1. Targets de los sensores capacitivos horizontales.
2. Targets de los sensores capacitivos verticales.
3. Par de esferas de los acoplamientos cinemáticos de 20 mm de diámetro cada esfera.

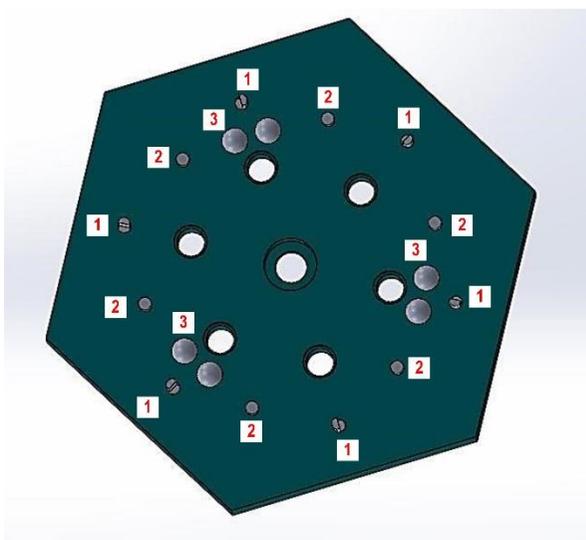


Figura 6.9 Componentes mecánicos y geometría final de placa móvil simplificada

Como consecuencia de la aplicación de las simplificaciones mencionadas se obtiene un modelo de ensamblaje completo simplificado de la plataforma multi-registro que se ilustra en la Figura 6.10.

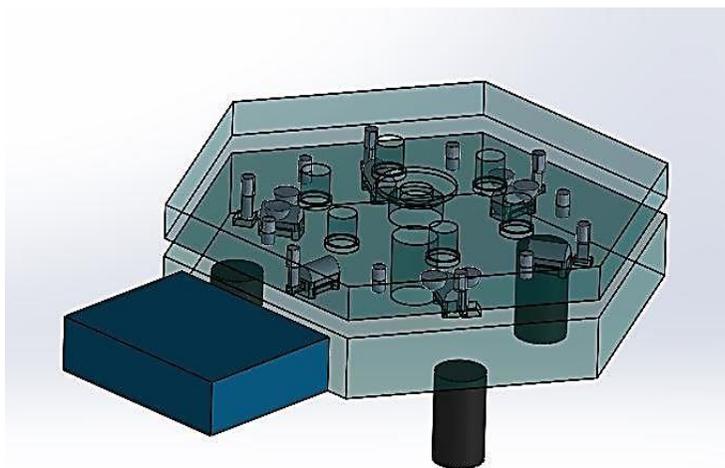


Figura 6.10 Simplificación final del modelo plataforma multi-registro

En resumen, es conveniente destacar que las simplificaciones dan lugar a un modelo más sencillo y similar en propiedades al modelo real. El modelo reducido disminuye el número de elementos que lo componen y simplifica su geometría, permitiendo una sustancial reducción del coste computacional en los posteriores cálculos a realizar, tanto en preparación de los casos de análisis, como en horas de cálculo y tratamiento de datos y resultados.

6.3 Análisis modal de la plataforma multi-registro mediante Abaqus

El método de análisis por elementos finitos (MEF) es un método numérico general para la aproximación de soluciones de ecuaciones diferenciales parciales asociadas a un problema físico sobre geometrías complicadas. La estructura se divide en un número elevado de elementos finitos, dentro de cada uno de estos elementos se distinguen una serie de puntos representativos llamados nodo y un conjunto de éstos generan una malla. El método está ampliamente extendido debido a su generalidad y a la facilidad de introducir dominios de cálculo complejos en dos o tres dimensiones. Dada la imposibilidad práctica de encontrar la solución analítica de estos problemas, con frecuencia, se convierten en la única alternativa práctica de cálculo.

Las tareas necesarias para llevar a cabo un cálculo mediante un programa de elementos finitos se dividen en los siguientes pasos:

- Pre-proceso: consiste en la definición de geometría, generación de la malla, condiciones de contorno y propiedades de los materiales.
- Cálculo: resolución de sistemas de n ecuaciones y n incógnitas, que puede ser resuelto con cualquier algoritmo para la resolución de sistemas de ecuaciones lineales. Cuando el problema a tratar es un problema no lineal o un problema dependiente del tiempo, a veces, el cálculo consiste

en una sucesión finita de sistemas de n ecuaciones y n incógnitas, que deben resolverse uno a continuación de otro y cuya entrada depende del resultado del paso anterior.

- Post-proceso: cálculo de las magnitudes derivadas de los valores obtenidos para los nodos.

En este trabajo se realiza un mallado por elementos finitos de la plataforma teniendo en consideración el modelo simplificado, y posteriormente se lleva a cabo un análisis modal computacional que permite obtener de manera rápida, un modelo de cálculo que suministre diferentes parámetros del elemento a analizar tales como las frecuencias naturales y las formas modales.

6.3.1 Tratamiento del modelo

Para la realización de los cálculos mediante el software elegido Abaqus es necesario importar las geometrías simplificadas con el objeto de comenzar el análisis. El modelo simplificado de la plataforma multi-registro utilizado en el análisis modal se observa en la Figura 6.11.

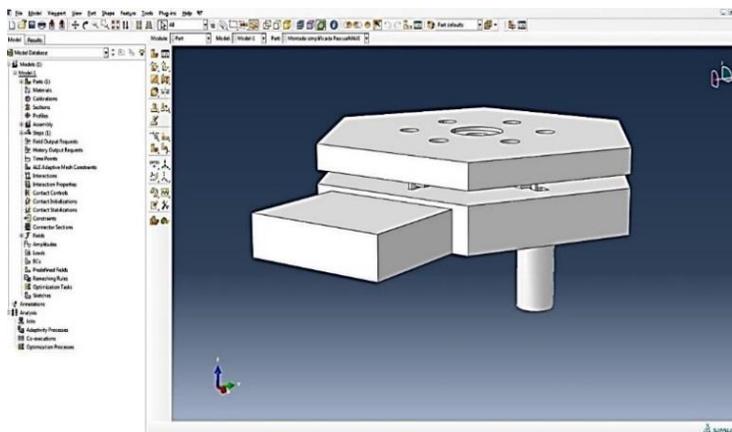


Figura 6.11. Mallado de la plataforma multi-registro

Adicionalmente es necesario definir los materiales del modelo, su uso específico y la idoneidad de los mismos, resumiendo su aplicación por componentes de la plataforma multi-registro en la siguiente Tabla 6.1:

Componente	Material
Esferas de apoyo y registro placa superior	Acero F131
Cilindros de apoyo y eje central	Acero F115
Placa superior e inferior	Acero F114
Pletinas de elevación y resto de elementos	Acero F111

Tabla 6.1. Lista de materiales utilizados en la plataforma multi-registro

Todos estos materiales son aceros de tratamiento térmico determinado para cada requerimiento específico, poseen en común las propiedades necesarias para el cálculo de frecuencias y modos de vibración, densidad, módulo de Young y coeficiente de Poisson.

- Densidad = 7800 kg/m^3
- Módulo = 210000 MPa
- Coeficiente de Poisson = 0.33

Dado el modelo tridimensional, se procede a un mallado mediante elementos tetraédricos ajustados a curvatura. La creación de dicha malla genera un total de 260000 elementos aproximadamente, tal y como puede observarse en la Figura 6.12 y la Figura 6.13.

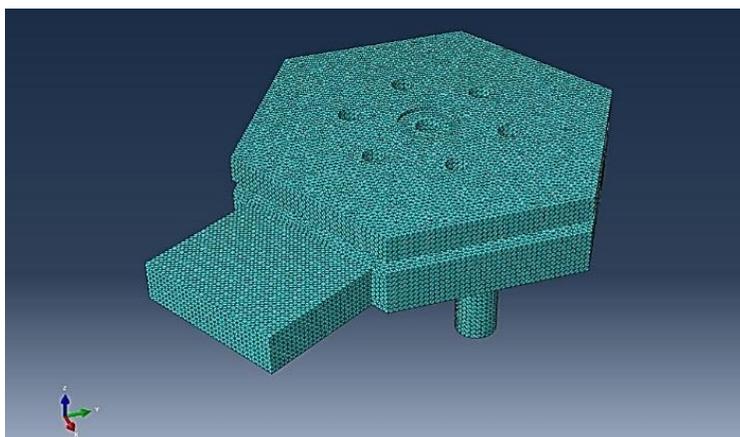


Figura 6.12. Mallado de la plataforma multi-registro

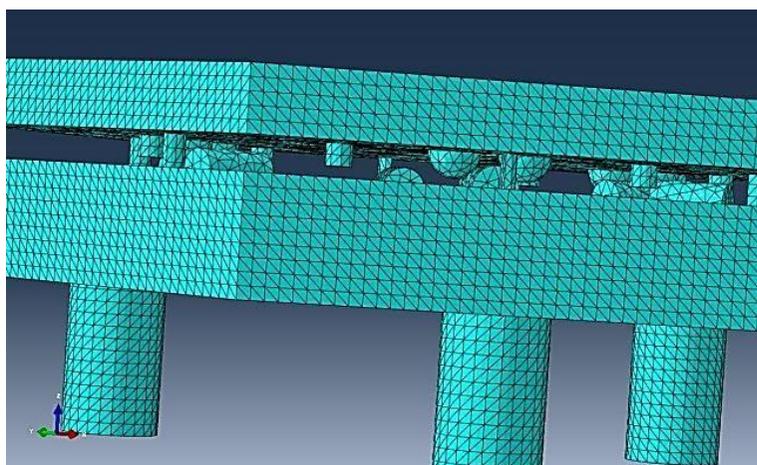


Figura 6.13. Detalle mallado de elementos de posicionamiento cilindro - esfera

Una vez obtenido un modelo definido y el mallado, es necesario determinar el modo de sustentación de la estructura. La determinación de este modo de sustentación, permitirá obtener un comportamiento

más real y ajustado al comportamiento de uso del modelo, pudiéndose realizar dos tipos de ensayo en función de la sustentación elegida:

1. Ensayo con condiciones de apoyo reales, o lo más similares posible a las condiciones reales del modelo en operación.
2. Ensayo libre-libre o modelo suspendido, simulando otras posibles condiciones de apoyo, incluso la unión del modelo a otros componentes estructurales.

Estos análisis, permiten obtener los modos de vibración de la plataforma como sólido rígido a frecuencias más bajas que los posibles modos de vibración con deformación de la estructura, siendo éstos últimos de interés para el análisis a realizar de la plataforma, ya que pueden influir en el comportamiento de la medida de los sensores capacitivos durante el proceso de medición.

6.3.2 Resultados del análisis modal con modelo libre

Como se mencionó anteriormente, el desarrollo de este cálculo parte de la suposición de un modelo ideal suspendido, sin interacciones con el medio, permitiendo obtener los modos de vibración y sus frecuencias naturales. El listado de los modos de vibración obtenidos se muestra en la siguiente Tabla 6.2 así como las imágenes de los modos de vibración en la Figura 6.14.

Modos	Rad/seg	Frecuencia (Hz)
1	6.3827e+006	1.0158e+006
2	9.4384e+006	1.5022e+006
3	1.063e+007	1.6918e+006
4	1.0983e+007	1.748e+006
5	1.1248e+007	1.7902e+006
6	1.2043e+007	1.9166e+006
7	1.2398e+007	1.9732e+006
8	1.4485e+007	2.3053e+006
9	1.4826e+007	2.3596e+006

Tabla 6.2. Modos de vibración obtenidos en análisis modal del modelo libre

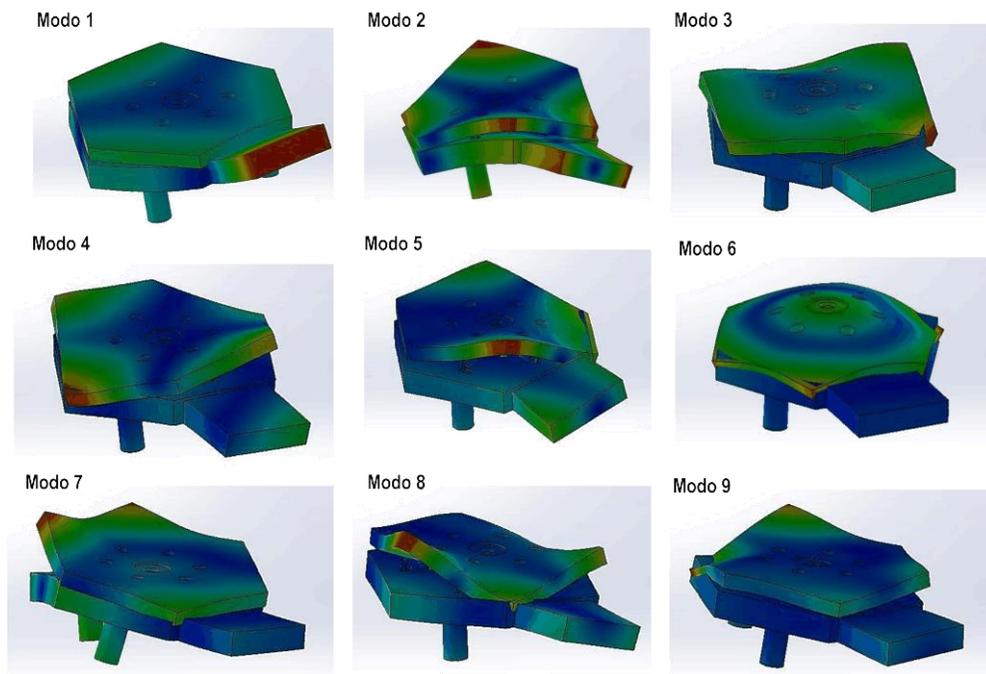


Figura 6.14. Modos de vibración en análisis modal del modelo libre

6.3.3 Resultados análisis modal modelo con apoyo en mesa

La plataforma está pensada para su uso sobre una superficie fija y horizontal, de esta forma un análisis real del mismo parte de establecer unas condiciones de contorno fijas de desplazamientos y giros permitidos nulos en las superficies de apoyo. El listado de los modos de vibración obtenidos en este ensayo se muestra en la siguiente Tabla 6.3 así como las imágenes de los modos de vibración en la Figura 6.15.

Modos	Rad/seg	Frecuencia (Hz)
1	9.4304e+006	1.5009e+006
2	1.0531e+007	1.676e+006
3	1.0894e+007	1.7338e+006
4	1.1264e+007	1.7927e+006
5	1.2249e+007	1.9494e+006
6	1.3469e+007	2.1436e+006
7	1.4816e+007	2.3581e+006
8	1.5422e+007	2.4546e+006
9	1.5632e+007	2.4879e+006

Tabla 6.3. Modos de vibración obtenidos en análisis modal con apoyo en mesa

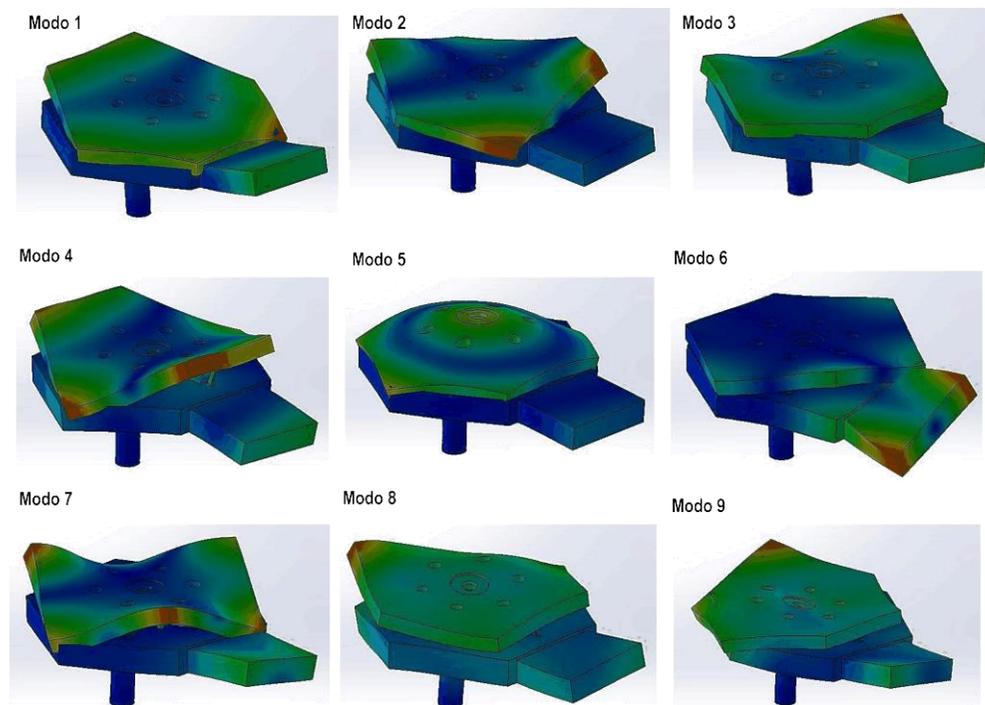


Figura 6.15. Modos de vibración en análisis modal del modelo con apoyo en mesa

6.3.4 Conclusiones

Con los resultados obtenidos en los cálculos realizados, se puede concluir que la estructura de la plataforma multi-registro se comporta como un cuerpo extremadamente rígido dadas sus altas frecuencias naturales. Estas frecuencias se encuentran comprendidas entre 1.000.000 Hz y 2.500.000 Hz, en respectivos cálculos en los ensayos con modelo libre y aplicando condiciones de contorno reales, corroborando de este modo la rigidez del modelo. Se estima que en el ambiente común de uso de la plataforma, las frecuencias a las que normalmente podría estar estimulada no superarían los 1000 Hz, por lo tanto serían muy inferiores a las resultantes de las simulaciones.

Por esta razón, se puede concluir que la influencia por deformación modal del sistema no es significativa en el proceso de medición de la plataforma multi-registro, con especial relevancia en las lecturas realizadas con los sensores capacitivos.

6.4 Análisis modal experimental de la plataforma multi-registro

6.4.1 Fases del ensayo modal experimental

En general, un estudio de análisis modal experimental de una estructura se divide en tres fases, pre-procesado, realización de las medidas y post-procesado.

- a) *Pre-procesado*: preparación del ensayo, definición de la geometría y preparación de la configuración de medida para el ensayo.

En primer lugar es importante definir las condiciones de ensayo o condiciones de contorno, para buscar una correlación con los cálculos computacionales realizados. En este caso, dadas las condiciones de trabajo esperadas de la plataforma multi-registro, se optará por ensayar el sistema en condiciones de contorno reales, en este caso con la plataforma fijada sobre una estructura plana, horizontal y rígida colocada sobre el suelo del Laboratorio de Metrología del Departamento de Ingeniería de Diseño y Fabricación.

Una vez definidas las condiciones de ensayo, es necesario determinar un modelo geométrico de la estructura a ensayar, definiendo un mallado sobre la pieza, de manera que cada nudo del mismo sea una posición de medida de la respuesta. El modelo debe intentar reflejar de una manera simplificada, la geometría de la pieza real. Se determinará por lo tanto, el número de puntos de medida, de excitación y sus posiciones. A partir de la información y de los modos de vibración capturados en el análisis computacional explicado en el apartado anterior de esta memoria, se establecerá el criterio de estimulación y captación en dirección Z, como se puede observar en la Figura 6.16, disponiendo de seis puntos de estimulación correspondientes a los seis extremos de la plataforma. De esta forma se captarán los posibles modos de vibración de la plataforma, basándose en el análisis previo realizado con Abaqus.

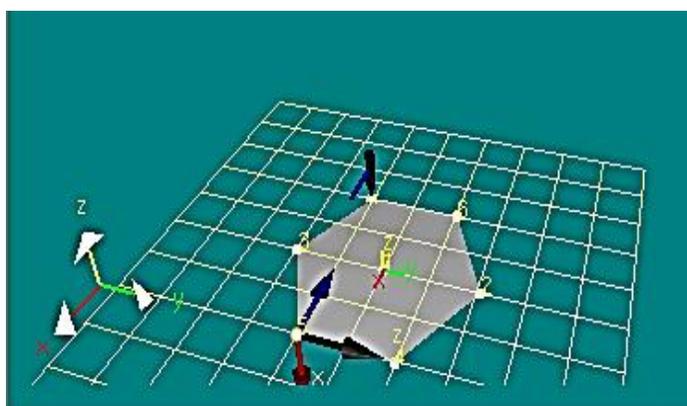


Figura 6.16. Disposición de puntos y dirección de la medida

La instrumentación utilizada consiste en un martillo de excitación con punta de acero, ver Figura 6.17 que estimulará la estructura de la plataforma multi-registro y su comportamiento será recogido mediante un acelerómetro triaxial adherido a la estructura. La masa despreciable de este dispositivo no tiene influencia perceptible en los resultados modales finales que se obtienen. Las señales son captadas por

el acelerómetro y transcritas a una tarjeta de registro y tratamiento de datos. El software utilizado para el tratamiento de los datos será Hammer.

