



UNIVERSIDAD DE LEÓN

Departamento de Ingeniería Mecánica, Informática y Aeroespacial

TESIS DOCTORAL

**DESARROLLO DE TÉCNICAS DE MEJORA DE
LA FIABILIDAD EN LA MEDICIÓN CON
BRAZOS PORTÁTILES DE MEDIR POR
COORDENADAS**

Daniel González Madruga

Directores de Tesis

Dr. D. Joaquín Barreiro García

Dr. D. Eduardo Cuesta González

León, Noviembre 2013



UNIVERSIDAD DE LEÓN

Departamento de Ingeniería Mecánica, Informática y Aeroespacial

TESIS DOCTORAL

**DESARROLLO DE TÉCNICAS DE MEJORA DE
LA FIABILIDAD EN LA MEDICIÓN CON
BRAZOS PORTÁTILES DE MEDIR POR
COORDENADAS**

Doctorando

Daniel González Madruga

Directores de Tesis

Dr. D. Joaquín Barreiro García
Profesor titular de Universidad
Universidad de León

Dr. D. Eduardo Cuesta González
Profesor titular de Universidad
Universidad de Oviedo

Tribunal

Presidente:

Dr. D. _____
Catedrático/Profesor
Universidad

Secretario

Dr. D. _____
Catedrático/Profesor
Universidad

Vocal

Dr. D. _____
Catedrático/Profesor
Universidad

A mi madre y hermanos

Agradecimientos

A lo largo de esta Tesis he encontrado numerosas dificultades, superadas gracias a la inestimable ayuda y apoyo ofrecido por los directores de Tesis, compañeros de la Universidad de León y Universidad de Oviedo, familia y amigos.

En primer lugar, quiero agradecer profundamente a *Eduardo Cuesta González* y a *Joaquín Barreiro García* por su dedicación como directores de Tesis, por las ideas aportadas, los ánimos que me han dado en todo momento y por la fructífera guía que han sido en este proceso a pesar de la situación que sufre la investigación en la actualidad y las dificultades surgidas en el desarrollo de la Tesis.

Además, quiero remarcar la importancia del continuo apoyo e inmejorable ejemplo de las compañeras del Área de Fabricación de la Universidad de León: *Susana Martínez Pellitero* y *Ana Fernández Abia*.

De igual manera agradezco a los compañeros del Área de Fabricación de la Universidad de Oviedo por acogerme en mis estancias en Gijón. Los aportes de *Braulio José Álvarez Álvarez*, *Fernando Sánchez Lasheras* y el personal de laboratorio *Agustín Castaño Rivero* y *Manuel Amado Carracedo* por la fabricación y calibración del patrón de características propuesto en esta Tesis.

Quiero agradecer enormemente a mi madre y mis hermanos por su apoyo durante todo este tiempo sin el cual habría sido imposible realizar esta Tesis. Sería impensable concebir esta Tesis sin el amor y la dedicación que mi madre puso en mi educación y en la de mis hermanos, sin haberme enseñado que la felicidad y satisfacción personal no es un objetivo sino el camino elegido, que el conocimiento aporta libertad y la continua motivación que he encontrado en ellos. A pesar de mis incesantes charlas sobre la Tesis, estáis a mi lado.

También ocupan un lugar importante mis compañeros de Tesis de la Universidad de León: *Laura*, *Víctor*, *Diego*, *Maite*, *Oscar* y *Octavio* que son mi punto de apoyo en esta difícil aventura. Siempre llegan con desbordantes ganas de alegrar y hacer fácil el día.

Por último quiero dar las gracias a mis amigos por convertir los momentos difíciles en momentos pasajeros y hacer de los buenos momentos experiencias inolvidables.

Esta tesis también os pertenece.

Índice

AGRADECIMIENTOS.....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	XI
ÍNDICE DE TABLAS	XV
RESUMEN	XVII
ABSTRACT.....	XIX
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 ÁMBITO DE APLICACIÓN DE LA TESIS	2
1.2 OBJETIVOS DE LA TESIS	4
1.3 ESTRUCTURA DE LA TESIS.....	6
2. ESTADO DEL ARTE.....	9
2.1 INTRODUCCIÓN	10
2.2 BRAZOS PORTÁTILES DE MEDIR POR COORDENADAS.....	13
2.2.1 TECNOLOGÍA DE LOS BRAZOS DE MEDIR POR COORDENADAS.....	14
2.2.2 PRECISIÓN DE LOS BRAZOS DE MEDIR POR COORDENADAS	18
2.3 METODOLOGÍAS DE CALIBRACIÓN Y EVALUACIÓN	20
2.3.1 MODELO CINEMÁTICO	21
2.3.2 PATRONES Y ACCESORIOS PARA LA CALIBRACIÓN	23
2.3.3 TOMA DE DATOS: MEDICIONES DEL PATRÓN	29
2.3.4 FUNCIÓN OBJETIVO	34
2.3.5 ALGORITMO DE OPTIMIZACIÓN: TÉCNICA DE IDENTIFICACIÓN DE PARÁMETROS	36
2.3.6 TRATAMIENTO DE LAS FUENTES DE ERROR	37
2.4 CONSIDERACIONES GENERALES.....	42
3. ESTUDIO DE LA PRECISIÓN DE LOS BRAZOS DE MEDIR POR COORDENADAS.....	43
3.1 INTRODUCCIÓN	44
3.2 MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE BRAZOS DE MEDIR POR COORDENADAS	46
3.2.1 EXPRESIÓN DE LA INCERTIDUMBRE	47
3.2.2 EXPRESIÓN DE LA INCERTIDUMBRE EN MMC Y BRAZOS DE MEDIR POR COORDENADAS.....	52
3.2.3 EVALUACIÓN: ISO 10360-2	54
3.2.4 EVALUACIÓN: ASME B89.4.22	56
3.2.5 EVALUACIÓN: VDI/VDE 2617 - 9.....	63
3.3 ESTUDIOS PRELIMINARES: INFLUENCIA DEL OPERARIO Y GEOMETRÍA.....	67
3.3.1 EVALUACIÓN DEL FACTOR OPERARIO	67
3.3.2 EVALUACIÓN DE CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS	69
3.4 CONCLUSIONES DE PARTIDA	74
4. EVALUACIÓN DE LOS BRAZOS DE MEDIR POR COORDENADAS CON PATRÓN DE CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS.....	77
4.1 INTRODUCCIÓN	78
4.2 PATRÓN DE CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS.....	83
4.2.1 CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS INCLUIDAS EN EL PATRÓN.....	85
4.2.2 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE POSICIONAMIENTO	89
4.3 ENSAYO DE EVALUACIÓN CON PATRÓN DE CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS	91
4.3.1 METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN	91

4.3.2	RESULTADOS DEL ENSAYO	93
4.3.3	CONCLUSIONES.....	101
4.4	BALANCE DE INCERTIDUMBRE EN UN PROCESO DE MEDICIÓN: PATRÓN, OPERARIO, TÉCNICA DE MEDICIÓN Y AACMM	107
4.4.1	METODOLOGÍA	107
4.4.2	RESULTADOS	114
4.5	ENSAYO DE EVALUACIÓN CON ESFERAS Y CÍRCULOS VIRTUALES	122
4.5.1	RESULTADOS	123
4.5.2	CONCLUSIONES.....	128
5.	EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DEL OPERARIO: FUERZA DE CONTACTO	129
5.1	INTRODUCCIÓN	130
5.2	DESARROLLO DE SENSOR DE MEDICIÓN DE LA FUERZA DE CONTACTO.....	144
5.2.1	DISEÑO	146
5.2.2	INCERTIDUMBRE DEL SENSOR.....	150
5.2.3	TRATAMIENTO DE LAS CURVAS DE FUERZA	152
5.3	ENSAYOS DE FUERZA DE CONTACTO CON PATRONES GEOMÉTRICOS	156
5.3.1	ANÁLISIS DE LOS DATOS	157
5.3.2	RESULTADOS	163
5.4	MODELO DE COMPENSACIÓN DE LA FUERZA DE CONTACTO EN ANILLO PATRÓN	172
5.4.1	DEFORMACIÓN DEL PALPADOR.....	179
5.4.2	MODELO DE CORRECCIÓN DE LA FUERZA DE CONTACTO	180
5.4.3	INCERTIDUMBRE DEL PROCESO DE MEDICIÓN	183
5.4.4	RESULTADOS DEL ENSAYO	186
5.5	CONCLUSIONES	190
6.	CONCLUSIONES.....	193
6.1	CONCLUSIONES	194
6.2	TRABAJOS FUTUROS	198
6.3	DISEMINACIÓN DE RESULTADOS	200
	BIBLIOGRAFÍA.....	203

Índice de figuras

FIGURA 2 - 1 BRAZOS ARTICULADOS DE MEDIR POR COORDENADAS	10
FIGURA 2 - 2 CONFIGURACIONES TÍPICAS DE BRAZOS DE MEDIR POR COORDENADAS	13
FIGURA 2 - 3 ENCODERS ABSOLUTOS.....	14
FIGURA 2 - 4 BRAZO CON BASE MAGNÉTICA Y TIPOS DE BASE	15
FIGURA 2 - 5 EJEMPLOS DE TRÍPODES PARA BRAZOS DE MEDIR POR COORDENADAS	15
FIGURA 2 - 6 EJEMPLOS DE PALPADORES PARA BRAZO DE MEDIR.....	16
FIGURA 2 - 7 PALPADORES “TOUCH TRIGGER” PARA BRAZO DE MEDIR POR COORDENADAS.....	17
FIGURA 2 - 8 BRAZOS CON ESCÁNER LÁSER	18
FIGURA 2 - 9 MODELO DENAVIT -HARTENBERG Y EJEMPLO APLICADO A BRAZOS DE MEDIR POR COORDENADAS ..	21
FIGURA 2 - 10 PATRONES PARA CALIBRACIÓN DE FURUTANI ET AL.	24
FIGURA 2 - 11 PATRÓN PARA CALIBRACIÓN DE GATTI ET AL.	24
FIGURA 2 - 12 PATRÓN PARA CALIBRACIÓN DE OUYANG ET AL.	25
FIGURA 2 - 13 PATRÓN PARA CALIBRACIÓN DE KOVAC ET AL.	25
FIGURA 2 - 14 PATRONES DE CALIBRACIÓN DE BARRAS CON ESFERAS	26
FIGURA 2 - 15 ESQUEMA DE PATRÓN DE ASIENTO CINEMÁTICO PARA CALIBRACIÓN DE GAO ET AL.	27
FIGURA 2 - 16 PATRONES DE ESFERAS VIRTUALES: BARRA Y PLACA.....	28
FIGURA 2 - 17 BARRA CON ASIENTOS CINEMÁTICOS DE TRES ESFERAS	28
FIGURA 2 - 18 PLATAFORMA MULTIREGISTRO PARA CALIBRACIÓN	29
FIGURA 2 - 19 PALPADORES DE CALIBRACIÓN DE SHIMOJIMA ET AL.	30
FIGURA 2 - 20 SONDA AUTOCENTRANTE PASIVA Y ACTIVA.....	30
FIGURA 2 - 21 APARATO DE CALIBRACIÓN DE HAMANA ET AL. Y DETALLE DE UNIÓN	31
FIGURA 2 - 22 ESPACIO DE TRABAJO PARA LA CALIBRACIÓN DE HAMANA ET AL.	32
FIGURA 2 - 23 POSICIONES DEL PATRÓN PARA CALIBRACIÓN SANTOLARIA ET AL.	33
FIGURA 2 - 24 POSICIONES DE PATRÓN PARA CALIBRACIÓN DE PIRATELLI ET AL.	34
FIGURA 3 - 1 DISTRIBUCIÓN DE LOS PUNTOS EN EL ENSAYO DE ERROR DE PALPADO	55
FIGURA 3 - 2 FUERZAS QUE ACTÚAN SOBRE LA BASE DE LOS BRAZOS DE MEDIR POR COORDENADAS	57
FIGURA 3 - 3 ZONAS DEL ENSAYO DE "ARTICULACIÓN DE PUNTO ÚNICO"	58
FIGURA 3 - 4 POSICIONES DE LAS ARTICULACIONES PARA EL ENSAYO "ARTICULACIÓN DE PUNTO ÚNICO"	59
FIGURA 3 - 5 DISTRIBUCIÓN DE PUNTOS PARA ENSAYO CON PALPADOR CON DETECCIÓN DE CONTACTO	59
FIGURA 3 - 6 OCTANTES DE ESFERA PARA EL ENSAYO DE PRECISIÓN VOLUMÉTRICA	61
FIGURA 3 - 7 POSICIONES PARA EL ENSAYO DE PRECISIÓN VOLUMÉTRICA	61
FIGURA 3 - 8 EJEMPLO DE RESULTADOS DEL ENSAYO DE PRECISIÓN VOLUMÉTRICA.....	62
FIGURA 3 - 9 POSICIONES DE LA ESFERA Y DE LAS ARTICULACIONES PARA EL ENSAYO DE ERROR DE PALPADO	63
FIGURA 3 - 10 POSICIONES DE LAS ARTICULACIONES PARA EL ENSAYO DE RENDIMIENTO VOLUMÉTRICO.....	65
FIGURA 3 - 11 VOLÚMENES PARCIALES DEL ENSAYO DE RENDIMIENTO VOLUMÉTRICO	66

FIGURA 3 - 12 RESULTADOS DE REPETIBILIDAD Y REPRODUCIBILIDAD POR OPERARIOS	69
FIGURA 3 - 13 PATRÓN CON CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS	70
FIGURA 3 - 14 ERROR RELATIVO POR TOLERANCIA	72
FIGURA 4 - 1 PATRÓN DE ESFERAS CON DISTANCIAS ENTRE ESFERAS	80
FIGURA 4 - 2 ASIENTOS CINEMÁTICOS.....	81
FIGURA 4 - 3 PATRÓN DE CARACTERÍSTICAS PARA EL ESTUDIO DE BRAZOS DE MEDIR POR COORDENADAS.....	84
FIGURA 4 - 4 ESFERAS VIRTUALES	87
FIGURA 4 - 5 CÍRCULOS VIRTUALES DEL PATRÓN.....	88
FIGURA 4 - 6 SISTEMA DE POSICIONAMIENTO DEL PATRÓN DE CARACTERÍSTICAS.....	90
FIGURA 4 - 7 DISTINTAS POSICIONES DEL PATRÓN DURANTE SU EVALUACIÓN	91
FIGURA 4 - 8 ERROR DE DIÁMETRO	94
FIGURA 4 - 9 ERROR DE DISTANCIA ENTRE PLANOS	96
FIGURA 4 - 10 ERROR DE DISTANCIA ENTRE ESFERAS.....	96
FIGURA 4 - 11 ERROR DE DISTANCIA ENTRE CILINDROS.....	97
FIGURA 4 - 12 ERROR DE PLANITUD	98
FIGURA 4 - 13 ERROR DE ESFERICIDAD.....	98
FIGURA 4 - 14 ERROR DE CILINDRICIDAD	99
FIGURA 4 - 15 ERROR DE PARALELISMO Y DIFERENCIA DE ERROR CON RESPECTO A MMC.....	100
FIGURA 4 - 16 ERROR DE PARALELISMO	101
FIGURA 4 - 17 COMPARACIÓN DE ERRORES DE DISTANCIA	103
FIGURA 4 - 18 COMPARACIÓN DE ERRORES PARALELISMO	103
FIGURA 4 - 19 POSICIÓN DEL BRAZO Y DEL PATRÓN	108
FIGURA 4 - 20 EJEMPLO DE GRÁFICA DE FRECUENCIA POR CADA OPERARIO	115
FIGURA 4 - 21 DESVIACIÓN ESTÁNDAR PARA TOLERANCIAS GEOMÉTRICAS	117
FIGURA 4 - 22 PORCENTAJE DE VARIANZA PARA TOLERANCIAS GEOMÉTRICAS.....	118
FIGURA 4 - 23 DESVIACIÓN ESTÁNDAR PARA TOLERANCIAS DIMENSIONALES	120
FIGURA 4 - 24 PORCENTAJE DE VARIANZA PARA TOLERANCIAS DIMENSIONALES.....	120
FIGURA 4 - 25 CÍRCULOS VIRTUALES DEL PATRÓN.....	122
FIGURA 4 - 26 ERROR DE CENTRO PARA ESFERA 1 Y 2 Y CÍRCULOS 1.1 Y 2.1	124
FIGURA 4 - 27 ERROR DE DIÁMETRO PARA ESFERA 1 Y 2 Y CÍRCULOS 1.1 Y 2.1.....	125
FIGURA 4 - 28 ERROR DE DISTANCIA PARA ESFERA 1 Y 2 Y CÍRCULOS 1.1 Y 2.1	125
FIGURA 4 - 29 ERROR MEDIO DE CENTRO PARA ESFERAS Y CÍRCULOS VIRTUALES.....	126
FIGURA 4 - 30 DESVIACIÓN ESTÁNDAR PARA ERROR DE DIÁMETRO DE ESFERAS Y CÍRCULOS VIRTUALES	127
FIGURA 4 - 31 DESVIACIÓN ESTÁNDAR PARA ERROR DE DISTANCIA DE ESFERAS Y CÍRCULOS VIRTUALES	127

FIGURA 5 - 1 ERROR DEL PALPADOR.....	132
FIGURA 5 - 2 ERROR EN LA ESFERA DEL PALPADOR	135
FIGURA 5 - 3 ERROR EN LA CALIBRACIÓN CON ESFERA.....	136
FIGURA 5 - 4 PARÁMETROS DE MEDICIÓN DEL PALPADOR.....	137
FIGURA 5 - 5 MODELO DE CORRECCIÓN DEL PALPADOR	138
FIGURA 5 - 6 MODELO 3D DE CORRECCIÓN DE ERROR DE PALPADOR	138
FIGURA 5 - 7 ESTUDIO DEL PALPADOR CON TRANSDUCTOR	139
FIGURA 5 - 8 ESTUDIO DE PALPADOR CON TRANSDUCTOR Y MESA ROTATIVA.....	140
FIGURA 5 - 9 ESTUDIO DE PALPADOR CON TRANSDUCTOR EN PIEZA Y ENCODER DE REJILLA.....	140
FIGURA 5 - 10 ESTUDIO DE PALPADORES CON GALGAS EXTENSIOMÉTRICAS	141
FIGURA 5 - 11 CALIBRACIÓN DE PALPADOR CON CUBO PATRÓN.....	141
FIGURA 5 - 12 CALIBRACIÓN DE PALPADOR CON INTERFERÓMETRO.....	142
FIGURA 5 - 13 PALPADORES DEL BRAZO DE MEDIR POR COORDENADAS	146
FIGURA 5 - 14 FUERZA EN EL CONTACTO ENTRE PALPADOR Y PIEZA	147
FIGURA 5 - 15 DISTRIBUCIÓN DE LAS GALGAS EXTENSIOMÉTRICAS EN EL PALPADOR.....	148
FIGURA 5 - 16 SISTEMA DE MEDICIÓN DE LA FUERZA DE CONTACTO	148
FIGURA 5 - 17 EQUIPO DE ADQUISICIÓN DE DATOS Y BRAZO DE MEDIR POR COORDENADAS	149
FIGURA 5 - 18 EJEMPLO DE FUERZA DE CONTACTO.....	150
FIGURA 5 - 19 FUERZA DE CONTACTO EN VALOR ABSOLUTO.....	153
FIGURA 5 - 20 DISTRIBUCIÓN DE PUNTOS UNIFORME EN CILINDRO.....	154
FIGURA 5 - 21 IDENTIFICACIÓN DE PUNTOS DE CONTACTO.....	154
FIGURA 5 - 22 FUERZA DE CONTACTO DE MEDICIÓN	155
FIGURA 5 - 23 PATRONES DE CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS	156
FIGURA 5 - 24 RELACIÓN ENTRE FUERZA Y ERRORES POR CARACTERÍSTICA GEOMÉTRICA.....	166
FIGURA 5 - 25 EJEMPLO DE DISTRIBUCIÓN EN MEDICIÓN CON BRAZO DE MEDIR.....	173
FIGURA 5 - 26 ERROR DE LOS PUNTOS DE CONTACTO	174
FIGURA 5 - 27 ERROR DE DIÁMETRO DE CILINDRO.....	175
FIGURA 5 - 28 ERROR DE FORMA DE CILINDRO.....	175
FIGURA 5 - 29 RELACIÓN ENTRE EL ERROR DE DIÁMETRO Y LA FUERZA DE CONTACTO	177
FIGURA 5 - 30 RELACIÓN ENTRE EL ERROR DE FORMA Y LA FUERZA DE CONTACTO	177
FIGURA 5 - 31 RELACIÓN ENTRE EL ERROR DE DIÁMETRO Y PARÁMETROS DE DISPERSIÓN DE LA FUERZA DE CONTACTO.....	178
FIGURA 5 - 32 RELACIÓN ENTRE EL ERROR DE FORMA Y PARÁMETROS DE DISPERSIÓN DE LA FUERZA DE CONTACTO	178
FIGURA 5 - 33 MODELO DEL PALPADOR POR ELEMENTOS FINITOS	179
FIGURA 5 - 34 MODELO DE CORRECCIÓN DE LA FUERZA DE CONTACTO.....	180
FIGURA 5 - 35 MODELO DE CORRECCIÓN DE LA FUERZA DE CONTACTO.....	181
FIGURA 5 - 36 CÁLCULO DE LA DIRECCIÓN DEL ERROR DE PALPADO	182

FIGURA 5 - 37 PUNTOS DE CONTACTO Y ERROR DE DIÁMETRO SIN CORREGIR Y CORREGIDOS (*) PARA EL MODELO
CON FUERZA PUNTUAL 186

FIGURA 5 - 38 RESULTADOS DEL ERROR DE DIÁMETRO TRAS APLICAR EL MODELO DE CORRECCIÓN..... 187

FIGURA 5 - 39 RESULTADOS DEL ERROR DE FORMA PARA EL MODELO DE FUERZA PUNTUAL 189

Índice de tablas

TABLA 2. 1 MODELOS DE BRAZOS DE MEDIR POR COORDENADAS	19
TABLA 2. 2 RESUMEN DE METODOLOGÍAS DE CALIBRACIÓN APLICADAS POR LOS AUTORES	41
TABLA 3. 1 ERRORES RELATIVOS POR TOLERANCIA	73
TABLA 4. 1 CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS Y TOLERANCIAS INCLUIDAS EN EL PATRÓN	85
TABLA 4. 2 DETALLE DE CARACTERÍSTICAS INCLUIDAS EN EL PATRÓN	86
TABLA 4. 3 POSICIONES DEL PATRÓN PROPUESTAS.....	92
TABLA 4. 4 ESTRATEGIA DE MEDICIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE MEDICIÓN.....	93
TABLA 4. 5 ERRORES DE PERPENDICULARIDAD Y ANGULARIDAD.....	101
TABLA 4. 6 RMS PARA CADA TOLERANCIA.....	104
TABLA 4. 7 Qp PARA CADA TOLERANCIA	105
TABLA 4. 8 MEDICIONES PARA EL DIÁMETRO DE LA ESFERA.....	110
TABLA 4. 9 CÁLCULOS ANOVA	111
TABLA 4. 10 RESUMEN DE CÁLCULOS DE MEDIAS DE ANOVA	112
TABLA 4. 11 EJEMPLO DE CÁLCULOS ANOVA PARA EL DIÁMETRO DE LA ESFERA 0 (Sph0).....	113
TABLA 4. 12 RESULTADOS DE DESVIACIÓN PARA DIÁMETRO DE ESFERA	116
TABLA 4. 13 EJEMPLO DE VARIANZA Y DESVIACIÓN ESTÁNDAR PARA DIÁMETRO DE ESFERAS.....	117
TABLA 4. 14 POSICIONES DE EVALUACIÓN PARA LAS ESFERAS VIRTUALES	123
TABLA 4. 15 DESVIACIONES ESTÁNDAR GLOBALES DE ESFERAS Y CÍRCULOS VIRTUALES.	128
TABLA 5. 1 CÁLCULO DE INCERTIDUMBRE PARA EL SENSOR DE FUERZA DE CONTACTO	152
TABLA 5. 2 DISTRIBUCIÓN DE PUNTOS POR CARACTERÍSTICA GEOMÉTRICA.....	157
TABLA 5. 3 CÁLCULOS ANOVA	160
TABLA 5. 4 EJEMPLO ANOVA PARA ERROR DE FORMA DE CILINDROS	163
TABLA 5. 5 RESULTADOS ANOVA PARA LAS CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS Y LA FUERZA DE CONTACTO	163
TABLA 5. 6 RESULTADOS DE CORRELACIÓN PARA CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS Y FUERZA DE CONTACTO ...	169
TABLA 5. 7 FUERZA DE CONTACTO PARA LAS MEDICIONES	176
TABLA 5. 8 CÁLCULO DE INCERTIDUMBRE PARA EL ANILLO PATRÓN	185
TABLA 5. 9 CÁLCULO DE INCERTIDUMBRE PARA LAS MEDICIÓN DEL ANILLO PATRÓN	185
TABLA 5. 10 CÁLCULO DE INCERTIDUMBRE PARA LAS MEDICIÓN DEL ANILLO PATRÓN CON CORRECCIÓN POR DEFORMACIÓN DEL PALPADOR	185
TABLA 5. 11 RESULTADOS DE LOS ERRORES CON LOS MODELOS DE COMPENSACIÓN	188

Resumen

Desarrollo de Técnicas de Mejora de la Fiabilidad en la Medición con Brazos Portátiles de
Medir por Coordenadas

Autor: Daniel González Madruga

Directores: Dr. D. Eduardo Cuesta González & Dr. D. Joaquín Barreiro García

La rápida expansión de los brazos de medir por coordenadas (AACMM o CMA) por la industria ha supuesto la aceptación de un instrumento metrológico que aporta flexibilidad a la tarea de inspección. Aunque las bases de funcionamiento de los brazos de medir por coordenadas han sido ya estudiadas, todavía existen una gran falta de conocimiento sobre su comportamiento, la definición y la determinación de sus errores de medición, sus metodologías de evaluación y el impacto de las diferentes fuentes de error.

En esta tesis se presenta un estudio completo del conocimiento actual sobre brazos en medición por contacto para proponer una metodología capaz de determinar correctamente el error que alcanzan. El objetivo final que se pretende es aumentar la fiabilidad y trazabilidad de los procesos de medición con estos dispositivos metrológicos, punto fundamental para el logro de los elevados estándares de calidad requeridos en los procesos fabricación. La metodología de evaluación propuesta se basa en el uso de características geométricas y en los principios generales especificados en las normas internacionales para conseguir revelar el error cometido en mediciones reales. Para ello, se ha diseñado y fabricado un patrón de evaluación adaptado a dicha metodología y a las características únicas de los brazos de medir. Este patrón se aleja del concepto tradicional de patrón de MMC (barra con esferas o patrones escalonados) que resulta insuficiente para evaluar el estado de estos instrumentos debido a la indeterminación y variabilidad del error cometido en cada punto de contacto.