La configuración del ensayo partirá de la captación de tres medidas por puntos de impacto en el rango total máximo de frecuencia de captación del dispositivo disponible en laboratorio (25000 Hz), obteniéndose los modos de vibración de acuerdo a las frecuencias naturales del sistema comprendidas entre los 0 Hz hasta los 25000 Hz. Adicionalmente, se establece una secuencia de puntos de ensayo correspondiente a las posiciones de giro de la plataforma, fijando el acelerómetro en la posición 1 de la plataforma, en la cual comienza la secuencia de ensayo tal cual se muestra en la Figura 6.18.



Figura 6.17. Martillo de excitación

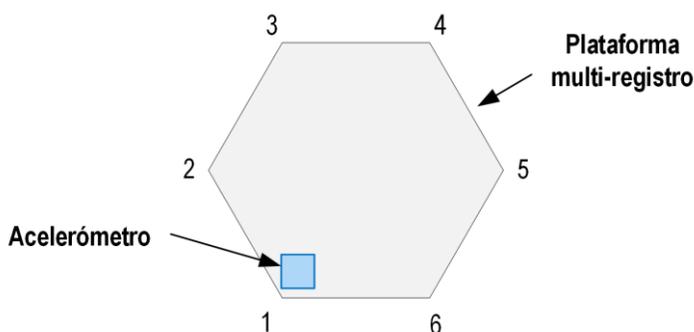


Figura 6.18. Vista en planta plataforma multi-registro y secuencia de excitación del ensayo

- b) *Realización de las medidas:* se procede a la excitación de la estructura en las posiciones anteriormente marcadas y el registro de la respuesta vibratoria en las posiciones de respuesta.

Durante la realización del ensayo es necesario monitorizar las diferentes señales que se captarán. En este caso, las señales captadas vienen determinados por el martillo excitador con punta metálica para registrar la magnitud de estímulo y el acelerómetro situado en la posición correspondiente para registrar las variaciones de desplazamiento y micro-deformaciones a su alrededor. Mediante la interfaz del programa es visible la saturación de la captación o posibles fallos en medida. Cuando la toma del resultado es correcta, el software analiza y registra la respuesta del modelo en frecuencia, suministrando una función de respuesta en frecuencia, una función de coherencia de los resultados obtenidos durante

la medida y las medias de las captaciones durante las diversas estimulaciones en el mismo punto, ver interface del software en Figura 6.19. En este ensayo se realizan tres medidas por punto de estimulación.

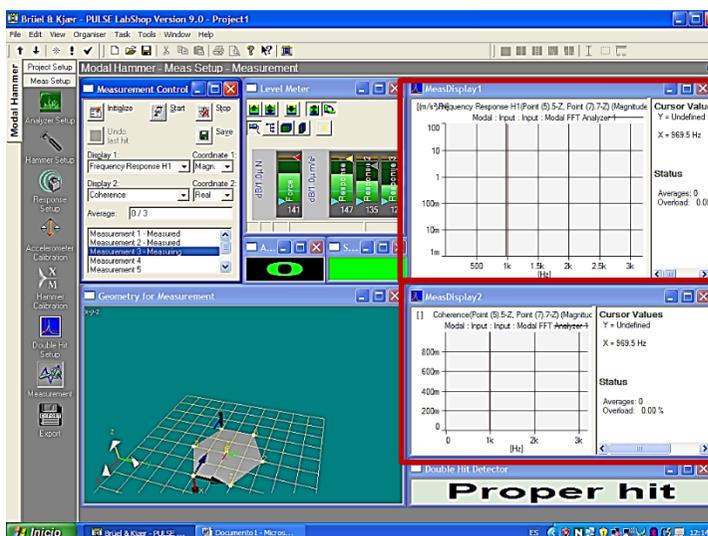


Figura 6.19. Interface del software utilizado para captura de datos

c) *Postprocesado*: a partir de las medidas realizadas, obtención del modelo modal, interpretación y validación del mismo.

Cada estimulación del modelo recoge su comportamiento en el rango frecuencial establecido obteniendo un gráfico de *amplitud de respuesta en frecuencia*, tal cual se muestra en la Figura 6.20.

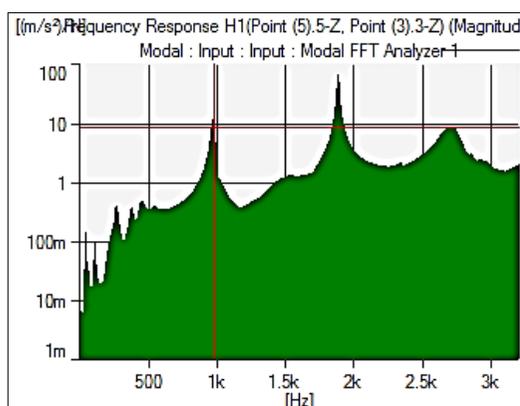


Figura 6.20. Visualización de función de respuesta en frecuencia

Otro parámetro que se extrae del análisis modal por el software es el término de *función coherencia*, que se define como la porción de la salida que está relacionada linealmente con la entrada. Esta función es real y toma valores entre 0 y 1, únicamente cobrando sentido cuando se hace el promedio de las

medidas, tres medidas por punto en el caso de este análisis. La función tendrá valor 1 en aquellos picos de resonancia de la estructura, es decir de cada una de las frecuencias naturales del sistema, ver Figura 6.21.

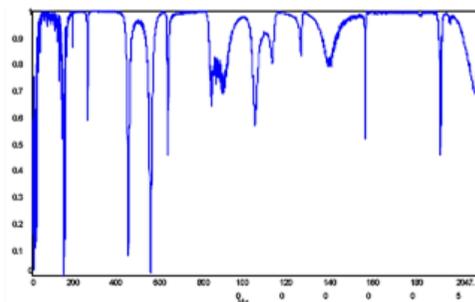


Figura 6.21. Función de coherencia

Una vez extraídos los parámetros modales es necesario realizar la validación de los mismos de acuerdo a unos criterios de aceptación de resultados obtenidos en la función de respuesta en frecuencia:

3. Todos los picos de resonancia que aparecen en los resultados deben tener la misma dirección, Figura 6.22 (a).
4. Deberá aparecer anti-resonancias entre dos resonancias consecutivas, Figura 6.22 (b).
5. Los cambios de fase han de ser de 180° , es decir en el diagrama de Bode frecuencial resultante deben aparecer desfase de 180° entre resonancias y anti-resonancias, de manera que ante resonancia las fases caigan 180° y viceversa, Figura 6.22 (c).

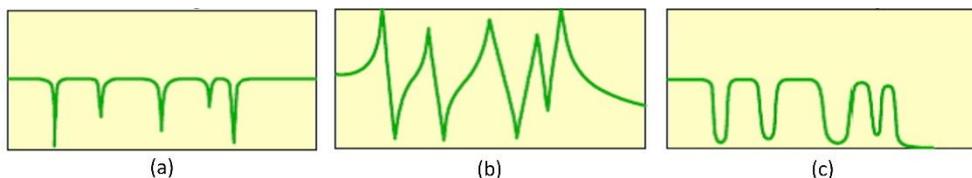


Figura 6.22. Ejemplos picos resonancia, anti-resonancia y desfase 180° - 180° entre resonancia y anti-resonancia

6.4.2 Resultados del ensayo modal experimental

Estableciendo el criterio antes descrito para la realización del ensayo, se llega a una serie de resultados acerca del modelo obteniendo los modos de vibración y las frecuencias naturales. Se observa que dentro del rango perceptible por los dispositivos de captación, frecuencia máxima 25000Hz, se registran tres picos de resonancias claros con los valores que se muestran en la Tabla 6.4.

Modo	Frecuencia (Hz)	Desfase (°)
1	964,5	163,8
2	991,9	180,8
3	1879	170,2

Tabla 6.4. Número de modos, frecuencias y desfases resultantes del análisis modal experimental

Destacar que con la realización del ensayo, únicamente se han captado tres frecuencias naturales con sus correspondientes modos de vibración. Dos de los primeros tres modos de vibración surgen a frecuencias muy próximas a los 1000Hz, y un tercero a frecuencias cercanas a los 2000 Hz tal cual se muestran en las Figura 6.23 y Figura 6.24.

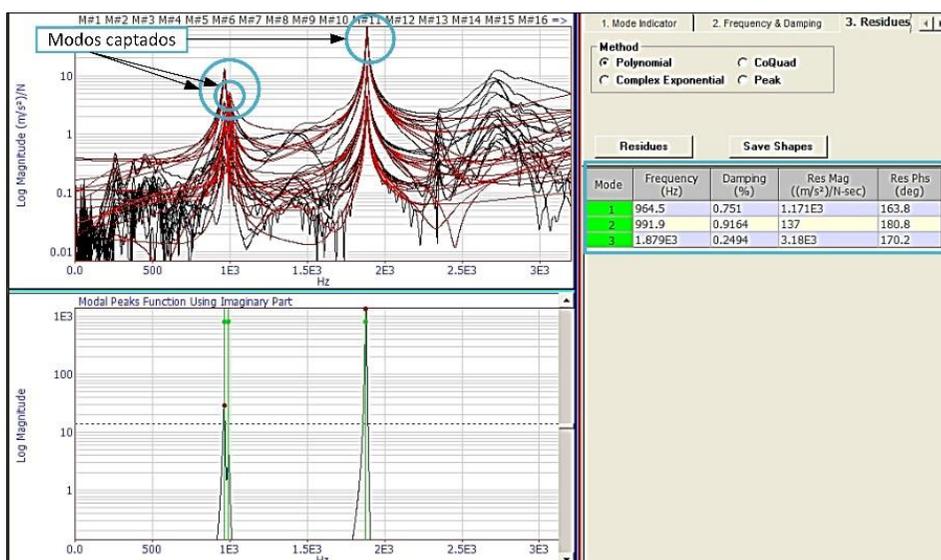


Figura 6.23. Función de respuesta en frecuencia del ensayo modal resultante

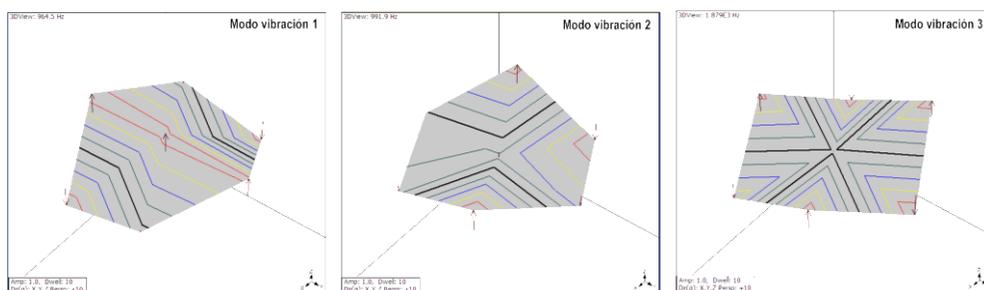


Figura 6.24. Modos de vibración: modo 1 (964,5 Hz), modo 2 (991,9 Hz) y modo 3 (1879 Hz)

En comparación con los análisis realizados con el método de elementos finitos surgen discrepancias claras. Mediante el método computacional aparecen una serie de modos a frecuencias muy superiores a las captadas por el ensayo, superiores a los 1000000 Hz. En comparación con el modelo real, se obtienen tres modos a frecuencias muy inferiores, por debajo de los 2000 Hz, y posteriores modos no visibles con frecuencias por encima de rango de captación del dispositivo captador.

Por consiguiente, se puede afirmar que el modelo computacional generado es poco representativo de la realidad, resultando un modelo mucho más rígido de lo esperado y es necesario realizar una adaptación del mismo con el fin de obtener correlaciones entre el modelo real y el simulado. Otro aspecto que podría justificar las discrepancias entre el análisis realizado por elementos finitos y el análisis experimental, podría radicar en el propio ensayo experimental realizado. Es posible que se hayan captado únicamente los modos de vibración de la plataforma superior, es decir, los resultados vibratorios generados pueden solo determinar los modos de comportamiento en frecuencia de una parte no significativa del modelo real global, y por ello resultar discrepantes respecto a los simulados. Para ello, se realiza un análisis modal computacional del modelo simulado únicamente con la plataforma superior, con el fin de corroborar esta última hipótesis obteniendo los resultados mostrados en la Tabla 6.5 y Figura 6.25.

Modos	Frecuencia (Hz)
1	1170,3
2	1184
3	2211,9

Tabla 6.5. Resultados modales del análisis MEF Abaqus para plataforma superior

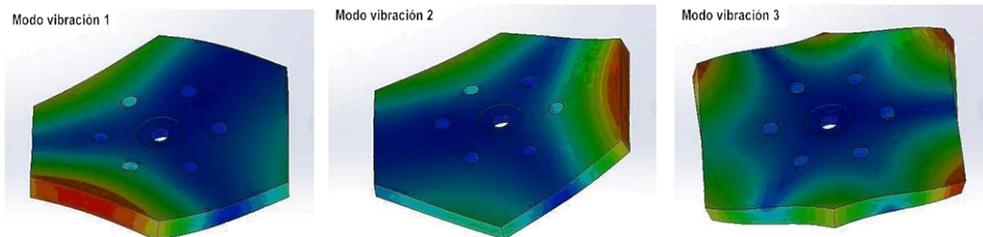


Figura 6.25. Modos de vibración MEF Abaqus Plataforma superior: modo 1 (1170,3 Hz), modo 2 (1184 Hz) y modo 3 (2211,9 Hz)

6.4.3 Conclusiones

Tras la realización del ensayo modal apoyado de la plataforma multi-registro con la disposición real de uso, se han obtenido una serie de frecuencias naturales distintas a las esperadas, dados los resultados obtenidos anteriormente con Abaqus en el análisis modal computacional. Como se mencionó en el apartado anterior, era de esperar una gran rigidez del sistema general con frecuencias del orden de 10^6 Hz. En comparación con el análisis computacional, los resultados experimentales recogen unas frecuencias del orden 10^3 Hz, es decir, tres órdenes de magnitud inferiores, dando la impresión de un

modelo computacional muy discrepante con el real dada las frecuencias tan reducidas en comparación con lo esperado. Surge en este caso la necesidad de observar si realmente el dispositivo durante la estimulación vibra en conjunto, ya que las frecuencias de vibración están estrechamente ligadas a la masa total del sistema.

De este modo, se plantea la posibilidad de que durante el ensayo se captase únicamente los modos y frecuencias naturales de la plataforma superior del conjunto, de menor masa y por tanto generando como resultado unas frecuencias naturales inferiores. Por este motivo, se realiza el análisis computacional exclusivamente de la parte superior del modelo, plataforma superior. Tras la realización del mismo, se corrobora el supuesto, dando como resultado unas frecuencias y modos de vibración que se ajustan a los obtenidos en el ensayo modal experimental y que se ajustan al comportamiento real de la plataforma multi-registro en frecuencia.

Para concluir, es importante mencionar que con los dispositivos existentes en laboratorio para la realización del ensayo experimental, no ha sido posible captar los modos globales del sistema y sus frecuencias, principalmente por las limitaciones de potencia durante la estimulación y el reducido rango de captación de frecuencias por los dispositivos, frecuencia máxima 25000 Hz. Una posible línea futura de trabajo para la continuación de este estudio, radicaría en la realización de un ensayo de captación de modos y frecuencias mediante la estimulación de la plataforma multi-registro sobre una mesa o bancada de vibración a tres ejes, donde con la potencia suficiente y con el hardware adecuados, se podría obtener una captura de todos los parámetros de vibración tales como frecuencias y modos.

6.5 Estimación de la incertidumbre de la plataforma multi-registro mediante simulación de Monte Carlo.

En este capítulo se realiza una estimación de la incertidumbre de la plataforma multi-registro utilizando el método de Monte Carlo. Según se indica en el suplemento de la GUM [89], la estimación de incertidumbres mediante propagación de distribuciones utilizando como herramienta el método de Monte Carlo, permite resolver este problema con modelos donde la magnitud de salida se describe mediante una variable real que se estima mediante una función modelo que depende de n magnitudes de entrada, pudiendo ser esta función modelo no lineal, no derivable o la magnitud de salida claramente asimétrica, Figura 6.26. Definiendo un número determinado de iteraciones, este procedimiento genera el valor más probable de la magnitud de salida con un intervalo de cobertura asociado que permite la definición de la incertidumbre del modelo.

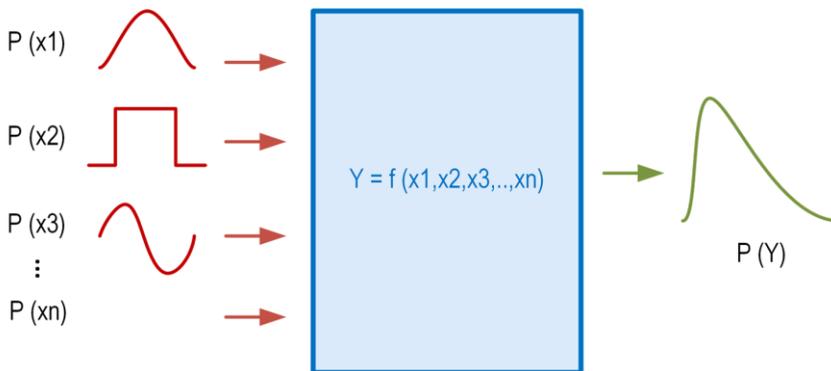


Figura 6.26. Propagación de distribuciones de variables de entrada a través del modelo de la plataforma multi-registro.

Para ello, se establecen las siguientes fases en la aplicación del método:

- Definición de la magnitud de salida.
- Definición de las magnitudes de entrada así como sus correspondientes distribuciones de probabilidad.
- Desarrollo del modelo matemático que vincule la salida y las entradas.
- Propagación de las distribuciones de las magnitudes de entrada a través del modelo planteado para obtener la distribución de salida.
- Estimación de la magnitud de salida, su incertidumbre y los intervalos de confianza.

6.5.1 Definición de variables de entrada del modelo

Para evaluar la incertidumbre de las variables de entrada del modelo, es necesario definir primero las entradas del modelo que serán en el caso en estudio, las posibles fuentes de error afectando a la incertidumbre de la plataforma: el error de calibración de la plataforma, el error del equipo de medición portátil, los sensores capacitivos integrados en la plataforma y la deformación que puede sufrir la plataforma debido al peso del equipo de medición portátil y al movimiento del mismo durante el procedimiento de medición.

El *procedimiento de calibración* de la plataforma utiliza un modelo matemático geométrico basado en las lecturas de seis sensores capacitivos y las características geométricas de los sensores capacitivos y sus correspondientes targets. Se utilizan como valores de medida los valores obtenidos por los seis sensores capacitivos de resolución nanométrica y como patrón los materializados por una máquina de medir por coordenadas (MMC), que se utilizarán para establecer correcciones a los resultados obtenidos en la medición. En ensayos de repetibilidad, se calculó el error de repetibilidad cometido por la MMC en la medición de las características geométricas de la plataforma durante la calibración, siendo el valor obtenido de $0.7 \mu\text{m}$. Adicionalmente, se evaluó durante la calibración el error de repetibilidad de posicionamiento mecánico de la plataforma alcanzado mediante los acoplamientos cinemáticos incluidos en la misma, presentando un valor máximo de $4 \mu\text{m}$. Con objeto de mejorar este error se incorporaron los sensores capacitivos de resolución nanométrica a la plataforma que permiten conocer con mayor precisión su posición.

El objetivo final de la calibración de la plataforma multi-registro es determinar a partir de las lecturas de los sensores capacitivos, una matriz de transformación que lleve las lecturas del sistema de referencia de la placa móvil al sistema de referencia de la placa fija pasando por el modelo matemático previamente mencionado, durante los procedimientos de verificación y calibración de equipos de medición por coordenadas portátiles. Una vez que se han obtenido todas las características geométricas en términos del sistema de referencia de la placa fija, se realiza una identificación de las características geométricas óptimas, que serán aquellas que minimicen la diferencia entre esta distancia y la lectura correspondiente del sensor capacitivo, utilizándose estas características geométricas óptimas en el procedimiento de verificación con la plataforma. Por lo tanto, el procedimiento de verificación utilizando la plataforma multi-registro estará afectado por el propio error de calibración cometido en la misma, pero debido a que la magnitud de este error es muy pequeña comparada con otras fuentes de error a tener en consideración, no se incluye el error de calibración como variable de entrada en el método de Monte Carlo aplicado en este trabajo para la estimación de la incertidumbre de la plataforma.