Además, se estudian las fuentes de error más relevantes (factor operario y la característica geométrica a medir). Debido a las características particulares de los brazos de medir (estructura no lineal, redundancia y control manual) el efecto de las fuentes de error es impredecible actualmente. Consecuentemente se ha implementado un sensor de fuerza de contacto que permite el estudio del efecto de dicho factor y reducir así su impacto. Este sensor de fuerza permite también identificar las formas de medición dependiendo de los tipos de geometría y tolerancia a evaluar. Por último, se ha desarrollado un modelo de corrección de este factor que logra reducir significativamente los errores de medición.

Abstract

Development of techniques for the Reliability Improvement of Articulated Arm Coordinate Measuring Machines

Author: Daniel González Madruga

Directors: Dr. Eduardo Cuesta González & Dr. Joaquín Barreiro García

The fast growth of Articulated Arm Coordinate Measuring Machines (AACMMs) or Coordinate Measuring Arms (CMAs) among manufacturing industry has resulted in the acceptance of a new metrological instrument that brings flexibility to the inspection task. Although operating bases of Coordinate Measuring Arms have been settled, still a great lack of knowledge about definition and determination of their measurement errors, evaluation methodologies and impact of error sources have been found.

This thesis presents a comprehensive survey of contact measurement with these instruments and proposes a methodology able to correctly determine measurement error. The main objective consists on increasing the reliability and traceability of measurement processes with these instruments, the key to achieve high quality standards. The proposed evaluation methodology is based on the use of a wide range of geometric characteristics and general principles of international standards in order to reveal actual measurement error. To that end, it has been designed and manufactured a master gauge according to that methodology and the unique features of the Coordinate Measuring Arms. This master gauge avoids the traditional concept of CMM gauge (bar with spheres or step-gauges) which is insufficient for AACMM evaluation due that the error for each contact point is undetermined and varies with each measurement repetition.

Most relevant error sources (human or operator factor and the measured geometric feature) are also studied since their effects are currently unknown because of the main characteristics of coordinate measuring arms (non-lineal structure, redundancy, manual handling). Consequently, a contact force sensor, that allows the study of this parameter in order evaluate AACMM behavior and improve their precision, was implemented. Also, this sensor allows us to identify the measurement strategy according to the geometric feature and the type of tolerance. Finally, it was developed a compensation model based on contact force that significantly reduce the error of a ring gauge.

Capítulo 1

Introducción

1.1 Ámbito de aplicación de la Tesis

En la actualidad las empresas de fabricación emplean muchos recursos (humanos, tiempo y costes) en la inspección de las piezas fabricadas. La inspección es la tarea por la cual se comprueba que los bienes producidos se adecuan a la normativa vigente y a los requisitos de diseño establecidos por el cliente. Aunque esta tarea supone un paso intermedio en el establecimiento de la calidad de cualquier proceso productivo y con el cual las empresas elevan su capacidad competitiva tanto nacional como internacionalmente, la inspección es una tarea que no aporta valor al producto en sí sino que la acepta como buena o no. Por esta razón es importante la optimización de la eficiencia de la inspección.

Tradicionalmente la tarea de inspección dimensional de piezas se realiza con máquinas de medir por coordenadas. Estas máquinas suponen una elevada inversión, personal altamente cualificado e instalaciones acondicionadas para su uso. Una alternativa a las conocidas MMC son los brazos de medir por coordenadas que aportan portabilidad, simplicidad en su uso y una inversión muy inferior. Sin embargo, su precisión es significativamente menor y la falta de estudios en el campo y de conocimiento de su comportamiento no garantizan la fiabilidad y la trazabilidad de sus mediciones. Al igual que las MMC, los brazos de medir por coordenadas deben ser calibrados para conseguir el menor error posible en las mediciones. Los procesos de evaluación evalúan estos instrumentos para garantizar en el tiempo los errores mínimos conseguidos en la calibración. Para ellos es habitual utilizar patrones de distancias conocidas que permiten conocer la bondad de medición del instrumento. Por otra parte, el error que alcanzan los brazos de medir por coordenadas se deben a las diferentes fuentes de error que provocan desviaciones con respecto a la calibración. La correcta evaluación de los brazos de medir por coordenadas así como el estudio de las fuentes de error que afectan a sus mediciones no solo mejorará la precisión que estos instrumentos pueden alcanzar si no que también permitirá garantizar su fiabilidad y la trazabilidad.

Esta tesis se engloba dentro del ámbito del estudio de las metodologías de evaluación relativas a brazos de medir por coordenadas en medición por contacto, su capacidad para cuantificar el error real que cometen y los medios necesarios para ello. Aunque la escasa cantidad de normas y bibliografía científica existente en el campo de los brazos de medir por coordenadas (principalmente dedicada a la resolución matemática de la calibración y el

modelo matemático) obliga a apoyarse en campos relacionados con los brazos de medir por coordenadas, las cualidades únicas de estos instrumentos requiere estudios propios, como los desarrollados en esta tesis. Como un punto importante los patrones de evaluación deben ser adaptados al comportamiento de los brazos de medir para ajustarse a las mediciones de piezas reales y el comportamiento de los brazos de medir por coordenadas. Esta tesis propone un nuevo concepto de patrón dimensional acción que permite la evaluación completa de estos instrumentos y el factor operario, factor fundamental debido al control manual y no considerado en la bibliografía existente debido a la automatización de las MMC).

Por otra parte la tesis se engloba dentro del estudio de las fuentes de error propias de estos instrumentos y de relevante importancia. El control manual y la redundancia de la estructura de los brazos de medir incrementan la significancia de la forma de medir o técnica de medición. El criterio del operario se convierte así en un factor que controla, hasta cierto límite, el proceso de medición el cual se encuentra totalmente automatizado y estudiado en las MMC. Esta tesis estudia este factor, en especial la fuerza de contacto, así como la interacción del brazo de medir con la pieza a medir con el objetivo de mantener la rapidez, simplicidad de uso y accesibilidad conseguida por estos instrumentos a la vez que reducir los errores de medición y garantizar la fiabilidad de las mediciones.

1.2 Objetivos de la Tesis

El reciente uso de los brazos de medir por coordenadas en el entorno de la industria ha propiciado y la falta de estudios científicos conduce a falta de conocimiento en el campo de los brazos de medir por coordenadas aunque se pueden ayudar de campos cercanos como las MMC y los brazos robot. La falta de conocimiento en la materia hace plantear un objetivo general consistente en estudiar la fiabilidad de las medidas de los brazos de medir.

Este objetivo principal se divide en varios objetivos específicos dirigidos a estudiar tanto los errores cometidos por los brazos de medir por coordenadas como metodologías que permitan conocer el error real de cada brazo y tomar medidas correctoras en su caso. El estudio de los errores o fuentes de errores de los brazos de medir pretende mejorar la precisión de estos instrumentos y el estudio de las metodologías de evolución trata de aumentar su trazabilidad y trazabilidad. Estos objetivos específicos son:

- Estudiar las metodologías de calibración y evaluación. Estas metodologías, propuestas por normas internacionales y autores, son la base de la precisión que alcanzan los brazos de medir por coordenadas. Al identificar las características de los brazos y las carencias o mejoras de las metodologías se posibilita el desarrollo de nuevas técnicas que permitan conocer correctamente el estado de los brazos de medir por coordenadas.
- Estudiar las fuentes de error que afectan a los brazos de medir por coordenadas y como son tratadas por los autores. Este estudio permitirá conocer las fuentes de error que causan mayor incertidumbre en la medición y plantear futuras líneas de acción.
- Proponer una metodología de evaluación que se ajuste a las características de los brazos de medir por coordenadas. Esta metodología debe ser capaz de incluir cuantificar el error real del brazo manejado por un operario.
- Proponer un patrón acorde con la metodología del punto anterior. Un patrón adecuado permitirá revelar el verdadero estado del brazo de medir por coordenadas y permitirá extrapolar los resultados obtenidos a las mediciones de piezas reales.

- Estudiar el factor operario en el comportamiento y los resultados de medición con brazo de medir por coordenadas. Este factor no estudiado en la literatura científica aporta una contribución significativa a la incertidumbre de los brazos de medir por coordenadas.
- Estudiar la fuerza de contacto de acuerdo a los resultados obtenidos. La fuerza de contacto se presenta como uno de los parámetros más importantes dentro del factor operario. Su estudio permitirá corregir gran parte de los errores de medición.
- Estudiar el impacto de las características geométricas a medir en los resultados de la medición. La alta sensibilidad de los brazos de medir a la técnica de medición utilizada por el operario obliga a estudiar cada característica de forma independiente.
- Cuantificar la influencia del operario en la medición. El estudio detallado del factor operario conlleva conocer su contribución al error de medición como una parte importante de la medición.
- Proponer modelos de corrección que reduzcan la influencia del factor operario y permita mejorar la precisión de los brazos de medir por coordenadas.

1.3 Estructura de la Tesis

La presente tesis se estructura en cuatro capítulos principales:

El capítulo 2 muestra el estado del arte de los brazos de medir por coordenadas. En este punto se recogen las aportaciones científicas de los autores, principalmente en calibración y en las fuentes de error estudiadas hasta la fecha. Además, se muestra brevemente las características básicas de los brazos de medir por coordenadas y la precisión que pueden alcanzar para situar la posición tecnológica actual de estos instrumentos.

El capítulo 3 muestra las diferentes posibilidades para delimitar la incertidumbre de los brazos de medir por coordenadas (normas de evaluación y procedimientos de cálculo de incertidumbre aplicables a estos instrumentos). Además, debido a la falta de estudios en el campo, especialmente en relación a las fuentes de error, se plantearon estudios preliminares para dirigir la tesis hacia las fuentes de error de mayor incidencia en los resultados.

El capítulo 4 propone una metodología de evaluación completa que se basa en el estudio de las características geométricas más importantes. Este procedimiento pretende suplir las carencias de las metodologías actuales basadas en MMC. La importancia de nuevos factores (operario, técnica de medición, estructura no lineal, portabilidad, redundancia) no incluidos en las MMC obliga a desarrollar nuevas metodologías adaptadas a las características de los brazos de medir por coordenadas. Acorde con la metodología se debe diseñar y fabricar un patrón que permita incluir los mencionados factores de forma similar a la medición de piezas reales. El patrón desarrollado se basa en el uso de la combinación de características geométricas que materializan una amplia gama de tolerancias (dimensionales y geométricas) para garantizar la correcta medición de cualquier característica dentro del espacio de trabajo del brazo de medir por coordenadas.

El capítulo 5 muestra el estudio del factor operario y las características geométricas de la pieza a medir. La fuerza que ejerce el operario en cada punto de contacto es recogida. Un sensor de la fuerza de contacto es desarrollado para tal fin. En los ensayos realizados se recoge el tipo de característica geométrica medida, el operario, la fuerza de contacto para establecer la relación existente con los errores de los resultados de medición. Además se propone un proceso de evaluación tanto de brazo de medir por coordenadas como de operario donde se cuantifica la contribución a la incertidumbre de medida del propio brazo, del

operario y de la técnica de medición. Además se analiza el comportamiento en función del tipo de tolerancia calculado. Por último, se utiliza el conocimiento extraído para diseñar un modelo de corrección de la fuerza de contacto para un caso particular.

En el capítulo 6 se recogen las conclusiones más destacadas de la tesis y las posibles líneas futuras de trabajo. Además se incluyen las publicaciones futuro de esta tesis.

Estado del arte

2.1 Introducción

Los brazos portátiles de medir por coordenadas son máquinas de estructura similar a un brazo humano, controladas por un operario cuya función principal es la inspección de piezas mediante la medición de puntos en su superficie, Figura 2 - 1. Su estructura está compuesta por segmentos unidos entre sí por articulaciones rotativas con dos extremos. Un extremo se fija a una posición base estable y el otro extremo es libre. En el extremo libre se encuentra un palpador similar al de las MMC, encargado de la obtención de las coordenadas de los puntos de contacto con la pieza. La posición de las articulaciones del brazo así como su movimiento son controlados por un operario. Manualmente, se desplaza el palpador hasta los puntos de la pieza que se desea inspeccionar y se obtienen las coordenadas del centro de la esfera del palpador en el sistema de coordenadas propio del brazo. El reducido precio de los brazos portátiles en comparación con las MMC y sus ventajas técnicas han ayudado a su expansión y aceptación en la industria.



Figura 2 - 1 Brazos articulados de medir por coordenadas

Los brazos portátiles son, por diseño, fácilmente transportables y están pensados para su uso en ambientes de trabajo fuera del laboratorio de metrología. De esta manera su función se extiende a un mayor número de posibles tareas: medición en línea de producción y en ensamblaje, medición de piezas grandes y pesadas de difícil transporte hasta la MMC o medición de lotes piezas pequeños. Además su control manual permite realizar la medición de piezas de geometría compleja de forma más rápida que con MMC. Mediante su uso, también, se evita el cálculo de colisiones, típico de la programación de la trayectoria del palpador con MMC. A pesar de sus ventajas los brazos aún están lejos del nivel de precisión y repetibilidad de las MMC y por ello todavía no pueden ser utilizados en los procesos de inspección más

exigentes. Además, la fiabilidad de sus mediciones depende de los procesos de calibración y evaluación existentes, procesos parcialmente ciegos y con poca experiencia. Este campo de investigación es relativamente nuevo en la bibliografía científica por lo que aún se debe estudiar en profundidad el comportamiento de los brazos portátiles de medir por coordenadas y las fuentes de error que afectan a sus mediciones.

La similitud de su estructura cinemática con los brazos robot propició que los estudios de brazos de medir se basasen en este campo. Una vez establecidas unas bases mínimas de estudio de los brazos de medir, estos han ido desarrollando una bibliografía propia enfocada a sus características particulares y a su función metrológica de precisión. Al contrario que los brazos robots que buscan la mayor repetibilidad en sus tareas mecánicas, los brazos de medición buscan la mayor precisión posible. Además los brazos robot son controlados por motores y su trayectoria es calculada y conocida de antemano mientras que los brazos de medición son controlados manualmente y su trayectoria es impredecible. Por otra parte, los dos tipos de brazos pueden cambiar su posición base pero los brazos robot suelen ocupar una posición conocida y estudiada. Los brazos articulados por su parte, sólo necesitan una superficie estable para su correcto funcionamiento, una persona puede cambiar su posición fácilmente en poco tiempo y realizar mediciones donde sea necesario. Con todo ello el diseño de los brazos robot es mucho más pesado y rígido y sus elementos como los motores son ubicados allí donde produzcan menor inercia. Por su parte, los brazos de medición tienen una estructura lo más ligera posible y sus pesos son posicionados para que su manejo canse lo menos posible al operario. En este punto el diseño de los brazos busca la mayor rigidez posible a la vez que la reducción de peso y ergonomía. La tecnología de los encoders también es distinta, los brazos articulados utilizan encoders de mayor precisión. Una precisión final de 1 mm puede ser suficiente para los brazos robot mientras que los brazos de medir se sitúan actualmente en las pocas centésimas.

Por otra parte, los brazos de medir intentan sustituir y aumentar el campo de acción de las MMC, dentro de su rango de precisión. Al compartir la misma función, algunos de los elementos en su tratamiento proceden del campo de las MMC. Sin embargo, las diferencias estructurales, constructivas y de control de ambos son muy diferentes. Las MMC están formadas por ejes cartesianos perpendiculares entre sí y sus errores se refieren a los diferentes errores de cada eje de la máquina. En el caso de los brazos de medir su cadena cinemática abierta genera redundancia en la determinación de las coordenadas de un punto y los errores dependen, en principio, de la posición relativa de cada segmento y la posición de las

articulaciones, perdiendo así la linealidad que caracteriza a las MMC. La capacidad de los brazos de medir de poder alcanzar un punto desde casi infinitas poses del brazo hace que el error de asociado a un punto no sea único. Por otra parte las MMC han sido diseñadas para no ser transportadas y medir siempre en un laboratorio de metrología con las condiciones ambientales controladas y sus efectos reducidos al mínimo. Los palpadores de ambas máquinas parecen similares, aunque los de las MMC se encuentran mucho más desarrollados, principalmente debido a que las MMC son automáticas. En las mediciones con MMC los parámetros de medición se encuentran completamente controlados y pueden ser configurados, sin embargo en la medición con brazos todos los parámetros son controlados intuitivamente por el operario. Esta característica de los brazos hace variar de forma no uniforme el error cometido entre todos los puntos de contacto con la pieza y complica el estudio y control de los parámetros de medición. Con todo ello, la precisión alcanzada por las MMC y su repetibilidad es muy superior a la de los brazos de medir.

Como se ha visto, aunque los brazos de medir comparten características con los brazos robot o las MMC las diferencias que les separan hacen que los brazos de medir conformen un tipo de máquina de medición propio. Además, durante su expansión en la industria se han desarrollado normas especializadas en la evaluación de los brazos de medir Y poco a poco se amplía su bibliografía de estudios científicos. La bibliografía de brazos de medir se basa principalmente en su calibración y en su evaluación.

2.2 Brazos portátiles de medir por coordenadas

Como se ha comentado la estructura de los brazos de medir por coordenadas está formada por una cadena cinemática abierta similar a un brazo humano. Las articulaciones están formadas por uniones rotativas de un solo grado de libertad, alcanzándose un total de 6 o 7 grados de libertad en el brazo. La norma ASME B89.4.22 recoge las posibles configuraciones de la estructura cinemática de los brazos de medir y las clasifica, Figura 2 - 2. Los posibles grados de libertad de las articulaciones se enumeran con letras: hombro (a, b), codo, (c, d) y muñeca (e, f, g). Por otra parte, los modelos se diferencian físicamente por su rango que puede variar desde 1.2 metros hasta 4.5 metros.

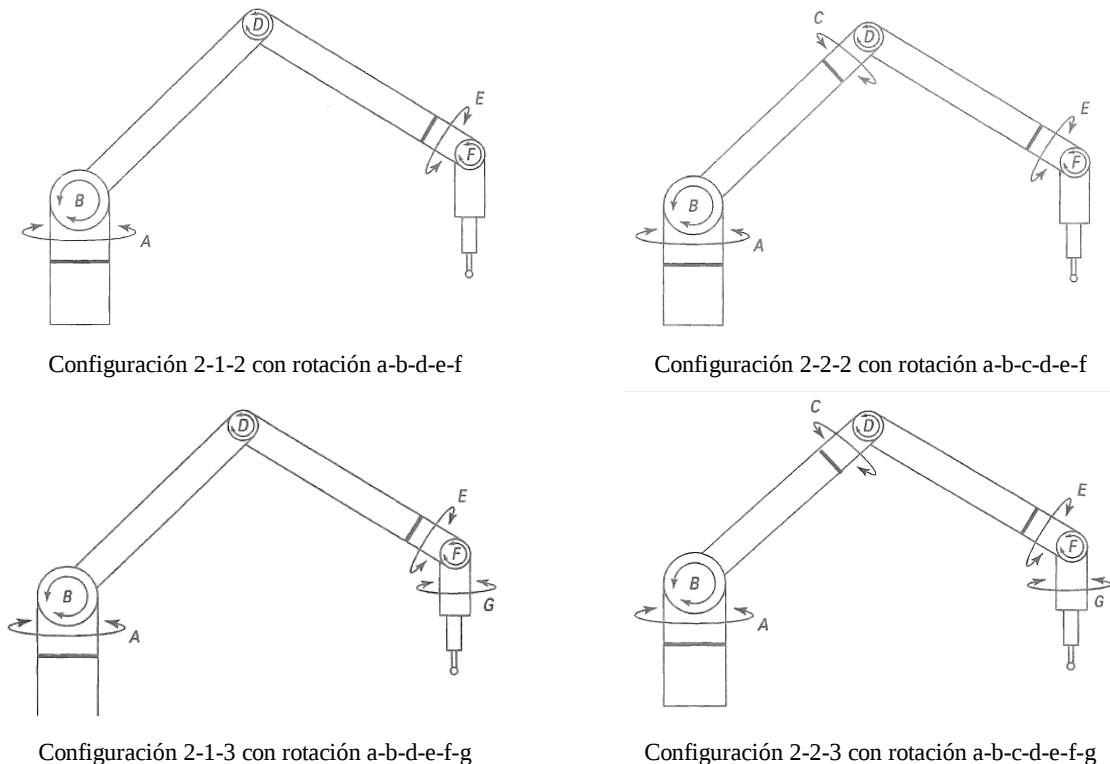


Figura 2 - 2 Configuraciones típicas de brazos de medir por coordenadas

Fuente: (ASME B89.4.22, 2004)

La flexibilidad operacional de estos aparatos también ha sido aprovechada para instalar escáneres láser en su extremo. Esto permite agilizar la toma de datos y la reconstrucción de superficies complejas. Los modelos comerciales distinguen los modelos que disponen de este sistema totalmente integrado y los que pueden ser acoplados. Los sistemas con sensores láseres disponen normalmente de 7 grados de libertad para un mejor control del escáner.

2.2.1 Tecnología de los brazos de medir por coordenadas

De la tecnología de los brazos de medir por coordenadas el equipo activo más importante son los encoders de las articulaciones. Del modelo cinemático se desprende que los datos utilizados para calcular las coordenadas de la esfera del palpador en cada posición son las rotaciones de las articulaciones. Los demás parámetros del modelo están relacionados con la construcción geométrica del modelo y tras la calibración se ajustan a una constante. Las coordenadas dependen, entonces, exclusivamente de las rotaciones de las articulaciones. La importancia de los encoders ha sido expuesta en el estado del arte, donde se señala que tanto su resolución, construcción y ajuste a la rotación real de la articulación añade errores en las mediciones con el brazo de medir por coordenadas. Su resolución llega a las décimas de segundo. En la última generación de brazos de medir por coordenadas se han integrado encoders absolutos que permiten una rápida puesta a punto y medición, ya que no es necesario alcanzar una referencia en la rotación para medir el giro de la articulación, Figura 2 - 3. Esta característica elimina la tarea de buscar el cero máquina.

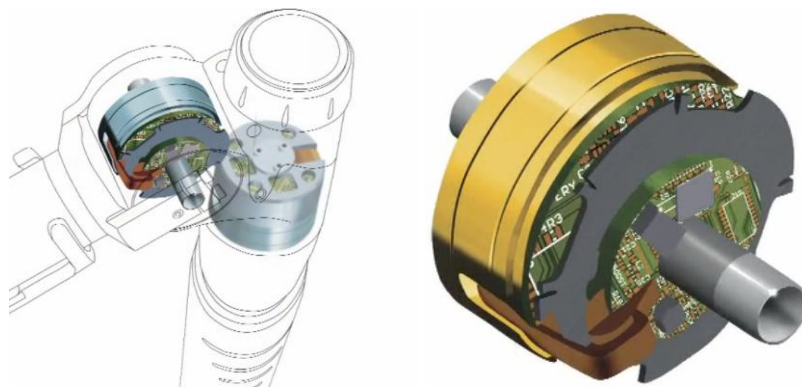


Figura 2 - 3 Encoders absolutos
Fuente: Romer

Por su parte, los elementos que componen la estructura se encargan de mantener sus dimensiones y posiciones relativas con la mayor precisión posible para no influir en las mediciones. Los segmentos que componen la estructura principal son secciones tubulares. El material utilizado en la actualidad es fibra de carbono o composite que proporcionan gran rigidez y bajo peso. Además los pesos están distribuidos de tal manera que el operario tiene que soportar el mínimo peso posible y que las mediciones se realicen sin esfuerzo. También se colocan contrapesos internos o sistemas de soporte del peso para este fin.

La base de soporte del brazo es otro punto de especial importancia para el proceso de medición. Esta aporta la posición a la cual el brazo refiere sus mediciones y permiten la unión

entre el brazo de medir por coordenadas y la superficie elegida desde la cual se realizará la inspección. La tipología de las bases depende de la superficie sobre la que se quiere montar el brazo de medir, Figura 2 - 4. En muchas ocasiones se utiliza como superficie de referencia la mesa de las MMC o mesas de trabajo que disponen de patrones de agujeros roscados. Las bases de los brazos de medir disponen de agujeros que encajan con estos para marcar su posición. En las situaciones en las que la superficie de referencia es magnética, algunas bases lo aprovechan para conseguir un posicionamiento rápido y seguro. También existen bases que fijan su posición por medio de sistemas de vacío con una superficie.

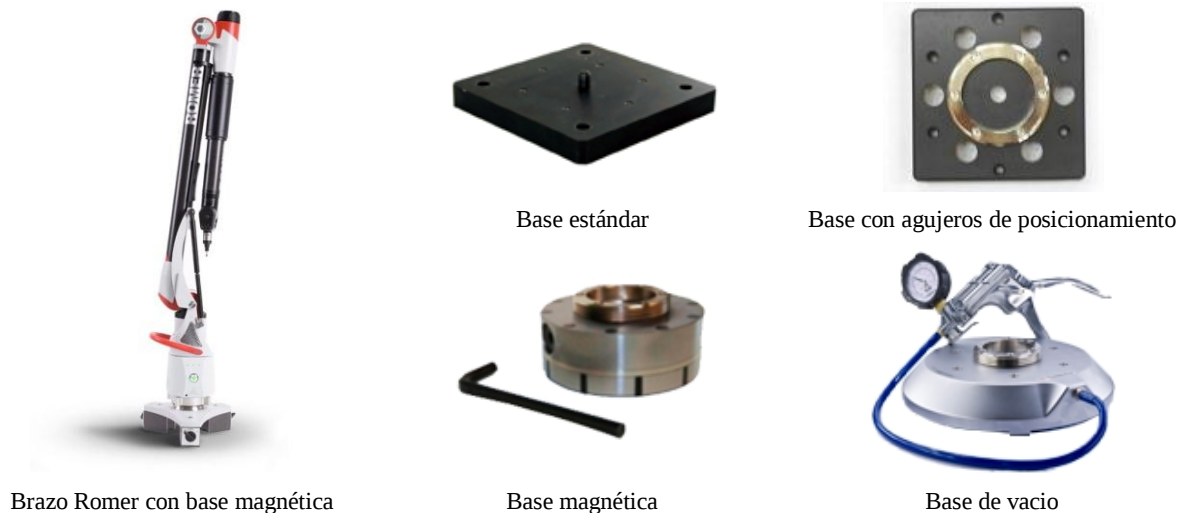


Figura 2 - 4 Brazo con base magnética y tipos de base
Fuente: Romer y Faro

Además para potenciar la portabilidad de los brazos de medir por coordenadas los fabricantes ofertan también trípodes para posicionar el brazo, Figura 2 - 5. Los trípodes disponen de mecanismos para ser transportados pero también ofrecen una referencia fija y estable para las mediciones. El uso de trípodes resulta útil en la medición de grandes piezas donde es necesaria la reubicación del brazo de medir por coordenadas para alcanzar todas las geometrías de la pieza.



Figura 2 - 5 Ejemplos de trípodes para brazos de medir por coordenadas
Fuente: Romer y Faro

La tecnología de los brazos incluye, además, los sistemas de comunicación para transmitir los datos al programa de medición. Es común el uso de sistemas de comunicación inalámbricos para agilizar las mediciones. También es habitual el uso de baterías para lugares en los que no se pueda alimentar directamente al brazo.

Los tipos de palpadores es otro de los puntos a estudiar en la evaluación del error de los brazos de medir por coordenadas. El palpador es la parte encargada de establecer el punto de contacto entre el brazo y la pieza, Figura 2 - 6. Representan el último sistema de referencia y el centro de las esferas suele ser un punto constante en este sistema de referencia. Además, los palpadores son intercambiables por lo que no es una parte fija de la estructura. En los modelos de brazo iniciales, los palpadores debían ser calibrados mediante un procedimiento propio de cada fabricante cada vez que se intercambiaban. En los modelos más actuales es habitual encontrar el reconocimiento de los palpadores automático, lo que reduce el tiempo de preparación y las confusiones en el proceso de medición. Además, las nuevas conexiones entre palpador y brazo de medir por coordenadas evitan, según los fabricantes, el proceso de calibración de la punta entre intercambios.

El tipo de palpador más utilizado es el palpador pasivo, con una geometría fija sin ningún mecanismo de detección de contacto. La esfera del palpador es de rubí sintético o de material cerámico de distintos diámetros al igual que los palpadores de MMC. Debido al control manual, el operario es el encargado de dirigir y controlar el palpador, por lo que éste soporta directamente las fuerzas de medición por lo que la esfera del palpador sufre un más que los palpadores de MMC tanto por deflexión como por desgaste o daños a la esfera/palpador. La mayoría de palpadores tienen una base ancha y robusta, dirigida a disminuir la deflexión que se produce en ellos durante la medición aunque también se debe tener en cuenta las dimensiones del palpador para acceder a los elementos a medir.



Figura 2 - 6 Ejemplos de palpadores para brazo de medir
Fuente: Romer y Faro

En los últimos años han surgido palpadores del tipo “touch trigger” basados en los palpadores homónimos de las MMC, Figura 2 - 7. Su funcionamiento se basa en su punta de movimiento libre que se sitúa en apoyos separados 120°. Cada apoyo está formado por dos

esferas sobre las cuales se ajusta un cilindro en la base de la punta del palpador. A la hora del contacto durante la medición, la fuerza con la pieza desplaza los cilindros de su apoyo y abre un circuito eléctrico que marca el momento de lectura de las coordenadas del punto. El movimiento de la punta del palpador (en la posición del punto leído por la MMC) hasta el momento de apertura del contacto del circuito se puede medir (*pretravel*) y utilizar para disminuir el error de las mediciones. Esta forma de detectar el contacto ha sido muy productiva en las MMC, sin embargo presenta dudas en su funcionamiento en la medición manual con brazos de medir por coordenadas. Las MMC controlan automáticamente todos los parámetros de medición por lo que en el momento de contacto el movimiento de la MMC se detiene y el “*pretravel*” es conocido por estudios previos. Los efectos cinemáticos son reducidos en la medición con MMC y alcanzan generalmente una repetibilidad inferior a 1 micrómetro. En el caso de los brazos de medir por coordenadas el contacto se produce en condiciones de movimiento más agresivas (velocidad y fuerza), lo que puede afectar a la lectura del punto de contacto. Además, si la fuerza con la que se calibra el palpador “touch trigger” es baja, el simple desplazamiento del palpador en el “aire” puede hacer saltar la señal de contacto por la inercia del movimiento. Cabe mencionar que no existen estudios sobre los errores que alcanzan los brazos de medir por coordenadas con estos tipos de palpadores, ni el error de los brazos alcanzado en las pruebas de evaluación de los fabricantes al utilizar estos palpadores, a pesar de que existen variantes en las normas de evaluación para este tipo de palpadores. Por otra parte, algunos de estos palpadores permiten la medición en continuo, sin embargo tampoco están estudiados ni se conocen los efectos metrológicos de esta forma de medición.



Figura 2 - 7 Palpadores “touch trigger” para brazo de medir por coordenadas

Fuente: Romer y Faro

El último tipo de palpadores o sensores son los escáneres láser, los cuales permiten recoger las coordenadas de numerosos puntos de la superficie de las piezas sin contacto alguno, Figura 2 - 8. La combinación de los escáneres con los brazos de medir por coordenadas permite agilizar el proceso de recogida de puntos especialmente en piezas de

geometrías complejas pero ofrece peores resultados en cuanto a precisión. Este método es particularmente útil para ingeniería inversa y tareas de inspección con tolerancias que se ajustan a su rango de errores. Los escáneres láser pueden estar integrados en el propio brazo o pueden ser un equipo adicional a la medición por contacto.



Escáner integrado de Romer
Escáner externo de Romer
Figura 2 - 8 Brazos con escáner láser
Fuente: Romer y Nikon

2.2.2 Precisión de los brazos de medir por coordenadas

La precisión que alcanzan los brazos depende de cada fabricante, del modelo del brazo y de su alcance. Los principales fabricantes son Romer (incluye Cimcore), Faro, Nikon, Vectoron, Api Axxis y Microscribe, destacando los dos primeros, Tabla 2. 1. Nikon utiliza la estructura de Romer y añade sus escáneres láser. El proceso de calibración de los fabricantes no es conocido. Generalmente los fabricantes aportan datos en referencia a las normas ASME (*ASME B89.4, 2004*) y VDI (*VDI/VDE 2617-9, 2009*) aunque en ocasiones no es clara a que norma hacen referencia los datos de precisión. Por ejemplo, el modelo “Romer Multi Gauge” referencia los datos de precisión a la norma ISO 10360-2 (*ISO 10360-2, 2009*) pero el resto de modelos de Romer han sido evaluados según la norma ASME y VDI. Por otra parte Romer hace referencia a que sus brazos han sido evaluados por las normas ASME y VDI pero solamente se usa un conjunto de datos. No se especifica qué procedimiento siguen los brazos de medir de Vectoron y API Axxis. Microscribe por su parte solamente aporta la información de la prueba de diámetro efectivo de ASME mientras que la mayoría se refiere al ensayo de repetibilidad en un único punto o la precisión volumétrica.

2.2 Brazos portátiles de medir por coordenadas

Tabla 2. 1 Modelos de brazos de medir por coordenadas

Fuente: Romer, Faro, Nikon, Vectoron, Axxis y Microscribe

Modelo	Configuración	Longitud	Resultados de evaluación			
			Repetibilidad	Precisión volumétrica	Repetibilidad	Precisión volumétrica
Romer absolute arm 73/75		2-2-2 a-b-c-d-e-f	Modelo 73		Modelo 75	
			1,5	±0,025	±0,037	
			2,0	±0,030	±0,042	±0,016
			2,5	±0,038	±0,051	±0,020
			3,0	±0,059	±0,075	±0,030
			3,5	±0,079	±0,100	±0,040
			4,0	±0,099	±0,125	±0,055
Romer Multi Gage		2-2-2 a-b-c-d-e-f	1,2	MPE _e (μm) = 5 + L/40 ≤ 18 ISO 10360-2		MPE _p (μm) = 8
Faro Edge / Prime		2-2-2 a-b-c-d-e-f	1,2	±0,016	±0,023	
			1,8	±0,019	±0,027	±0,024
			2,4	±0,024	±0,034	
			2,7			±0,029
			3,0	±0,042	±0,059	
			3,7	±0,060	±0,085	±0,064
Faro Fusion		2-2-2 a-b-c-d-e-f / 2-2-3 a-b-c-d-e-f-g	2-2-2		2-2-3	
			1,8	±0,036	±0,051	±0,046
			2,4	±0,043	±0,061	±0,051
			3,0	±0,074	±0,104	±0,089
			3,7	±0,104	±0,147	±0,124
Nikon MCAx+		2-2-3 a-b-c-d-e-f-g	MCAx+		MCA	
			2,0	0,023	0,033	0,044
			2,5	0,027	0,038	0,049
			3,0	0,042	0,058	0,079
			3,5	0,055	0,081	0,099
			4,0	0,067	0,098	0,115
			4,5	0,084	0,119	0,141
Vectoron		2-2-2 a-b-c-d-e-f	3,1	0,060	0,150	
			3,1	0,040	0,080	
			3,5	0,040	0,060	
			3,5	0,060	0,080	
API Axxis		2-2-2 a-b-c-d-e-f	2,6	0,035	0,060	
			3,2	0,055	0,090	
Microscribe		2-1-2 a-b-d-e-f	0,63	Spherical diameter test:		
			0,80	0,051	0,076	

2.3 Metodologías de calibración y evaluación

Las coordenadas del palpador se calculan de acuerdo al tipo de articulaciones y su posición en cada momento de acuerdo a su modelo cinemático. Por medio de la calibración se calculan los parámetros del modelo cinemático ajustándolos al comportamiento real del brazo de medir y, así, asegurar la fiabilidad de su medición. En la evaluación de los brazos, el modelo cinemático no se modifica pero se determina el error que comete el brazo en las mediciones en un proceso de toma de mediciones de un patrón similar al proceso de calibración.

Durante las mediciones, la esfera del palpador determina las coordenadas del punto de contacto que recoge el programa de medición. Con el conjunto de coordenadas correspondientes a los puntos sobre una característica de inspección se construye por medios matemáticos la geometría de dicha característica. Estas geometrías construidas se utilizan para calcular los errores de la pieza evaluada. La precisión que alcanzan los brazos de medir viene dada en gran medida por la capacidad del brazo y del modelo cinemático de determinar las coordenadas reales de los puntos de contacto ajustando el modelo matemático al comportamiento real del brazo. Este ajuste se consigue mediante la calibración por la cual se mide un patrón conocido y se calculan los parámetros del modelo que minimizan el error obtenido con el brazo frente a las dimensiones conocidas del patrón. El error a minimizar puede adoptar varias formas (repetibilidad en un punto, en distancia...) y se define en una función objetivo que depende del criterio de cada autor. El error definido, generalmente, se expresa en términos de diferencia entre la medición con el brazo y la medida real del patrón. Se pueden utilizar diferentes métodos de optimización para buscar los parámetros de mayor ajuste al comportamiento del brazo de medir. Una vez definidos los parámetros óptimos, el brazo calculará las coordenadas de cualquier punto en las mediciones posteriores.

A lo largo del uso del brazo, el modelo matemático y los parámetros optimizados pierden el ajuste entre el modelo cinemático y el comportamiento real del brazo obtenido en la calibración. Para asegurar la fiabilidad de las mediciones con brazos de medir por coordenadas se realizan procedimientos de evaluación que comprueban el estado de dicha relación en intervalos periódicos. En la evaluación no se modifican los parámetros del modelo cinemático, sólo se mide el error cometido por el brazo de medir para deducir si funciona dentro de unos límites aceptables o no. Los fabricantes refieren las características técnicas de

sus brazos de medir a las normas internacionales ISO 10360 (ISO 10360-2, 2009), ASME (ASME B89.4, 2004) y VDI (VDI/VDE 2617-9, 2009). En los siguientes apartados se exponen y discuten los puntos de interés en los procesos de calibración y evaluación propuestos en la bibliografía científica.

2.3.1 Modelo cinemático

El modelo cinemático básico empleado en brazos robot es el modelo Denavit-Hartenberg (D-H) (Denavit-Hartenberg, 1955) por el cual se modelan los mecanismos de varios grados de libertad. El modelo D-H establece sistemas de referencia locales en las articulaciones del brazo de medir por coordenadas y matrices de transformación homogéneas con la relación geométrica entre los sucesivos sistemas de referencia, Figura 2 - 9. Mediante la premultiplicación de cada matriz de transformación entre los sistemas de referencia se obtienen la expresión de las coordenadas del centro de la esfera del palpador de acuerdo a la posición de cada articulación, leída por los encoders. El modelo D-H es la base del estudio de la cinemática de los brazos robot y ha sido asumido también por los brazos de medir por coordenadas. En el estudio del modelo los autores plantean soluciones para los casos de estructuras en los que surgen indeterminaciones del modelo y para la inclusión de las diferentes fuentes de error.

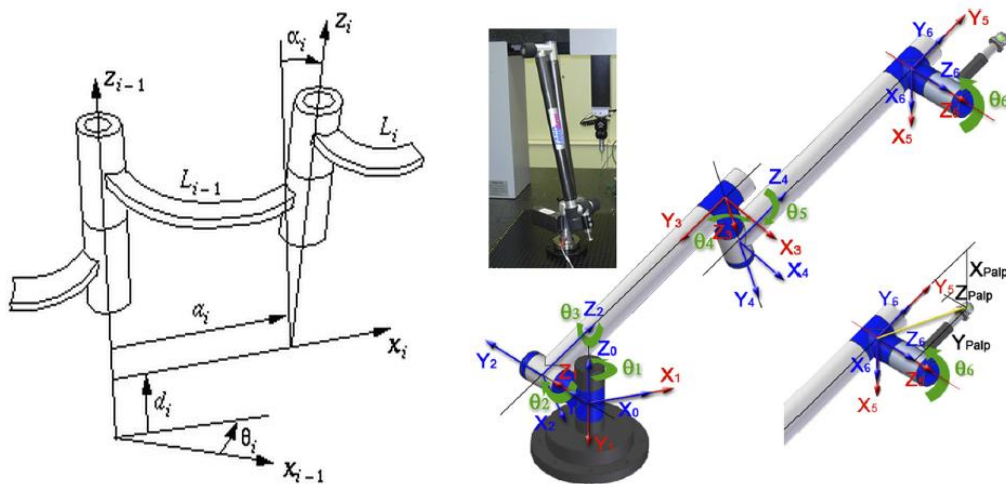


Figura 2 - 9 Modelo Denavit -Hartenberg y ejemplo aplicado a brazos de medir por coordenadas
Fuente: (Denavit-Hartenberg, 1955) y (Santolaria, 2008)

Hayati et al. (Hayati, 1983) apuntaron las indeterminaciones que surgen con el modelo D-H en ejes rotativos paralelos. Para solucionar este problema varios autores añaden parámetros al modelo básico D-H. Hsu et al. (Hsu, 1985) propusieron un parámetro extra por

sistema de referencia que permite definir mecanismos de ejes paralelos. Mooring et al. (Mooring, 1983) utilizan también un parámetro extra para salvar la indeterminación en mecanismos de ejes paralelos. Stone et al. (Stone, 1986) añaden 2 parámetros al modelo para tener en cuenta la posición variable de los sistemas de referencia del modelo así como para eliminar las indeterminaciones anteriormente citadas. Hollerbag et al. (Hollerbag, 1996) aplican el modelo de Hayati en las articulaciones que presentan indeterminaciones y D-H para el resto. Zhuang et al. (Zhuang, 1992) completan también el modelo D-H con dos parámetros adicionales que modelan la posición arbitraria de los sistemas de referencia. Por otra parte, el estudio matemático de los modelos cinemáticos puede llevar a la pérdida del significado físico de los parámetros del mismo. Everet et al. (Everet, 1987) (Everet, 1998) estudian el número mínimo de parámetros necesarios en función del modelo utilizado. Goswami et al. (Goswami, 1993a) estudian también el número de parámetros necesario y la relación del modelo matemático y el modelo físico real. Los modelos propuestos pueden definir el comportamiento de varias estructuras cinemáticas pero añaden redundancia y complejidad al modelo.

Por otra parte, la dificultad de unir el modelo cinemático y las diferentes naturalezas de los errores que afectan a la precisión de los brazos lleva a los autores a plantear modificaciones del modelo cinemático. Los errores geométricos están, generalmente, incluidos en el propio modelo pero el tratamiento de los errores no geométricos depende del autor. Nuevamente, se añaden parámetros adicionales al modelo para describir el efecto de los errores (Mooring, 1984) (Whitney, 1984). Otros autores utilizan matrices de error intermedias para modelar errores no geométricos (Meggiolaro, 2000) (I-Ming, 2001) (Drouet, 2002). Esta metodología permite mantener constantes los parámetros del modelo y modelar los errores al mismo tiempo aunque la complejidad del modelo aumenta.

En la elección del modelo cinemático más adecuado para los brazos de medir por coordenadas los autores se basan en la estructura real de los brazos comerciales, en la complejidad del modelo y en la posibilidad de la compensación de las fuentes de error. La estructura de los brazos no presenta ejes paralelos por diseño por lo que el modelo D-H explica el funcionamiento cinemático básico del brazo perfectamente (Santolaria, 2006) (Santolaria, 2008). La adición de nuevos elementos al modelo D-H añade redundancia y complejidad innecesarias a los cálculos derivados de su uso. Por último, aunque la optimización que sufre el modelo D-H durante la calibración altera sus parámetros geométricos, el proceso, en su totalidad, es más simple y son posibles correcciones

posteriores, (Santolaria, 2009a). Los estudios en el campo de la calibración de brazos de medir por coordenadas utilizan el modelo D-H mencionándolo explícitamente (Furutani, 2003) (Shimajima, 2004) (Santolaria, 2008), (Aguilar, 2008) (Ouyang, 2008) (Hamana, 2010), (Sladek, 2013) mientras que otros autores (Kovac, 1999a) (Kovac, 2001) (Vrhovec, 2007) no mencionan el modelo utilizado en la calibración. Hamana et al. (Hamana, 2010) proponen una modificación de los parámetros del modelo susceptible de sufrir deformación de acuerdo a su posición angular con respecto a la horizontal y las propiedades físicas del segmento. Li et al. (Li, 2013) estudian el modelo cinemático, calibración y compensación de errores en un brazo de medir por coordenadas de estructura cinemática distinta a la mayoría (posee ejes lineales y paralelos) de brazos articulados de medir. Cabe mencionar que las normas existentes relacionadas con brazos de medir no sugieren ningún modelo determinado ya que están enfocadas a la evaluación y no a la calibración de estas máquinas.

2.3.2 Patrones y accesorios para la calibración

Los patrones de calibración son los encargados de establecer las dimensiones de referencia y por lo tanto se utilizan como herramienta para determinar el error cometido por los brazos de medir por coordenadas durante su medición. En este punto muchos de los trabajos se basan en patrones ya establecidos para MMC, principalmente patrones lineales con esferas o planos distribuidos a lo largo de su dimensión principal. Con el paso del tiempo los autores han adaptado, hasta cierto punto, o diseñado patrones para las características de los brazos de medir por coordenadas.

Dentro del proceso de calibración y evaluación es recurrente la idea de analizar todo el espacio de trabajo del brazo con el fin de considerar válida cualquier medida futura realizada dentro de dicho espacio. Para ello el patrón se en diferentes posiciones (normalmente indicadas por las normas) que consiguen cubrir la mayor parte dentro de este espacio de trabajo. Esto se consigue o bien cambiando la posición del patrón por medio de aparatos complementarios o bien mediante patrones que ocupen todo o parte del espacio y un tamaño adecuado al rango del brazo.

Furutani et al. (Furutani, 2003) (Furutani, 2004) simularon varios tipos de patrones tridimensionales mediante la adición de patrones simples (esfera de calibración, una barra con dos esferas y una estructura en “L” con tres esferas, además utilizó una placa de bolas para

comparar los resultados con un patrón tridimensional), Figura 2 - 10. La incertidumbre del brazo simulada mostró que los patrones simples colocados en diferentes posiciones tienen el mismo efecto que patrones tridimensionales en el cálculo de la incertidumbre de los brazos.



Figura 2 - 10 Patrones para calibración de Furutani et al.

Fuente: (Furutani, 2003) y (Shimajima, 2004)

En cuanto a los sistemas tridimensionales, Shimajima et al. (*Shimajima, 2004*) estudió la posibilidad de calibrar los brazos de medir con una placa de bolas. Esta placa contiene 9 esferas distribuidas uniformemente a diferentes alturas. El uso de placas reduce el número de posiciones del patrón en el proceso de calibración. Además, el patrón fue acompañado de un proceso de calibración así como de un palpador especialmente diseñado para esta tarea. El cálculo de la incertidumbre asociado a la medición de dicha placa fue realizado según la norma ISO 14253-2 (*ISO 14253-2, 1999*). Hamana et al. (*Hamana, 2010*) volvieron a utilizar este patrón en su proceso de calibración ayudado por una MMC y un artefacto desarrollado para esta tarea.

Gatti et al. (*Gatti, 2008*) propusieron una placa con asientos cinemáticos (agujeros cónicos) para la calibración de su brazo articulado de diseño propio, Figura 2 - 11. Los asientos cinemáticos son utilizados como puntos únicos que el brazo puede medir desde diferentes orientaciones del brazo, lo que agiliza el proceso de calibración. Los autores evaluaron la cantidad de puntos óptimos necesarios para calcular la incertidumbre del sistema.



Figura 2 - 11 Patrón para calibración de Gatti et al.

Fuente: (Gatti, 2008)

Ouyang et al. (Ouyang, 2010) diseñaron una estructura tetraédrica de fibra de carbono con esferas en sus vértices, Figura 2 - 12. Las coordenadas de los vértices del tetraedro son medidas por una MMC y utilizadas como referencia. La diferencia con las mediciones del brazo de medir son utilizadas para calcular el error cometido por el brazo.

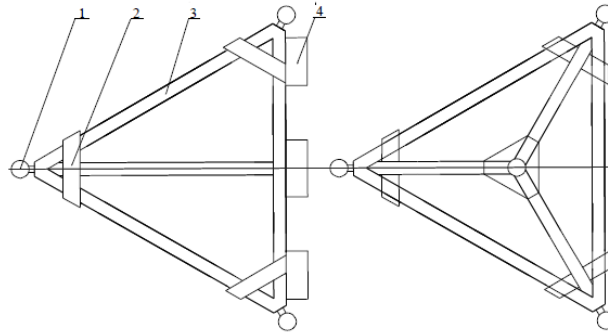


Figura 2 - 12 Patrón para calibración de Ouyang et al.

Fuente: (Ouyang, 2010)

Los patrones lineales, formados principalmente por una barra, son los más utilizados en la actualidad por los autores y las normas debido principalmente a su facilidad de uso y que la alta precisión que poseen es suficiente para calibrar brazos. Kovac et al. (Kovac, 1999b) (Kovac, 2001) (Kovac, 2002) en uno de los primeros estudios sobre brazos de medir utilizan un instrumento orientable en el espacio formado por una barra y elementos móviles y un interferómetro que mide la distancia a lo largo de su eje longitudinal, Figura 2 - 13. Estas distancias son utilizadas para comprobar el error en las mediciones de los brazos. El sistema resulta pesado y complejo en comparación con lo propuesto en trabajos posteriores.

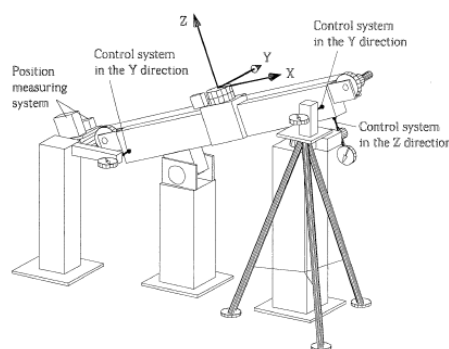


Figura 2 - 13 Patrón para calibración de Kovac et al.

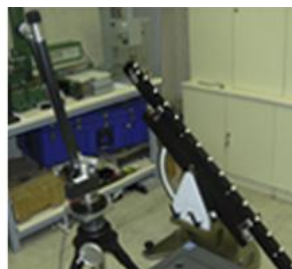
Fuente: (Kovac, 2001)

En uno de los trabajos más completos sobre AACMM, Santolaria et al. (Santolaria, 2008) (Santolaria, 2009a) (Santolaria, 2010b) (Santolaria, 2010c) utilizan una barra de 1,5 metros de fibra de carbono y 15 esferas cerámicas para la calibración del AACMM. Su error de patrón es muy bajo, $(1+0,000L) \mu\text{m}$, para evitar influencias ajenas en la calibración del

brazos de medir, Figura 2 - 14. Además desarrollaron un palpador adaptado para recogida de datos rápida y masivamente. El centro de las esferas y la distancia que las separa fue medido en 7 posiciones dentro del espacio de trabajo. Sladek et al. (Sladek, 2009) (Sladek, 2013) también consideraron también el uso de un patrón lineal con esferas para identificar los parámetros del modelo cinemático. La normas ASME (ASME B89.4, 2004) y VDI (VDI/VDE 2617-9, 2009) requieren estos patrones para la evaluación volumétrica de los brazos. El NPL (National Physics Laboratory) ha desarrollado un patrón similar para la evaluación de brazos de medir por coordenadas de hasta 3,7 metros de alcance de acuerdo a la norma ASME B89.4.22, Figura 2 - 14.



(Sladek, 2013)



(Santolaria, 2008)



NPL

Figura 2 - 14 Patrones de calibración de barras con esferas

Fuente: (Santolaria, 2008), (Sladek, 2013) y NPL

Algunos autores han aprovechado las características de los brazos y han ajustado los patrones a ellas. La naturaleza manual del control de los brazos genera falta de reproducibilidad y repetibilidad sin embargo se presenta como una ventaja a la hora de medir asientos cinemáticos. La geometría de los asientos cinemáticos permite medir, teóricamente, el mismo punto con el palpador de los brazos de medir por coordenadas no solo en mediciones distintas sino también desde orientaciones del brazo distintas. Esta cualidad fue utilizada por Gatti et al. (Gatti, 2008) en su placa con asientos cinemáticos. Gao et al. (Gao, 2009a) (Gao, 2009b) utilizaron los asientos cinemáticos de manera más simple con un único

punto medido varias veces en el espacio en sus propuestas de metodologías de calibración, Figura 2 - 15.

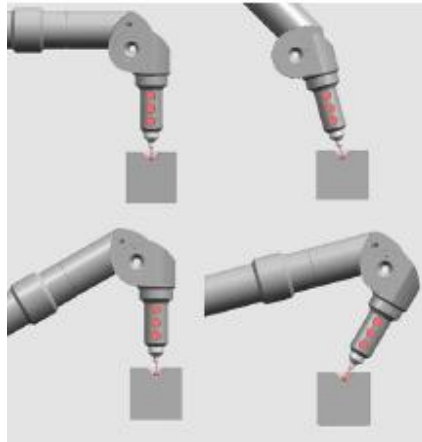


Figura 2 - 15 Esquema de patrón de asiento cinemático para calibración de Gao et al.