Todo *equipo de medición portátil*, bien brazo articulado de medición por coordenadas o láser tracker, presenta un error que afecta al procedimiento de verificación. En el caso del brazo articulado de medición por coordenadas empleado, modelo Faro Platinum, los errores de medición indicados por el fabricante son $\pm 43 \mu\text{m}$ en precisión volumétrica y $30 \mu\text{m}$ en repetibilidad de punto. Para el láser tracker utilizado durante el procedimiento de verificación, modelo API T3 15m, los datos reportados por el fabricante indican una precisión angular de $3.5 \mu\text{m}/\text{m}$, precisión en distancia (ADM) de $\pm 15 \mu\text{m}$ y precisión en distancia con interferómetro de $\pm 0.5 \text{ ppm}$. Estos errores influyen en la incertidumbre final del proceso de verificación utilizando la plataforma multi-registro, en la generación de la matriz de transformación homogénea del sistema de referencia del equipo portátil de medición a la plataforma superior. Esta matriz se obtiene mediante la medición con el instrumento portátil de medición, de las tres esferas de referencia situadas en la plataforma superior, estando por lo tanto también afectada esta medición del propio error del equipo. Para la optimización del proceso de obtención de esta matriz de transformación homogénea, se considera importante resaltar como futuro trabajo la obtención de esta matriz contrastando la medición realizada con el equipo portátil, brazo articulado o láser tracker, con la medición de las esferas realizada con una máquina de medición por coordenadas, de manera que permitiera la corrección del error cometido por el instrumento y se optimizase la matriz de transformación a incluir en el modelo. Sin embargo, debido a que el objetivo de este apartado es la estimación de la incertidumbre de la plataforma multi-registro únicamente, sin instrumento de medición portátil colocado sobre ella, se obviará en la simulación por Monte Carlo la introducción del error del equipo de medición como entrada del modelo.

La *deformación sufrida por la plataforma*, bien debido al peso de instrumento y/o al movimiento del mismo durante el proceso de verificación, puede afectar claramente al error introducido por la propia plataforma. Sin embargo, tal cual se ha visto en el apartado 6.3, la plataforma es extremadamente rígida, con lo cual no se vería afectada por estas deformaciones. Por lo tanto, se descarta su inclusión como entrada del modelo propuesto.

La última fuente de error que se ha tenido en consideración en este análisis, son los errores de los *sensores capacitivos* integrados en la plataforma multi-registro. Serán las lecturas realizadas por los seis sensores capacitivos aquellas que se consideren en este análisis como entradas del modelo.

Los sensores capacitivos utilizados en este trabajo son seis sensores modelo Lion Precision C5-E con número de serie 090508-06 y driver modelo CD de seis canales con número de serie 090508-06. Según las especificaciones del fabricante de los sensores, Lion Precision, los sensores están afectados por una serie de errores que generan variaciones de la medida real del sensor, siendo los principales errores a considerar los que se resumen a continuación:

- *Error de sensibilidad*: la sensibilidad indica cuanto cambia el voltaje de salida como resultado de un cambio en la distancia entre el target y el sensor. La pendiente de la recta es la sensibilidad, en este caso $1V/0.05mm$. El error de sensibilidad se presenta generalmente como un porcentaje de la pendiente, comparando la pendiente ideal con la pendiente real, ver Figura 6.27.

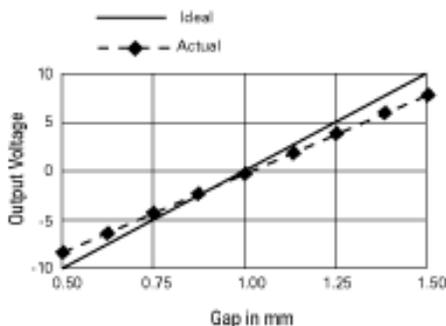


Figura 6.27. Error de sensibilidad del sensor capacitivo (fuente: Lion Precision)

- *Error de Offset*: este tipo de error surge cuando se añade un valor constante de la tensión de salida del sistema, ver Figura 6.28. Estos errores surgen de la influencia de factores tales como la temperatura, para lo cual el fabricante añade una compensación para mantener el error por debajo de $0,04\% FS / ^\circ C$.

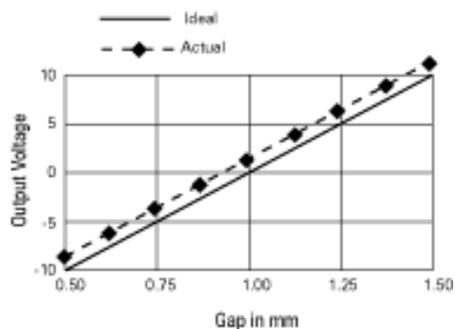


Figura 6.28. Error de offset del sensor capacitivo (fuente: Lion Precision)

○ *Error de linealidad*: la sensibilidad del sensor puede variar ligeramente entre dos puntos y esta variación es definida como error de linealidad. Para ello, se comparan los datos de calibración con la línea recta que mejor se ajusta a los puntos, ver Figura 6.29. Esta recta de referencia se calcula mediante un ajuste de mínimos cuadrados a partir de los datos de calibración. El error de linealidad se expresa habitualmente en términos de porcentaje de la escala completa siendo el error de linealidad, el error del punto de la curva de calibración que se encuentra más alejado de la línea ideal. Por ejemplo, si el mayor error es 0,001 mm y el rango de la escala completa de la calibración es 1 mm, el error de linealidad sería del 0,1%.

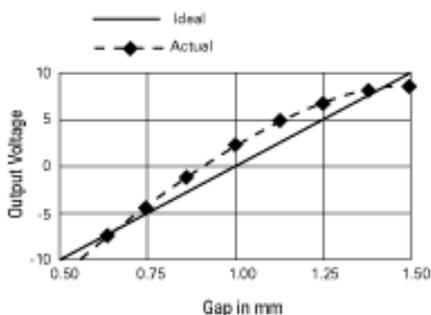


Figura 6.29. Error de linealidad del sensor capacitivo (fuente: Lion Precision)

○ *Error de banda*: representa la combinación de errores de linealidad y sensibilidad. Es la medida del error absoluto en el rango calibrado. La banda de error se calcula comparando los voltajes de salida con el valor esperado. El error más desfavorable de esta comparación se toma como error de banda del sensor y es expresado por el fabricante como un valor en % de la medida realizada por el sensor. En este trabajo, se tomará el error de banda como error representativo a introducir en las medidas simuladas de los sensores para el análisis de Monte Carlo, ya que es un dato que el fabricante da en el certificado de calibración y combina los errores de sensibilidad y linealidad. Asumiendo una distribución normal y considerando el rango de medida de los sensores 100 μm , es posible simular el error de banda de un sensor como se muestra en la Figura 6.30, correspondiente al error de banda del sensor 1, con un valor de 0,013% aplicado al rango de medida del sensor de 100 μm para 100.000 iteraciones.

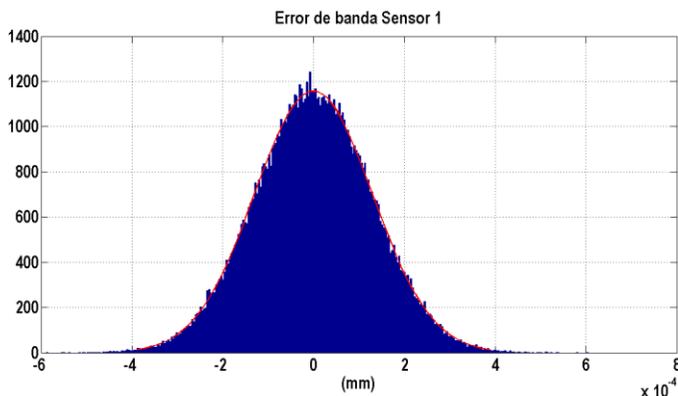


Figura 6.30. Simulación error de banda sensor capacitivo 1, n-iteraciones = 100.000

○ *Resolución*: se tiene también en consideración en este análisis, la resolución del sensor capacitivo definida como la mínima medida que el sistema pueda realizar, siendo el ruido del sensor un factor determinante en su resolución. El ruido en el voltaje de salida genera pequeños errores instantáneos en la salida. En el certificado de calibración el fabricante indica dos valores de resolución o ruido de salida para cada uno de los sensores, resolución pico a pico y resolución media (RMS). La resolución pico a pico se define como el mayor valor de voltaje pico a pico registrado para un periodo de tiempo lo suficientemente largo para incluir componentes de baja frecuencia. En el caso del valor medio de resolución (RMS) el fabricante la define como la desviación estándar de los voltajes de salida muestreados durante un periodo de tiempo suficientemente largo para incluir componentes de baja frecuencia. En este análisis se incluirá el valor de la resolución media (RMS) para introducir el ruido del propio sensor en las entradas simuladas correspondientes a las lecturas de los sensores capacitivos.

Una vez descritos los principales errores relativos a los sensores capacitivos, es importante explicar que los sensores capacitivos empleados en este trabajo, modelo Lion Precision C5-E, fueron calibrados por el propio fabricante generando el correspondiente certificado de calibración. El fabricante calibró el equipo conforme a la normativa aplicable ISO Q10012-2003, sección 7.1.4 obteniendo una serie de valores de error previamente descritos. Estos valores de error se utilizarán para afectar las señales de entrada simuladas correspondientes a las lecturas de los sensores la simulación por Monte Carlo que se lleva a cabo en este trabajo. Los parámetros de calibración considerados por el fabricante se muestran en la Tabla 6.6. Los resultados obtenidos en la calibración de los sensores que se consideran más representativos para su inclusión en la simulación de las entradas de lecturas de los sensores capacitivos a realizar con Monte Carlo se incluyen en la Tabla 6.7.

Parámetros calibración	
Salida	10 a -10 VDC
Near gap	100 μm
Rango	100 μm
Sensibilidad	0.2 V/μm
Ancho de banda	6000 Hz

Tabla 6.6. Parámetros de calibración sensores capacitivos (fuente: Lion Precision)

Sensor ID	Resolución pico a pico (nm)	Resolución RMS (nm)	Error de banda (%)	Error de linealidad (%)
1	59.28	6.85	0.13	0.07
2	76.95	8.90	0.15	0.08
3	76.06	8.79	0.13	0.13
4	55.48	6.41	0.08	0.08
5	75.09	8.68	0.10	0.10
6	82.31	9.52	0.16	0.11

*) Temperatura: 24.2°C. Humedad: 35.5% RH

Tabla 6.7. Resultados de calibración sensores capacitivos (fuente: Lion Precision)

Adicionalmente es importante destacar, que el ruido del sensor se caracterizó de manera experimental mediante la realización de capturas en continuo de cada uno de los seis sensores capacitivos, para cada una de las seis posiciones de la plataforma multi-registro, en diferentes condiciones de ensayo que se indican a continuación:

1. Plataforma con precarga de 4 bar.
2. Plataforma con brazo articulado de medición encima en estático con precarga de 4 bar.
3. Plataforma con brazo articulado de medición encima en dinámico con precarga de 4 bar.

En el ensayo 1 se realizan las capturas en continuo únicamente con la plataforma multi-registro aplicando la precarga de 4 bar sin ningún instrumento de medición portátil encima, mientras que el ensayo 2 pretende analizar cómo afecta el peso del propio brazo a la plataforma y a la captura de los sensores capacitivos. Finalmente el ensayo 3 persigue estudiar cómo afecta el peso y movimiento del brazo a la plataforma, definiéndose para ello una secuencia fija de movimiento tomando tres puntos sobre un patrón virtual situado en un sector del volumen de trabajo de la plataforma.

Durante los diferentes ensayos se registraron 1000 capturas por segundo durante los 20 segundos que dura el ensayo, obteniéndose por lo tanto un total de 20000 datos capturados por sensor y posición (1-6) de la plataforma. Un ejemplo de las seis capturas en continuo realizadas para los seis sensores capacitivos en el ensayo en estático de la plataforma, con precarga de 4 bar y posición 1 de la misma se incluyen en la Figura 6.31 a continuación.

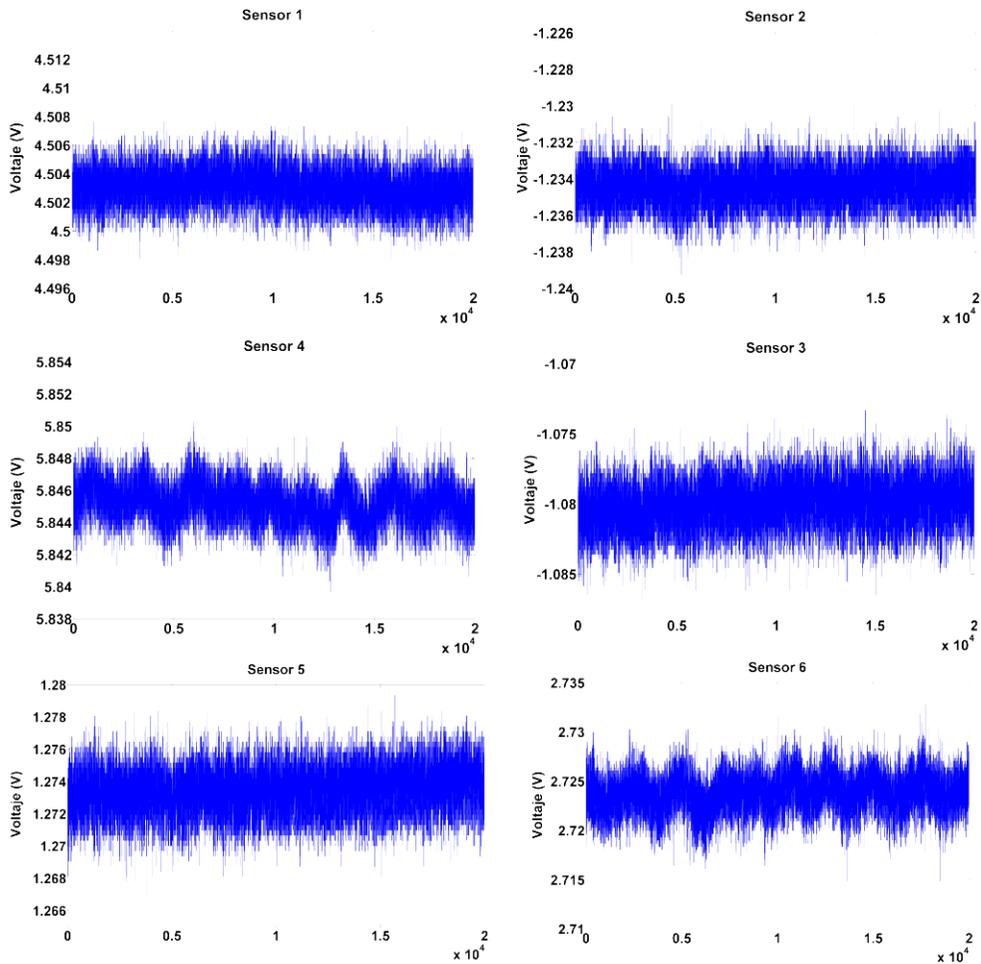


Figura 6.31. Captura en continuo sensores capacitivos (1-6), plataforma en estático, precarga 4 bar, posición plataforma 1.

A partir de estas capturas en continuo para cada uno de los sensores, se ajustaron los 20.000 datos registrados por sensor y ensayo a una función de distribución de probabilidad normal, de manera que se pudo obtener los parámetros característicos del ajuste a una distribución gaussiana con media μ y desviación estándar σ . En el ejemplo mostrado a continuación, ver Figura 6.32, se utilizan los datos procedentes del ensayo con la plataforma en estático con una precarga aplicada de 4 bar y plataforma en la posición 1 que han sido análogamente graficados para cada sensor capacitivo (1-6) en la Figura 6.31. Los valores se muestran en desplazamiento (μm) tras realizar una conversión del valor obtenido en la captura en continuo del sensor en voltaje (V).

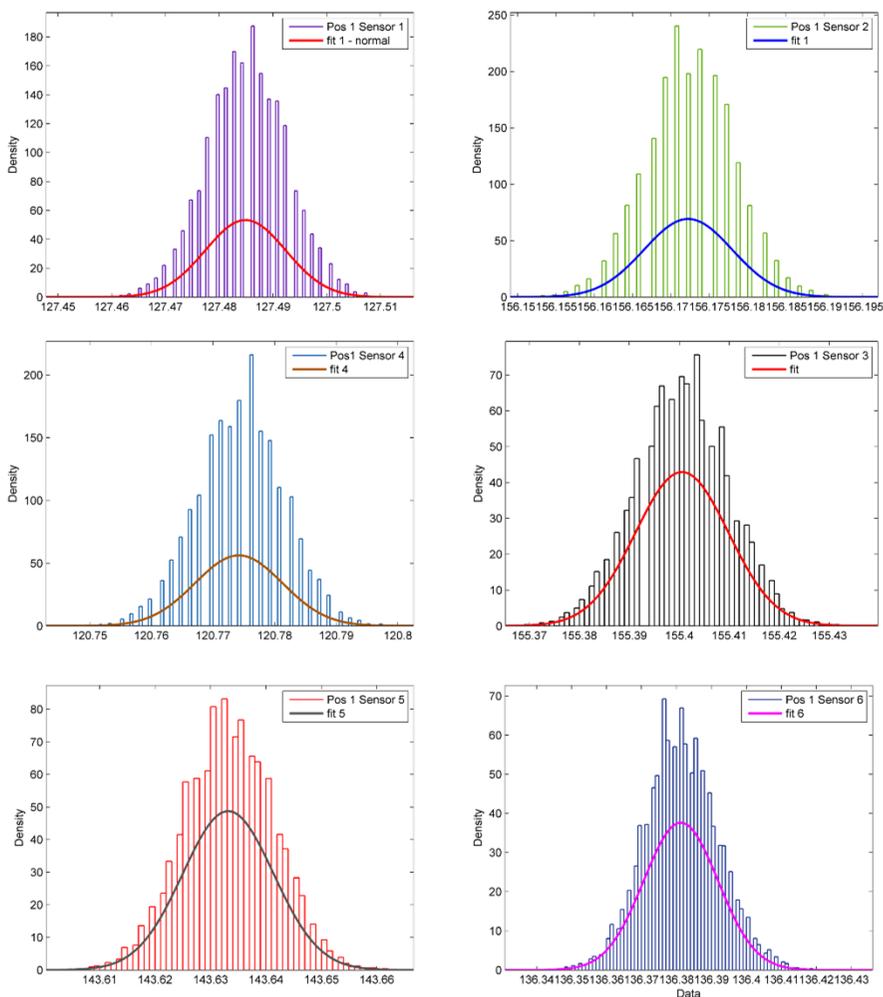


Figura 6.32. Ajustes función de probabilidad normal para capturas en continuo sensores capacitivos (1-6), plataforma en estático, precarga 4 bar, pos 1.

Los valores de media y desviación estándar obtenidos en el ajuste probabilístico normal para los datos en continuo registrados en el ensayo mencionado en el párrafo anterior se incluyen en la siguiente Tabla 6.8:

Sensor ID	Media (μm)	Desviación estándar (μm)
1	127.4849	0.0075
2	156.1722	0.0058
3	155.4005	0.0093
4	120.7742	0.0071
5	143.6332	0.0082
6	136.3812	0.0106

Tabla 6.8. Parámetros ajuste datos en continuo sensores función de distribución normal

Observando los valores de desviación estándar obtenidos en el análisis experimental para cada sensor capacitivo mostrados en la Tabla 6.8 y los valores de resolución media RMS incluidos en el certificado de calibración del fabricante Tabla 6.7, se observan que los valores están en el mismo rango tal y como se muestra en la Figura 6.33.