Fuente: (Gao, 2009a) y (Gao, 2009b)

Son varias las ventajas que aporta el uso de los asientos cinemáticos en la calibración de brazos. La toma de mediciones es rápida (se mide directamente un punto y no se calcula como, por ejemplo, el centro de las esferas), cómoda (gracias a que es un apoyo estable para el palpador y la medición manual) y se pueden medir con muchas posiciones distintas del brazo de manera sencilla. Además la propia geometría del asiento cinemático guía la medición. Sin embargo, estos elementos son difíciles de calibrar ya que el punto leído depende del tamaño de la esfera del palpador del brazo y la geometría del asiento (*Piratelli, 2009*). Para encontrar dicho punto una MMC debe medir la geometría cónica del asiento y posteriormente calcular geoméricamente las coordenadas del centro de la esfera del palpador. Además aunque el uso de asientos cinemáticos sirve para calibrar y detectar fallos de funcionamiento, no permite conocer la incertidumbre real del brazo ya que se omite en gran medida la influencia del operario en la medición y la medición de piezas reales. *Piratelli et al. (Piratelli, 2009)* aportan un nuevo enfoque al adaptar los asientos cinemáticos a una esfera conformando una esfera virtual, Figura 2 - 16. En trabajos posteriores (*Piratelli, 2010*) (*Piratelli, 2012*) aplica el concepto de esfera virtual a una placa para reducir el número de posiciones a medir y agilizar el proceso de evaluación del brazo. De esta manera *Piratelli et al.* no solo puede evaluar la repetibilidad del centro de las esferas virtuales sino que también la distancia entre sus centros. En contra, aunque ahora las esferas virtuales adoptan una geometría en barra similar a la de los patrones más tradicionales de esferas y pueden por lo tanto seguir la metodología de las normas (*ASME B89.4, 2004*) (*VDI/VDE 2617-9, 2009*), no utiliza características geométricas reales y por lo tanto este factor podría influir en el error

total del brazo. A pesar de ello, este concepto se puede utilizar como una medida de la evolución del error de los brazos a lo largo del tiempo.

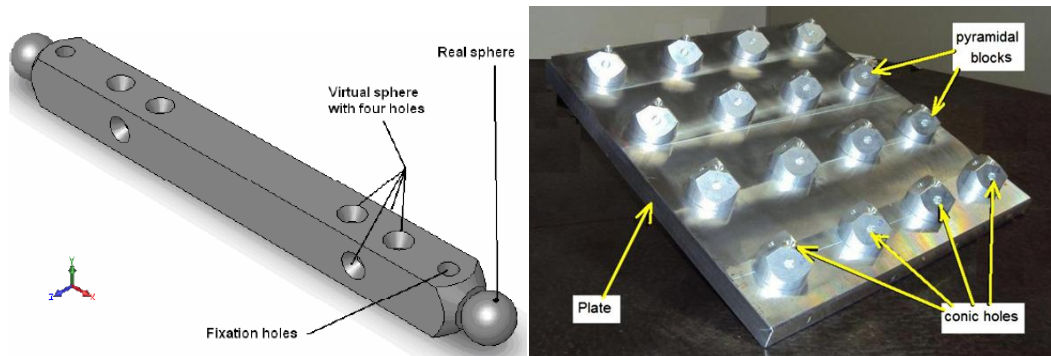


Figura 2 - 16 Patrones de esferas virtuales: barra y placa
Fuente: (Piratelli, 2009) y (Piratelli, 2010)

Desde otro punto de vista los asientos cinemáticos también pueden estar formados por tres esferas sobre las que se apoya la esfera del palpador tradicional para determinar un único punto, (Sladek, 2013) Figura 2 - 17.



Figura 2 - 17 Barra con asientos cinemáticos de tres esferas
Fuente: (Piratelli, 2013)

Por otra parte, los patrones se miden generalmente en varias posiciones dentro del espacio de trabajo de los brazos de medir, por lo que se han desarrollado de forma análoga accesorios complementarios a estos. Piratelli et al. (Piratelli, 2009) utilizan una estructura soldada que aporta una superficie de apoyo estable para el patrón pero se vislumbra de difícil adaptación a la práctica industrial. Brau et al. (Brau, 2010) (Brau, 2013) diseñan una plataforma multiregistro para la base del brazo que permite el rápido y preciso giro del brazo sobre su eje vertical, Figura 2 - 18. Este giro simula el cambio de posición del patrón dentro del espacio de trabajo del brazo sin necesidad de desplazar el patrón ni requerir grandes cantidades de espacio.

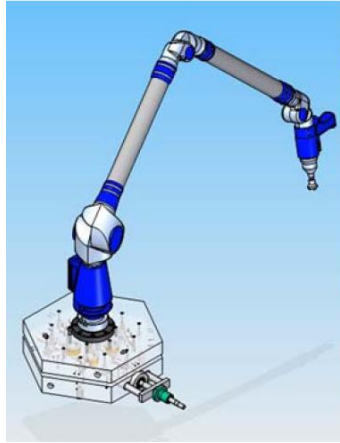


Figura 2 - 18 Plataforma multiregistro para calibración

Fuente: (Brau, 2010) (Brau, 2013)

2.3.3 Toma de datos: mediciones del patrón

El objetivo del proceso de toma de mediciones es obtener los errores verdaderos del brazo en todo su volumen de trabajo. La correcta medición de estos errores permite generalizar los resultados de la calibración o la evaluación a todas las mediciones realizadas por el brazo de medir por coordenadas indistintamente del lugar y posición del espacio de trabajo en el que se hayan realizado. La toma de datos depende principalmente del criterio del autor aunque algunos estudios se basan en las posiciones recomendadas por la norma ASME (*ASME B89.4, 2004*). De la combinación de posiciones del patrón, los elementos a medir y las repeticiones por cada elemento se materializan una gran cantidad de puntos recogidos. Esta gran cantidad de puntos a recoger ha llevado a varios autores a diseñar palpadores específicos para la tarea de calibración.

Shimajima et al. (*Shimajima, 2004*) construyeron un palpador de punta cónica invertida donde encajan las esferas de calibración, Figura 2 - 19. Este diseño permite leer directamente el centro de las esferas incluso al variar la orientación del palpador de manera rápida. El palpador se coloca sobre la esfera y se mantiene el contacto mientras se desliza por su superficie. En el mismo trabajo diseñan otro palpador con la misma idea pero cambian la forma cónica invertida por tres pequeñas esferas donde encaja la esfera del patrón de calibración. Este diseño reduce la zona de fricción entre el palpador y la esfera a tres puntos.

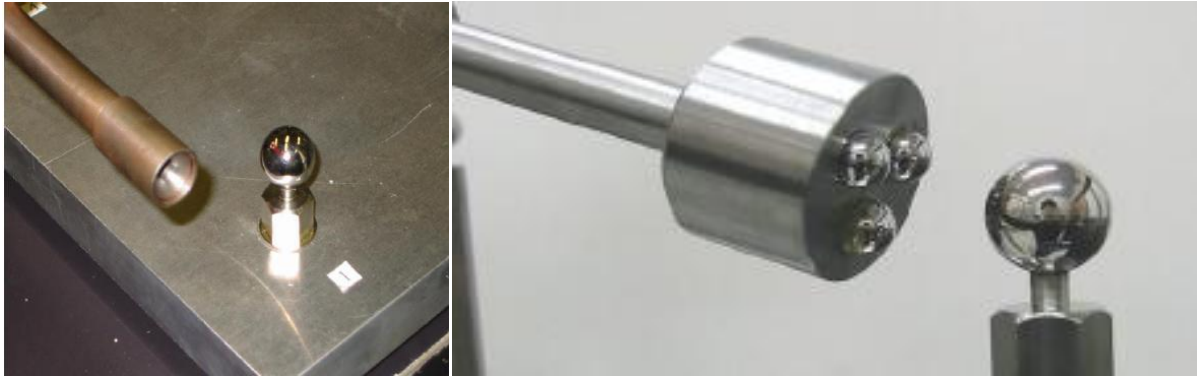


Figura 2 - 19 Palpadores de calibración de Shimojima et al.
Fuente: (Shimojima, 2004)

Santolaria et al. (Santolaria, 2008) diseñaron y construyeron un palpador (sonda autocentrante pasiva) similar formado por tres esferas que se adaptan al diámetro de las esferas de calibración de su patrón, Figura 2 - 20. En trabajos posteriores (Santolaria, 2009a) (Santolaria 2010b) (Santolaria 2009c) (Santolaria 2009d) construyen y comparan una sonda autocentrante pasiva y otra activa también desarrollada por ellos. La sonda activa está compuesta por tres sensores de movimiento lineal que determinan el centro de la esfera en contacto automáticamente. Obtuvieron una mejora en el comportamiento del palpador pero nuevamente el proceso de calibración omite el palpador real usado en las mediciones de piezas reales, que lógicamente es una parte importante de la estructura del propio brazo de medir y no se debería obviar.

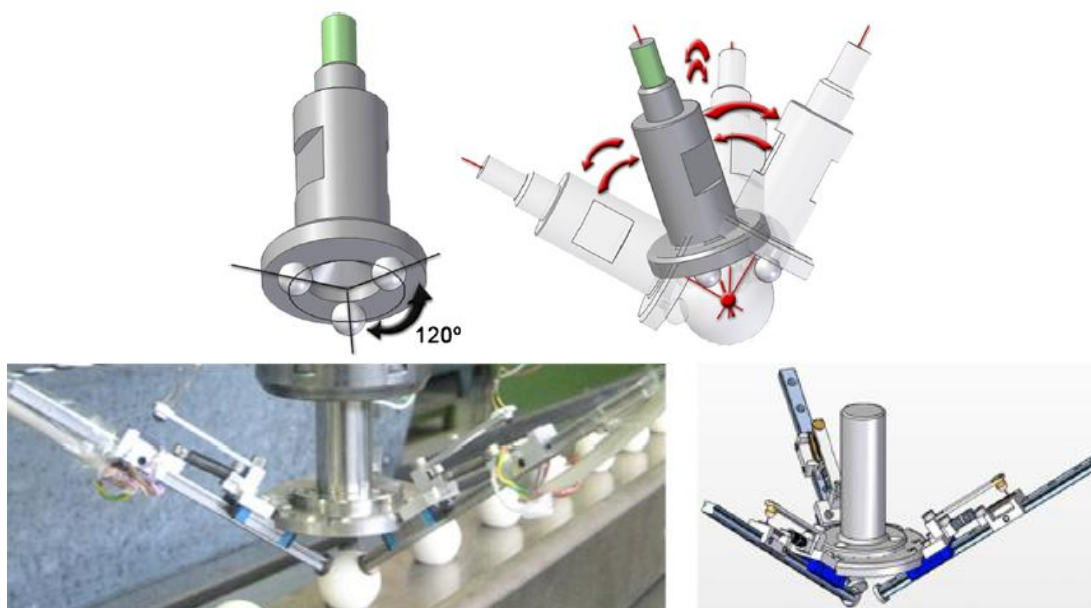


Figura 2 - 20 Sonda autocentrante pasiva y activa
Fuente: (Santolaria, 2009a) (Santolaria 2010b) (Santolaria 2009c) (Santolaria 2009d)

Por contra, el uso de este tipo de palpadores requiere su ajuste al tamaño de la esfera de calibración y una fabricación cuidadosa. Además, se omite en el proceso de calibración el palpador real utilizado posteriormente por el brazo de medir, así como la forma típica de palpado. Estos palpadores se utilizan únicamente para la calibración y la forma de medir difiere significativamente de la forma de medir con los palpadores reales.

Hamana et al. (*Hamana, 2010*) desarrollaron un instrumento que se acopla en la MMC y el brazo de medir por coordenadas en lugar de sus palpadores, Figura 2 - 21. Este instrumento permite a la MMC conocer la posición del extremo del brazo y usar estos puntos para que la calibración ajuste las coordenadas del brazo a las indicadas por la MMC. Este trabajo plantea el uso directo de una MMC en la calibración de los brazos de medir por coordenadas, sin embargo el propio instrumento puede influir en la medición con el brazo de medir. Además el sistema vuelve a eliminar el palpador del brazo de medir del proceso de calibración.



Figura 2 - 21 Aparato de calibración de Hamana et al. y detalle de unión

Fuente: (Hamana, 2010)

Por otro lado, la forma en la que las normas o los autores miden el patrón (posiciones del patrón, elementos medidos y repeticiones por cada elemento) determina en gran medida la fiabilidad de las mediciones posteriores. Sin embargo, esta forma de medición depende del criterio de los diferentes autores. Kovac et al. (*Kovac, 1999b*) (*Kovac, 2001*) miden las distancias (cada 100 mm) de su patrón de calibración 5 veces cada una, usando dos posiciones horizontales (simulan las direcciones X e Y), una vertical y otra a 50° por ser la posición más desfavorable de su patrón. Shimojima et al. (*Shimojima, 2004*) miden las 9 esferas de su patrón con 5 repeticiones en 5 posiciones diferentes del patrón alrededor del eje principal del brazo. En la comparación de patrones que realizaron Furutani et al. (*Furutani, 2003*) (*Furutani, 2004*) los patrones se midieron 5 veces en cuatro posiciones distintas. En el estudio de Hamana et al. (*Hamana, 2010*) se realizaron y compararon dos tipos de calibraciones. La

primera es similar a la planteada por Furutani et al. (Furutani, 2003) (Furutani, 2004) y la segunda utiliza una MMC y su espacio de trabajo para evaluar el brazo de medir, Figura 2 - 22. Un instrumento conecta la MMC con el brazo de medir por coordenadas por lo que las coordenadas del MMC se utilizan como referencia para las mediciones del brazo de medir por coordenadas. El espacio de trabajo de 400x400 mm define puntos cada 100 mm aproximadamente en las direcciones principales que son medidos por el brazo.

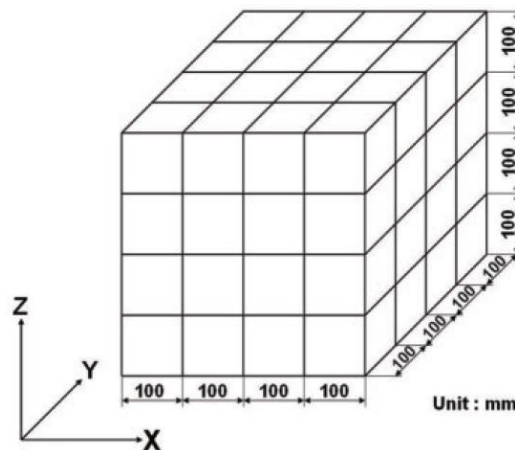


Figura 2 - 22 Espacio de trabajo para la calibración de Hamana et al.
Fuente: (Hamana, 2010)

Gatti et al (Gatti, 2008) midieron su placa con asientos cinemáticos en hasta 160 puntos con varias posiciones para estudiar la repetibilidad y precisión de su propio brazo de medir por coordenadas. En los estudios de Gao et al. (Gao, 2009a) miden un único asiento cinemático con 100 repeticiones y estudian la repetibilidad de dicho punto para calibrar el brazo de medir por coordenadas. En un trabajo similar Gao et al. (Gao, 2009b) añaden la medida de una longitud entre dos asientos cinemáticos al medir cada punto 100 veces.

Estos trabajos presentan procesos de tomas de datos que no representan todo el volumen de trabajo. Desde la aparición de la normas ASME (ASME B89.4, 2004) y VDI (VDI/VDE 2617-9, 2009), se ha avanzado en la armonización de las metodologías de evaluación y en la definición de un proceso que incluya todo el espacio de trabajo de los brazos de medir por coordenadas. La mayoría de fabricantes ya dan los datos de repetibilidad y precisión de acuerdo a estas normas. La primera norma en aparecer, ASME (ASME B89.4, 2004), parece la más aceptada en los trabajos de los autores ya que varios siguen la metodología en sus ensayos. Esta norma en su prueba de rendimiento volumétrico divide el espacio de trabajo esférico en octantes y describe 20 posiciones para el patrón. Se miden dos distancias, una corta y una larga, distribuidas en 20 posiciones. Las esferas, utilizadas como elementos de referencia de las distancias, se miden con 5 puntos. Por su parte la norma VDI

propone dos versiones de su prueba de comportamiento volumétrico según la distancia del patrón. Para un patrón largo se definen 7 posiciones y para uno corto 3 posiciones ortogonales por cuadrante. En el caso de la norma VDI se deben realizar 5 repeticiones por cada longitud. Estas normas establecen una base exhaustiva para la evaluación completa del espacio de trabajo de los brazos de medir por coordenadas. Ambas, además, definen otras pruebas utilizando esferas de calibración y un asiento cinemático.

Algunos autores utilizan posiciones similares a las definidas en las normas para evaluar o calibrar los brazos de medir por coordenadas. Santolaria et al. (*Santolaria, 2008*) (*Santolaria 2009b*) miden 4 esferas en una barra donde materializan 6 distancias en 7 posiciones distintas del patrón, Figura 2 - 23. En total se miden 400 centros de esferas con una combinación total de 10780 ángulos de las articulaciones.

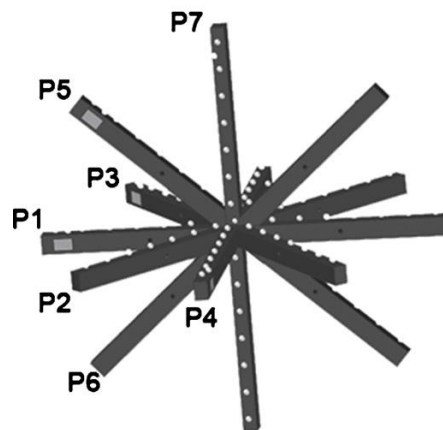


Figura 2 - 23 Posiciones del patrón para calibración Santolaria et al.
Fuente: (*Santolaria, 2008*)

Piratelli et al. (*Piratelli, 2009*) propusieron unas posiciones del patrón basándose en la norma B89.1.12M (*ASME B89.1.12M, 1990*) aunque esta está destinada a MMC. Por medio de la metodología de diseño de experimentos redujeron las posiciones necesarias a 8, obteniendo resultados similares, Figura 2 - 24.

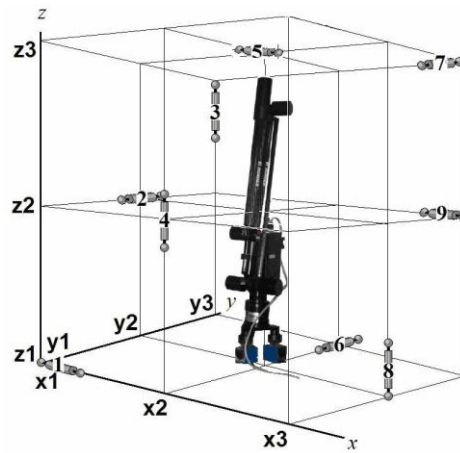


Figura 2 - 24 Posiciones de patrón para calibración de Piratelli et al.
Fuente: (Piratelli, 2009)

Cabe mencionar que la cualidad de los brazos de medir por coordenadas de poder medir un punto desde casi infinitas orientaciones complica la evaluación. No sólo es necesario evaluar el error cometido en una región del espacio de trabajo del brazo de medir por coordenadas sino que también es necesario evaluar dicho error en dicha región accediendo desde varias orientaciones del brazo. Esta característica ha sido vagamente incluida en los procesos de evaluación, salvo por las indicaciones o sugerencias de tomar las mediciones cambiando la configuración del brazo (*ASME B89.4, 2004*), o en mayor detalle como hace Santolaria et al. (*Santolaria, 2008*) al comprobar los giros realizados en los encoders de las articulaciones durante el proceso de calibración.

Actualmente los fabricantes referencian las normas ASME y VDI para dar los datos técnicos de cada modelo de sus brazos. Esto permite la comparación directa tanto entre modelos del mismo fabricante como entre fabricantes. El uso de esquemas de posiciones que abarquen el espacio con la combinación de un patrón de longitud adecuada al rango del brazo permite calcular el error asociado con los brazos de medir. Además, el número de posiciones se puede reducir hasta una cantidad que no eleve el tiempo de calibración o evaluación excesivamente.

2.3.4 Función objetivo

La función objetivo representa los términos concretos que definen el error del brazo de medir y funciona como el objetivo a minimizar. Los datos extraídos del patrón y del proceso de calibración son introducidos en dicha función normalmente como una diferencia entre los datos reales del patrón y los datos medidos por el brazo. En este punto cada autor define el

error del brazo en términos concretos. Shimojima et al. y Furutani et al. (Shimojima, 2004) (Furutani, 2003) utilizan la norma ISO 14253-2 (ISO 14523-2, 1999) para calcular la incertidumbre global y función error como la combinación de la incertidumbre de los parámetros del modelo geométrico, de los encoders y de la función de obtención de las coordenadas del brazo, Ec. 2. 1.

$$\phi = u_x^2 = \left(\frac{\partial f}{\partial p}\right)^2 u_p^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial \theta}\right)^2 u_\theta^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial r}\right)^2 u_r^2 \quad \text{Ec. 2. 1}$$

En un trabajo posterior del grupo, Hamana et al. (Hamana, 2010) utilizan una MMC para la calibración del brazo por lo que utilizan la diferencia entre las coordenadas del brazo de medir y de la MMC como la función objetivo a optimizar, Ec. 2. 2.

$$\phi = r = \sqrt{(x - cmm[x])^2 + (y - cmm[y])^2 + (z - cmm[z])^2} \quad \text{Ec. 2. 2}$$

Santolaria et al. (Santolaria, 2008) (Santolaria, 2009b) establecen la función objetivo con dos términos. El primero es la diferencia de la distancia medida por el brazo articulado y la distancia calibrada del patrón y el segundo es 2 veces la desviación estándar por cada coordenada de los centros de las esferas, Ec. 2. 3. Por lo tanto, esta función objetivo tiene un término de precisión volumétrica similar al presentado por las normas y un término de repetibilidad también presentado en la norma ASME (ASME B89.4, 2004).

$$\phi = \sum_{i=1}^r \sum_{j,k=1}^s [(D_{i\ jk} - D_{o\ jk})^2 + (2\sigma_{x\ ij})^2 + (2\sigma_{y\ ij})^2 + (2\sigma_{z\ ij})^2] \quad \text{Ec. 2. 3}$$

Gatti et al. (Gatti, 2008) utilizan una función objetivo centrada en la repetibilidad de los brazos de medir. El error mínimo buscado es la media del error más 3 veces la desviación estándar de la medición de un punto, Ec. 2. 4. Gao et al. (Gao, 2009a) (Gao, 2009b) utilizan la misma expresión para su método de calibración.

$$RP = \bar{E} + 3\sigma \quad \text{Ec. 2. 4}$$

Ouyang et al. (Ouyang, 2010) utilizan como función objetivo la diferencia de coordenadas del centro de la esfera en el vértice de su patrón tetraédrico con el brazo de medir por coordenadas con respecto a las mediciones de una MMC.

Sladek et al. (Sladek, 2013) buscan la mejora en términos de distancia entre las esferas de su patrón, Ec. 2. 5.

$$\phi = d = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2} \quad \text{Ec. 2. 5}$$

La función objetivo determina los términos de error del brazo y su criterio debe ir acorde a los futuros parámetros que se utilizarán en su evaluación para que no se pierda el sentido de la calibración. Aunque algunos autores coinciden en términos de sus funciones objetivos, todavía no está establecido cuáles son los mejores términos para minimizar el error ni se han comparado las diferentes funciones en un mismo trabajo. Sin embargo, la función objetivo y la calibración establecen una base desde la que mejorar los errores de los brazos de medir por coordenadas.

2.3.5 Algoritmo de optimización: técnica de identificación de parámetros

Como la mayoría de aspectos relativos al comportamiento cinemático los brazos de medir han heredado la experiencia de los brazos robot (*Santolaria, 2006*). La búsqueda de los valores de los parámetros del modelo cinemático se realiza mediante técnicas numéricas de optimización que minimizan el error de la función objetivo. El método más extendido es el de mínimos cuadrados y sus variantes (*Shimojima, 2004*) (*Furutani, 2003*) (*Gatti, 2008*). Por otra parte, Santolaria et al. (*Santolaria, 2008*) utilizan el método de mínimos cuadrados no lineales Levenberg-Marquadt (*Levenberg, 1944*) (*Marquadt, 1963*), aplicado con éxito por otros autores en el campo de los brazos robot (*Alici, 2005*) (*Alici, 2006*) (*Goswami, 1993b*). Este método resuelve problemas en cuanto a la definición de la función objetivo y presenta un mejor comportamiento matemático en cuanto a la convergencia del método en cada iteración.

Gao et al. (*Gao, 2009a*) (*Gao, 2009b*) utilizan técnicas de redes neuronales para la tarea de identificación de los parámetros del modelo cinemático de los brazos de medir por coordenadas. En el primer trabajo utilizan un algoritmo PSO (Optimization Swarm Particle) que simula un sistema social simplificado en el que cada miembro de la “sociedad” aprende de las experiencias pasadas de todos los miembros. Cada miembro representa una solución potencial para el problema de optimización. La posición inicial de los elementos de los algoritmos es aleatoria y se mueve en el espacio hasta localizar la mejor posición. En el segundo trabajo utilizan un algoritmo MSAA (Modified Simulated Annealing Algorithm) que busca mínimos de funciones. La capacidad de este algoritmo de escapar de mínimos locales permite la búsqueda del conjunto óptimo de parámetros para el modelo cinemático.

Por otra parte, Sladek et al. (*Sladek, 2013*) definen el error como el vector diferencia entre el punto leído por el brazo de medir y el punto realmente medido en la pieza y estudia la

acción de los errores aleatorios en la definición de un punto en el espacio medido por el brazo de medir por coordenadas.

Una vez obtenidos los parámetros cinemáticos del modelo, el brazo debe ser evaluado, preferentemente por los métodos propuestos por las normas, de forma que permitan la comparación entre ellos. Sin embargo, la mayoría de las metodologías de calibración propuestas por los autores no son comparables directamente entre sí, ya que utilizan brazos de medir de diferentes características constructivas y precisión.

2.3.6 Tratamiento de las fuentes de error

Descartada la opción de tratar las diferentes fuentes de error desde el modelo cinemático, debido a la elección de un modelo cinemático simple, las compensaciones de los efectos de dichas fuentes de error se debe realizar a partir de la base obtenida en la calibración. Son pocos los estudios que se centran en las fuentes de error y sus efectos en los brazos de medir por coordenadas. Los errores cometidos durante las mediciones de la calibración se realizan bajo la influencia de numerosas fuentes de error (deformación de la estructura, cambios de temperatura, ajustes en las uniones, resolución de los encoders, estabilidad de la medición, etc.).