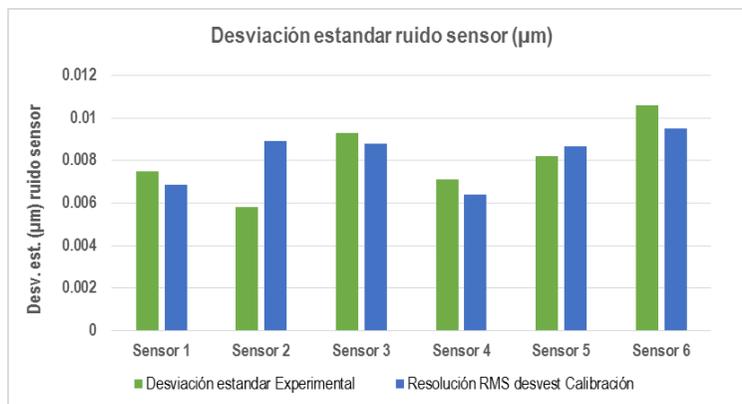


Figura 6.33. Comparativa datos de calibración y resultado experimental de desviación estándar del ruido generado por los sensores capacitivos (1-6), plataforma en estático, precarga 4 bar, pos 1.

Los valores nominales de lecturas de los sensores capacitivos que se toman como entradas y que serán afectados del ruido y error de banda caracterizado de los sensores, corresponden a las capturas realizadas durante la medición de un punto, sobre una esfera de un patrón de bolas en un ensayo de verificación de brazo articulado de medición con plataforma multi-registro para una posición de la plataforma y una posición del patrón. En este trabajo se capturaron datos para tres posiciones de la plataforma (1/3/6), una posición del patrón denominada Barra Lejos que se muestra en la Figura 6.36, y tres esferas por posición del patrón (1/2/5). Se realizaron cinco mediciones de puntos por esfera, capturándose simultáneamente las lecturas de los sensores capacitivos.

A modo de ejemplo, se incluye en la Tabla 6.9 un listado de lecturas nominales de los seis sensores capacitivos para la posición 1 de la plataforma, posición patrón Barra Lejos, esfera 1 y primer punto medido.

Sensor ID	Lectura nominal sensor (µm)
1	108.5137
2	125.4271
3	144.3024
4	118.7031
5	148.8462
6	109.1777

Tabla 6.9. Lecturas nominales sensores capacitivos

A estas lecturas nominales para cada sensor capacitivo, se les sumará un valor aleatorio dentro del rango definido por el error de banda correspondiente del sensor y el ruido, ambos datos registrados en

el certificado de calibración del fabricante que se resumen en la anterior Tabla 6.7. Como resultado, se incluye en las Figura 6.34 y Figura 6.35 la distribución de lecturas de cada uno de los sensores capacitivos (1-6) consideradas como parámetros de entrada del modelo de simulación por Monte Carlo, afectadas del error de banda del sensor y el propio ruido del sensor para 100 iteraciones y 100000 iteraciones. Se observa claramente que al aumentar el número de iteraciones, el valor medio de la distribución se aproxima cada vez más al valor nominal de lectura de los sensores indicado en la Tabla 6.9 y que los datos se ajustan más claramente a una distribución de probabilidad normal reflejada en la campana en rojo en las gráficas.

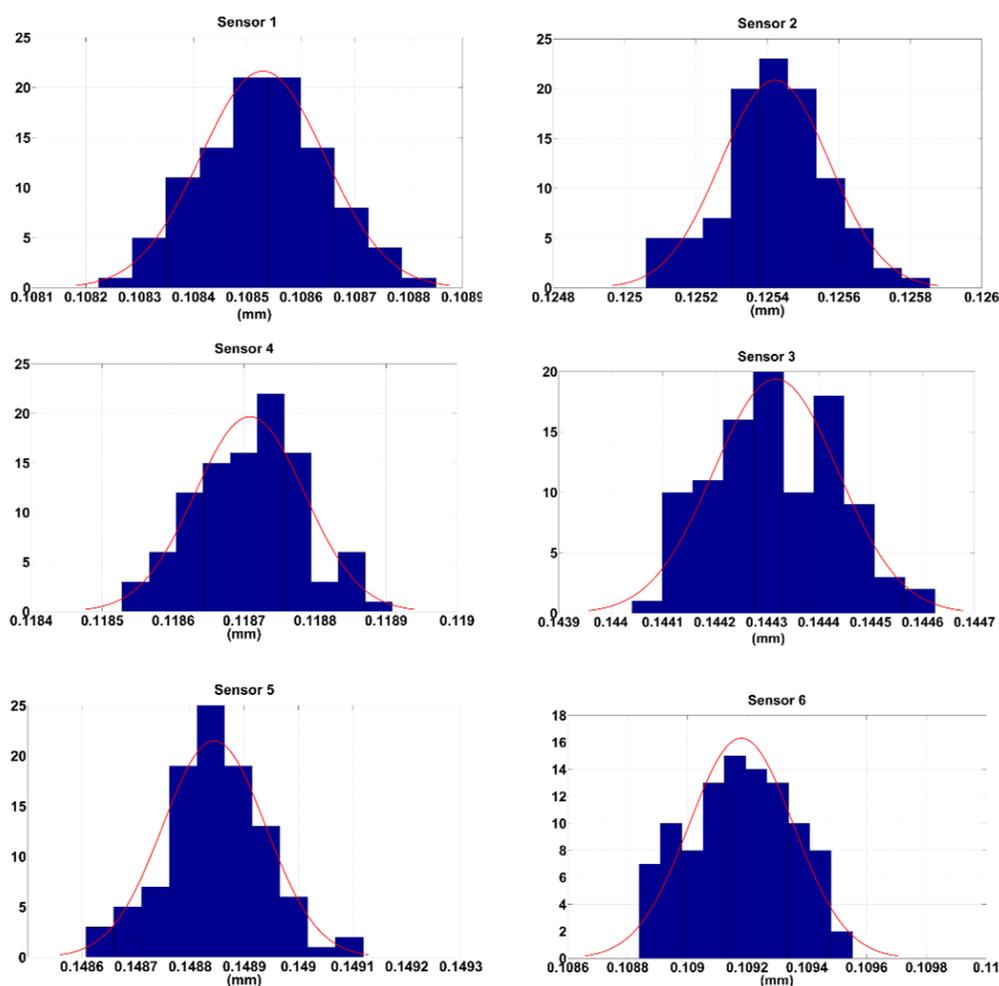


Figura 6.34. Entradas del modelo distribución lecturas sensores capacitivos (1-6), posición plataforma 1, posición patrón Barra Lejos, esfera 1, punto 1. n-iteraciones 100

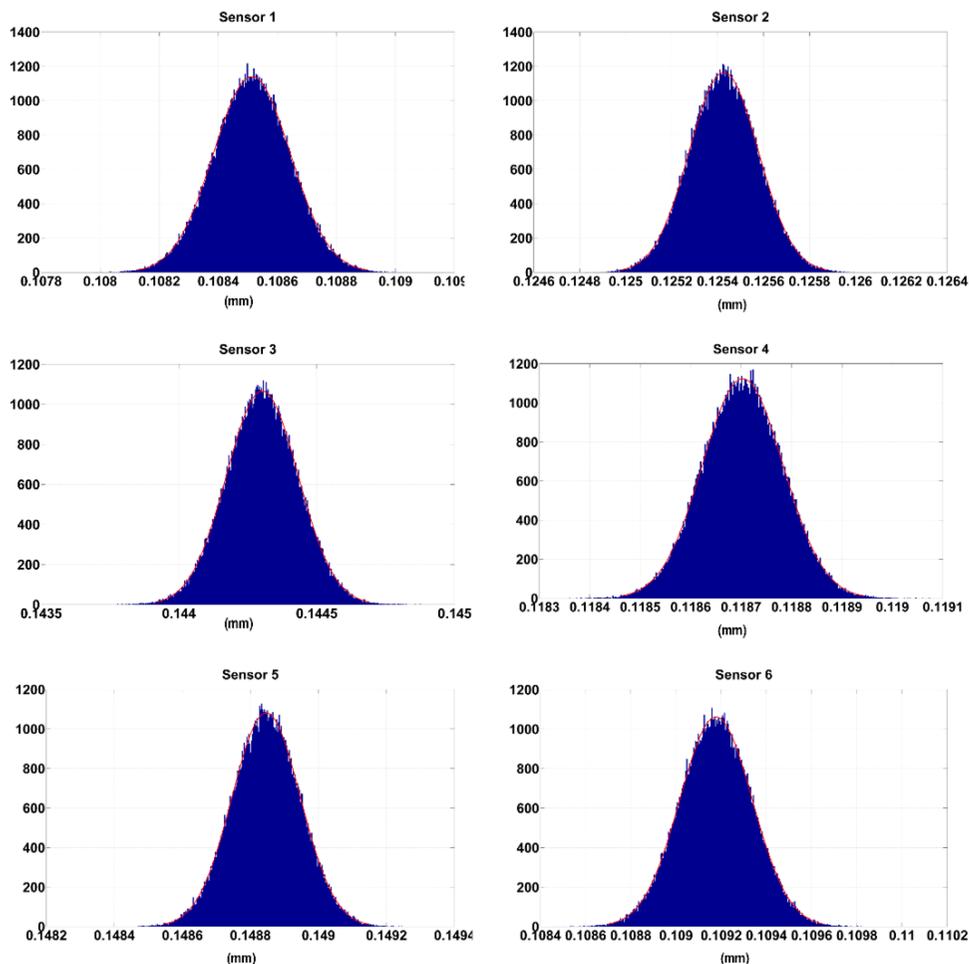


Figura 6.35. Entradas del modelo distribución lecturas sensores capacitivos (1-6), posición plataforma 1, posición patrón Barra Lejos, esfera 1, punto 1, n-iteraciones 100.000

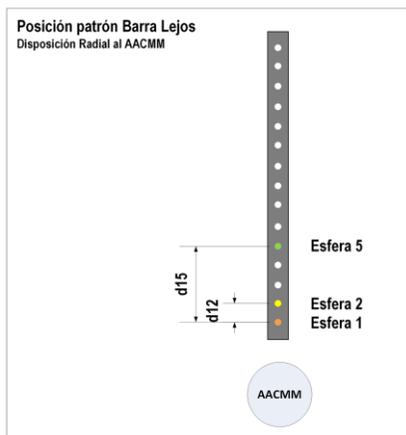


Figura 6.36. Disposición patrón posición Barra Lejos y brazo articulado de medición en captura de datos

6.5.2 Definición de variables de salida del modelo

Las variables de salida del sistema van a ser en este caso la n-matrices de transformación homogéneas que realizan el cambio de sistema de referencia de plataforma superior a plataforma inferior pasando por el modelo de verificación de la plataforma multi-registro explicado en el capítulo 3.6.1 Este modelo matemático, permite encontrar las matrices de transformación homogéneas para expresar los puntos capturados en el objeto patrón, en un sistema de coordenadas global o sistema de referencia de la plataforma inferior, utilizando la lectura de los sensores capacitivos en la verificación y el conjunto de datos obtenidos del procedimiento de calibración. La matriz de transformación homogénea tendrá unos términos de traslación (XYZ) y rotación (ABC) que serán considerados como parámetros de salida del sistema:

- X→ Posición respecto al eje X
- Y→ Posición respecto al eje Y
- Z→ Posición respecto al eje Z
- A→ Giro respecto al eje X
- B→ Giro respecto al eje Y
- C→ Giro respecto al eje Z

Teniendo en consideración las n-iteraciones a realizar en la ejecución de la simulación por Monte Carlo, el resultado de salida será una matriz nx6 con tantas filas como número de iteraciones realizadas, ver la ecuación (6-1).

$$\begin{pmatrix} x_i & \dots & C_i \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_n & \dots & C_n \end{pmatrix} \quad (6-1)$$

Los n-valores obtenidos para cada parámetro de salida correspondiente a cada término de la matriz de transformación, pueden ajustarse a una función de distribución obteniendo de este modo un valor medio del parámetro, así como un valor de incertidumbre con los intervalos de confianza asociados, siendo las entradas al modelo L1- L6 las lecturas simuladas correspondientes a los seis sensores capacitivos, tal y como se muestra en la Figura 6.37.

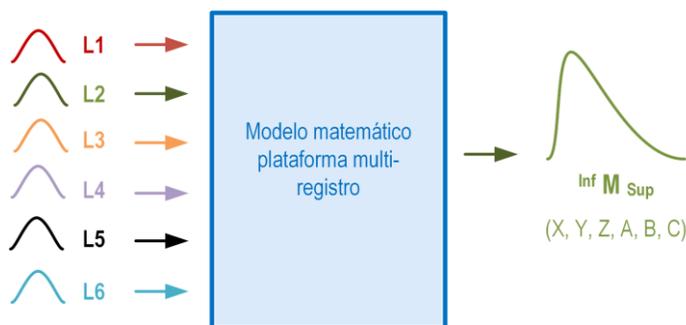


Figura 6.37. Propagación de distribuciones de variables de entrada a través del modelo de la plataforma multi-registro y generación de variables de salida.

A partir de esas n-matrices homogéneas de transformación que pasan de sistema de referencia plataforma superior a plataforma inferior, es posible tomando un punto con coordenadas (x,y,z) medido con el brazo articulado de medición sobre una esfera, para una posición determinada del patrón y posición de la plataforma y expresado en sistema de referencia brazo, obtener n-puntos con coordenadas (x,y,z) expresados en sistema de referencia plataforma inferior o sistema de referencia global. De este modo, se puede ver la influencia de la incertidumbre de la plataforma en la generación de puntos en un sistema de referencia global. Adicionalmente teniendo en cuenta m-puntos palpados por esfera en sistema de referencia brazo, es posible obtener a partir de los n-puntos obtenidos para cada uno de los m-puntos palpados por esfera y expresados en sistema de referencia plataforma inferior, los centros de las n-esferas correspondientes así como la distancia entre centros de esas esferas, observando consecuentemente la influencia de la incertidumbre de la plataforma en la medición de una distancia entre los centros de las n-esferas generadas. Todos estos conceptos se reflejan de una forma gráfica en el esquema de la Figura 6.38.

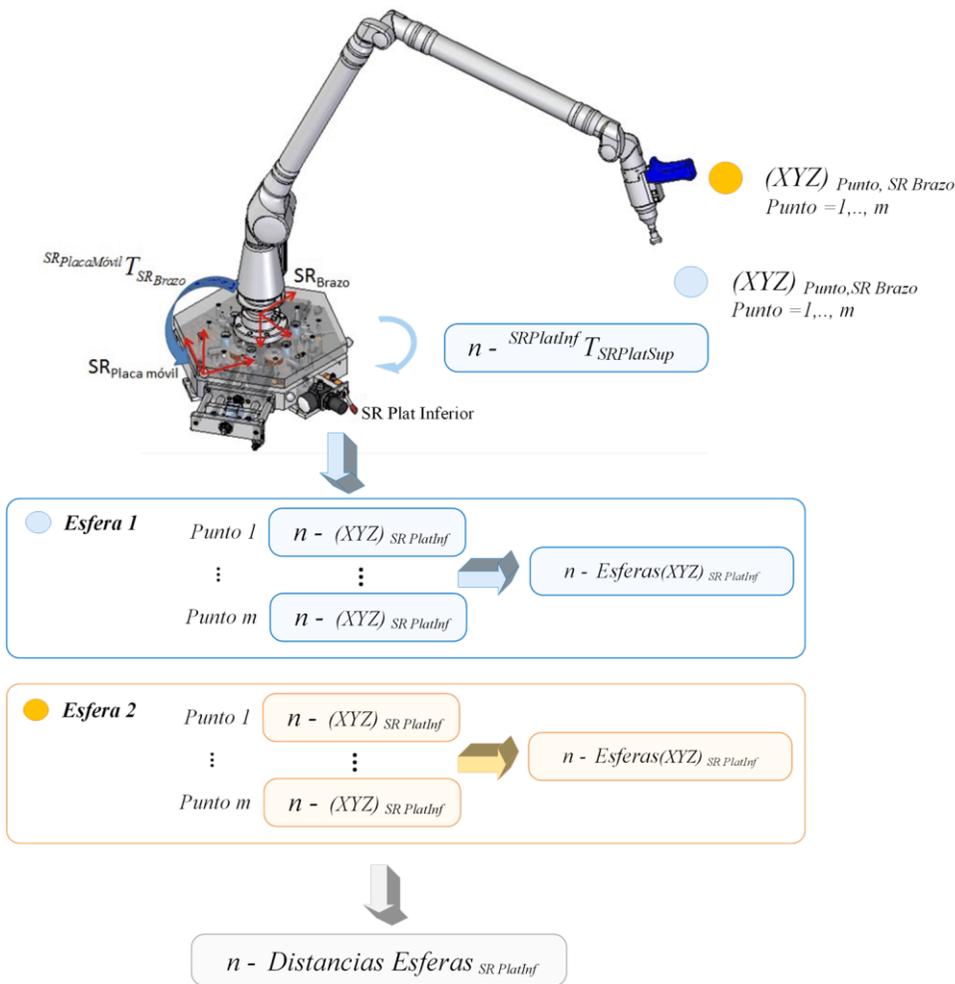


Figura 6.38. Esquema de estimación de incertidumbre de plataforma multi-registro.

6.5.3 Resultados de estimación de incertidumbre

Los resultados obtenidos después de la simulación para un número de n-iteraciones, muestran como variables de salida las n-matrices homogéneas de transformación que permiten el cambio de sistema de referencia de plataforma superior a plataforma inferior en la plataforma multi-registro pasando por el modelo de verificación de la plataforma. De este modo, es posible realizar una estimación de la incertidumbre de la plataforma multi-registro para una determinada posición de la misma y considerando un único punto palpado en este caso por el brazo articulado de medición.

Tomando como referencia las lecturas de los sensores capacitivos correspondientes al punto1, de la esfera 1, en posición del patrón Barra Lejos y posición 1 de la plataforma, para un número de 10000 iteraciones se obtienen los siguientes términos de traslación (XYZ) y rotación (ABC) de las 10000 matrices obtenidas como los parámetros de salida del sistema. Se calculan los siguientes valores medios, máximos, mínimos, límite superior e inferior del intervalo de confianza al 95% e incertidumbre reflejada como una desviación estándar que se muestran en las Tabla 6.10.

<i>Matrices de transformación Plat Sup - Inf (Esfera 1 / Punto 1 / PosPlat 1 / Barra Lejos)</i>							
	Nominal	Media	Incertidumbre	Max	Min	U. bound (95%)	L. bound (95%)
X (mm)	-0.13500	-0.13502	0.01996	-0.13494	-0.13510	-0.13498	-0.13506
Y (mm)	196.61710	196.61707	0.04489	196.61724	196.61691	196.61716	196.61698
Z (mm)	40.84180	40.84181	0.04965	40.84200	40.84159	40.84190	40.84171
A (°)	179.99880	179.99879	0.02057	179.99888	179.99871	179.99883	179.99875
B (°)	0.01940	0.01941	0.01677	0.01948	0.01935	0.01944	0.01938
C (°)	60.05620	60.05621	0.01159	60.05625	60.05616	60.05623	60.05618

Tabla 6.10. Incertidumbre de posición y orientación plataforma multi-registro en matrices de transformación homogéneas plataforma superior a inferior, esfera 1, punto 1, n-iteraciones 10000.

Para un punto capturado de una esfera determinada, posición del patrón y posición de la plataforma, es posible analizar el efecto de la incertidumbre de la plataforma en la generación de la matriz de transformación de la plataforma superior a plataforma inferior, y que permite por lo tanto expresar un punto capturado por el brazo en sistema de referencia plataforma inferior. La Figura 6.39 muestra todos los posibles valores de los términos de traslación XYZ y orientación ABC de las 10000 matrices homogéneas de transformación, que pueden obtenerse con la plataforma multi-registro en el cambio de sistema de referencia plataforma superior a inferior, para un punto palpado por el brazo articulado de medición. Igualmente se muestra en la Figura 6.40 los elipsoides de incertidumbre que se generan con los posibles valores de traslación de la matriz XYZ y sus proyecciones correspondientes.

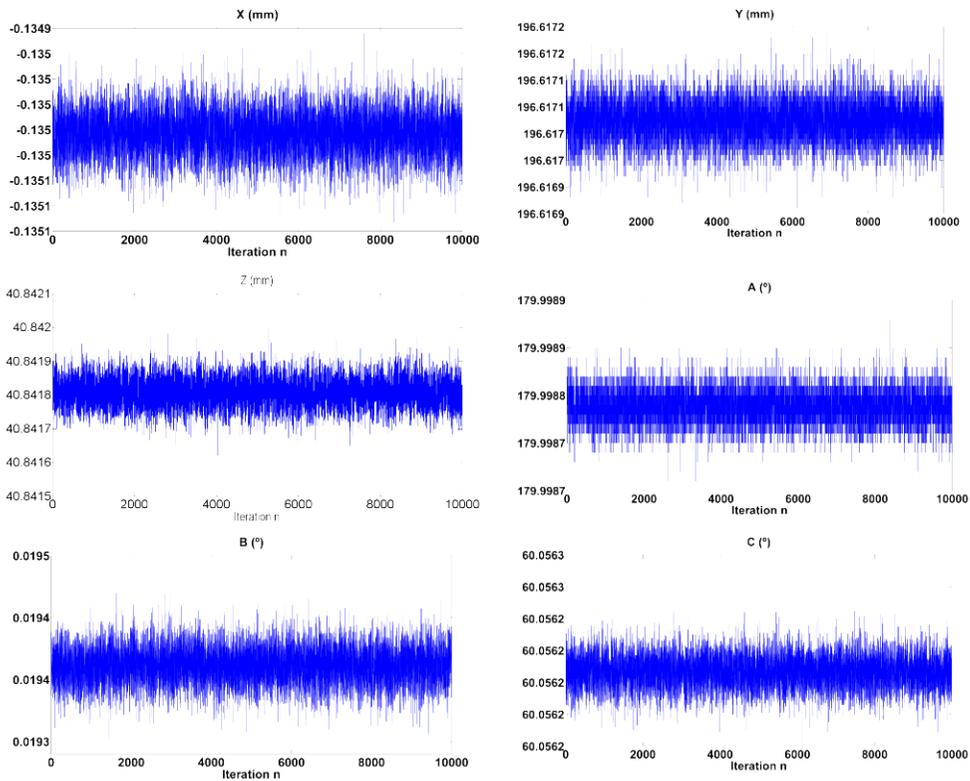


Figura 6.39. Posibles valores de términos de traslación XYZ y rotación ABC de matriz de transformación homogénea de cambio de sistema referencia superior a inferior, n-iteraciones 10000.

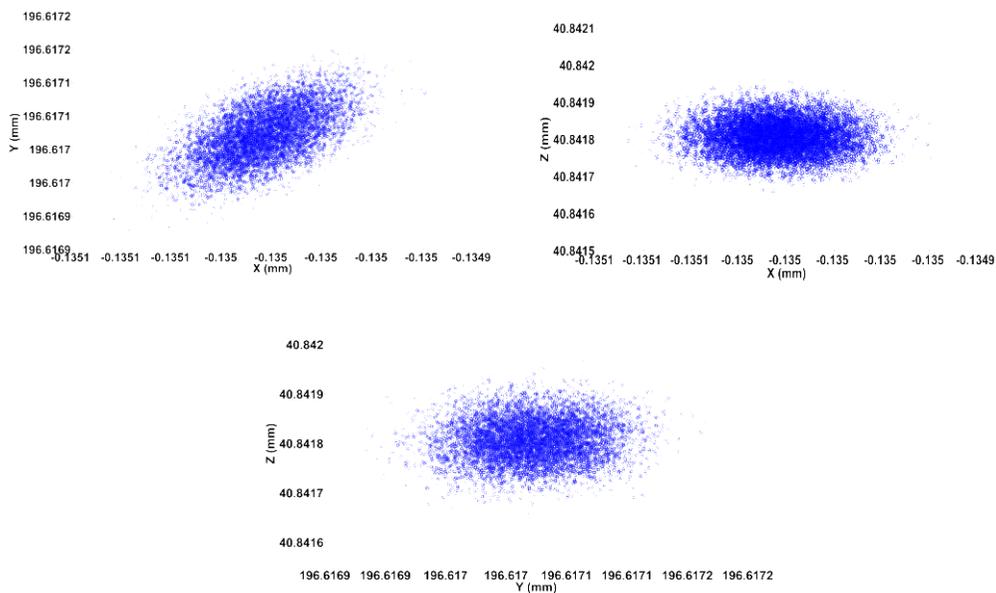


Figura 6.40. Posibles valores de términos de traslación XYZ y rotación ABC de matriz de transformación homogénea de cambio de sistema referencia superior a inferior, n-iteraciones 1000.

- *Evaluación de la incertidumbre de la plataforma en la generación de un punto en sistema de referencia plataforma Inferior*

A partir de esas n-matrices homogéneas de transformación que pasan de sistema de referencia plataforma superior a plataforma inferior, es posible tomando un punto con coordenadas (x,y,z) medido con el brazo articulado de medición sobre una esfera, para una posición determinada del patrón y posición de la plataforma y expresado en sistema de referencia brazo, obtener n-puntos con coordenadas (x,y,z) expresados en sistema de referencia plataforma inferior o sistema de referencia global. De este modo se puede ver la influencia de la incertidumbre de la plataforma en la obtención de puntos medidos en un sistema de referencia global, tal y como se muestra en la Figura 6.38. A partir de las n- matrices de transformación obtenidas con valores mostrados en la Tabla 6.10 y dado un punto de la esfera 1 con coordenadas (x,y,z) expresadas en sistema de referencia brazo, se obtienen n-puntos correspondientes al punto de la esfera 1 capturado y expresados todos ellos en sistema de referencia plataforma inferior tras haber sido calculados a través del modelo matemático de la plataforma multi-registro. Para un caso de 10000 iteraciones y cinco puntos capturados para la esfera 1 del patrón colocado en la posición Barra Lejos y la plataforma multi-registro en la posición 1, los resultados obtenidos son los siguientes:

Punto 1 – Esfera 1 (PosPlat 1 / Barra Lejos)							
	Nominal	Media	Incertidumbre (μm)	Max	Min	U. bound (95%)	L. bound (95%)
X (mm)	-57.34600	-57.34600	0.23224	-57.34517	-57.34703	-57.34645	-57.34554
Y (mm)	687.25450	687.25450	0.26270	687.25552	687.25333	687.25398	687.25501
Z (mm)	744.99564	744.99564	0.19425	744.99640	744.99492	744.99526	744.99602

Tabla 6.11. Incertidumbre de la plataforma multi-registro en la generación de punto 1, esfera 1 en sistema de referencia plataforma inferior, n- iteraciones 10000.

Punto 2 – Esfera 1 (PosPlat 1 / Barra Lejos)							
	Nominal	Media	Incertidumbre (μm)	Max	Min	U. bound (95%)	L. bound (95%)
X (mm)	-62.03535	-62.03535	0.23086	-62.03438	-62.03627	-62.03580	-62.03489
Y (mm)	699.27579	699.27579	0.25906	699.27678	699.27469	699.27528	699.27629
Z (mm)	733.34541	733.34541	0.19850	733.34622	733.34475	733.34502	733.34580

Tabla 6.12. Incertidumbre de la plataforma multi-registro en la generación de punto 2, esfera 1 en sistema de referencia plataforma inferior, n- iteraciones 10000.

Punto 3 – Esfera 1 (PosPlat 1 / Barra Lejos)							
	Nominal	Media	Incertidumbre (μm)	Max	Min	U. bound (95%)	L. bound (95%)
X (mm)	-68.32018	-68.32018	0.22942	-68.31929	-68.32109	-68.32063	-68.31973
Y (mm)	684.46708	684.46707	0.25985	684.46807	684.46609	684.46657	684.46758
Z (mm)	736.63710	736.63711	0.19406	736.63784	736.63625	736.63673	736.63749

Tabla 6.13. Incertidumbre de la plataforma multi-registro en la generación de punto 3, esfera 1 en sistema de referencia plataforma inferior, n- iteraciones 10000.

<i>Punto 4 – Esfera 1 (PosPlat 1 / Barra Lejos)</i>							
	Nominal	Media	Incertidumbre (μm)	Max	Min	U. bound (95%)	L. bound (95%)
X (mm)	-53.63718	-53.63718	0.22671	-53.63630	-53.63801	-53.63762	-53.63674
Y (mm)	676.14141	676.14141	0.25829	676.14248	676.14051	676.14090	676.14192
Z (mm)	735.19406	735.19406	0.19052	735.19476	735.19328	735.19369	735.19443

Tabla 6.14. Incertidumbre de la plataforma multi-registro en la generación de punto 4, esfera 1 en sistema de referencia plataforma inferior, n- iteraciones 10000.

<i>Punto 5 – Esfera 1 (PosPlat 1 / Barra Lejos)</i>							
	Nominal	Media	Incertidumbre (μm)	Max	Min	U. bound (95%)	L. bound (95%)
X (mm)	-45.98916	-45.98916	0.23146	-45.98831	-45.99008	-45.98961	-45.98870
Y (mm)	693.07839	693.07855	0.26153	693.07959	693.07743	693.07803	693.07906
Z (mm)	735.16236	735.16224	0.19956	735.16299	735.16153	735.16185	735.16263

Tabla 6.15. Incertidumbre de la plataforma multi-registro en la generación de punto 5, esfera 1 en sistema de referencia plataforma inferior, n- iteraciones 10000.

La siguiente Figura 6.41 muestra la representación tridimensional de los 10000 puntos generados para la primera captura, punto 1 de la esfera 1 tras la aplicación de la simulación de Monte Carlo.

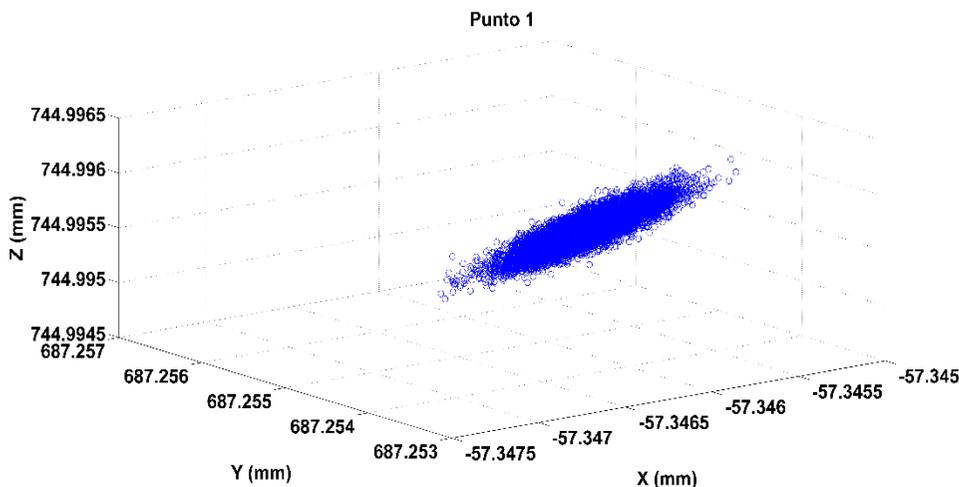


Figura 6.41. Posibles valores de las coordenadas XYZ del punto 1, esfera 1 en sistema de referencia plataforma inferior, n-iteraciones 10000.

De este modo la Figura 6.42 muestra los 10000 posibles valores de las coordenadas (x,y,z) en sistema de referencia plataforma inferior para 10000 puntos, obtenidos a través de las 10000 matrices homogéneas de transformación generadas en la simulación por Monte Carlo para un punto palpado por el brazo articulado y con coordenadas (x,y,z) expresadas en sistema de referencia brazo.

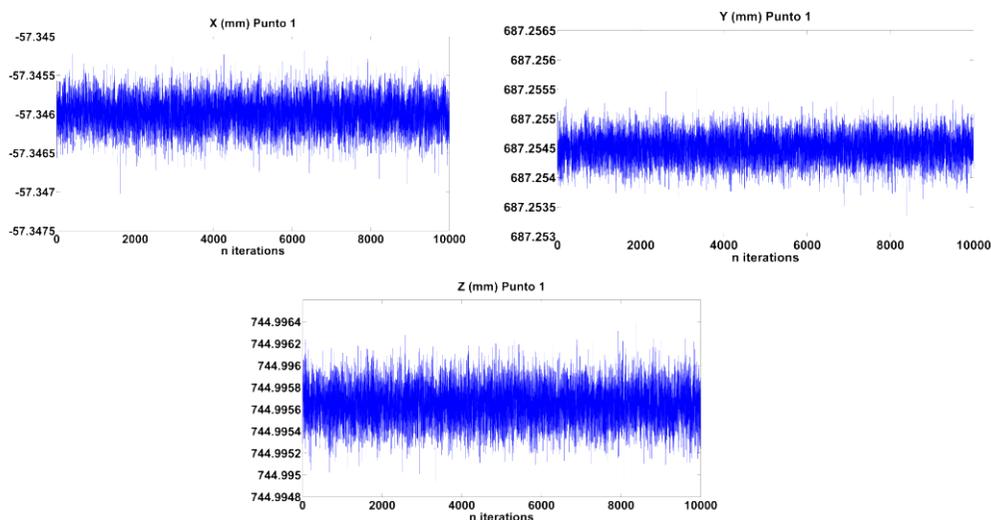


Figura 6.42. Posibles valores de las coordenadas XYZ del punto 1, esfera 1 en sistema de referencia plataforma inferior, n-iteraciones 10000.

Igualmente se muestra en la Figura 6.43 los elipsoides de incertidumbre que se generan con los posibles valores de las coordenadas (x,y,z) para los 10000 puntos generados y sus proyecciones.

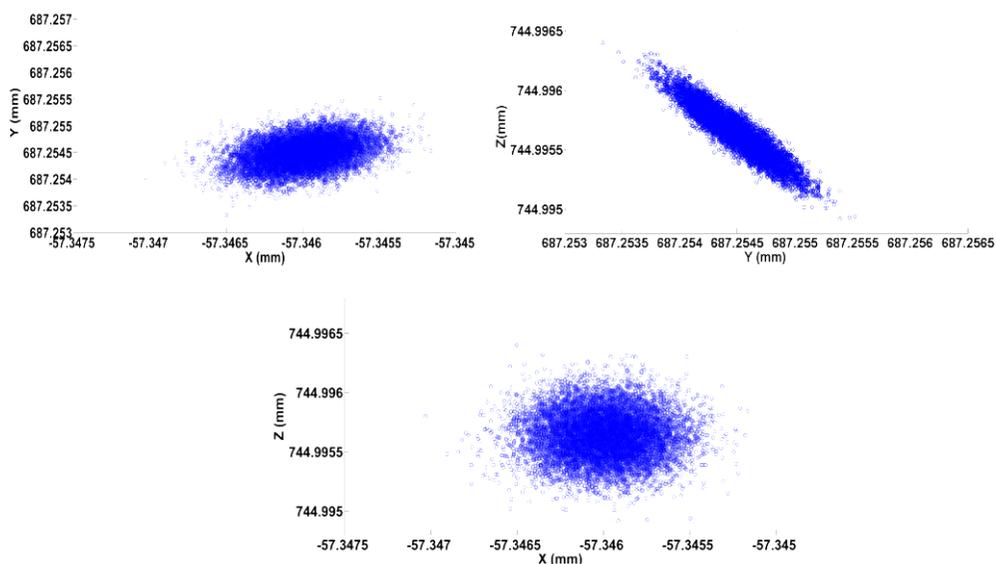


Figura 6.43. Posibles valores de las coordenadas XYZ del punto 1, esfera 1 en sistema de referencia plataforma inferior, n-iteraciones 10000.

Adicionalmente, teniendo en cuenta 5 puntos palpados por esfera en sistema de referencia brazo, es posible obtener a partir de los 10000 puntos obtenidos para cada uno de los 5 puntos palpados por

esfera y expresados en sistema de referencia plataforma inferior, los centros de las 10000 esferas correspondientes tal y como se aprecia en la Figura 6.44.

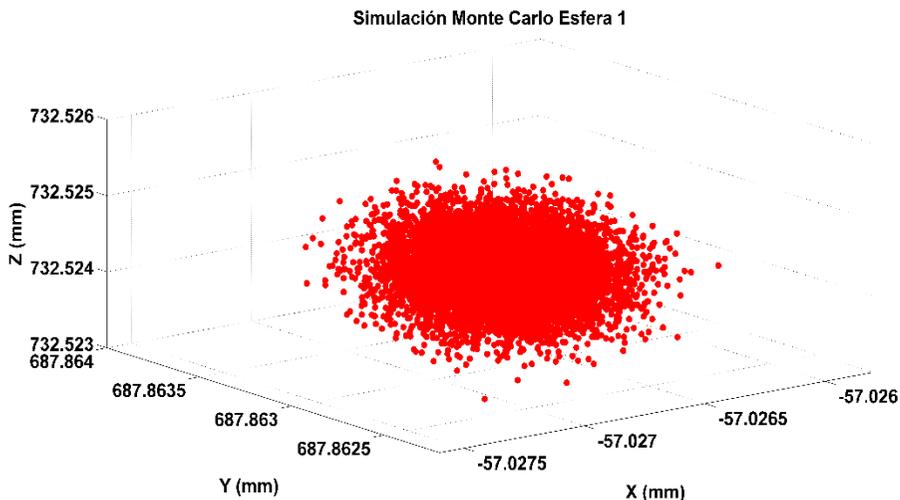


Figura 6.44. Posibles valores de las coordenadas XYZ del centro de las n-esferas 1 en sistema de referencia plataforma inferior, n-iteraciones 10000.

- *Evaluación de la influencia de la incertidumbre de la plataforma multi-registro en la medición de distintas posiciones de esfera patrón.*

Al igual que se ha realizado la simulación con un número de 10000 iteraciones para la esfera 1 de la barra patrón colocada en la posición Barra Lejos del patrón y posición 1 de la plataforma, se ha aplicado el procedimiento de simulación de Monte Carlo a las esferas 2 y esfera 5 del patrón, capturando con el brazo cinco puntos en cada una de ellas. De este modo se obtuvieron las n-matrices de transformación plataforma superior a inferior y los n-puntos con coordenadas en sistema de referencia plataforma inferior, para cada uno de los cinco puntos capturados en las tres esferas patrón.

Se analizó la variación resultante en la incertidumbre tras la simulación dependiendo de la esfera del patrón que se mide y su posición en el patrón, ver Figura 6.36, para una misma posición del patrón Barra Lejos y posición 1 de la plataforma. La variación puede ser debida a diversas causas, siendo una de ellas que las posiciones de los encoders angulares del brazo varían dependiendo de la medición realizada, distancia y posición respecto al brazo del objeto patrón a medir. En este caso, se realizó la simulación para un número de 10000 iteraciones para la esfera 1, esfera 2 y esfera 5 con los siguientes resultados comparativos a nivel de incertidumbre en las coordenadas (x,y,z) obtenidas para cada uno de los 10000 puntos generados en sistema de referencia plataforma inferior, para cada uno de los cinco puntos palpados por esfera, ver Tabla 6.16 y Figura 6.45.

		Incertidumbre (μm)		
		Esfera 1	Esfera 2	Esfera 5
Punto 1	X (mm)	0.232241	0.241225	0.269990
	Y (mm)	0.262705	0.265127	0.266787
	Z (mm)	0.194251	0.225467	0.315529
Punto 2	X (mm)	0.230860	0.239216	0.270039
	Y (mm)	0.259056	0.263258	0.266019
	Z (mm)	0.198503	0.230363	0.319403
Punto 3	X (mm)	0.229417	0.241851	0.272184
	Y (mm)	0.259851	0.265617	0.268567
	Z (mm)	0.194056	0.225515	0.315342
Punto 4	X (mm)	0.226707	0.238836	0.267329
	Y (mm)	0.258289	0.262216	0.268738
	Z (mm)	0.190516	0.221844	0.316312
Punto 5	X (mm)	0.231457	0.241063	0.271587
	Y (mm)	0.261532	0.263736	0.266704
	Z (mm)	0.199563	0.228499	0.319692
Diámetro esferas		0.33016	0.34805	0.33449

Tabla 6.16. Comparativa de incertidumbres en la generación de puntos por esfera (esfera 1, 2 y 5) y esfera gaussiana asociada en sistema de referencia plataforma inferior, n- iteraciones 10000.

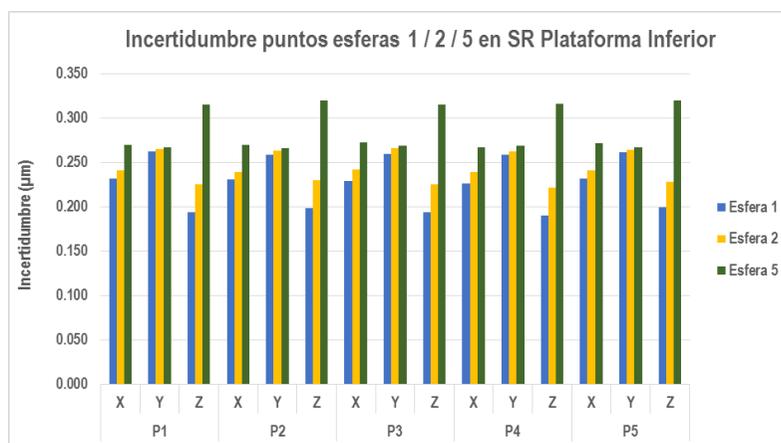


Figura 6.45. Incertidumbre de la plataforma multi-registro en la generación puntos por esfera (esfera 1, 2 y 5) en sistema de referencia plataforma inferior, n- iteraciones 10000.