Santolaria et al. (*Santolaria, 2009*,) tras su calibración, propusieron también una mejora de la repetibilidad de los brazos de medir. De los resultados de la calibración, el término de error en distancia consiguió una mejora sustancial pero el término de la repetibilidad tuvo una mejora insuficiente. Por ello, plantearon la mejora de la repetibilidad en base a los parámetros cinemáticos ya calculados, que proporciona un error de distancia aceptable. Así, los valores de los errores de repetibilidad en todas las posiciones adoptadas durante la calibración se simulaban por medio de una función de Fourier. Este método también se emplea para extrapolar los resultados a posiciones y zonas no utilizadas en la calibración. La repetibilidad se mejoró en su conjunto y, especialmente, en las zonas no consideradas en la calibración. Esta compensación se puede considerar como una segunda calibración ya que reúne todas las fuentes de error de los brazos de medir y se basa en las mediciones realizadas durante la calibración.

Vhrovek et al (*Vhrovek, 2007*) clasificaron y estimaron el efecto que las diferentes fuentes de error pueden ejercer sobre el comportamiento de los brazos de medir por

coordenadas. Los errores cinemáticos son el resultado de la fabricación y puesta a punto de los componentes de los brazos. Aunque estos errores pueden llegar a ser muy importantes en un punto dado, son controlables ya que son errores sistemáticos que no varían en el tiempo y dependen de la geometría del brazo de medir. Por ello, la calibración y optimización de los parámetros del modelo cinemático puede reducir estos errores al mínimo. En este sentido, Lin et al. (Lin, 2005) estudiaron la influencia del error sistemático de los parámetros del modelo cinemático y cómo se propagan los errores hasta la punta de los brazos de medir por coordenadas. Sin embargo, este estudio no es aplicable a las calibraciones actuales que modifican los parámetros del modelo cinemático y por lo tanto pierden la relación con el modelo físico. Gao et al. (Gao, 2013) realizaron un estudio similar en el que se analiza cómo se transfieren los posibles errores de todos los parámetros del modelo D-H.

El error de los encoders en cuanto a su fabricación y colocación en el brazo se incluyen dentro de los errores cinemáticos, pero su resolución tiene un tratamiento distinto. La resolución de la medición del ángulo rotado en cada articulación es uno de los principales datos en el cálculo de las coordenadas finales de los brazos de medir por coordenadas por lo que su comportamiento afecta al error cometido en las mediciones. Esta fuente de error se corrige principalmente por el avance en la tecnología de los encoders con el desarrollo de sensores cada vez más precisos.

Los errores en las articulaciones que generan desviaciones de un movimiento rotacional también pueden ser corregidos si estos se conocen de antemano. Además, la fricción en las articulaciones puede modificar la rotación con el tiempo y obligar a realizar calibraciones periódicas.

Los errores térmicos son muy importantes en el caso de los brazos de medir por coordenadas, ya que su ámbito de utilización se encuentra fuera del laboratorio de metrología, donde la temperatura no está controlada. Además, estos errores son difíciles de corregir debido a la no linealidad del sistema. La norma ASME (ASME B89.4, 2004) establece los tiempos de espera para que el brazo de medir se adapte a los cambios de temperatura y minimizar los cambios que puedan producirse en su estructura durante las mediciones. Santolaria et al (Santolaria 2009) propusieron un sistema que varía los parámetros del modelo cinemático de acuerdo a la temperatura. Realizaron la calibración de un brazo a diferentes temperaturas con lo que se consiguió un conjunto de parámetros por cada temperatura. A continuación, describieron una función para cada parámetro del modelo cinemático que

establece el valor de éste de acuerdo a la temperatura registrada. El modelo no corrige directamente el efecto de la temperatura sino que realiza una compensación global que depende de la temperatura. La influencia real de la temperatura en el error no se conocen a priori con este método aunque al final los efectos de la temperatura se corrigen.

Los errores de las deformaciones elásticas incluyen el peso propio de la estructura, la fuerza que ejerce el operario, la fuerza de contacto con la pieza a medir o las fuerzas producidas por la aceleración. Estos errores constituyen una de las mayores fuentes de error ya que depende del propio diseño del brazo y del comportamiento impredecible del operario. Vhrovek et al. (*Vhrovek, 2001*) desarrollaron un sensor laser que mide la deflexión de los segmentos del brazo en todo momento. Sin embargo, este sistema debería colocarse en cada segmento y corregir el modelo cinemático constantemente. En un trabajo posterior, Vhrovek et al. (*Vhrovek, 2010*) implementaron este sensor en un único segmento de un brazo por motivos de espacio y diseño del brazo. Este sistema consigue reducir el error (medido como la suma del error los errores 3D de 20 puntos medidos a lo largo de una barra donde el palpador es movido con un aparato que se desliza por dicha barra.) del brazo por medio del cálculo de parámetros del modelo cinemáticos ajustados la deformación del segmento en el que está instalado el sensor. Hamana et al. (*Hamana, 2010*) intentaron corregir la deflexión de los segmentos del brazo por medio del cálculo teórico de su deflexión: recogen la inclinación de cada segmento con respecto a la horizontal y sus propiedades físicas y calculan la deflexión. Posteriormente, este término se añade a la matrices de transformación entre los sistemas de referencia del modelo cinemático. No se encontró una mejora significativa en la calibración con este sistema respecto a la calibración con patrón en su trabajo anterior (*Furutani, 2003*), deduciendo que es necesario un modelo más completo de deflexión. Al añadir estos parámetros en el modelo cinemático, estos pueden verse afectados por la optimización que se realiza en la calibración perdiendo el significado de la deflexión calculada por lo que es conveniente realizar esta corrección a posteriori.

Por otra parte, se ha demostrado en trabajos preliminares de esta tesis (*Cuesta, 2011a*) (*Cuesta, 2011b*) que las fuentes de error dependientes del operario representan un factor relevante. La naturaleza manual de los brazos de medir por coordenadas resulta en un proceso de medición no controlado y con parámetros de medición no uniformes. Esta no uniformidad se observa tanto entre diferentes mediciones de un mismo elemento como entre los puntos que conforman la medición de cada elemento. El operario controla los numerosos parámetros de medición de manera intuitivamente por lo que existe una variabilidad considerable en los

parámetros de medición, especialmente al compararlos con el comportamiento de las MMC. Los parámetros de medición incluyen: la fuerza de contacto, la estabilidad de la medición, la distribución de los puntos, la estrategia de medición (continuo o discontinuo), la orientación del palpador con respecto a la superficie de medida o la orientación del brazo, entre otros.

El factor operativo es uno de los más importantes en el comportamiento de los brazos de medir y además se manifiesta por varios caminos. La fuerza de contacto que produce la deformación del palpador se muestra como un error que afecta directamente al error de todo el brazo. Por la forma de manejar el brazo el operario centra su fuerza en dos puntos: uno para mantener la orientación del brazo y otro para aplicar la fuerza de contacto. El operario tiende a asegurar el contacto con un exceso de fuerza directamente desde la articulación de la muñeca donde se sitúa el palpador. Por esta razón se asume que la fuerza de contacto es mayoritariamente la fuerza ejercida por el operario en ese punto. La deformación del palpador debida a esta fuerza depende de la orientación del propio palpador, asociado con la técnica de medición seguida por el operario. A menudo esta técnica cambia al medir un tipo de característica geométrica determinado. Además, la rigidez del palpador frente a fuerzas radiales de flexión o longitudinales de compresión es muy diferente, por lo que la deformación que sufra será también muy diferente. El estudio de la fuerza ejercida por el operario además de la influencia del tipo de elemento medido puede aportar información suficiente para estudiar el comportamiento de los brazos de medir y proponer metodologías de corrección y evaluación adecuadas. Incluso la inclusión de modelos de corrección de este factor en los procesos de calibración y/o evaluación llevará, probablemente, a la disminución de los errores de los brazos y al aumento de la fiabilidad de sus mediciones.

Como resumen de todo lo expuesto, la Tabla 2. 2 muestra el resumen de los trabajos realizados hasta la fecha por los diferentes grupos. Se puede observar que el número de grupos de investigación en esta temática es muy reducido.

Tabla 2. 2 Resumen de metodologías de calibración aplicadas por los autores

Grupo	Modelo cinemático	Patrón	Palpador	Posiciones	Función objetivo	Método de optimización
Kovac	-	Barra con interferómetro	Tradicional	4	-	-
Shimajima y Furutani	D-H	Placa de esferas Barra con dos esferas	Cono invertido y tres esferas	5	Error de los parámetros del modelo GUM	Mínimos cuadrados
Gatti	D-H	Placa con asientos cinemáticos	Palpador en punta	1	Repetibilidad	Mínimos cuadrados
Santolaria	D-H	Barra con esferas	Autocentrante pasivo y activo	7	Error en distancia y repetibilidad	Mínimos cuadrados L-M
Sladek	D-H	Asiento cinemático de tres esferas	Tradicional	7	Distancia	-
Gao	D-H	Asiento cinemático	Tradicional	1	Repetibilidad de un punto	PSO, MSAA
Piratelli	-	Barra con esferas virtuales	Tradicional	8	-	-
Ouyang	D-H	Tetraedro con esferas	Tradicional	1	Coordenadas vértice de tetraedro	-
Hamana	D-H	Aparato de unión con MMC	-	-	Coordenadas de CMM	Mínimos cuadrados

2.4 Consideraciones generales

En párrafos anteriores se han establecido las bases del estudio de los brazos de medir por coordenadas y algunas pautas para mejorar su comportamiento y fiabilidad. De acuerdo a la bibliografía, el modelo D-H es el más utilizado por su simplicidad, ya que se ajusta a la estructura cinemática del brazo y porque son posibles compensaciones posteriores a la calibración. El uso del modelo D-H es un punto que los autores no cuestionan, centrándose más en la forma de mejorar el error cometido por los brazos de medir por coordenadas a partir de él, en lugar de en el estudio del propio modelo en sí.

Se constata también que es importante definir un parámetro o conjunto de parámetros que determine el error cometido por los brazos. Algunos autores se centran en la minimización del error de los parámetros del modelo, otros en la repetibilidad y otros utilizan el error en distancias. El error debe además representar a todo el espacio de trabajo por lo que los autores diseñan metodologías de calibración que incluyen varias posiciones del patrón de calibración. Por otra parte el patrón de calibración utilizado ejerce un papel importante en el proceso. Su forma y longitud a menudo determinan las posiciones necesarias para la calibración. Además, las características geométricas incluidas en el patrón influyen en los resultados de la calibración.

La calibración establece un punto de partida para las corrección de las fuentes de error, es decir, los modelos de corrección pueden desarrollarse a partir de la calibración sin modificar el modelo cinemático. Varias fuentes de error han sido estudiadas pero aún no se conoce el comportamiento real del brazo bajo la influencia de la mayoría de estas fuentes de error. Los errores de deflexión, especialmente los debidos a la acción del operario, juegan un papel importante en el comportamiento de los brazos de medir por coordenadas. El operario es el encargado de ejercer los parámetros de medición y con ello los errores que generan.

En esta tesis se estudia la gran variabilidad de estos parámetros, la acción del operario y la falta de reproducibilidad de los brazos con la intención de conocer su influencia y minimizarlos en la medida de lo posible. Además, la tesis pretende establecer una metodología de evaluación completa de los brazos que incluya los efectos tanto de los errores inherentes al brazo de medir como los añadidos por el operario.

Estudio de la precisión de los brazos de medir por coordenadas

3.1 Introducción

El presente capítulo pretende mostrar el la metodologías de evaluación actuales aplicables y aplicadas por los fabricantes y autores para calcular la incertidumbre o lo errores de medición de los brazos de medir por coordenada. A pesar de que los brazos de medir por coordenadas componen un grupo propio por sus características especiales, no en todos los casos la evaluación de su error se realiza de acuerdo a normas o metodologías específicas para brazos de medir. La norma ISO 10360 se empleó, en un principio, como medio de evaluación ya que no se disponían de normativas dirigidas a brazos de medir. En 2004 se publicó la norma americana ASME B89.4.22 destinada específicamente a los brazos de medir. Esta norma se ha convertido en una referencia internacional y es habitualmente utilizada por los fabricantes para proporcionar las características técnicas de sus brazos a lo largo de los últimos años. En el año 2009 se publicó la norma alemana VDI/VDE 2617 Parte 9, que aborda la evaluación de estos instrumentos de manera similar. También se ha convertido en una referencia para la comparación de brazos de distintos fabricantes. Estas normas consideran las características de los brazos de medir e introducen nuevos términos para cuantificar su error. Al contrario de las MMC, donde se evalúan los errores a lo largo de sus ejes y sus combinaciones, los brazos de medir por coordenadas no poseen ejes cartesianos físicos. La combinación de la posición de las articulaciones determina el error cometido, pero además un punto puede se puede alcanzar desde casi infinitas configuraciones espaciales del brazo de medir por coordenadas. Por estas razones las normas ASME y VDI plantean formas nuevas de evaluación. Algunos autores basan sus metodologías de calibración o evaluación en los procesos propuestos por estas normas (*Santolaria, 2008*) (*Piratelli, 2009*).

Otra forma de cuantificar el error cometido por los brazos es mediante la aplicación de normas de cálculo de incertidumbre de equipos de medición. La guía GUM y la norma EA 2/04 proporcionan metodologías generales para el cálculo de la incertidumbre de los procesos de medición. La norma ISO 14253-3 fue utilizada por Furutani et al. (*Furutani, 2003*). Esta norma aplica un método simplificado de la GUM para obtener la incertidumbre de procesos de medición. La norma ISO 15530-3 aplica la evaluación del proceso de medición con MMC por medio del cálculo de la incertidumbre de los términos que intervienen en las mediciones. Estos procedimientos pueden aplicarse a la medición con brazos de medir por coordenadas ajustando el proceso de evaluación a las características de los brazos. Estos documentos

técnicos pueden ser muy útiles para conocer la incertidumbre de trabajo de los brazos de medir por coordenadas y para estudiar su evolución en el tiempo con el fin de calibrarlos cuando se supere un límite no deseado. Sin embargo, aporta poca información sobre la influencia de las fuentes de error en dicha incertidumbre y establecen únicamente la incertidumbre para un proceso de medición concreto.

3.2 Métodos de evaluación de brazos de medir por coordenadas

A continuación se exponen las posibles maneras de evaluar los procedimientos de medición. La guía GUM (*GUM, 2008*) establece reglas generales para evaluar y expresar la incertidumbre de procedimientos de medida. Esta guía es de utilidad para mantener el control de la producción, realizar investigaciones, calibrar patrones e instrumentos. Los métodos propuestos en la GUM han sido aplicados en numerosas normas y documentos técnicos así como han sido adaptados a diversos sistemas de medición. La norma EA 2/04 (*EA-4/02 M, 1999*) aplica la metodología de la GUM para los procedimientos de calibración. Está dirigida a la elaboración de certificados de calibración emitidos por laboratorios acreditados y para proporcionar a los entes de acreditación un proceso coherente de las capacidades de medición de los laboratorios de calibración acreditados por estos entes. Las normas ISO 15530-3 (*ISO 15530-0, 2011*) e ISO 14253-2 (*ISO 14253-2, 1999*) (desarrollan métodos prácticos basados en los cálculos de las incertidumbres de la GUM para la evaluación de las MMC y de equipos de medida, respectivamente. La norma ISO 15530-3 utiliza la incertidumbre propia del patrón de calibración, del procedimiento de medición del patrón, del proceso de medición y de los materiales de las piezas para calcular la incertidumbre de una MMC. La norma ISO 14253-2 establece un procedimiento simplificado iterativo por el cual se propone un procedimiento de medición y sus términos de incertidumbre. En cada iteración se mejoran los términos de incertidumbre hasta que se cumpla el objetivo de incertidumbre. Aunque estas metodologías obtienen incertidumbre de un proceso de medición, no definen el error real cometido por el instrumento de medida sino la incertidumbre de un procedimiento muy específico de inspección. Tampoco proponen los ensayos específicos con los que los instrumentos se deben evaluar. Aspectos como el error cometido en todo el volumen de trabajo, errores de los diferentes componentes de las máquinas o los patrones necesarios no se tratan en estas normas.

La norma ISO 10360-2 propone los ensayos de aceptación y de verificación periódica para MMC. Esta norma ya establece ensayos concretos en los que se obtiene los errores propios de la máquina (error de palpado y error de mediciones de dimensión). Cuando los valores de estos ensayos se encuentren dentro de los límites establecidos, las mediciones con la MMC son aceptadas. De forma similar, las normas ASME y VDI establecen ensayos

específicos y medios destinados a obtener los errores de evaluación de los brazos de medir por coordenadas.

3.2.1 Expresión de la incertidumbre

El enfoque GUM propone un procedimiento para el cálculo y expresión del resultado de una medición que consta de varias etapas. La primera de ellas, consiste en detallar el modelo matemático del proceso de medida. Éste se realizará tras haber analizado el proceso de medida, identificando los factores de influencia y estableciendo una estrategia para reducirlos (por ejemplo: mediante la repetición de observaciones y la aplicación de las correcciones necesarias). La transcripción de estas operaciones al lenguaje matemático, permite establecer un modelo del proceso.

El mensurando o magnitud particular objeto de la medición (Y) dependerá de una serie de magnitudes de entrada X_i ($i = 1, 2, \dots, n$) de acuerdo a una relación funcional, Ec. 3. 1

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N) \quad \text{Ec. 3. 1}$$

La función modelo (f) representa el procedimiento de medición y el método de evaluación, en el sentido de que describe cómo se obtienen los valores de la magnitud de salida (Y) a partir de los valores de entrada (X_i). Además, los valores de entrada pueden a su vez depender de otras magnitudes medibles. En la mayoría de los casos, la función modelo corresponde a una única expresión analítica, pero en otros casos, se necesitan varias expresiones de este tipo que incluyan las correlaciones y factores de corrección de los efectos sistemáticos, en cuyo caso existe una relación más complicada que no se expresa explícitamente como una función.

Por lo tanto, las opciones para el cálculo de f son:

- Determinar la expresión de forma analítica
- Determinar la expresión de forma experimental
- La combinación de los casos anteriores

A la hora de calcular la incertidumbre de una medida según el enfoque GUM, se deben de calcular las incertidumbres asociadas a las variables de las que se ha hecho depender la

expresión matemática del mensurando. La evaluación de estas variables puede ser de tipo A o de Tipo B.

La evaluación tipo A de la incertidumbre típica es aquella cuyo valor estimado y cuya incertidumbre asociada se determina directamente de la medición. Estos valores pueden ser obtenidos a partir de una única observación, a partir de observaciones reiteradas o a partir de juicios basados en la experiencia. Pueden exigir la determinación de correcciones de las lecturas de un instrumento y de las magnitudes de influencia, como la temperatura ambiental, la presión barométrica o la humedad relativa.

Para este tipo de evaluación, la incertidumbre típica se calcula como la desviación típica experimental de la media que se deriva de un procedimiento promediado o de un análisis de regresión. En definitiva, la obtención del valor de la incertidumbre típica se realiza mediante métodos de análisis estadístico. Supuesta X_A como una magnitud tipo A de las X_i de las que depende el mensurando Y , y suponiendo que se realizan j observaciones estadísticamente independientes de la citada magnitud X_A y se denotan como $x_{A,j}$, se calcula la media aritmética o promedio de los valores observados, Ec. 3. 2.

$$\bar{x}_A = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{A,j} \quad \text{Ec. 3. 2}$$

Por otra parte, para el estimado de X_A se puede obtener la varianza experimental (s^2) de la distribución de probabilidad o mediante su raíz cuadrada o desviación típica experimental (s), Ec. 3. 3 y Ec. 3. 4.

$$s^2(x_A) = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (x_{A,j} - \bar{x}_A)^2 \quad \text{Ec. 3. 3}$$

$$s(x_A) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (x_{A,j} - \bar{x}_A)^2} \quad \text{Ec. 3. 4}$$

A partir de estas expresiones es posible obtener la varianza experimental de la media aritmética, Ec. 3. 5.

$$s^2(\bar{x}_A) = \frac{s^2(x_A)}{n} \quad \text{Ec. 3. 5}$$

Este parámetro es el que habitualmente se usa como expresión de la incertidumbre de medida (u) asociada a una de las variables de las que depende el cálculo del mensurando, Ec. 3. 6.

$$u(\bar{x}_A) = s(\bar{x}_A) = \sqrt{\frac{s^2(x_A)}{n}} \quad \text{Ec. 3. 6}$$

La evaluación tipo B de la incertidumbre típica es aquella en la cual la evaluación de la incertidumbre no se realiza mediante un método estadístico, sino mediante criterios científicos basados en todas las informaciones disponibles. Estas informaciones pueden incluir:

- Datos obtenidos de mediciones anteriores.
- Experiencia o conocimientos generales sobre el comportamiento y las propiedades de los materiales e instrumentos relevantes.
- Especificaciones de los fabricantes.
- Datos de calibraciones y otros certificados.
- Incertidumbres asignadas a los datos de referencia obtenidos en los manuales.

El uso de la información disponible para una evaluación tipo B se basa en la experiencia y en los conocimientos generales. No obstante, se deben distinguir tres casos:

- Cuando sólo se conoce un valor único de una magnitud (X_A), este valor debe utilizarse como valor de la desviación (x_A). La incertidumbre típica se usará siempre que se conozca y, en caso contrario, se calculará a partir de datos inequívocos sobre la incertidumbre. En caso de que no se disponga de este tipo de datos, la incertidumbre debe de estimarse en base a la experiencia.
- Cuando se pueda suponer una distribución de probabilidad para la magnitud X_A , la expectativa o valor esperado se tomará como el estimado x_A , mientras que su desviación típica se tomará como la incertidumbre típica asociada $u(x_A)$.
- Si sólo pueden estimarse unos límites superior e inferior para el valor de la magnitud, puede suponerse una distribución de probabilidad con una densidad

constante entre dichos límites y, empleando consideraciones de tipo estadístico, calcular la desviación típica de la distribución propuesta.

La incertidumbre típica de “y”, siendo “y” la estimación del mensurando Y, se obtiene componiendo las incertidumbres típicas de las estimaciones de entrada. Esta incertidumbre se conoce como la incertidumbre típica combinada u_c . La ley de propagación explica cómo combinar las incertidumbres de los factores que afecta a un mensurando. La ley de propagación de la incertidumbre surge de aplicar el desarrollo de Taylor de primer orden a la conocida expresión del mensurando (Y) en función de las variables de influencia consideradas (X_i). La incertidumbre típica combinada es calculada de acuerdo a la ley de propagación, Ec. 3. 7.

$$u^2(y) = \sum_{i=1}^N \left[\frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2 \cdot u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N u(x_i, x_j) \quad \text{Ec. 3. 7}$$

El segundo término de la expresión refleja la contribución de la incertidumbre de las variables a la incertidumbre del mensurando en el caso de que algunas de las variables estén correlacionadas. Sin embargo, en el caso (realmente el más frecuente en la práctica) de que las variables sean independientes, la expresión de la ley de propagación de la incertidumbre elimina el segundo término, Ec. 3. 8.

$$u^2(y) = \sum_{i=1}^N \left[\frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2 \cdot u^2(x_i) \quad \text{Ec. 3. 8}$$

Por otra parte se definen los coeficientes (c_i) de sensibilidad para cada variable X_i , Ec. 3. 9. Este coeficiente describe el grado en que la estimación de salida se ve afectada por variaciones en la estimación de entrada x_i .

$$c_i = \frac{\partial f}{\partial x_i} \quad \text{Ec. 3. 9}$$

En ocasiones, es conveniente emplear como valor de la incertidumbre una versión modificada de la incertidumbre típica de medida $u(y)$ que sea más restrictiva en cuanto a la probabilidad de cobertura. Esta versión modificada se denomina incertidumbre expandida de medida (U) y se puede calcular como la incertidumbre típica multiplicada por un factor de cobertura o recubrimiento (k), Ec. 3. 10.

$$U = k \cdot u(y) \quad \text{Ec. 3. 10}$$

La multiplicación de la incertidumbre típica por este factor de cobertura o de recubrimiento (k), habitualmente entre 2 y 3, debe especificarse siempre como parte del resultado de medida. Obteniendo así valores de incertidumbre expandida (U) "más seguros" para aplicaciones industriales. En caso de poder atribuir una distribución normal (gaussiana) al mensurando y suponiendo que la incertidumbre típica asociada a la estimación de salida tiene la suficiente fiabilidad, debe utilizarse el factor de cobertura usual ($k=2$). Este factor de cobertura equivale a proporcionar una probabilidad de cobertura a la incertidumbre expandida asociada de (aproximadamente) un 95%.

Con este factor de cobertura, o lo que es lo mismo, considerando la incertidumbre expandida, la expresión final de la medición de la magnitud viene dado por su estimación e incertidumbre expandida, Ec. 3. 11.

$$Y \pm U \qquad \text{Ec. 3. 11}$$

Pudiendo definir incertidumbre (U) como el valor de la semiamplitud de un intervalo alrededor del valor resultante de la medida (valor convencionalmente verdadero). Dicho intervalo representa una estimación adecuada de una zona de valores entre los cuales es "casi seguro" que se encuentre el valor verdadero del mensurando.

La mejora de las condiciones del proceso de medición y de los medios utilizados para la calibración del proceso produce una incertidumbre expandida menor lo que permite conocer de manera más exacta el valor verdadero del mensurando.

La norma EA utiliza también esta metodología de cálculo de incertidumbres aplicándola a calibración de instrumentos. La EA está destinada a entes acreditadores que certifican laboratorios de calibración. En su desarrollo establece los principios y requerimientos en la evaluación de la incertidumbre de las mediciones en calibración y su inclusión en los certificados. Su enfoque sigue siendo general para que sea aplicable a cualquier proceso e instrumento de medición susceptible de ser calibrado y certificado. El objetivo es establecer las bases para armonizar el procedimiento de calibración y expresión de la incertidumbre. Además aporta diversos ejemplos que sirven como guías para procesos de medida similares tanto en conceptos de fuentes de incertidumbre como en forma de cálculo de su incertidumbre.

3.2.2 Expresión de la incertidumbre en MMC y brazos de medir por coordenadas

La norma ISO 15530-3 aplica la metodología GUM específicamente para la medición con MMC mediante el uso de piezas calibradas o patrones. Para ello establece los requerimientos del proceso. La MMC y el sistema de palpado deben prepararse según las especificaciones del fabricante en especial en cuanto a la temperatura de estos sistemas y el patrón a ser medido. Si la MMC dispone de sistemas de corrección para las condiciones ambientales, por ejemplo cambios térmicos, se deben activar.

El método requiere similitud en los siguientes aspectos del proceso:

- La dimensión y la geometría de las piezas usadas en las mediciones reales y el patrón de calibración utilizado en la evaluación de la incertidumbre de la medida. Incluye la posición y orientación de las piezas y patrón, entre otras.
- El procedimiento de medición de la evaluación de la incertidumbre de medida y la medición real. Incluye cómo se manipulan las piezas, el amarre, la estrategia de medición, la rapidez y fuerza de medición, entre otros.
- Las condiciones ambientales durante la evaluación de la incertidumbre de la medida y la medición real. Incluye temperatura, tiempo de estabilización de temperatura, las correcciones debidas a la temperatura, entre otros.