En la figura y tabla anterior se observa que la incertidumbre presenta menores valores en todas las coordenadas XYZ y puntos palpados en la esfera 1, siendo la esfera 5 la que presenta valores más altos, pudiendo estar asociado este hecho a la posición del brazo durante la medición de las esferas y que esta esfera se encuentra en una posición más alejada, y por lo tanto, las variaciones de orientación

del sistema de referencia plataforma superior debidas a la incertidumbre de medida de la plataforma, afectan en mayor medida.

Los resultados de los 10000 posibles centros correspondientes a las esferas 2 y esferas 5 expresados en sistema de referencia plataforma inferior se observan en las Figura 6.46 y Figura 6.47.

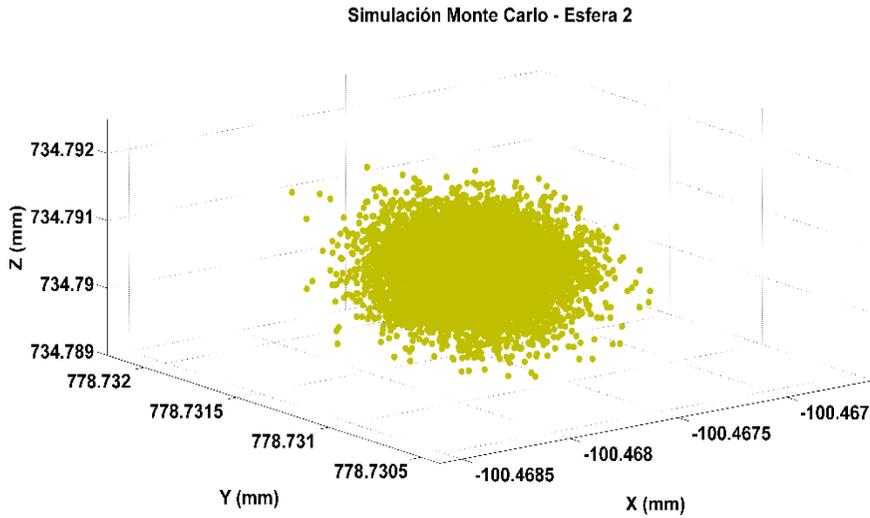


Figura 6.46. Posibles valores de las coordenadas XYZ del centro de las n-esferas 2 expresadas en sistema de referencia plataforma inferior, n-iteraciones 10000.

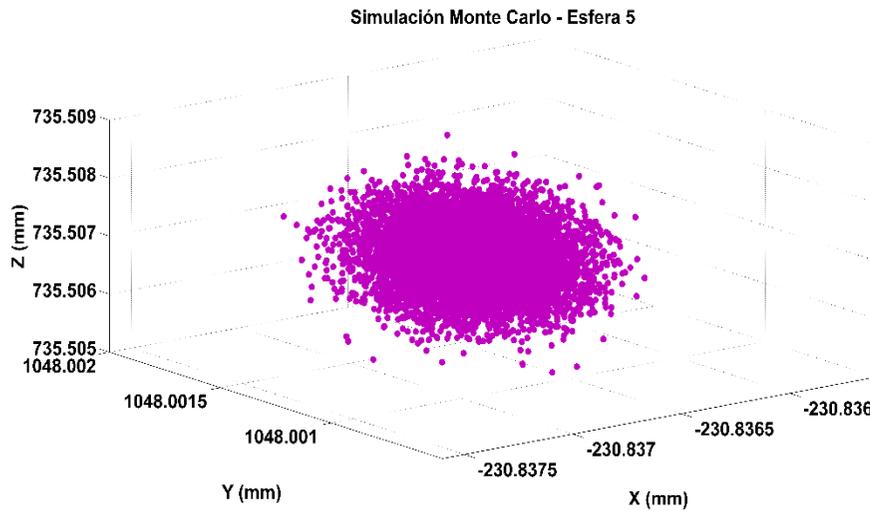


Figura 6.47. Posibles valores de las coordenadas XYZ del centro de las n-esferas 5 expresadas en sistema de referencia plataforma inferior, n-iteraciones 10000.

○ *Evaluación de la incertidumbre de la plataforma en la medición de una distancia*

El concepto se basa en el cálculo de un error en distancia como desviación en distancia medida resultante entre dos centros de las esferas colocados sobre el patrón de referencia respecto a la longitud calibrada del certificado de calibración de la barra patrón. El objetivo es analizar mediante la simulación de Monte Carlo cómo afecta la incertidumbre de la plataforma multi-registro en la medición de una distancia por parte del instrumento de medida, en este caso un brazo articulado de medición por coordenadas. La desviación en distancia se calcula según se muestra en la ecuación (6-2) siendo L_i la longitud entre centros de esferas del patrón medida por el brazo y L_{Cal} la longitud calibrada.

$$D_i = L_i - L_{Cal} \quad (6-2)$$

En este caso, una vez obtenidos los 10000 centros de las esferas 1, 2 y 5, es posible calcular distancias entre sus centros y estimar un error en distancia, observando cómo afecta la incertidumbre de la plataforma en la medición de una distancia entre los centros de las n-esferas generadas. Para ello, se definen dos distancias nominales calibradas de referencia, que serán la distancia entre la esfera 1 y la esfera 2 (d12) distancia corta, y la distancia entre la esfera 1 y la esfera 5 (d15) distancia larga. Los valores nominales de distancia calculados a partir de los centros de las esferas incluidos en el certificado de calibración del patrón se muestran en la Tabla 6.17:

	d12 (Esfera 1 - 2)	d15 (Esfera 1 - 5)
Longitud Calibrada (mm)	100.80247	399.96137

Tabla 6.17. Definición de distancias nominales entre esferas en el patrón

Como resultado final de esta evaluación se obtendrán cinco parámetros para las 10000 distancias y errores en distancia calculados para d12 y d15: error medio en distancia, máxima y la mínima desviación en distancia, desviación estándar y rango de desviaciones en distancia, con los valores obtenidos en la simulación que se muestran en las Tabla 6.18, Figura 6.48 y Figura 6.49. Estos errores fueron utilizados para evaluar la influencia de la incertidumbre de la plataforma en la medición de una distancia con el brazo articulado de medición por coordenadas.

	d12 (distancia corta)	d15 (distancia larga)
Error en distancia medio (mm)	0.058721	0.063400
Error en distancia máximo (mm)	0.059636	0.064404
Error en distancia mínimo (mm)	0.057635	0.062562
Rango error en distancia (mm)	0.002001	0.001842
Desviación estándar (mm)	0.000245	0.000242

Tabla 6.18. Resultados de la evaluación en distancia e influencia de la incertidumbre de la plataforma multi-registro, n-iteraciones 10000.

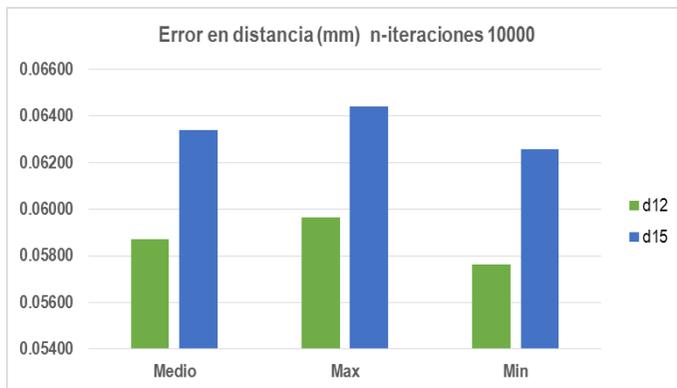


Figura 6.48. Evaluación de error en distancia, n-iteraciones 10000 (a)

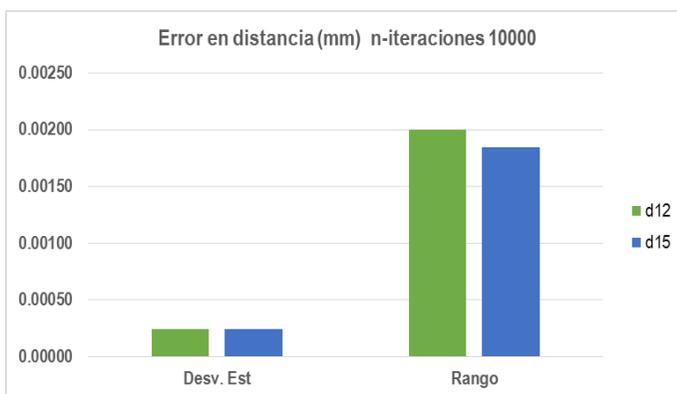


Figura 6.49. Evaluación de error en distancia, n-iteraciones 10000 (b)

Se observa que el error medio obtenido es mayor en el caso de la distancia larga 0.0634 mm frente a 0.0587 mm en distancia corta, si bien el rango es ligeramente inferior 0.0018 mm en la evaluación de la distancia larga frente a un valor de 0.0020 mm en la distancia corta. Las desviaciones estándar de ambas distancias son similares.

- *Evaluación de la influencia de la incertidumbre de la plataforma multi-registro en la medición en distintas posiciones de la plataforma.*

Finalmente con objeto de analizar la influencia de la posición de giro de la plataforma en el proceso de estimación de su incertidumbre, se realizaron simulaciones para las posiciones 3 y 6 de la plataforma bajo las mismas premisas que las realizadas en el caso de la posición 1. Se tomó la esfera 1 de referencia, capturando cinco puntos por esfera y 10000 iteraciones.

En la siguiente Tabla 6.19 se muestra un resumen comparativo de las incertidumbre obtenidas para las coordenadas XYZ de cada uno de los 10000 puntos generados para cada uno de los cinco puntos palpados en la esfera 1, posición patrón Barra Lejos y posiciones 1, 3 y 6 de la plataforma. Igualmente se incluye la incertidumbre en el cálculo de las coordenadas XYZ de los centros de las 10000 esferas construidas.

Posición Plataforma		Incertidumbre (μm)		
		1	3	6
Punto 1	X (mm)	0.237251	0.336581	0.321769
	Y (mm)	0.275764	0.191801	0.189172
	Z (mm)	0.201466	0.208158	0.171014
Punto 2	X (mm)	0.220530	0.336820	0.314770
	Y (mm)	0.262204	0.192493	0.185209
	Z (mm)	0.199191	0.212803	0.172280
Punto 3	X (mm)	0.238617	0.330789	0.309839
	Y (mm)	0.272784	0.192055	0.189935
	Z (mm)	0.200863	0.210502	0.173191
Punto 4	X (mm)	0.232483	0.332145	0.313143
	Y (mm)	0.270231	0.187238	0.188535
	Z (mm)	0.200888	0.203918	0.167066
Punto 5	X (mm)	0.227324	0.333095	0.316487
	Y (mm)	0.265404	0.189137	0.188833
	Z (mm)	0.204541	0.207487	0.170702
Diámetro esferas		0.342780	0.347125	0.343805

Tabla 6.19. Comparativa de incertidumbres en la generación de puntos por posición de plataforma 1/3/6 y esfera asociada en sistema de referencia plataforma inferior, n- iteraciones 10000.

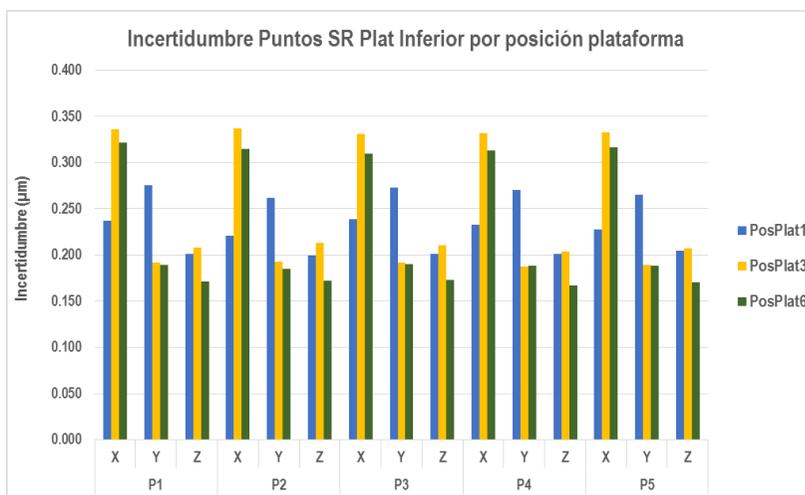


Figura 6.50. Comparativa de incertidumbres en la generación de puntos por posición de plataforma 1/3/6 y esfera asociada en sistema de referencia plataforma inferior, n- iteraciones 10000.

Se observan tanto en la Figura 6.50 como en la Tabla 6.19, diversos comportamientos en función de la coordenada de los puntos analizada. Para todos los puntos (1-5), la incertidumbre es mayor en el caso de la coordenada X para la posición 3 de la plataforma. En el caso de la coordenada Y siempre es mayor

en las medidas de la posición 1 de la plataforma y en la coordenada Z ligeramente superior en la posición 3. En ninguno de los puntos coinciden mayores incertidumbres para una posición determinada en las tres coordenadas, ni se observa claramente que una posición presente más incertidumbre que otra de una manera evidente.

- *Evaluación de la influencia del número de iteraciones en el cálculo de incertidumbre de la plataforma multi-registro*

El número de iteraciones a realizar en la simulación es un parámetro que se puede ajustar, siendo demostrado que conforme aumenta el número de iteraciones el valor medio de los parámetros de salida de la simulación se aproximan cada vez más al valor nominal utilizado y el tiempo de cálculo aumenta notablemente. En este trabajo se realizaron simulaciones para 10, 100, 1000 y 10000 iteraciones, presentándose los resultados para 10000 iteraciones. El motivo por el cual se decidió no incrementar el número de iteraciones, fue que la variación del valor medio de los parámetros de salida era muy pequeña entre los casos simulados por ejemplo para 1000 y 10000 iteraciones. A modo de ejemplo se ilustra en la Figura 6.51 a continuación la evolución de la media de la coordenada X (mm) para el punto 1, ambos casos para la esfera patrón 1 y posición 1 de la plataforma multi-registro, con valor nominal -57.34598 mm.

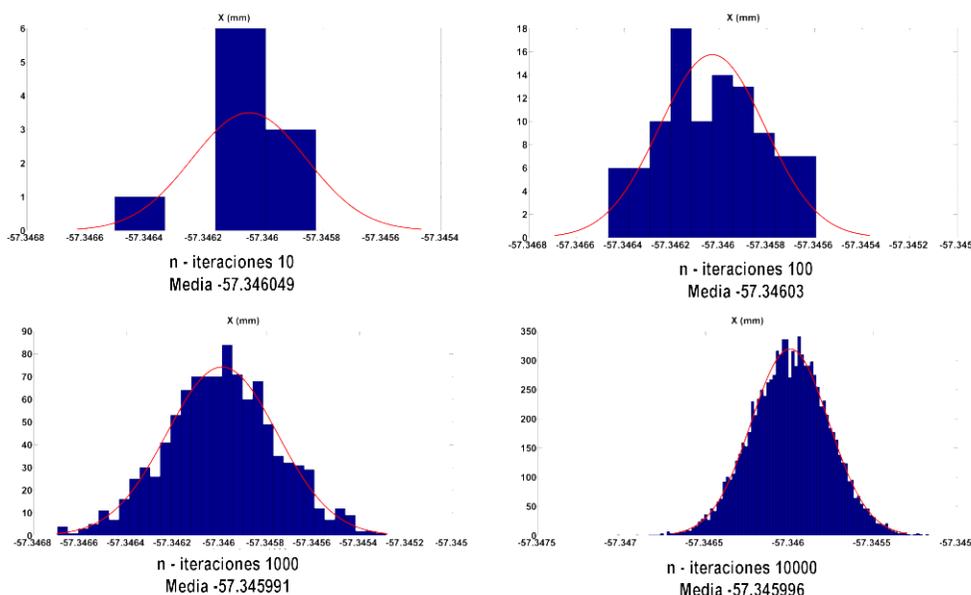


Figura 6.51. Influencia del número de iteraciones en variable de salida X (mm).

Se observa en la figura anterior como el valor medio de la coordenada X (mm) se aproxima al valor nominal conforme aumentan el número de iteraciones, si bien las variaciones son pequeñas porque también son pequeñas las variaciones en las magnitudes de entrada, lectura de los sensores capacitivos.

6.6 Conclusiones

En este capítulo se ha abordado el procedimiento de estimación de la incertidumbre de medición de la plataforma multi-registro, identificando como primer paso las principales posibles fuentes de error que pudieran afectar al resultado de la medición con la plataforma como medio auxiliar en procesos de verificación y calibración. Una vez identificadas las fuentes de error y seleccionadas aquellas abordables en la estimación de la incertidumbre realizada en este trabajo, debido a la naturaleza no lineal del modelo de la plataforma, se decidió aplicar el método de Monte Carlo para la estimación de incertidumbres mediante propagación de distribuciones.

Una de las posibles fuentes de error identificadas, fue la posible deformación de la plataforma en uso y el efecto que esta deformación podría tener sobre las lecturas de los sensores capacitivos integrados en la plataforma. Adicionalmente, se quiso estudiar el comportamiento de la plataforma ante frecuencias de excitación del sistema completo durante su utilización, para lo cual se realizó un análisis modal computacional y una corroboración experimental del resultado teórico en laboratorio. Para el análisis modal computacional mediante Abaqus, se realizó un mallado simplificado de la plataforma, reduciendo la complejidad de aquellos elementos no relevantes en el análisis y permitiéndose de este modo permitieron reducir notablemente el tiempo de cálculo. Las condiciones de contorno relativas al sistema de fijación de la plataforma se evaluaron mediante un modelo libre de apoyos, y un modelo sustentado más similar al posicionamiento real de la plataforma durante los procedimientos de verificación. De este análisis computacional se obtuvieron unos modos de vibración y frecuencias para la plataforma, observándose en todos los casos que la plataforma se comporta como un sólido extremadamente rígido debido a las frecuencias de vibración obtenidas en el rango de 1.000.000 Hz y 2.500.000 Hz, hecho que hace que la plataforma no sea sensible a deformaciones que pudieran originarse, debidas bien al peso del instrumento portátil posicionado sobre ella o el movimiento del mismo. Por este motivo, se eliminó esta posible causa de error en la simulación de incertidumbre de Monte Carlo.

El análisis modal experimental se realizó en condiciones reales de uso de la misma en procedimientos de verificación en el laboratorio de Ingeniería de Diseño y Fabricación, sometiendo a la plataforma a tres secuencias de excitaciones con el equipo experimental de ensayo disponible. Los captadores de frecuencia tienen un rango de frecuencias hasta 25000 Hz, restringiendo el registro de resultados y otros posibles modos de vibración y frecuencias naturales superiores al rango de medida máximo de los dispositivos. Cabe destacar, que durante el ensayo experimental, la captación de los modos de vibración obtuvo únicamente los modos pertenecientes a la plataforma superior, con dos de los primeros tres modos de vibración a frecuencias próximas a los 1000 Hz, y un tercero a frecuencias cercanas a los 2000 Hz. La comprobación del hecho de que el registro únicamente pertenecía a la plataforma superior se evidenció mediante la realización de un nuevo análisis modal computacional exclusivamente de la plataforma superior, apareciendo tres modos de vibración entre 1100 – 2200 Hz análogos a los registrados experimentalmente.

Finalmente, se llevó a cabo en este capítulo la simulación y estimación de la incertidumbre de la plataforma mediante el método de Monte Carlo. Para evaluar la incertidumbre de las variables de entrada del modelo, fue necesario definir primero las entradas del modelo. En el caso de la plataforma multi-registro, se decidió analizar la influencia de los sensores capacitivos integrados en la misma incluyendo los datos de error de banda y ruido del sensor suministrados por el fabricante en el certificado de calibración. Sin embargo, es importante destacar que aunque por su relevancia en el resultado se decidió considerar en este caso únicamente los sensores capacitivos como entrada al modelo, existen

otras posibles fuentes de error que afectan a la incertidumbre de la plataforma como son el error de calibración de la plataforma, el error del equipo de medición portátil que se posiciona sobre la plataforma y la deformación que puede sufrir la plataforma debido al peso del equipo de medición portátil y el movimiento del mismo durante el procedimiento de medición. El modelo matemático de la plataforma permite obtener un punto en sistema de referencia plataforma inferior, dado un punto medido por el brazo en sistema de referencia brazo, mediante el cálculo de la matriz homogénea de transformación que pasa del sistema referencia plataforma superior al sistema de referencia plataforma inferior. Por lo tanto, dado un punto palpado por el brazo, las lecturas de los seis sensores capacitivos capturados para ese punto y un número n de iteraciones, las salidas del modelo seleccionadas fueron las n -matrices de transformación homogéneas de plataforma superior a inferior y los n -puntos expresados en sistema de referencia plataforma inferior.