Una vez que los requisitos y la MMC está preparada se procede a evaluar la incertidumbre. La evaluación consiste en la secuencia de mediciones, realizada de la misma manera y bajo las mismas condiciones que las mediciones reales tras la evaluación. Las contribuciones a la incertidumbre se separan en: la debida al procedimiento de medición, la de la calibración del patrón y la variación de las piezas medidas. El procedimiento de evaluación se debe especificar exhaustivamente y debe ser similar al usado en las mediciones reales. Éste consiste en líneas generales en medir las piezas calibradas o patrón tal y como se medirán las piezas reales. Al menos deberían realizarse 10 ciclos de mediciones y un total de al menos 20 mediciones de las piezas calibradas o patrón. Todos los movimientos y acciones realizadas en la medición de las piezas reales se deben incluir en el procedimiento de evaluación.

El cálculo de incertidumbres se realiza para un porcentaje de cobertura del 95% ($k=2$) por recomendación de la norma. Los términos de incertidumbre son los siguientes:

- u_{cal} : incertidumbre asociada a la incertidumbre de la calibración de la pieza calibrada o patrón (certificado de calibración). Esta incertidumbre es un dato del certificado de calibración del patrón en función del factor de su factor de cobertura.
- u_p : incertidumbre asociada al procedimiento de medición. Este error se divide a su vez en factores como los errores geométricos de la MMC, la temperatura de la MMC, la temperatura de la pieza, la repetibilidad de la MMC, la resolución de la MMC, los gradientes de temperatura de la MMC y los errores del sistema de palpado, entre otros.
- u_b : incertidumbre asociada al error sistemático del proceso de evaluación usando un patrón. La incertidumbre asociada al coeficiente de expansión térmica del material es evaluada en este punto como parte del error sistemático.
- u_w : incertidumbre asociada al material y las variaciones de fabricación (variaciones en el coeficiente de expansión, errores de forma, rugosidad, entre otros). Este término se separa en la incertidumbre relativa al proceso de fabricación de las piezas no calibradas (u_{wp}) y en la incertidumbre debida a la diferencia de los coeficientes de expansión en las piezas no calibradas (u_{wt}). Si se utilizan varias piezas calibradas esta componente puede ser omitida.

De esta manera la incertidumbre expandida es la combinación de estas componentes, Ec. 3. 12.

$$U = k \sqrt{u_{cal}^2 + u_p^2 + u_b^2 + u_w^2} \quad \text{Ec. 3. 12}$$

Esta norma establece ya un método de cálculo de incertidumbre para el uso específico de MMC y permite conocer en cierto grado la capacidad de la MMC para realizar mediciones aceptables. Sin embargo, la incertidumbre sólo es asociable a un procedimiento concreto de medición con lo que sólo se aceptan las mediciones para ese proceso.

A su vez la norma ISO 14253-2 establece un proceso simplificado e iterativo basado en la GUM por el cual calcula la incertidumbre de un proceso de medición. Este proceso incluye un límite de incertidumbre objetivo y para alcanzarlo supone un proceso de calibración. Tras este supuesto se calcula la incertidumbre y se compara con la incertidumbre objetivo. Si esta no cumple la incertidumbre objetivo el proceso de medición o los medios

deben mejorarse para reducir la incertidumbre hasta alcanzar la incertidumbre objetivo. Esta norma sirve para hacer un análisis general del proceso de calibración necesario para una tarea de inspección en comparación con el presumible coste de la calibración. Además, todas las condiciones de medición se deben mantener constantes durante todas las mediciones. Sin embargo, la naturaleza del control manual de los brazos de medir por coordenadas no permite satisfacer plenamente este punto.

Furutani et al. (*Furutani, 2003*) utilizan esta norma para comparar varios patrones para la calibración de los brazos de medir. Comienza en el desarrollo del modelo cinemático del brazo para conseguir los coeficientes de sensibilidad. El trabajo presenta directamente los resultados de la incertidumbre, por lo cual no es posible apreciar el proceso del cálculo de incertidumbre seguido por los autores.

3.2.3 Evaluación: ISO 10360-2

Establece los ensayos para evaluar las MMC con el error de indicación en mediciones de dimensión y el error de palpado. El error de indicación permite conocer el comportamiento de la MMC en mediciones de dimensión. El error de palpado mide el error del sistema del palpador. La norma expresa que sus ensayos son aplicables únicamente a MMC, definiendo dos tipos de ensayos:

a) Ensayo “Error de palpado”

El objetivo del ensayo es comprobar si la MMC es capaz de medir con un error menor al error de palpado máximo permisible especificado, MPE_p . El ensayo se realiza con una orientación de la esfera de calibración, elegida por el usuario. La esfera se mide con 25 puntos uniformemente repartidos al menos por un hemisferio, Figura 3 - 1. Con las coordenadas de los 25 puntos se calcula la esfera gaussiana asociada. Después, se calcula la distancia entre cada uno de los 25 puntos y el centro de la esfera calculada, r .

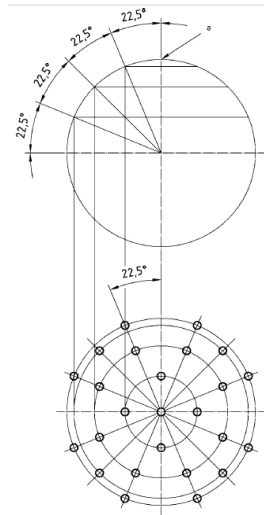


Figura 3 - 1 Distribución de los puntos en el ensayo de error de palpado
Fuente: (ISO 10360, 2009)

El rango de las distancias corresponde al error de palpado, Ec. 3. 13. El MPE es el error máximo admisible para ensayos de aceptación.

$$MPE_p \geq P = R_{max} - R_{min} \quad \text{Ec. 3. 13}$$

b) Ensayo “Error de dimensión”

El objetivo de este ensayo es conocer si la MMC mide con un error menor que el error máximo permisible de indicación, MPE_E . En el ensayo se miden al menos 5 patrones longitudinales de distancias diferentes. Además, cada patrón se debe medir en siete posiciones distintas dentro del volumen de trabajo de la MMC con tres repeticiones. Las posiciones del patrón son elegidas por el usuario. El patrón, preferiblemente un patrón escalonado o bloques patrón, debe contener al menos una distancia mayor del 66% de la diagonal mayor del volumen de trabajo de la MMC. Las mediciones deben ser bidireccionales, entre caras opuestas y deben usar únicamente un punto en cada extremo del patrón. Para cada distancia y medición se calcula la diferencia “E” entre la distancia medida y la distancia real, Ec. 3. 14. Los efectos de la temperatura se deben corregir si la MMC tiene los medios adecuados. El error E debe ser menor al MPE_E dado por el fabricante, especificado normalmente en función de la distancia.

$$MPE_E \geq E \quad \text{Ec. 3. 14}$$

3.2.4 Evaluación: ASME B89.4.22

La norma propone la evaluación de los brazos de medir por coordenadas como una máquina singular y distinta a las MMC. Además, con ello pretende homogeneizar los criterios de evaluación y hacer posible la comparación entre brazos distintos. La norma define las posibles configuraciones de los brazos de medir por coordenadas, los requerimientos del ambiente para su funcionamiento y los métodos de evaluación. Además, es específica para medición por contacto excluyendo explícitamente los sistemas ópticos de medición sin contacto.

La norma no trata de corregir los efectos derivados de los cambios de temperatura, ya que la portabilidad de los brazos hace que sea imposible asegurar la temperatura de 20° C. Sin embargo refiere a la norma ASME B89.6.2 para el cálculo de índice de error térmico como un parámetro extra en las mediciones realizadas a otras temperaturas. El fabricante debe proveer los parámetros térmicos aceptables para poder realizar con garantías la medición con el brazo de medir por coordenadas. Estos parámetros son el rango aceptable de temperaturas de trabajo, así como los gradientes máximos tanto en tiempo como en longitud y el tiempo de estabilización. Además, se debe ser especialmente cuidadoso con las fuentes de calor radiantes que pueden afectar al comportamiento del brazo de medir. La norma recomienda que en el caso de que las mediciones se realicen a otra temperatura significativamente diferente de la temperatura usada en la prueba de evaluación, se repitan parcialmente los ensayos de la norma (ensayo de diámetro efectivo y una parte del ensayo de precisión volumétrica) a la temperatura de las mediciones. Si la temperatura de medición no cumple las especificaciones del fabricante, el usuario debe detener las mediciones. Por otra parte, el fabricante debe asegurar de que el brazo funcione correctamente dentro de los límites de temperatura. No se consideran efectos negativos debido a la humedad en el ambiente aunque debe ser controlado durante el tiempo por posibles daños a la estructura o sus componentes.

La norma también se refiere a la superficie utilizada como referencia para montar el brazo de medir como una fuente importante de errores, especialmente las vibraciones. Las vibraciones son muy perjudiciales para los componentes del brazo de medir al causar movimientos relativos entre el palpador, los ejes y la pieza o incluso dañar el equipo. Obviamente la elección de la superficie idónea para la realizar las mediciones corresponde al usuario final.

Además se refiere al control manual y a los contrapesos internos del brazo como fuente de error que produce deflexión en los segmentos que componen el brazo de medir por coordenadas. Si los ensayos que propone la norma arrojan errores que se encuentran claramente fuera de la precisión dada por el fabricante, el primer paso debe consistir en revisar el montaje del brazo.

Las condiciones de montaje tienen un apartado propio en la norma debido a su portabilidad y habitual cambio de posición. El fabricante debe indicar las condiciones de montaje para una correcta medición. La base en la que se apoya el brazo debe montarse en una mesa de trabajo o en instrumentos de soporte proporcionados por el fabricante, como trípodes. La base se somete a diversas fuerzas y momentos, midiendo la deformación producida y comparándola con los requerimientos del sistema. Las fuerzas que actúan en la base durante las mediciones son de traslación y de torsión, Figura 3 - 2. Las fuerzas de traslación actúan en los ejes principales de la base y los momentos de torsión sobre estos ejes.

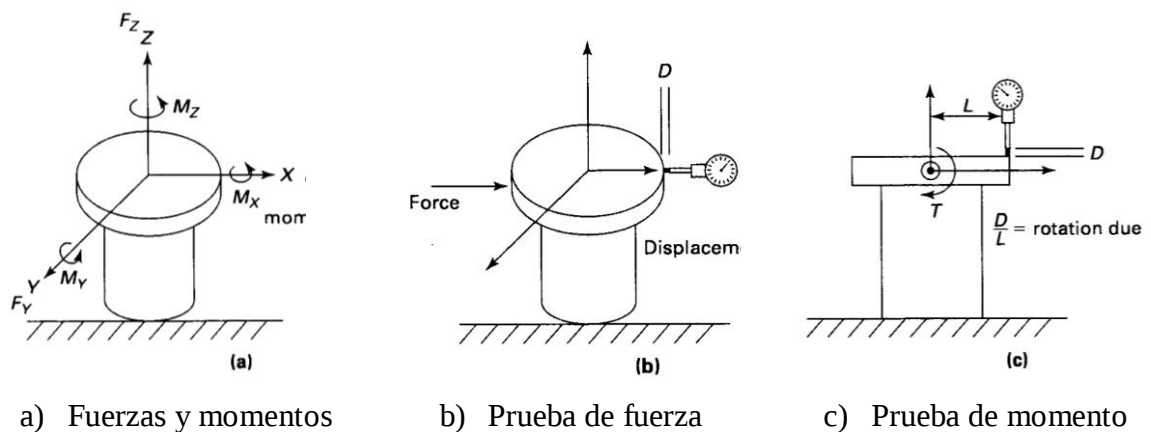


Figura 3 - 2 Fuerzas que actúan sobre la base de los brazos de medir por coordenadas

Fuente: (ASME, 2004)

Una vez comprobado que el brazo de medir por coordenadas cumple los requerimientos de funcionamiento especificados por el fabricante, se realizan tres ensayos para comprobar el error de medición. La norma propone tres ensayos que definen los diferentes errores en la medición con brazo de medir por coordenadas:

a) Ensayo de diámetro efectivo

En este ensayo se mide con el brazo una esfera de calibración con 9 puntos. La medición de la esfera se mide tres veces en la misma posición y la máxima diferencia entre el diámetro medido y el de calibración de la esfera es el dato de error obtenido de este ensayo. El diámetro de la esfera es de 10-50 mm y debe colocarse aproximadamente a la mitad del

alcance del brazo de medir. La distribución de puntos debe ser uniforme: 4 puntos en el ecuador, 4 puntos a latitud de 45° y 1 punto en el polo. Cada punto se debe tomar de forma independiente, es decir, no debe haber contacto con la pieza entre la toma de dos puntos consecutivos. Además, la posición de las articulaciones del brazo durante las mediciones debe mantenerse aproximadamente constante durante la medición de la esfera. Con los puntos adquiridos se construye la esfera asociada y con ello se obtiene el diámetro medido, que se compara con el diámetro de calibración de la esfera. Este ensayo puede desvelar errores tales como una excesiva histéresis del brazo de medir o del palpador, o una calibración del palpador incorrecta. La obtención de diámetros claramente diferentes debe llevar a la repetición de la medición o incluso del ensayo tras la correcta corrección de las posibles causas de problemas.

b) Ensayo de articulación de punto único

Este ensayo se dirige a comprobar si el brazo de medir por coordenadas es capaz de medir el mismo punto desde diferentes posiciones de sus articulaciones. La norma especifica que este ensayo no mide la repetibilidad sino que incorpora aspectos de repetibilidad y reproducibilidad. En este test se evalúa la no linealidad de la estructura de los brazos de medir y su capacidad de medir un punto desde infinitas posiciones de las articulaciones. Para maximizar las configuraciones de las articulaciones desde las que se realizan las mediciones el elemento a medir se coloca en tres posiciones diferentes. El volumen de trabajo del brazo de medir se divide en tres zonas: un círculo de radio 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 3 - 3. El elemento objeto de medición se ubica en cada una de estas zonas.

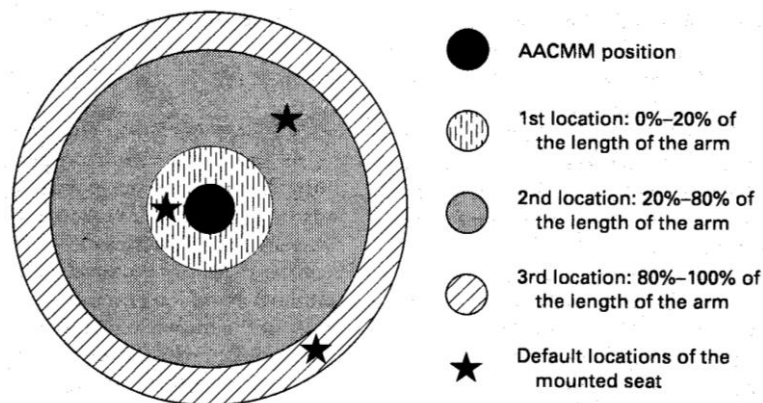


Figura 3 - 3 Zonas del ensayo de "Articulación de punto único"

Fuente: (ASME, 2004)

De acuerdo al tipo de palpador utilizado, pasivo o con detección de contacto, el ensayo se divide en dos variantes. Para un palpador pasivo se mide un asiento cinemático, ya sea un asiento cinemático de tres esferas, un asiento cónico o un asiento de una agujero avellanado para que encaje el palpador. La esfera del palpador debe permanecer en la posición de lectura del punto del asiento cinemático en todo momento. Cada asiento cinemático se mide diez veces en las tres posiciones indicadas. Cada repetición debe realizarse con las articulaciones en posiciones determinadas para poder evaluar todo el rango de las articulaciones, Figura 3 - 4.

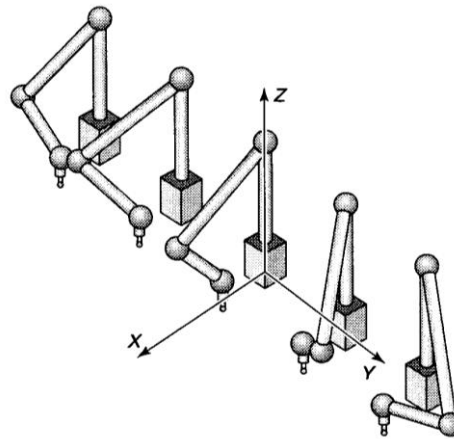


Figura 3 - 4 Posiciones de las articulaciones para el ensayo "Articulación de punto único"
Fuente: (ASME, 2004)

En el caso de utilizar un palpador con detección de contacto se utiliza una esfera de calibración en lugar de un asiento cinemático. Se mantienen las tres posiciones, diez repeticiones por posición y las posiciones de las articulaciones del brazo por repetición. La esfera se debe medir con cinco puntos: cuatro en una circunferencia máxima de la esfera y otro en el polo, Figura 3 - 5. Los cinco puntos de cada repetición se deben tomar aproximadamente con la misma posición de las articulaciones del brazo de medir..

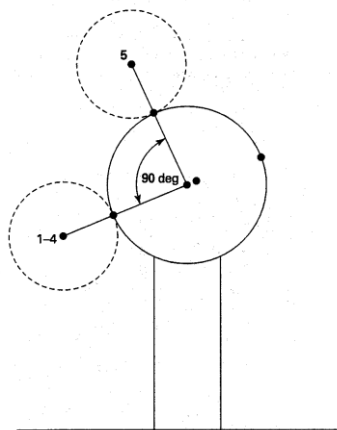


Figura 3 - 5 Distribución de puntos para ensayo con palpador con detección de contacto
Fuente: (ASME, 2004)

De la medición de la esfera se obtiene el valor del centro de la esfera y la distancia a cada punto de contacto (X_a, Y_a, Z_a) y el centro de cada una de las mediciones (X_i, Y_i, Z_i) , Ec. 3. 15.

$$\delta_i = \sqrt{(X_i - X_a)^2 + (Y_i - Y_a)^2 + (Z_i - Z_a)^2} \quad \text{Ec. 3. 15}$$

De estos datos se calcula $2s_{SPAT}$, Ec. 3. 16.

$$2s_{SPAT} = 2 \sqrt{\frac{\sum \delta_i^2}{(n - 1)}} \quad \text{Ec. 3. 16}$$

siendo $n = 10$

El valor de la máxima distancia (δ_{max}) y el valor de $2s_{SPAT}$ se calculan para cada posición. Los valores finales son los que corresponden a la posición con la mayor distancia.

c) Ensayo de rendimiento volumétrico

Este ensayo describe el comportamiento en la medición de longitudes en el volumen de trabajo de los brazos de medir por coordenadas. No se persigue determinar el error de ejes lineales como en las MMC. Se utiliza un patrón longitudinal, una barra con esferas situadas a largo de su longitud o un patrón escalonado. Los efectos de la temperatura en la longitud del patrón se deben corregir si la evaluación se realiza a una temperatura diferente a 20°. El patrón debe poseer dos distancias medibles: una corta entre el 50% y el 75% de la longitud del brazo y otra larga entre el 120% y el 150%. La norma aporta 20 posiciones pero se pueden utilizar otras posiciones si cubren el volumen de trabajo. Para la definición de las posiciones del patrón se divide el volumen de trabajo del brazo de medir en 8 octantes, Figura 3 - 6.

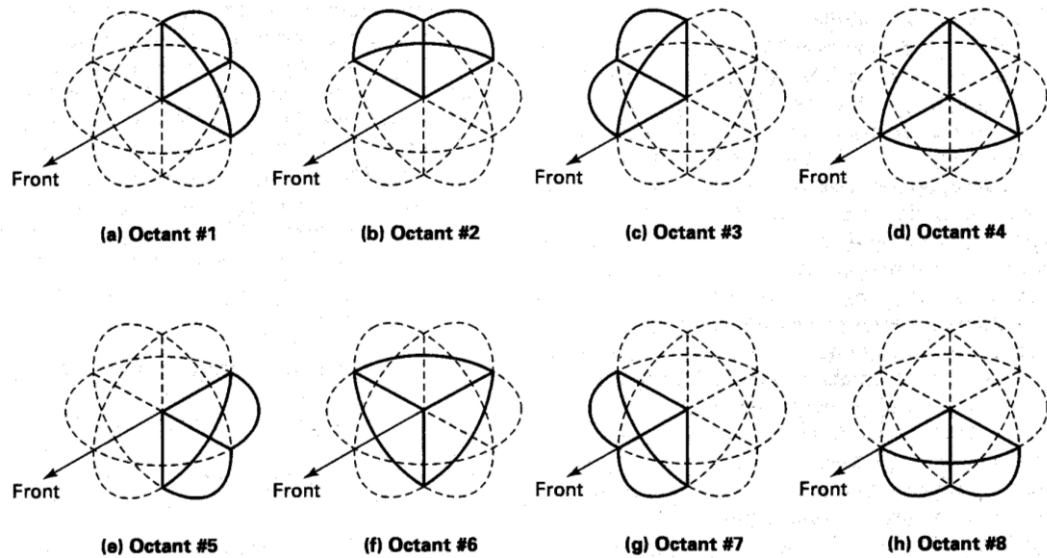


Figura 3 - 6 Octantes de esfera para el ensayo de precisión volumétrica

Fuente: (ASME, 2004)

El patrón es medido en dos posiciones verticales, diez horizontales y ocho a 45°. Combinando la medición de la longitud corta o la larga, las posiciones relativas del patrón y la cercanía del palpador al eje vertical principal del brazo se definen todas las posiciones, Figura 3 - 7.

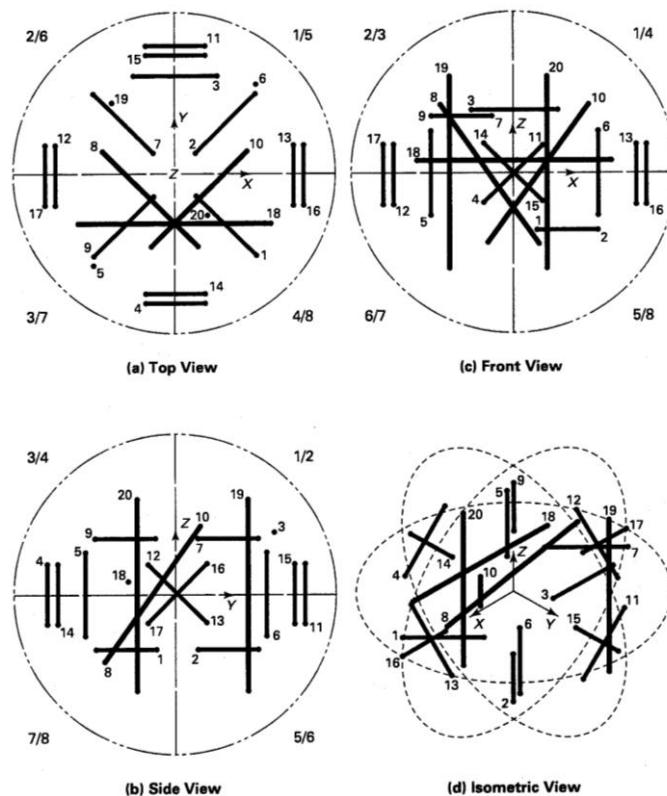


Figura 3 - 7 Posiciones para el ensayo de precisión volumétrica

Fuente: (ASME, 2004)

Para cada posición se mide la distancia (L_i) y se calcula la diferencia con la distancia calibrada del patrón (L_{cal}), Ec. 3. 17. En el caso de utilizar un patrón con esferas se utilizarán

cinco puntos de medición uniformemente repartidos y la distancia se considera de centro a centro de esfera.

$$D_i = L_i - L_{cal} \quad \text{Ec. 3. 17}$$

Del ensayo se obtienen tres parámetros: la máxima desviación ($D_{\max}$), el rango de las desviaciones ($D_{\max} - D_{\min}$) y la desviación estándar de las diferencias, Ec. 3. 18.

$$2RMS = 2 \sqrt{\frac{\sum D_i^2}{(n - 1)}} \quad \text{Ec. 3. 18}$$

siendo $n = 20$.

Las distancias se pueden representar gráficamente para una mayor comprensión del rendimiento volumétrico del brazo, Figura 3 - 8.

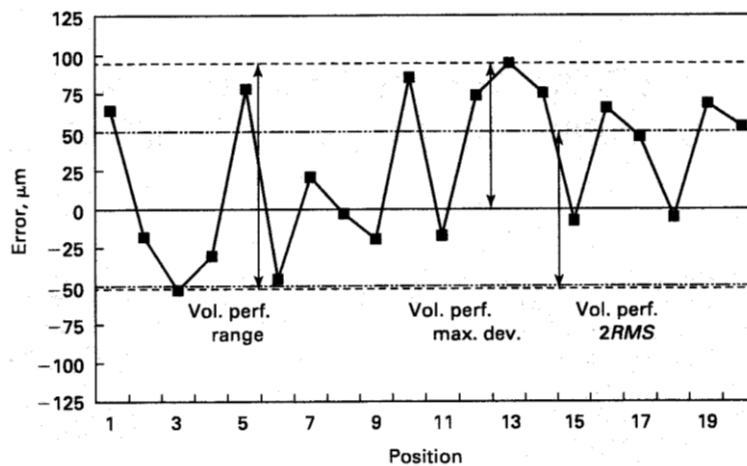


Figura 3 - 8 Ejemplo de resultados del ensayo de precisión volumétrica
Fuente: (ASME, 2004)

Durante los ensayos se debe registrar la temperatura y se debe medir con una incertidumbre de al menos $\pm 0.1^\circ\text{C}$. La esfera de calibración debe ser esférica con un error de esfericidad inferior a un quinto del resultado del ensayo de punto único. La combinación entre la esfericidad y el acabado superficial de la esfera debe ser inferior a un tercio del resultado del ensayo de punto único. El error de distancia entre esferas debe ser inferior a un quinto del error obtenido en el ensayo de rendimiento volumétrico.

3.2.5 Evaluación: VDI/VDE 2617 - 9

La norma VDI/VDE 2617 – 9 estudia también la evaluación de los brazos articulados de manera independiente a las MMC. Esta norma propone dos ensayos para calcular los errores del brazo de medir por coordenadas.

a) Ensayo de error de palpado

En este ensayo se mide una esfera de calibración. La esfera se mide en tres posiciones en diferentes zonas del volumen de trabajo del brazo de medir. La posición radial de cada posición difiere 120° con respecto a las demás. Además, para ubicar las esferas se divide el volumen en tres zonas: una que cubre una distancia menor al 30% de la longitud del brazo, otra que cubre desde el 30% hasta el 70% de la longitud y una última que cubre desde el 70% hasta el 100% de la longitud del brazo. La altura de la esfera de calibración se define con respecto a la posición de reposo del brazo de medir. La altura corresponde a -20%, 0% y 50% de la longitud del brazo, respectivamente, Figura 3 - 9. La esfera se mide con cinco puntos en uno de los hemisferios con un punto en el polo y cuatro repartidos uniformemente en el ecuador. La medición de la esfera se debe repetir 5 veces con posiciones del palpador distintas.

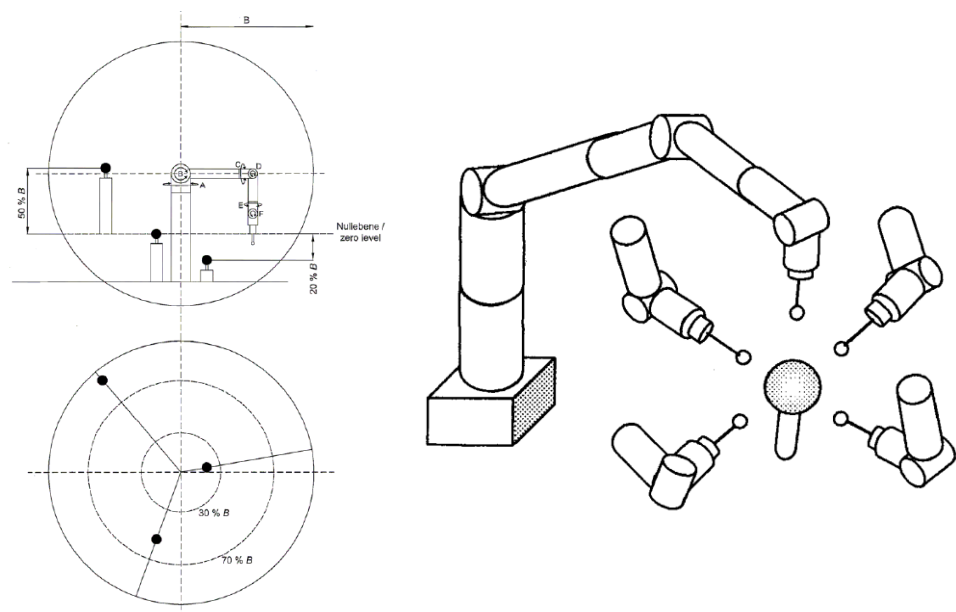


Figura 3 - 9 Posiciones de la esfera y de las articulaciones para el ensayo de error de palpado

Fuente: (VDI, 2009)

De estas mediciones se calculan tres parámetros del error de palpado. El error de palpado (MPL_P) se divide en error de palpado de ubicación (MPL_{PL}), error de palpado de forma (MPL_{PF}) y error de palpado de tamaño (MPL_{PT}). Para el cálculo de los tres es necesario

construir la esfera asociada a las mediciones de los cinco puntos tomados. Por lo tanto, por cada posición de la esfera se obtiene 5 esferas construidas. El error de palpado de ubicación utiliza los datos de los centros de dichas esferas. Para cada posición se calcula la máxima distancia entre los cinco centros. El máximo valor de esta distancia para las tres posiciones de la esfera es el error de palpado de ubicación.

Por otra parte, el diámetro obtenido en las mediciones se compara con el verdadero diámetro de la esfera de calibración. El máximo valor para todas las posiciones de la esfera es el error de palpado de tamaño.

Por último, se calcula la distancia de cada punto al centro de la esfera. Para cada posición se calcula la diferencia entre la distancia mayor y la menor. El máximo valor de esta diferencia para las tres posiciones de la esfera es considerado el error de forma.

b) Ensayo de rendimiento volumétrico.

Este ensayo se basa en la norma ISO 10360-2, la cual es adaptada a las características de medición de los brazos de medir por coordenadas. Se mide un patrón longitudinal en varias posiciones dentro del volumen de trabajo del brazo de medir. El patrón puede ser una barra con esferas, un patrón escalonado o similar. El patrón debe materializar cinco distancias distintas. El ensayo se divide en dos dependiendo del tamaño del patrón.

En el ensayo de rendimiento volumétrico del volumen completo la longitud del patrón debe ser al menos el 66% del alcance del brazo de medir. La prueba de rendimiento volumétrico de volúmenes parciales mide un patrón más corto en diversas partes del volumen total. En el ensayo de volumen completo el patrón se mide en siete posiciones distintas que pueden ser elegidas por el usuario. Las posiciones recomendadas por las normas se reparten por dos zonas del volumen de trabajo: una por debajo del 70% del alcance del brazo y otra desde el 70% hasta el 100%. Además, el volumen se divide en tres zonas de 120° cada una. Las posiciones definidas son las siguientes:

- Posición 1: horizontal a la altura 0 de la posición de descanso del brazo. Los extremos del patrón deben situarse en la zona exterior.
- Posición 2: similar a la posición 1 y girada 120° con respecto al eje vertical.
- Posición 3: similar a la posición 2 y girada 120° con respecto al eje vertical.

- Posición 4: inclinada 45° con respecto a la horizontal. Los extremos del palpador deben situarse dentro de la zona exterior.
- Posición 5: similar a la posición 4 girada 45° con respecto a la horizontal en sentido contrario a la posición 4.
- Posición 6: similar a la posición 4 y girada 120° con respecto al eje vertical.
- Posición 7: similar a la posición 6 y girada 120° con respecto al eje vertical.

Con estas posiciones la distancia mayor siempre se encuentra en la zona exterior y las distancias menores en la zona interior. De esta manera se miden un total de 35 distancias en siete posiciones del patrón. Cada distancia se repite tres veces variando la posición de la articulación “A”. En dos de las repeticiones la posición de la articulación “A” debe ser opuesta, Figura 3 - 10.

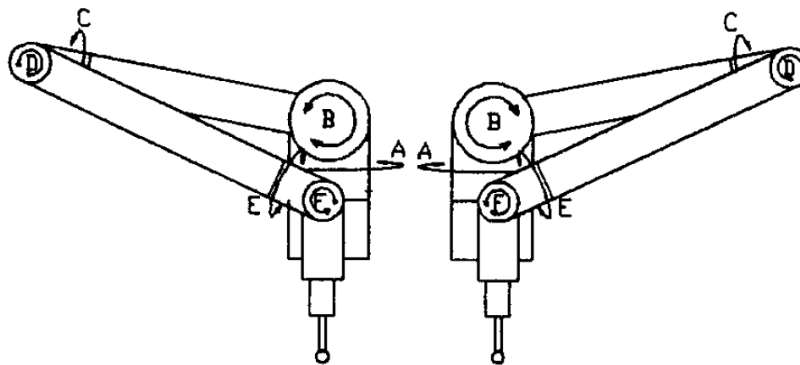


Figura 3 - 10 Posiciones de las articulaciones para el ensayo de rendimiento volumétrico
Fuente: (VDI, 2009)

En cada medición se calcula el error de medición como la diferencia entre el valor medido de la distancia menos el valor del patrón calibrado. Todas las mediciones se presentan en una gráfica que muestra el error cometido frente a la distancia medida con los errores máximos permitidos (MPL_E).

En el ensayo de rendimiento volumétrico de volúmenes parciales la longitud del patrón es inferior al 66% del alcance del brazo. Para esta versión del ensayo el volumen total de trabajo se divide por lo menos en tres sub-volúmenes. Debe existir solapamiento entre los sub-volúmenes. El tamaño de cada sub-volumen debe ser tal que se pueda evaluar una distancia similar al 40% del alcance del brazo de medir. Además, los sub-volúmenes deben

estar repartidos uniformemente y deben incorporar la mayor diagonal del volumen total de trabajo. La norma recomienda 4 sub-volumenes uniformemente repartidos, Figura 3 - 11.

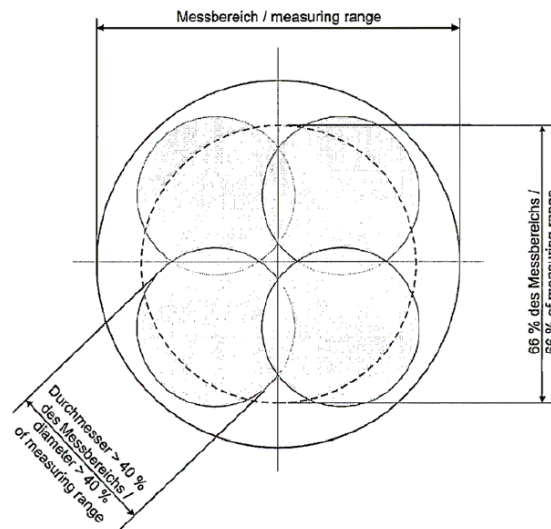


Figura 3 - 11 Volúmenes parciales del ensayo de rendimiento volumétrico
Fuente: (VDI, 2009)

Tres de las posiciones del patrón dentro de cada sub-volumen deben ser ortogonales entre sí. En cada posición se miden 5 distancias con tres repeticiones. Así, se realizan un mínimo de 135 mediciones y 180 con la metodología recomendada. Como sucedía en el ensayo de volumen completo, dos de las tres mediciones se debe realizar con la posición de la articulación “A” opuesta. El error de distancia se calcula como la diferencia entre el valor medido de la distancia y el valor de la distancia calibrada. Todas las mediciones se presentan en una gráfica que muestra el error cometido frente a la distancia medida con los errores máximos permitidos (MPL_E).

3.3 Estudios preliminares: influencia del operario y geometría

En el estado del arte se ha mostrado que la precisión de los brazos de medir por coordenadas puede mejorar por medio del estudio de sus fuentes de error, las cuales han sido escasamente tratadas en la literatura científica. Por otra parte, la mejora de su tecnología (menor peso, encoders de mayor resolución, mejoras en el diseño y ensamblaje) permitirán reducir la magnitud de los errores asociados a los brazos de medir aunque todavía se deberán corregir las fuentes de error. El factor operario, técnica de medición y las características de las piezas a medir tienen, a priori, una gran influencia en el comportamiento del brazo. Esta influencia se materializa en la deformación de la estructura y del palpador, errores cinemáticos, posición de las articulaciones en la medición, orientación del palpador y la forma y fuerza de contacto con la pieza, entre otros.

En cuanto a las metodologías de evaluación existentes, éstas están basadas en MMC y, por lo tanto, no se adaptan a las características de los brazos de medir por coordenadas. Las normas utilizan únicamente esferas o planos, y no consideran los efectos del operario y su técnica de medir como un componente importante de la incertidumbre de medición. En este estudio preliminar se estudia el comportamiento del brazo bajo la acción de varios operarios y características geométricas con objeto de comprobarlos parámetros principales afectan a los resultados de las mediciones para comprobar el alcance de su importancia.

Para este estudio se ha utilizado un brazo de medir Romer Sigma 2018 con un rango de medida de 1800 mm. De acuerdo al certificado del brazo de medir su repetibilidad, ensayo de rendimiento volumétrico ASME, es de 0,048 mm.

3.3.1 Evaluación del factor operario

El hecho de que el control del brazo sea manual, añade incertidumbre por la no uniformidad de los parámetros de medición y por la variación en estos dependiendo del operario que lo controle. Presumiblemente cada operario realiza la medición de manera distinta lo que afecta a los resultados obtenidos y a la trazabilidad del proceso de medición. Por esta razón se diseñó un ensayo donde se evalúa el comportamiento de 5 operarios en términos de repetibilidad y reproducibilidad.

El ensayo se ha dividido en dos fases de mediciones. En una primera fase, varios bloques patrón han sido escalonados de manera similar a los patrones utilizados para los procesos de calibración de MMC. Los bloques patrón materializan las distancias de 20, 60, 100 y 150 mm calibradas con certificado de calibración. De este patrón se ha obtenido la planitud de las caras de los bloques, el paralelismo y la distancias entre sus caras. En la segunda fase se han medido anillos patrón de 50, 70, 125 y 175 mm de diámetro. De estas mediciones se obtiene el diámetro y la cilindridad.

Para minimizar el efecto de una distribución de puntos desigual entre operarios y repeticiones (número de puntos y su distribución) se eligió una única distribución de puntos para cada elemento a medir. Los operarios siguieron las indicaciones de distribución pero la gran variabilidad de la determinación en el punto de contacto es inherente al proceso de medición con el brazo de medir lo que resulta en un rango de milímetros en la determinación de los puntos de contacto. Cada punto utilizado en la distribución fue limitado a un área de $10 \times 10 \text{ mm}^2$ para validar la toma de mediciones. De esta manera 7 puntos fueron necesarios para la medición de los planos (4 en las esquinas y 3 en el área central) y 12 para los anillos (3 niveles y 4 puntos por nivel) por tener una superficie mayor. Se ha realizado 10 repeticiones por cada ensayo. También se han utilizado varios tamaños de palpador 0, 4 y 6 mm para estudiar su influencia.

Resultados preliminares

Los resultados muestran que el error sistemático y la dispersión de las mediciones varían considerablemente, Figura 3 - 12. De las mediciones se ha observado algunos factores experiencia (fatiga, habilidades manuales del operario) como relevantes para la disminución del error cometido. Sin embargo, cuando la desviación típica y los rangos de las mediciones fueron estudiados se encontró que este valor es mucho más bajo para la distancia entre planos que para la medición de diámetros. Este efecto puede ser explicado por la amplitud de movimientos que se necesitan para medir diámetros en comparación con planos. En la medición de cilindros el palpador y el brazo adopta muchas más orientaciones y posiciones que en el caso de los planos. La falta de reproducibilidad puede ser observada en la diferencia de posición entre las diferentes curvas y la repetibilidad en la anchura de cada curva.

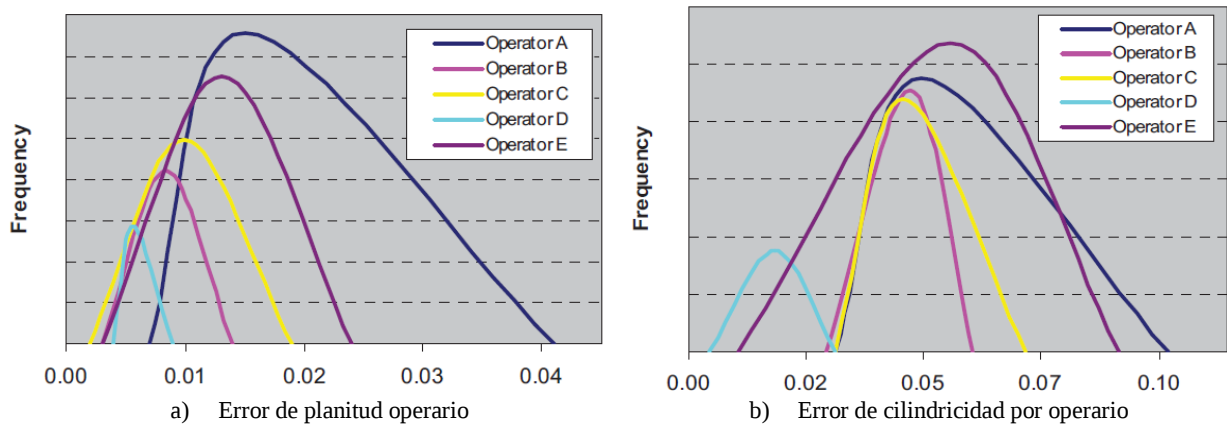


Figura 3 - 12 Resultados de repetibilidad y reproducibilidad por operarios

De los resultados de las mediciones con varios patrones, tamaños de palpador, operadores y repeticiones las conclusiones obtenidas muestran que es necesario estudiar en profundidad la fiabilidad de los brazos de medir de acuerdo a los parámetros no controlados.

- La dispersión obtenida de las mediciones de diámetros fue mayor que la dispersión obtenida de la distancia de planos aunque ambas son tolerancias dimensionales.
- La dispersión de los resultados de verificación de planitud o paralelismo fue diferente de la de dispersión de cilindridad aunque ambas tolerancias son geométricas.
- La repetibilidad y reproducibilidad varía dependiendo de sí en la tolerancia se mide un elemento o dos.

Este resultado parece indicar que cada característica geométrica y tipo de tolerancia influye en el comportamiento del operario y/o brazo de medir ya sea por las poses y orientaciones de palpador necesarias para medirlo o por la estrategia de medición seguida por cada operario. Además cada operario tiene un comportamiento distinto de acuerdo a las gráficas de repetibilidad. La gran variabilidad existente en las mediciones debe ser reducida por la mejora de la tecnología de los brazos de medir, la medición adecuada de cada elemento y el estudio del comportamiento de operario y brazo conjuntamente.

3.3.2 Evaluación de características geométricas

Considerando estas conclusiones del ensayo anterior se diseñó un patrón que contienen características geométricas representativas para detectar los errores relativos al

operario y a la característica medida. Debido a la falta de repetibilidad y reproducibilidad de la medición con brazos de medir, una vez establecidos los parámetros del estudio es necesario limitar de variabilidad para estos parámetros. Por lo tanto, se eligieron las características geométricas más utilizadas con varios tipo de tolerancias dimensionales y geométricas: planitud (3 elementos), cilindridad (3 elementos), perpendicularidad (2 elementos), paralelismo (2 elementos), angularidad (1 elemento), posición (1 elemento), diámetros (3 elementos), distancia entre planos (4 elementos), distancia entre ejes paralelos (2 elementos), distancia entre ejes perpendiculares (1 elemento) y distancia entre eje de cilindro y plano (1 elemento), Figura 3 - 13.

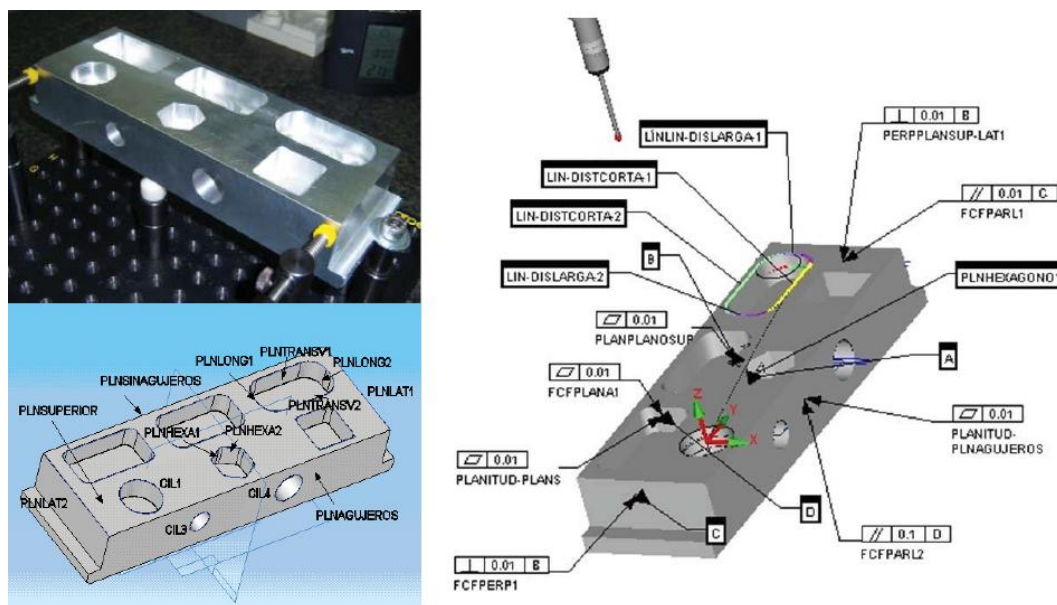


Figura 3 - 13 Patrón con características geométricas

Para evaluar la precisión de los resultados de medición realizados con el brazo de medir el patrón fue medido con una MMC previamente. La MMC es una Dea Global Image 091508, con una incertidumbre expandida de $U = 2.2 + 3L/100$ [μm], calibrada por un laboratorio certificado ENAC. Después 5 operarios midieron la pieza patrón con el brazo de medir y los resultados fueron comparados. El objetivo de este ensayo es descubrir las circunstancias bajo las cuales el brazo de medir comete mayores errores. El estudio de las mediciones incluye el estudio de errores relativos y absolutos para aumentar el conocimiento sobre la calidad de las mediciones con brazos de medir por coordenadas y proponer medios de compensación.

Un paso fundamental para poder comparar las mediciones con MMC y brazo de medir el número de puntos de contacto y la distribución de estos debe ser considerado. Ha sido

probado que la distribución de puntos de contacto tienen influencia en los resultados (Zhao, 2009). Por ejemplo, un mayor número de puntos con una distribución más densa es necesaria para verificar el error de tolerancias geométricas mientras que menos puntos son necesarios para el caso de tolerancias dimensionales. De esta manera el mismo número de puntos de contacto y distribución fue elegido tanto para MMC como para brazo de medir. Se utilizó una distribución más densa que la matemáticamente necesaria para minimizar los efectos de una distribución desigual por parte de la medición con brazo de medir por coordenadas. La comparación entre los resultados de MMC y brazo es posible ya que los errores obtenidos con la MMC (tomados como referencia) son menores que la precisión de los CMA. Cualquier error por encima de la precisión de los brazos de medir puede ser atribuible al operador, el proceso de medición o ambos.

El patrón utilizado (300 mm x 80 mm x 60 mm) fue situado en una única posición de forma que todas las características geométricas fuesen accesibles desde una posición cómoda para el operario. Además, la temperatura fue controlada a $20 \pm 2^\circ\text{C}$, los palpadores fueron calibrados según el procedimiento del fabricante y los operarios fueron entrenados en el uso básico del brazo de medir, especialmente para la distribución de los puntos de cada característica geométrica. Por otra parte, la orientación óptima del palpador con relación a la característica geométrica es un aspecto de crítico, el fabricante recomienda una tolerancia de $\pm 20^\circ$ con respecto a la normal de la superficie. Además es importante evitar deslizamientos durante la medición que ocurre con diámetros de esfera pequeños. Uno de los objetivos del ensayo es evaluar la influencia de la orientación del palpador sobre la repetibilidad y errores del brazo de medir por coordenadas. La tolerancia de redondez no se ha considerado ya que es imposible situar los puntos manualmente y en todo caso las mediciones se referirían, en todo caso, a la proyección de las mediciones sobre un plano.

Resultados preliminares

Los resultados del ensayo muestran que los mayores errores relativos, con las mediciones de la MMC como referencia, corresponden a las tolerancias geométricas (planitud, cilindricidad, paralelismo y perpendicularidad). Estos errores alcanzan valores desde el 50% hasta el 300% de los errores referencia de las MMC mientras que los errores relativos a las tolerancias dimensionales (distancias y diámetros) apenas alcanzan el 0.6%, Figura 3 - 14.

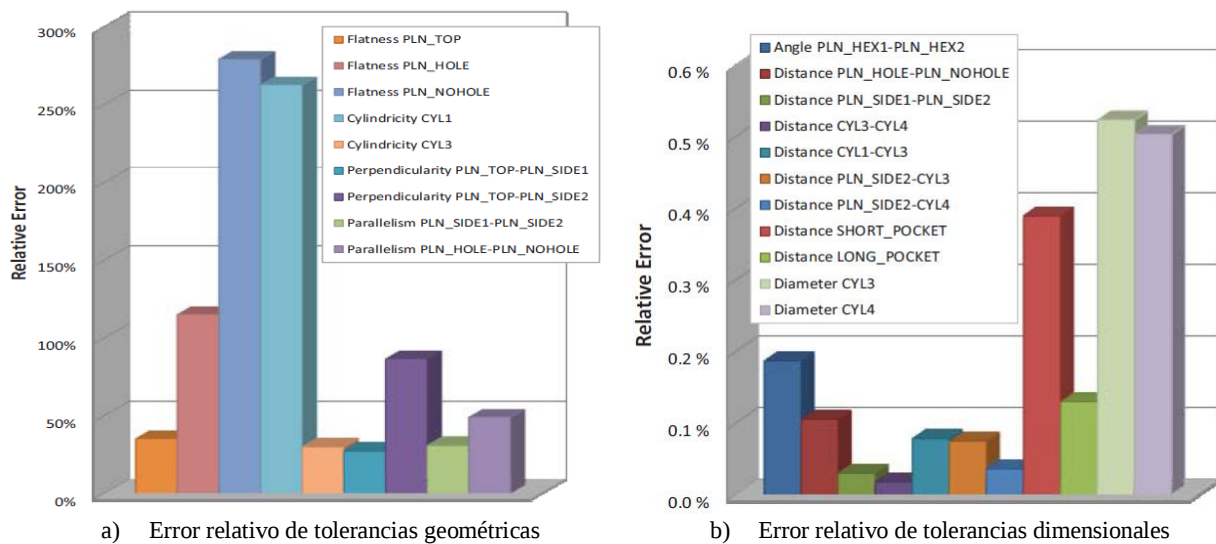


Figura 3 - 14 Error relativo por tolerancia

Los mayores errores son debidos a que el error de forma de las características geométricas (planitud menor de 0.010 mm, paralelismo y perpendicularidad menor a 0.020 mm) es inferior a la precisión del brazo de medir, esto es, 0.025 mm para la cualificación del palpador o 0.048 mm para la precisión de longitud. Por lo tanto un patrón con este tipo de características es suficiente para verificar el comportamiento de los brazos de medir por coordenadas sin la necesidad de utilizar patrones escalonados de alta precisión como en las MMC. En el caso de las comparaciones de cilindridad los altos errores relativos son debidos a la falta de repetibilidad causada por el control manual.

Por otra parte, el comportamiento de los brazos en la verificación de tolerancias dimensionales es mejor, lo que puede ser atribuible al hecho de que las dimensiones medidas están dentro del rango óptimo de medición del brazo de medir, por encima de su precisión. Sin embargo cabe decir que entre las tolerancias las de mayores errores están relacionadas con geometrías de mayor dificultad de medición (como diámetros de cilindros). Estos errores son atribuibles a los operarios y su técnica de medición.

Para confirmar las conclusiones anteriores, se propuso el parámetro que evalúa la calidad de las mediciones con CMA. Este parámetro Q_p se define como la relación entre el valor medio de un error medido con el brazo de medir y el mismo valor medido por la MMC. De esta manera un valor de Q_p cercano a 1 indica que el brazo de medir es adecuado ya que sus mediciones son similares a las de las MMC mientras que un valor alto de Q_p indica que el brazo de medir se aleja de las mediciones de MMC y su uso se desaconseja para esa característica hasta que se baje Q_p . Las formas de bajar Q_p pueden incluir técnicas de

medición, distribuciones de puntos más densas, control de la fuerza, estabilización del contacto, etc.

La Tabla 3. 1 muestra los valores de Q_p correspondientes a las diferentes características evaluadas en el test con dos palpadores (primero un palpador de 50mm y 4mm de diámetro de esfera, segundo un palpador de 15 mm y 6 mm de diámetro de esfera). También se ha observado diferencia en el uso de un palpador u otro en el uso ya que el palpador más largo puede acceder a mayor superficie de las características y los resultados también están influenciados.