A partir de cinco puntos medidos en una esfera en sistema de referencia brazo, fue posible obtener los n -puntos en sistema de referencia plataforma inferior para cada uno de los cinco puntos medidos y se construyeron las esferas gaussianas asociadas en sistema de referencia global o plataforma inferior. Se analizó la influencia de la incertidumbre de la plataforma multi-registro en la medición de distintas posiciones de esfera patrón, aplicando el método de Monte Carlo a diversas esferas de la barra patrón. Como resultado final se obtuvo una estimación de la incertidumbre de la plataforma en la generación de un punto en sistema de referencia plataforma inferior con diferentes valores de incertidumbre para las tres coordenadas XYZ. Tomando como ejemplo posición 1 de la plataforma, posición de patrón Barra Lejos, esfera 1 y punto 1, la incertidumbre obtenida en la coordenada X fue de $0.23224 \mu\text{m}$, $0.26270 \mu\text{m}$ en la coordenada Y y 0.19425 mm en la coordenada Z. En el caso de la esfera 2, los valores de incertidumbre fueron $0.24122 \mu\text{m}$ en la coordenada X, $0.26512 \mu\text{m}$ en la coordenada Y y 0.22546 en la coordenada Z. Para la esfera 5, los valores de incertidumbre obtenidos fueron $0.26999 \mu\text{m}$ en la coordenada X, $0.26678 \mu\text{m}$ en la coordenada Y y 0.31552 en la coordenada Z. Con esto, puede concluirse, que si bien las incertidumbre están en un mismo rango para las diferentes esferas medidas, se observan diferencias en los valores calculados debido a la influencia de la incertidumbre de la plataforma, obteniéndose distintas precisiones en la medición de los diversos puntos debidas a las variaciones en el sistema de referencia de la plataforma superior.

Adicionalmente se analizan las incertidumbres obtenidas para las diferentes posiciones de la plataforma, realizando la simulación mediante Monte Carlo en tres posiciones 1, 3 y 6, tomando como referencia la esfera 1. Para todos los puntos palpados de la esfera 1, la incertidumbre es mayor en el caso de la coordenada X para la posición 3 de la plataforma. En el caso de la coordenada Y, siempre es superior en las medidas de la posición 1 de la plataforma y en la coordenada Z se incrementa ligeramente en la posición 3. En ninguno de los puntos coinciden mayores incertidumbres para una posición determinada en las tres coordenadas, ni se observa claramente que una posición presente más incertidumbre que otra de una manera evidente. La incertidumbre de la plataforma en la medición de una distancia también fue objeto de estudio, siendo el error medio y la incertidumbre de $0.058721 \pm 0.000245 \text{ mm}$ para distancias definidas como cortas (100 mm) y $0.063400 \pm 0.000242 \text{ mm}$ para distancias definidas como largas (400 mm). Finalmente remarcar que el número de iteraciones a realizar en la simulación de Monte Carlo hace que el valor medio de las magnitudes de salida simuladas tienda a aproximarse al valor nominal. En este caso, se fijó un número máximo de 10000 iteraciones porque las diferencias entre los valores medios obtenidos en distintos parámetros de salida para 1000 y 10000 iteraciones, presentaban variaciones de $0.01 \mu\text{m}$, valor considerado lo suficientemente pequeño para no incrementar el número de iteraciones máximo.

Capítulo 7

7 Conclusiones

7.1 Conclusiones

Esta tesis ha tenido como objetivo principal el desarrollo, implementación y ensayo de nuevas técnicas de verificación y calibración de instrumentos portátiles de medición por coordenadas mediante una plataforma multi-registro, aplicándose a brazos articulados de medición por coordenadas y láser tracker. La plataforma multi-registro es un instrumento con una alta repetibilidad posicionamiento, hecho que ha corroborado su idoneidad de utilización en procedimientos de verificación de instrumentos de medición como brazos y láser tracker. A lo largo de este trabajo se han identificado numerosas ventajas en la utilización de la plataforma multi-registro. Una de ellas es la generación de puntos fijos en sistema de referencia plataforma inferior, con la reducción de tiempo, esfuerzo y espacio físico que aporta en procedimientos de verificación y calibración, debido a que es el instrumento portátil fijado sobre la plataforma el que rota en las seis posiciones de la plataforma en lugar del patrón de medida, pudiendo generar un número mayor de posiciones sin necesidad de un movimiento físico del patrón. Otra de las ventajas a destacar es la posibilidad de definición de mallas patrón virtuales sin necesidad de materialización física de la distancia de referencia en un patrón, donde la plataforma presenta su principal aportación al campo de las técnicas de verificación y calibración de instrumentos portátiles de medición.

Como primera fase de este trabajo de tesis, se llevó a cabo una amplia revisión del estado del arte referente a instrumentos de medición portátiles, brazos de medición por coordenadas y láser trackers, analizando las tecnologías disponibles, sus prestaciones y características metrológicas. En el caso de brazos articulados de medición, se revisaron como parámetros el error volumétrico y repetibilidad de punto; precisión angular y en distancia con ADM o mediante interferómetro para láser trackers. Igualmente, se hizo una revisión de los patrones físicos que se utilizan en los procedimientos de evaluación. Conjuntamente con los equipos de medición, se introdujo el nuevo concepto de plataforma multi-registro como medio auxiliar a utilizar en la evaluación de estos equipos de medición frente a los procedimientos convencionales contemplados en la normativa aplicable. Como base de estos ensayos de verificación, se realizó un análisis de las técnicas de evaluación existentes, incluyendo normativa aplicable a brazos articulados ASME B89.4.22-2004 [2], VDI/VDE 2617-2009 parte 9 [3], el borrador ISO/CD 10360 parte 12 -2014 [4] y a láser tracker ASME B89.4.19 -2006 [5], VDI/VDE 2617- parte 10-

2011 [6], ISO/CD10360-10 [7] creando un marco de referencia para el desarrollo de los posteriores procedimientos de calibración y verificación objeto de esta tesis.

El siguiente paso a realizar en la generación de nuevos procedimientos de verificación con la plataforma multi-registro, fue el modelado cinemático de los equipos que se emplearon en este trabajo, brazo articulado de medición por coordenadas modelo Faro Platinum, láser tracker modelo API T3 -15 y la plataforma multi-registro. En el caso de brazo y láser tracker, tras llevar a cabo una revisión bibliográfica del estado del arte al respecto de los métodos de modelado cinemático aplicables a estos equipos, se decidió la utilización del modelo de Denavit-Hartenberg (D-H). Una vez definidos los modelos cinemáticos de D-H con sus parámetros y sistemas de coordenadas asociados para brazo y láser tracker, se determinaron los valores iniciales de los mismos. En el caso de la plataforma multi-registro se incluyó su modelo matemático empleado posteriormente en los procedimientos de verificación generados en el trabajo.

Una vez concluido el modelado cinemático de los equipos, se concibieron dos líneas de trabajo relativas a nuevas técnicas de calibración y verificación, una focalizada en brazos articulados de medición por coordenadas y otra dirigida a láser trackers. En el caso del brazo articulado de medición por coordenadas, tras determinar los valores iniciales de los parámetros de su modelo cinemático, se llevó a cabo un procedimiento de identificación de parámetros del brazo utilizando la plataforma multi-registro, con objeto de obtener el conjunto de parámetros óptimos del modelo del brazo que permitan minimizar el error de medición conjunto, obteniéndose resultados satisfactorios a nivel de reducción de error en distancia entre centros de esferas en sistema de referencia plataforma inferior, repetibilidad de medición y error de punto, definido este último como la diferencia de coordenadas de un punto expresadas en sistema de referencia inferior para diferentes posiciones de giro de la plataforma.

Posteriormente se realizó un procedimiento de verificación completo del brazo articulado con la plataforma multi-registro, cuyos resultados se compararon posteriormente con los resultados de evaluación de ese mismo brazo de acuerdo a las normas [2] y [3], pudiendo concluir que la plataforma multi-registro es un instrumento adecuado para su utilización en procesos de verificación de brazos de medición, presentando claras mejoras en términos de reducción de tiempo de ensayo de hasta un 75% y de complejidad de montajes de prueba asociados respecto a los procedimientos indicados en las normas previamente mencionadas. Reafirma su viabilidad de uso, los valores comparativos de error obtenidos en la evaluación volumétrica realizada de acuerdo a norma y con plataforma multi-registro utilizando un patrón barra de esferas convencional, siendo el valor de error 2RMS obtenido en el ensayo con plataforma multi-registro, inferior al valor calculado tras la realización de los ensayos según norma [2] y próximo a los valores de la evaluación según VDI [3] y al valor de error volumétrico suministrado por el fabricante del brazo.

Igualmente dentro de este mismo bloque de trabajo, se validó la utilización de un láser tracker como instrumento patrón en la verificación de brazos articulados de medición, aportando flexibilidad al procedimiento, ya que permite la generación de un número infinito de distancias y posiciones de ensayo sin necesidad de un patrón físico. Adicionalmente, se compararon los resultados obtenidos en la verificación del brazo utilizando el láser tracker como patrón, con los generados en un proceso de verificación del brazo sobre la plataforma multi-registro, pero usando una barra patrón de esferas convencional calibrada. Se obtuvieron valores medios y máximos de errores en distancia comparables con ambos procedimientos, hecho que remarca la viabilidad de uso del láser como patrón. Finalmente y con el objetivo de incluir los requerimientos de normativa de evaluación de brazos existentes, se realizó

una comparativa con el ensayo de precisión volumétrica de acuerdo a ASME B89.4.22-2004 [2] obteniendo valores de error medio en distancia comparables.

En referencia a laser trackers, se definieron, desarrollaron y se validaron experimentalmente nuevos procedimientos de verificación utilizando la plataforma multi-registro como método auxiliar sobre el que se posiciona el láser, mostrando idénticas ventajas a las anteriormente descritas en el caso de brazos articulados de medición. Sin embargo, una de las principales aportaciones de esta tesis ha sido el desarrollo de la técnica de generación de mallas y distancias virtuales patrón mediante el uso de la plataforma multi-registro. La plataforma multi-registro no funciona como un mero elemento auxiliar en procedimientos de verificación de instrumentos portátiles, permitiendo una rotación del equipo portátil evitando la necesidad de mover el patrón, sino que posibilita la generación de puntos virtuales distribuidos en sus correspondiente mallas virtuales que funcionan a modo de malla patrón, conocido y cuantificado el giro de la plataforma con gran precisión. Una vez determinado el giro de una posición a otra de la plataforma, es posible aplicar ese giro a un punto medido por el láser tracker y generar un punto virtual con sus correspondientes coordenadas conocidas, pudiéndose crear de este modo un número infinito de puntos virtuales y distancias virtuales entre puntos virtuales existentes. Este nuevo método es de especialidad utilidad en sistemas de medición de alto rango, donde las distancias a materializar en el patrón son de grandes dimensiones.

Tras la realización de los ensayos pertinentes de verificación de láser tracker utilizando únicamente plataforma multi-registro y distancias virtuales con plataforma multi-registro, se evaluó la precisión volumétrica del equipo, su repetibilidad en distancia y error de punto, obteniéndose buenos resultados teniendo en consideración la precisión del equipo a evaluar y comparables con ambas metodologías. Estos resultados permitieron la validación de ambas técnicas de verificación de láser tracker con el uso de la plataforma multi-registro.

Finalmente en el capítulo 6, la tesis abordó el procedimiento de estimación de la incertidumbre de medición de la plataforma multi-registro, identificando las posibles fuentes de error que pudieran afectar al resultado de la medición con la plataforma. Una vez identificadas las fuentes de error y seleccionadas aquellas abordables en la estimación de la incertidumbre realizada en este trabajo, se decidió aplicar el método de Monte Carlo para la estimación de incertidumbres mediante propagación de distribuciones de probabilidad. En el trabajo, dado un punto medido por el brazo articulado de medición con coordenadas en sistema de referencia brazo y las lecturas de los seis sensores capacitivos correspondiente a esa medición, es posible obtener valores de incertidumbre de la plataforma multi-registro en la generación de ese punto en sistema de referencia plataforma inferior, y como un paso posterior, estimar la incertidumbre de la plataforma en la medición de distancias entre puntos expresados en el sistema de referencia plataforma inferior. Adicionalmente se realizó un análisis modal mediante elementos finitos con un modelo simplificado de la plataforma, y un análisis modal experimental para estudiar su comportamiento ante frecuencias de excitación del sistema completo durante su utilización, obteniendo como resultado unos modos de vibración y frecuencias en el orden de 10^6 Hz para el modelo completo de la plataforma en el análisis computacional. Este hecho demuestra que la plataforma se comporta como un sólido extremadamente rígido. Sin embargo, los resultados experimentales recogieron unas frecuencias del orden 10^3 Hz, mostrando una discrepancia con el valor computacional obtenido. Para verificar esta diferencia, se valoró la posibilidad de que el ensayo estuviera captando únicamente los modos y frecuencias naturales de la plataforma superior del conjunto, de menor masa y por tanto generando como resultado unas frecuencias naturales inferiores, llevándose a cabo un análisis modal computacional únicamente para la plataforma superior, obteniendo

unos modos y frecuencias de vibración del orden de 10^3 Hz, que corroboraron los obtenidos en el análisis modal experimental realizado.

7.2 Líneas de trabajo futuro

A continuación se presentan futuras líneas de trabajo como pasos posteriores del trabajo realizado a lo largo de esta tesis doctoral, que dará continuidad al trabajo llevado a cabo:

- Aplicación de la metodología de verificación mediante generación de *distancias virtuales con plataforma multi-registro a brazos articulados de medición por coordenadas*.
El impacto de utilización de esta técnica sobre procedimientos de verificación de láser tracker es mayor, debido principalmente a que las dimensiones y complejidad de los patrones a utilizar con equipos de láser tracker son mayores que en brazos articulados de medición. Por este motivo, se decidió hacer una primera aproximación de la técnica con un equipo de láser tracker, validando su utilización y planteando como un segundo paso su aplicación a brazos de medición.
- *Extensión del análisis modal de la plataforma multi-registro*.
Se planifica la realización de un análisis modal extendido, haciendo uso de medios y dispositivos con la suficiente potencia para excitar frecuencialmente la totalidad del conjunto, determinando así todos los modos de vibración existentes en un rango de altas frecuencias. La sustitución de los equipos actuales, limitados en la medida del rango de frecuencias por otros superiores, permitiría la captación con mayor precisión.
- Determinación de un modelo computacional de la plataforma multi-registro para el estudio del comportamiento ante esfuerzos mecánicos puntuales o la influencia de parámetros externos al dispositivo, tales como golpes, inercias, temperaturas de trabajo, humedad.
- Generación de un *nuevo modelo de estimación de incertidumbre* de la plataforma multi-registro por Montecarlo, incluyendo como *variables de entrada al sistema adicionales* la incertidumbre del equipo de medición portátil a utilizar con la plataforma y la incertidumbre de calibración de la plataforma.
- Optimización del proceso de *medición de las esferas de referencia* colocadas en la placa superior de la plataforma. Mediante estas mediciones se puede calcular la matriz de transformación que relaciona el sistema de referencia del brazo o láser tracker con el sistema de referencia de la plataforma superior. Debido al propio error del instrumento de medición, se induce un error en la medición de las esferas que contribuye a la incertidumbre de medición de la plataforma.
- Diseño de una *nueva plataforma con dos ejes de giro perpendiculares*, eje Z análogo al actual y un eje perpendicular al Z que posibilite inclinar la plataforma. Ésta prestación permitiría cubrir la variación completa de los ejes de un instrumento portátil de medición, como por ejemplo el láser tracker.
- Diseño de una *segunda versión de la plataforma sin sensores capacitivos*, una vez analizados los resultados de repetibilidad obtenidos con la versión actual, con objeto de bajar el coste de la plataforma multi-registro y poder realizar una industrialización de la misma a un coste competitivo.

7.3 Publicación de resultados

Como resultado del trabajo de investigación realizado en esta tesis doctoral se han generado las siguientes publicaciones relacionadas que se listan a continuación:

- **Revistas científicas**

- Acero, R; Brau, A; Santolaria, J; Pueo, M, "Verification of an articulated arm coordinate measuring machine using a laser tracker as gauge equipment and an indexed metrology platform", *Measurement*, (en revisión 22/02/2015).
- Conte, J; Majarena, A.C; Acero, R; Santolaria, J; Aguilar, J.J; "Performance evaluation of laser tracker kinematic models and parameter identification", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014.
- Conte, J; Santolaria, J; Majarena, A.C; Acero, R. "Modelling, kinematic parameter identification and sensitivity analysis of a Laser Tracker having the beam source in the rotating head", *Measurement*, (en revision 22/02/2015).

- **Congresos nacionales e internacionales**

- Aguilar, J.J; Brau, A; Santolaria, J; Acero, R; Rodriguez, Ricardo A; García, R; Valenzuela, M. "Modelo matemático de calibración de una plataforma multi-registro para la verificación de instrumentos de medir por coordenadas portátiles". Simposio de Metrología, Centro Nacional de Metrología, CENAM. Santiago de Querétaro (México), 2014.
- Acero, R; Brau, A; Santolaria, J; Majarena, A.C; Conte, J; "Análisis de uso de una plataforma multi-registro en procesos de verificación de brazos de medición por coordenadas y comparación con normativa internacional ASME B89.4.22-2004 y VDI 2617_9-2009", XX Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica, Asociación española de ingeniería mecánica, Málaga (España), 2014.
- Brau, A; Santolaria, J; Acero, R; Aguilar, J.J. "Verification of an articulated arm coordinate measuring machine by means of an indexed metrology Platform", 2014 Anual Workshop and Conference of the North American Coordinate Metrology, North America coordinate metrology association, NACMA, Toronto (Canadá), 2014.

Otros trabajos de investigación realizados y publicados durante el periodo docente e investigador de esta tesis doctoral son los siguientes:

- Revistas científicas

- Acero, R; Santolaria, J; Pueo, M. "Double flank roll testing as verification technique for micro gears". *Key engineering materials*. 615, pp. 45 – 50, ISSN 1013-9826, 2014.
- Acero, R; Albajez, J.A; Yagüe-Fabra, J.A; Torralba, M; Valenzuela, M; Aguilar, J.J; "Homing sensor system design for a 2D long range nanopositioning moving platform". *Key engineering materials*. 615, pp. 57 - 62. ISSN 1013-9826, 2014.
- Pueo, M; Santolaria, J; Acero, R; Aso, G. "Comparison of double flank roll testers for worm and worm gear". *Key engineering materials*. 615, pp. 39 – 44, ISSN 1013-9826, 2014.
- Acero, R; Albajez, J.A; Yagüe-Fabra, J.A; Torralba, M; Valenzuela, M; Aguilar, J.J; "Analysis and design of a homing sensor system for a 2D moving platform with nanometer resolution". *Procedia Engineering*. 63 - 2013, pp. 183 - 192. ISSN 1877-7058, 2013.

- Pueo, M; Santolaria, J; Acero, R; Aso, G; “Double flank roll testing machines intercomparison for worm and worm gear”. *Procedia Engineering*. 63 - 2013, pp. 454 - 462. ISSN 1877-7058, 2013.
- Acero, R; Santolaria, J; Pueo, M. “Verification Methods for Micro Gears. Analysis of Double Flank Roll Testing Applied to Micro Gears”. *Procedia Engineering*. 63 - 2013, pp. 142 - 150. ISSN 1877-7058, 2013.
- Congresos nacionales e internacionales
 - Acero, R; Albajez, J.A; Yagüe-Fabra, J.A; Torralba, M; Valenzuela, M; Aguilar, J.J; “Analysis and design of a homing sensor system for a 2D moving platform with nanometer resolution”, 5th Manufacturing Engineering Society International Conference MESIC 2013, SIF Sociedad de Ingeniería de Fabricación, Zaragoza (España), 2013.
 - Acero, R; Santolaria, J; Pueo, M; “Verification Methods for Micro Gears. Analysis of Double Flank Roll Testing Applied to Micro Gears”, 5th Manufacturing Engineering Society International Conference (MESIC 2013), SIF Sociedad de Ingeniería de Fabricación, Zaragoza (España), 2013.
 - Pueo, M; Santolaria, J; Acero, R; Aso, G; “Double flank roll testing machines intercomparison for worm and worm gear”, 5th Manufacturing Engineering Society International Conference (MESIC 2013), SIF Sociedad de Ingeniería de Fabricación, Zaragoza (España), 2013.

8 Bibliografía

- [1] H. R. Denavit J, "A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices," *J. Appl. Mech. ASME*, vol. 77, pp. 215–221, 1955.
- [2] American Society of Mechanical Engineers, "ASME B89.4.22-2004, Methods for performance evaluation of articulated arm coordinate measuring machines." New York, NY, USA, pp. 1–45, 2004.
- [3] Verein Deutscher Ingenieure, "VDI/VDE 2617 Part 9, Acceptance and reverification test for articulated arm coordinate measuring machines." pp. 1–20, 2009.
- [4] International Organization for Standardization, "ISO / CD 10360-12 Geometrical Product Specifications (GPS) — Acceptance and reverification tests for coordinate measuring systems (CMS) — Part 12 : articulated arm coordinate measurement machines (CMM)," Geneva (Switzerland), 2014.
- [5] American Society of Mechanical Engineers, "ASME B89.4.19-2006, Performance Evaluation of Laser Based Spherical Coordinate Measurement Systems." pp. 1–76, 2006.
- [6] Verein Deutscher Ingenieure, "VDI/VDE 2617 Part 10. Acceptance and reverification tests of laser tracker," no. January. pp. 1–36, 2011.
- [7] International Organization for Standardization, "ISO / CD 10360-10 Geometrical product specifications (GPS) — Acceptance and reverification tests for coordinate measuring machines (CMS) — Part 10 : Laser trackers for measuring point-to-point distances," 2012.
- [8] A. Weckenmann, T. Estler, G. Peggs, and D. McMurtry, "Probing Systems in Dimensional Metrology," *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 53, no. 2, pp. 657–684, Jan. 2004.
- [9] J. Santolaria, J.-J. Aguilar, D. Guillomía, and C. Cajal, "A crenellated-target-based calibration method for laser triangulation sensors integration in articulated measurement arms," *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 27, no. 2, pp. 282–291, Apr. 2011.

- [10] K. Lau, R. Hocken, and L. Haynes, "Robot performance measurements using automatic laser tracking techniques," *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 2, no. 3–4, pp. 227–236, Jan. 1985.
- [11] P. G. Maropoulos, Y. Guo, J. Jamshidi, and B. Cai, "Large volume metrology process models: A framework for integrating measurement with assembly planning," *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 57, no. 1, pp. 477–480, Jan. 2008.
- [12] W. T. Estler, K. L. Edmundson, G. N. Peggs, and D. H. Parker, "Large-Scale Metrology – An Update," *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 51, no. 2, pp. 587–609, Jan. 2002.
- [13] A. Lewis, B. Hughes, A. Forbes, W. Sun, D. Veal, and K. Nasr, "Determination of misalignment and angular scale errors of a laser tracker using a new geometric model and a multi-target network approach Error model," in *MacroScale 2011*, 2011, pp. 1–16.
- [14] B. Hughes, A. Forbes, A. Lewis, W. Sun, D. Veal, and K. Nasr, "Laser tracker error determination using a network measurement," *Meas. Sci. Technol.*, vol. 22, no. 4, p. 045103, Apr. 2011.
- [15] J. Ouyang, W. Liu, X. Qu, Y. Yan, Z. Liang, and H. Province, "Modeling and self calibration of laser tracker using planar constraints," pp. 1–4.
- [16] J. F. Ouyang, W. L. Liu, D. X. Sun, Y. G. Yan, and J. City, "Laser Tracker Calibration Using Coordinate Measuring Machine," pp. 5–8, 2005.
- [17] A. Brau, J. Santolaria, R. M. Gella, L. Vila, and J. J. Aguilar, "Técnica de verificación de instrumentos de medición por coordenadas portátiles basada en plataforma multi-registro," in *XVIII Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica*, 2013.
- [18] A. Brau Avila, J. Santolaria Mazo, and J. J. Aguilar Martín, "Design and mechanical evaluation of a capacitive sensor-based indexed platform for verification of portable coordinate measuring instruments.," *Sensors (Basel)*, vol. 14, no. 1, pp. 606–33, Jan. 2014.
- [19] International Organization for Standardization, "ISO 10360-8:2013 Geometrical product specifications (GPS) -- Acceptance and reverification tests for coordinate measuring systems (CMS) -- Part 8: CMMs with optical distance sensors." 2013.
- [20] International Organization for Standardization, "ISO 10360-9:2013 Geometrical product specifications (GPS) -- Acceptance and reverification tests for coordinate measuring systems (CMS) -- Part 9: CMMs with multiple probing systems." 2013.
- [21] D. González-Madruga, E. Cuesta González, J. Barreiro García, and A. I. Fernandez-Abia, "Application of a force sensor to improve the reliability of measurement with Articulated Arm Coordinate Measuring Machines.," *Sensors (Basel)*, vol. 13, no. 8, pp. 10430–48, Jan. 2013.
- [22] H. Weckenmann, A. Knauer, M. Kunzmann, "The influence of Measurement Strategy on the Uncertainty of CMM-Measurements," *Ann. CIRP*, vol. 47, no. 1, 1998.

- [23] A. Balsamo, E. Franke, E. Trapet, F. Waeldele, L. De Jonge, P. Vanherck, and K. U. Leuven, "Results of the CIRP-Euromet intercomparison of Ball Plate-Based Techniques for Determining C M M Parametric Errors," *Ann. CIRP*, vol. 46, no. 9, pp. 463–466, 1997.
- [24] L. Arriba, E. Trapet, M. Bartscher, M. Franke, and A. Balsamo, "Methods and Artifacts to Calibrate Large CMMs," in *9th International Conference of the European Society for Precision Engineering & Nanotechnology EUSPEN*, 1999.
- [25] I. Kovac and A. Frank, "Testing and calibration of coordinate measuring arms," *Precis. Eng.*, vol. 25, pp. 90–99, 2001.
- [26] J. Sladek, K. Ostrowska, and A. Gaška, "Modeling and identification of errors of coordinate measuring arms with the use of a metrological model," *Measurement*, vol. 46, no. 1, pp. 667–679, Jan. 2013.
- [27] J. Santolaria, J.-J. Aguilar, J.-A. Yagüe, and J. Pastor, "Kinematic parameter estimation technique for calibration and repeatability improvement of articulated arm coordinate measuring machines," *Precis. Eng.*, vol. 32, no. 4, pp. 251–268, Oct. 2008.
- [28] J. Santolaria, J.-A. Yagüe, R. Jiménez, and J.-J. Aguilar, "Calibration-based thermal error model for articulated arm coordinate measuring machines," *Precis. Eng.*, vol. 33, no. 4, pp. 476–485, Oct. 2009.
- [29] J. Santolaria, A. C. Majarena, D. Samper, A. Brau, and J. Velázquez, "Articulated Arm Coordinate Measuring Machine Calibration by Laser Tracker Multilateration," *Sci. World J.*, vol. 2014, pp. 1–11, 2014.
- [30] J. Santolaria, A. Brau, J. Velázquez, and J. J. Aguilar, "A self-centering active probing technique for kinematic parameter identification and verification of articulated arm coordinate measuring machines," *Meas. Sci. Technol.*, vol. 21, no. 5, p. 055101, May 2010.
- [31] K. Shimojima, R. Furutani, K. Takamasn, and K. Araki, "The Estimation Method of Uncertainty of Articulated coordinate measuring machine," *VDI Berichte*, vol. 1860, pp. 245–250, 2002.
- [32] K. Furutani, R; Shimojima, K; Takamasu, "Kinematical calibration of articulated MMC using multiple simple artifacts," in *XVII IMEKO World Congress*, 2003.
- [33] G. Gao, W. Wang, K. Lin, and Z. Chen, "Kinematic Calibration for Articulated Arm Coordinate Measuring Machines Base on Particle Swarm Optimization," in *2009 Second International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation*, 2009, no. 1, pp. 189–192.
- [34] G. Gatti and G. Danieli, "A practical approach to compensate for geometric errors in measuring arms: application to a six-degree-of-freedom kinematic structure," *Meas. Sci. Technol.*, vol. 19, no. 1, p. 15107, 2008.
- [35] A. Piratelli-Filho and G. R. Lesnau, "Virtual spheres gauge for coordinate measuring arms performance test," *Measurement*, vol. 43, no. 2, pp. 236–244, Feb. 2010.

- [36] A. Piratelli-Filho, F. H. T. Fernandes, and R. V. Arencibia, "Application of Virtual Spheres Plate for AACMMs evaluation," *Precis. Eng.*, vol. 36, no. 2, pp. 349–355, Apr. 2012.
- [37] D. González-Madruga, E. Cuesta, H. Patiño, J. Barreiro, and S. Martínez-Pellitero, "Evaluation of AACMM Using the Virtual Circles Method," *Procedia Eng.*, vol. 63, pp. 243–251, Jan. 2013.
- [38] H. Patiño, D. Gonzalez-Madruga, E. Cuesta, B. Alvarez, and J. Barreiro, "Study of Virtual Features in the Performance of Coordinate Measuring Arms," *Procedia Eng.*, vol. 69, pp. 433–441, 2014.
- [39] E. Cuesta, D. González-Madruga, B. J. Alvarez, and J. Barreiro, "A new concept of feature-based gauge for coordinate measuring arm evaluation," *Meas. Sci. Technol.*, vol. 25, no. 6, p. 065004, Jun. 2014.
- [40] R. Furutani, K. Shimojima, and K. Takamasu, "Parameter Calibration for non-Cartesian CMM," *VDI Berichte*, vol. 1860, pp. 317–26, 2004.
- [41] H. Hamana, M. Tominaga, M. Ozaki, and R. Furutani, "Calibration of Articulated Arm Coordinate Measuring Machine Considering Measuring Posture," *Int. J. Autom.*, vol. 5, no. 2, pp. 1–6, 2011.
- [42] S. D. Phillips, "Laser Trackers : Testing and Standards." 2012.
- [43] J. Unkuri, A. Rantanen, J. Manninen, V.-P. Esala, and A. Lassila, "Interferometric 30 m bench for calibrations of 1D scales and optical distance measuring instruments," *Meas. Sci. Technol.*, vol. 23, no. 9, p. 094017, Sep. 2012.
- [44] M. Hayati, S; Mirmirani, "Improving the absolute positioning accuracy of robot manipulators," *J. Robot. Syst.*, pp. 397–413, 1985.
- [45] S. Hayati, K. Tso, and G. Roston, "Robot geometry calibration," *Proceedings. 1988 IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, pp. 947–951, 1988.
- [46] T.-W. H. L. J. Everett, "The Theory of Kinematic Parameter Identification for Industrial Robots," *J. Dyn. Syst. Meas. Control*, vol. 110, no. 1, 1986.
- [47] C. Veitschegger, W.K. Wu, "A Method for Calibration and Compensation Robot Kinematic Errors," in *Proceedines of the 1987 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1987, pp. 39–44.
- [48] C. Veitschegger, W.K. Wu, "Robot Accuracy Based on Kinematics," *IEEE J. Robot. Autom.*, vol. RA-2, pp. 171–179, 1986.
- [49] C. Veitschegger, W.K. Wu, "Robot Accuracy Analysis," in *Proceedings of the 1985 IEEE Conference on Cybernetics*, 1985, pp. 425–430.
- [50] L. Everett, M. Driels, and B. Mooring, "Kinematic modelling for robot calibration," *Proceedings. 1987 IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, vol. 4, pp. 183–189, 1987.

- [51] H. W. Stone, A. C. Sanderson, and C. P. Neuman, "Arm signature identification," in *IEEE International Conference on Robotics and Automation.*, 1986, pp. 41–48.
- [52] U. S. P. Morris R. Driels, "Generalized joint model for robot manipulator kinematic calibration and compensation," *J. Robot. Syst.*, no. 1, pp. 77–114, 1987.
- [53] J. M. Hollerbach and C. W. Wampler, "The Calibration Index and Taxonomy for Robot Kinematic Calibration Methods," *Int. J. Rob. Res.*, vol. 15, no. 6, pp. 573–591, Dec. 1996.
- [54] H. Zhuang, Z. S. Roth, S. Member, and F. Hamano, "A Complete and Parametrically Continuous Kinematic Model for Robot Manipulators," *IEEE Trans. Robot. Autom.*, vol. 8, no. 4, 1992.
- [55] H. Zhuang and Z. S. Roth, "Robot calibration using the CPC error model," *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 9, no. 3, pp. 227–237, Jun. 1992.
- [56] C. Gong, J. Yuan, and J. Ni, "A Self-Calibration Method for robotic measurement system," *J. Manuf. Sci. Eng.*, vol. 122, no. February 2000, pp. 174–181, 2000.
- [57] J. Santolaria, J. Conte, M. Pueo, and C. Javierre, "ROTATION ERROR MODELING AND IDENTIFICATION FOR ROBOT KINEMATIC CALIBRATION BY CIRCLE POINT METHOD," *Metrol. Meas. Syst.*, vol. 21, no. 1, pp. 85–98, Jan. 2014.
- [58] J. Santolaria, J. Conte, and M. Ginés, "Laser tracker-based kinematic parameter calibration of industrial robots by improved CPA method and active retroreflector," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 66, no. 9–12, pp. 2087–2106, Sep. 2012.
- [59] Sklar ME, "Geometric calibration of industrial manipulators by circle point analysis," in *Proc 2nd Conf Recent Adv Robot*, 1989, pp. 178–202.
- [60] A. Nubiola and I. a. Bonev, "Absolute robot calibration with a single telescoping ballbar," *Precis. Eng.*, pp. 1–9, Jan. 2014.
- [61] J. Chen and L. Chao, "Positioning error analysis for robot manipulators with all rotary joints," *IEEE J. Robot. Autom.*, vol. 3, no. 6, pp. 539–545, Dec. 1987.
- [62] B. Bongardt, "Sheth–Uicker convention revisited," *Mech. Mach. Theory*, vol. 69, pp. 200–229, Nov. 2013.
- [63] A. Goswami, A. Quaid, and M. Peshkin, "Identifying Robot Parameters Using Partial Pose Information," in *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, 1992, pp. 6–14.
- [64] P. Y. Tao, G. Y. Member, Y. C. Sun, M. T. Fellow, and C. Y. Lai, "Product-Of-Exponential (POE) Model for Kinematic Calibration of Robots with Joint Compliance," in *International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, 2012, pp. 496–501.
- [65] X. Yang, L. Wu, J. Li, and K. Chen, "A minimal kinematic model for serial robot calibration using POE formula," *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 30, no. 3, pp. 326–334, Jun. 2014.

- [66] J. Santolaria, J. Mainz, A. Brau, D. Samper, and J. J. Aguilar, "CALIBRATION TECHNIQUE OF ARTICULATED ARMS COORDINATE MEASURING MACHINES BASED ON LARGE SCALE MULTILATERATION SYSTEM GAUGES," in *XX IMEKO World Congress Metrology for Green Growth*, 2012, pp. 9–12.
- [67] X. H. Li, B. Chen, and Z. R. Qiu, "The calibration and error compensation techniques for an Articulated Arm CMM with two parallel rotational axes," *Measurement*, vol. 46, no. 1, pp. 603–609, Jan. 2013.
- [68] P. D. Lin and C.-H. Lu, "Modeling and Sensitivity Analysis of Laser Tracking Systems by Skew-Ray Tracing Method," *J. Manuf. Sci. Eng.*, vol. 127, no. 3, p. 654, 2005.
- [69] B. Muralikrishnan, D. Sawyer, C. Blackburn, S. Phillips, B. Borchardt, and W. T. Estler, "ASME B89.4.19 Performance Evaluation Tests and Geometric Misalignments in Laser Trackers," *J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol.*, vol. 114, no. 1, p. 21, Jan. 2009.
- [70] Raimund Loser and Stephen Kyle, "Alignment and field check procedures for What ' s the purpose of alignment ?," in *Boeing Large Scale Optical Metrology Seminar, 1999*, 1999.
- [71] A. C. Majarena Bello, J. Conte Blasco, R. Acero Cacho, J. Santolaria Mazo, and A. Brau Ávila, "Estrategias de modelado cinemático e identificación de parámetros de láser trackers," in *XX Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica*, 2014, p. 193.
- [72] A. Brau, "Diseño, fabricación y calibración de una plataforma multiregistro para la verificación de instrumentos de medir por coordenadas portátiles.," Universidad de Zaragoza, 2013.
- [73] J. W. Zhuang, Hanqi, "Optimal planning of robot calibration experiments by genetic algorithms," in *IEEE International Conference on Robotic and Automation*, 1996, no. April.
- [74] Y. Sun and J. M. Hollerbach, "Observability index selection for robot calibration," in *2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2008, pp. 831–836.
- [75] W. C. Lau, K., Hocken, R. J., & Haight, "Automatic laser tracking interferometer system for robot metrology," *Precis. Eng.*, vol. 8, no. 1, 1986.
- [76] K. C. Hocken, R. J., & Lau, "Three and five axes laser tracker systems," US4714339 A1987.
- [77] S. Aguado, D. Samper, J. Santolaria, and J. J. Aguilar, "Identification strategy of error parameter in volumetric error compensation of machine tool based on laser tracker measurements," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 53, no. 1, pp. 160–169, Feb. 2012.
- [78] T. Jiang, Hong; Osawa, Sonko; Takatsuji, Toshiyuki; Noguchi, Hironori; Kurosawa, "High-performance laser tracker using an articulating mirror for the calibration of coordinate measuring machine," *Opt. Eng.*, vol. 41, no. 3, p. 632, Mar. 2002.
- [79] K. Umetsu, R. Furutnani, S. Osawa, T. Takatsuji, and T. Kurosawa, "Geometric calibration of a coordinate measuring machine using a laser tracking system," *Meas. Sci. Technol.*, vol. 16, no. 12, pp. 2466–2472, Dec. 2005.

- [80] J. Schwenke, H. Franke, M. Hannaford, "Error mapping of CMMs and machine tools by a single tracking interferometer," *CIRP Ann. Technol.*, vol. 54, no. 1, pp. 475–478, 2005.
- [81] S. Aguado, J. Santolaria, D. Samper, and J. J. Aguilar, "Influence of measurement noise and laser arrangement on measurement uncertainty of laser tracker multilateration in machine tool volumetric verification," *Precis. Eng.*, vol. 37, no. 4, pp. 929–943, Oct. 2013.
- [82] A. Lewis, "CMM developments at the National Physical Laboratory," 2006.
- [83] T. Takatsuji, Y. Koseki, M. Goto, and T. Kurosawa, "Restriction on the arrangement of laser trackers in laser trilateration," *Meas. Sci. Technol.*, vol. 9, no. 8, pp. 1357–1359, Aug. 1998.
- [84] T. Takatsuji, M. Goto, A. Kiritani, T. Kurosawa, and Y. Tanimura, "The relationship between the measurement error and the arrangement of laser trackers in laser trilateration," *Meas. Sci. Technol.*, vol. 11, no. 5, pp. 477–483, May 2000.
- [85] G. Zhang, X. H. Li, Y. B. Lin, X. L. Liu, X. F. Li, J. B. Guo, and Z. R. Qiu, "Study on the Optimal Design of Laser-based Multi-lateration Systems," *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 52, no. 1, pp. 427–430, 2003.
- [86] D. Zhang, S. Rolt, and P. G. Maropoulos, "Modelling and optimization of novel laser multilateration schemes for high-precision applications," *Meas. Sci. Technol.*, vol. 16, no. 12, pp. 2541–2547, Dec. 2005.
- [87] A. Hughes, E.B., Wilson and G. N. Peggs, "Design of a high accuracy CMM based on multi-lateration techniques," *Ann. CIRP*, vol. 49, no. 1, pp. 391–394, 2000.
- [88] D. González-Madruga, J. Barreiro, E. Cuesta, and S. Martínez-Pellitero, "Influence of human factor in the AACMM performance: a new evaluation methodology," *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, vol. 15, no. 7, pp. 1283–1291, Aug. 2014.
- [89] Centro Español de Metrología, Ed., "JCGM 101:2008. Suplemento 1 de la 'Guía para la expresión de la incertidumbre de medida'. Propagación de incertidumbres aplicando el método de Monte Carlo." 2008.