Tabla 3. 1 Errores relativos por tolerancia

Tolerancia	$Q_p \text{ } \varnothing 4$	$Q_p \text{ } \varnothing 6$	Toleranciai	$Q_p \text{ } \varnothing 4$	$Q_p \text{ } \varnothing 6$
Angularidad	1.00	1.00	Planitud	1.30	1.35
Distancia planos	1.00	1.00	Planitud	6.41	3.79
Distancia planos	1.00	1.00	Planitud	3.30	2.15
Distancia ejes	1.01	1.00	Paralelismo	1.24	1.19
Distancia ejes	1.01	1.00	Paralelismo	1.57	1.49
Distancia plano/eje	1.01	1.01	Cilindricidad	4.98	3.63
Distancia plano/eje	1.01	1.01	Cilindricidad	2.17	0.91
Distancia caras/cajera	1.00	1.00	Cilindricidad	5.39	2.34
Distancia caras/cajera	1.00	1.00	Diámetro	1.01	1.00
Perpendicularidad	1.47	1.86	Diámetro	1.00	1.00
Perpendicularidad	1.20	1.21			

3.4 Conclusiones de partida

Del estado del arte, la literatura científica relativa a los brazos de medir por coordenadas y los ensayos preliminares realizados se han extraído las siguientes conclusiones sobre el estado actual de estos instrumentos:

- La falta de repetibilidad y reproducibilidad de los brazos de medir por coordenadas así como sus características constructivas y de control hace de los brazos de medir por coordenadas un grupo único dentro de los instrumentos de medición por coordenadas.
- Las normas actuales están basadas en MMC, no consideran las características constructivas, el factor operario ni la variabilidad de los parámetros de medición. Especialmente, el factor operario inexistente en MMC pero fundamental en brazos de medir por coordenadas. La metodología no se ajusta a la medición real de piezas.
- Análogamente los patrones utilizados para evaluar los brazos de medir por coordenadas han sido heredados de las MMC y no se ajustan a las características de medición de los brazos de medir por coordenadas. La medición únicamente de distancia entre esferas es incompleta.
- Numerosos factores afectan al comportamiento de los brazos de medir por coordenadas: factor operario (fuerza de contacto, orientación del palpador, estabilidad del brazo en la medición), de la técnica de medición (medición en continuo, punto a punto, rapidez de medición, fallos en medición) y la geometría del palpador (longitud y diámetro de la esfera). factor operario, técnica de medición y característica geométrica no han sido estudiados y contribuyen significativamente a los errores de medición.
- El factor operario y técnica de medición no están incluidos en las metodologías de las normas internacionales y autores. Este factor puede llevar a resultados de evaluación erróneas debido a errores altos producidos por el operario y no por una calibración deficiente.

- El comportamiento de los brazos de medir cambia de acuerdo a la característica medida y la tolerancia considerada. Este factor está íntimamente relacionado con el comportamiento del operario y la técnica de medición empleada. La evaluación con un único tipo de característica geométrica o tolerancia no garantiza la correcta medición del resto.
- Es posible calcular la incertidumbre de un proceso de medición específico siguiendo la norma EA-4/02 y GUM. Este proceso debe ser especificado para un operario, posición de la pieza y técnica de medición semejantes a los reales y aunque no permite evaluar completamente los brazos de medir por coordenadas.

Evaluación de los
brazos de medir por
coordenadas con
patrón de
características
geométricas

4.1 Introducción

En capítulos precedentes se han mostrado las numerosas fuentes de errores que afectan a los brazos de medir por coordenadas, alguna de ellas relacionadas con el operario. En los estudios preliminares se observó, grosso modo, la fuerte influencia del operario, de los parámetros de medición y de la propia geometría de los elementos que conforman la pieza en las mediciones con brazo de medir por coordenadas. La estructura cinemática del equipo aporta redundancia a la determinación de las coordenadas de un punto. De esta manera, el error asignado a cada punto del espacio de trabajo puede adoptar diferentes valores en función no solo de la pose del brazo sino también de la geometría a ser medida y los parámetros de medición controlados por el operario. Como consecuencia de la variabilidad de los factores que intervienen en la medición, los brazos de medir por coordenadas tienen un nivel de repetibilidad y reproducibilidad muy inferior a las MMC. Además, la falta de conocimiento y estudios en el comportamiento de los brazos genera incapacidad en la determinación del correcto funcionamiento de los brazos de medir por coordenadas. En este capítulo se pretende estudiar el comportamiento de los brazos de medir por coordenadas. Para ello se proponen metodologías de evaluación, acorde con un patrón adecuado, que permitan evaluar tanto el buen funcionamiento del brazo de medir como la contribución del operario y la medición en los resultados del brazo.

En el caso de las MMC, su alta repetibilidad permite evaluar su correcto funcionamiento y la aptitud de las mediciones de acuerdo a la metodología de evaluación propuesta en la norma ISO 10360-2 o similares. Las metodologías de evaluación de MMC se basan en la medición de distancias conocidas entre centros de esferas o entre planos paralelos en varias posiciones dentro del volumen de trabajo y donde el error cometido determina su precisión. Las posiciones utilizadas en la evaluación pueden variar pero generalmente son coincidentes con los ejes principales de la MMC para buscar los errores en los ejes físicos de la máquina. Las características de las MMC (estructura, control automático, repetibilidad) garantizan que los resultados de este tipo de evaluación aseguran el buen funcionamiento de ésta y la fiabilidad de mediciones futuras.

Sin embargo, en las mediciones con brazo de medir por coordenadas los factores ya mencionados (redundancia de la estructura, control manual, variabilidad de los parámetros de medición, tipo de geometría...) obligan a definir nuevas metodologías para evaluar la

fiabilidad de sus mediciones. Actualmente, las normas ASME B89.4.22 y VDI 2617-9 evalúan los brazos de medir por coordenadas de forma similar a las MMC al medir distancias entre centros de esferas en un patrón longitudinal. Además, aunque se han definido ensayos donde se mide la repetibilidad del brazo a la hora de medir un mismo punto desde varias orientaciones distintas, no se considera el operario como un factor a tener en cuenta. De esta manera, en el caso de obtener un resultado positivo de la evaluación, las mediciones que se hagan con el brazo serán aceptadas para las mediciones con distintos operarios e independientemente de la característica geométrica considerada en la medición. En el caso de obtener un resultado negativo de la evaluación, éste podría deberse a un manejo incorrecto por parte del operario y no una falta de calibración del equipo.

Por otra parte, los procesos actuales de evaluación permiten conocer la evolución en el tiempo del estado del brazo y, una vez superado un límite predeterminado, tomar medidas correctoras. En todo caso, aunque estos procedimientos son una herramienta que permite conocer el momento en el que es necesaria la calibración (y corrección si procede), no alcanzan a cuantificar el error real de las mediciones con el brazo de medir. Al intentar ajustar los procesos de evaluación de las MMC a los brazos de medir por coordenadas se observa que la estructura no lineal de los brazos se desliga de la idea de evaluar los errores de los ejes cartesianos principales de las MMC. Además los procedimientos se deben realizar con unos parámetros de medición concretos. Sin embargo, los brazos de medir son controlados por el operario y, en consecuencia, los parámetros de medición varían de una medición a otra, incluso entre los puntos de una misma característica geométrica. Por ejemplo, en la medición de un cilindro interior en MMC el palpador es paralelo al eje del cilindro y su movimiento es radial además de utilizar la misma fuerza de contacto para determinar el contacto. Por el contrario, en la medición con brazo de medir por coordenadas la inclinación del palpador con respecto a la superficie y la fuerza de control varían sin ninguna directriz clara de un punto a otro. La evaluación únicamente con patrones de esferas no garantiza que las mediciones futuras de un operario excedan el límite de error, que otro operario mida correctamente o que errores de forma distintos se midan (palpen) en los puntos correctos. Por estas razones, las posibles metodologías de evaluación deben incluir diferentes características geométricas, la capacidad de evaluar a los operarios y la técnica de evaluación.

En la actualidad, los patrones utilizados provienen de la experiencia previa acumulada en el campo de las MMC, básicamente patrones longitudinales de esferas o calas o patrones escalonados. La distancia entre sus elementos (esferas o planos) es el único parámetro

considerado en la evaluación volumétrica de los brazos de medir por coordenadas. Así por ejemplo, el patrón de la norma ASME utiliza 2 distancias (o dos patrones de diferentes longitudes) y la norma VDI utiliza 5 distancias en un mismo patrón. Santolaria et al. (Santolaria, 2008) emplean también una barra con esferas para su propuesta de calibración de brazos de medir por coordenadas. El material de la barra es fibra de carbono y contiene 15 esferas cerámicas. Para su calibración utilizó 6 distancias resultantes de la combinación de 4 esferas, Figura 4 - 1.

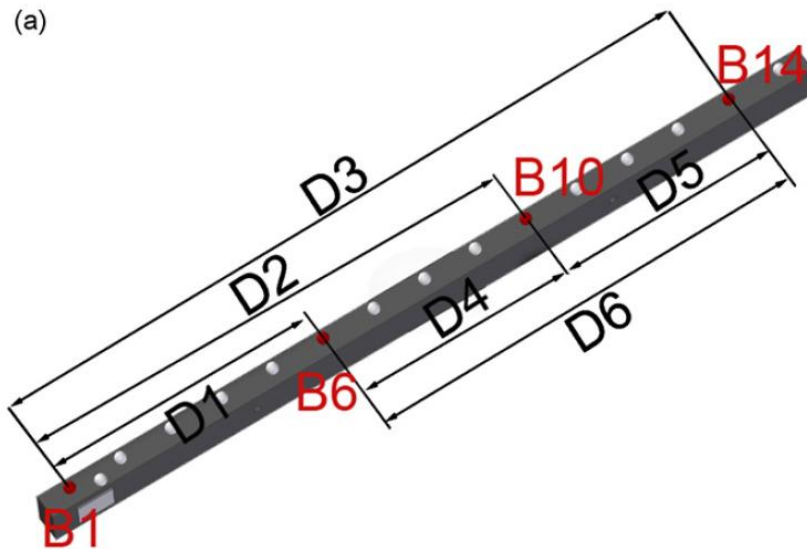


Figura 4 - 1 Patrón de esferas con distancias entre esferas
Fuente: (Santolaria, 2008)

Furutani et al. (Furutani, 2003) utilizan una versión más simple de barra, con únicamente 2 esferas que materializan una distancia. En otro estudio del mismo grupo se emplea un patrón 2D, una placa con esferas. Este tipo de patrones está también extendido en el campo de MMC ya que en una única posición de patrón se pueden medir varias direcciones longitudinales y el concepto de evaluación volumétrica se mantiene. También con el objetivo de reducir las posiciones se adaptan los patrones longitudinales a formas geométricas tridimensionales (Ouyang, 2010).

Por otra parte en otros ensayos definidos en las normativas se utilizan esferas de calibración para comparar sus parámetros característicos con los medidos por el brazo. La norma ASME estudia la repetibilidad y reproducibilidad del brazo de medir por coordenadas al medir asientos cinemáticos, Figura 4 - 2. Los asientos cinemáticos son construcciones geométricas en las que una esfera se acomoda en una única posición estable, generalmente un agujero cónico. Aplicado a la medición con máquinas de medir por coordenadas, la esfera del

palpador se ajusta a la geometría del asiento cinemático y por lo tanto permite medir teóricamente el mismo punto en sucesivas repeticiones. El control manual de los brazos de medir permite fácilmente encontrar la posición de descanso entre el asiento cinemático y el palpador. En el caso de las MMC este punto es difícil de encontrar ya que los palpadores leen las coordenadas del contacto con un único punto de contacto, y no la posición de descanso de la esfera. De esta manera la norma ASME mide un asiento cinemático desde varias orientaciones para evaluar la capacidad del brazo para leer el mismo punto desde varias orientaciones. Manteniendo el palpador en la posición de descanso/medida del asiento cinemático, se puede variar la posición de las articulaciones que permiten alcanzar al brazo el punto de lectura. Así, los errores de lectura de ese punto son asociados a la variación de la posición de los brazos de medir por coordenadas, su repetibilidad y reproducibilidad.

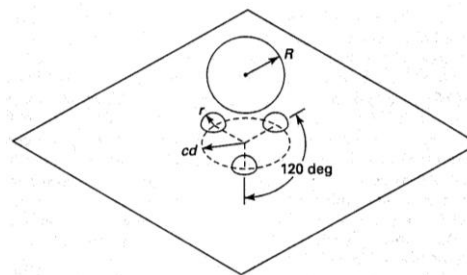


Figura 4 - 2 Asientos cinemáticos
Fuente: (ASME, 2004)

Gao et al. (Gao, 2009a) (Gao, 2009b) utilizan este tipo de patrón para calibrar los brazos de medir por coordenadas por medio de redes neuronales. Desde otro enfoque, Piratelli et al. (Piratelli, 2009) utilizan cuatro asientos cinemáticos para delimitar cuatro puntos en el espacio que definen una esfera virtualmente. Al mecanizar dos conjuntos de cuatro asientos cinemáticos, cada uno en un extremo de una barra, construyeron un patrón de esferas virtuales. El patrón funciona de manera similar a una barra con esferas sólidas (macizas) salvo que los puntos de medida de la “esfera” son determinados por los asientos cinemáticos. Los autores utilizaron este patrón para evaluar su brazo de medir por coordenadas siguiendo la norma ASME B89.4.22. Además también desarrollaron una placa con 16 esferas virtuales con el objetivo de reducir las posiciones necesarias del patrón para la evaluación y la duración del proceso de evaluación (Piratelli, 2010). Gatti et al. (Gatti, 2008) también utilizaron una placa con asientos cinemáticos, sin formar ninguna geometría tridimensional, para calibrar su propio brazo de medir por coordenadas.

Aunque los asientos cinemáticos son presentados como una herramienta para estudiar la repetibilidad de los brazos de medir por coordenadas, su uso (al menos de forma exclusiva) implica perder parte de las cualidades y características de los brazos de medir por coordenadas. La evaluación de los brazos con este método sería suficiente cuando no hubiese fuerte variación de geometrías en la medición de piezas reales, pues incluso en el caso más similar, la medición de una esfera virtual dista ampliamente de la medición realizada sobre una esfera sólida. De todas maneras, el patrón de esferas virtuales puede ser utilizado como un sistema sencillo y de bajo coste para controlar la evolución de los brazos de medir por coordenadas aunque no para estudiar su comportamiento real o evaluar el error real cometido en las características geométricas.

Como conclusión del estudio del estado de la técnica se planteó la evaluación de los brazos de medir desde dos puntos de vista: el patrón y la metodología de evaluación. Se propone en este capítulo un nuevo patrón de características geométricas específicamente diseñado para evaluar la capacidad real de los brazos de medir por coordenadas, permitiendo medir diferentes tolerancias dimensionales y geométricas. De forma coherente con este artefacto se ha desarrollado una metodología de evaluación para evaluar el comportamiento del brazo de medir. Posteriormente se extiende la investigación realizando un análisis de repetibilidad y reproducibilidad (r&R), capaz de evaluar la aptitud tanto de los brazos de medir como de los operarios y la técnica en la medición.

4.2 Patrón de características geométricas

Debido a la necesidad de estudiar y evaluar completamente el comportamiento de los brazos de medir por coordenadas se ha propuesto el desarrollo de un nuevo patrón. El diseño del nuevo patrón incluye una extensa gama de características para revelar la bondad de la medición. Esto se ha llevado a cabo introduciendo las características geométricas más comunes en un mismo patrón dimensional, dando lugar a lo que llamaremos *patrón de características*. El número y variedad de las características geométricas consideradas están pensados para revelar la influencia real del operario y la técnica de medición aplicada a los diferentes tipos de tolerancias, pues se han señalado como una de las fuentes principales de errores no considerados en los trabajos actuales.

Por una parte, la técnica de medición con este patrón incorpora a la evaluación numerosos factores que en otras máquinas, como las MMC, se encuentran automatizados y controlados pero tienen un papel fundamental en la medición con brazos de medir. Dentro de estos factores se encuentran: la posición y orientación del palpador durante el contacto, la distribución de puntos sobre la superficie de la pieza a medir, la estrategia de medición (medición continua o punto a punto), la fuerza de contacto empleada por el operario, la velocidad de acercamiento o de aproximación, así como la variación de estos parámetros durante el proceso. Por otra parte, las diferencias entre los diferentes tipos de características geométricas tienden a influir en la forma de medir de los operarios: accesibilidad y facilidad de medición, deslizamiento, control de fuerzas, estabilidad de la medida, etc.

En concreto el patrón contiene un conjunto de características geométricas básicas, como son planos, cilindros, conos y esferas, Figura 4 - 3. Los cilindros y los conos tienen variantes para palpado exterior e interior. Además se han incluido esferas sólidas y esferas virtuales. Éstas últimas construidas a base de 4 puntos dados por asientos cinemáticos cónicos. El patrón se basa en una estructura de sección en “T” invertida dotada de unas almenas que materializan 12 planos paralelos. En el centro de las almenas se mecanizaron (taladrado y posterior mandrinado) 6 cilindros. En los extremos del patrón se mecanizaron planos formando un ángulo de 60°.

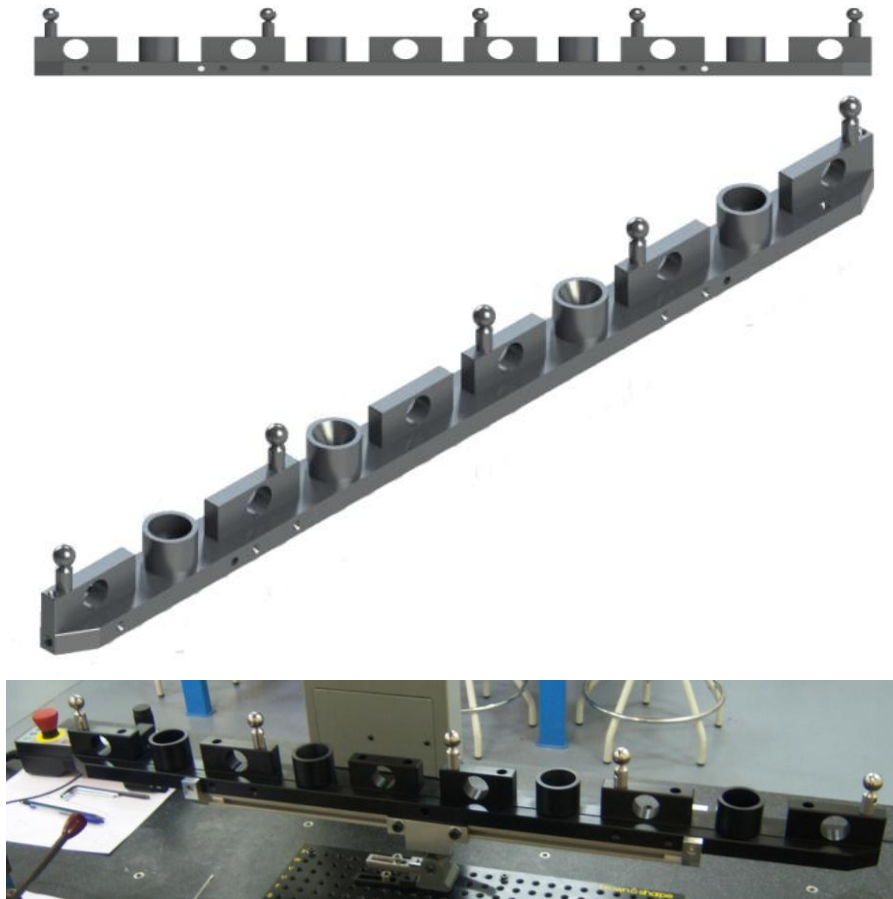


Figura 4 - 3 Patrón de características para el estudio de brazos de medir por coordenadas

Por último, este capítulo pretende, además de validar el método de calibración y/o verificación, estudiar y cuantificar precisamente la diferencia entre las distintas características o el comportamiento de los brazos de medir frente a los diferentes tipos de características geométricas.

4.2.1 Características geométricas incluidas en el patrón

El patrón combina las características citadas para posibilitar la medición manual de múltiples tolerancias dimensionales y geométricas, tanto individuales como relacionadas, Tabla 4. 1.

Tabla 4. 1 Características geométricas y tolerancias incluidas en el patrón

Característica	Opciones de medición			
	Dimensión principal	Error de forma	Distancia entre elementos	Tolerancia GD&T
Planos	-	X	X	Paralelismo, Perpendicularidad, Ángulo
Esferas	Ø	X	X	Posición
Esferas virtuales	Ø	-	X	Posición
Cilindros exteriores	Ø	X	X	Paralelismo, coaxialidad y posición
Cilindros interiores	Ø	X	X	Paralelismo, coaxialidad y posición y perpendicularidad
Conos interiores	α	X	X	Paralelismo
Conos exteriores	α	X	X	Paralelismo

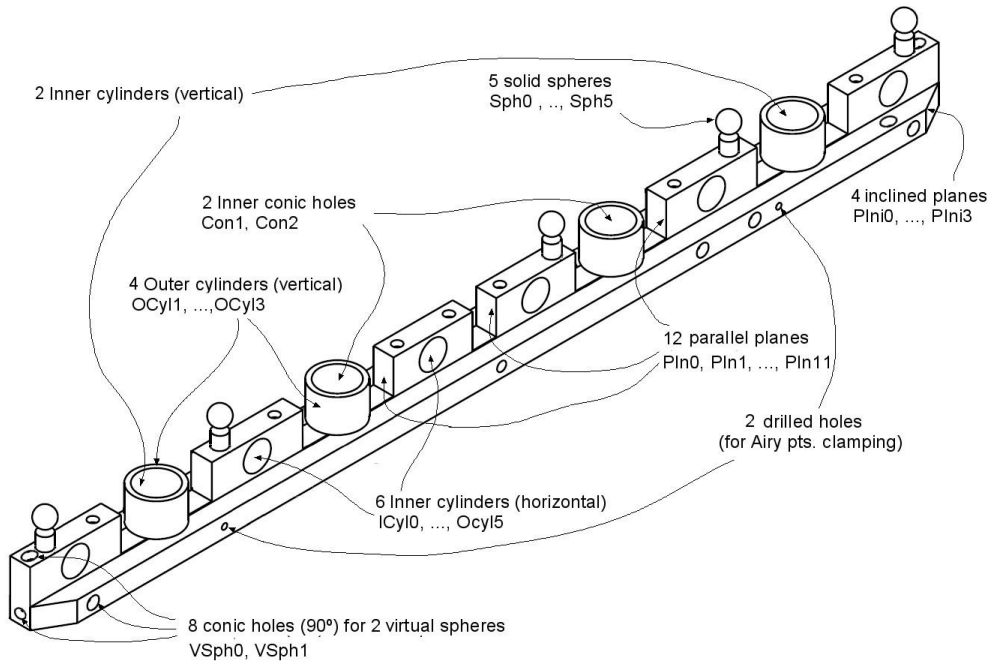
Al margen de las tolerancias dimensionales y geométricas (simples y/o relacionadas) que se pueden construir entre superficies de la misma naturaleza, también se consideran tolerancias “combinadas” entre elementos: la distancia entre plano y eje de cilindro, distancia y paralelismo entre plano y cilindros (con ejes perpendiculares), distancia y paralelismo entre plano y cono, perpendicularidad entre cilindro y plano adyacente, o distancia de centro de esfera a plano etc. Estas tolerancias serán estudiadas en una fase más avanzada de la presente investigación.

El patrón tiene una dimensión preferente longitudinal sobre la que se sitúan todas las características geométricas, Tabla 4. 2, con una longitud de 1000 mm, lo que representa en nuestro caso el 55% del rango de los brazos de medir por coordenadas disponibles. Esto es así porque una longitud ligeramente mayor imposibilitaría la medición de características (como planos o cilindros) en los extremos de rango máximo de medida y una distancia menor reduce el volumen de trabajo evaluado. El cuerpo principal de la barra ha sido mecanizado con una forma final de sección en “T” invertida y almenada en su longitud. La forma almenada determina 6 salientes que forman 12 planos paralelos (codificados con los índices Pln0-Pln11), permitiendo la medición de varias distancias hasta 1000 mm. Utilizando distancias entre planos de índice par (Pln0, Pln2... Pln10) se obtienen las distancias entre caras opuestas. Estas caras tienen un área mínima de 2 cm² con suficiente accesibilidad para la medición manual con brazo de medir por coordenadas. Las caras laterales de las almenas se han

mecanizado perpendiculares a la base del patrón (Plnp0-Plnp1). En los extremos de la barra o longitud existen dos planos inclinados (Plni0- Plni3) que fueron mecanizados de tal manera que materializan un ángulo de 60° grados en cada extremo para la evaluación de angularidad.

Tabla 4. 2 Detalle de características incluidas en el patrón

Característica geométrica	Descripción (núm. de ítems)	Distancia nominal/ángulo	Codificación
Planos	Paralelos (12)	100, 200, 300, 400, 487, 513, 600, 700, 800, 900, 1000 mm	Pln0, ..., Pln11
	Inclinados (4, 2 en cada extremo)	60°	Plni0, ..., Plni3
	Perpendicular (2, lateral del patrón)	90°	Plnp0, Plnp1
Cilindros	Exterior, Ø 50 mm (4)	200, 500, 700 mm	OCyl0,..., OCyl3
	Interior, Ø 30 mm (6)	200, 400, 500, 700, 900 mm	ICyl0, ..., ICyl5
	Interior, Ø 40 mm (2)	700 mm	I2Cyl0, I2Cyl1
Conos	Interior (2)	300 mm	Con0, Con1
Esferas	Ø 20 mm (5)	260, 508, 700, 960 mm	Sph0, ..., Sph4
Esferas virtuales	≈ Ø 74 mm (2)	947.3 mm	VSph0, VSph1



Además, cada una de las almenas o salientes contiene un cilindro interior (ICyl0-ICyl5) taladrado y acabado con una operación de mandrinado para mejorar el error de forma y el acabado superficial. Entre las almenas se han colocado cuatro piezas, o casquillos, cilíndricos (OCyl0-OCyl3) los cuales han sido torneadas y posteriormente ensamblados en posición vertical por ajuste con apriete. Dos de los casquillos tienen, además de la superficie cilíndrica exterior que la define, un agujero torneado interior (I2Cyl0-I2Cyl1). Análogamente, los otros dos casquillos incluyen superficies cónicas en su interior (Con0-Con1). Finalmente, el patrón posee 5 esferas de precisión (Sph0-Sph4) que han sido ensambladas sobre las

almenas. Por razones económicas y de disponibilidad de equipos, máquinas-herramienta, etc., el patrón prototipo ha sido fabricado en aleación de aluminio y endurecido superficialmente con un tratamiento de anodizado duro que evita el desgaste superficial del patrón frente al proceso de medición por contacto manual, más severo que la medición automática con la MMC.

Adicionalmente, 2 conjuntos de 4 asientos cinemáticos han sido integrados en el patrón, Figura 4 - 4. Estos asientos cinemáticos han sido fabricados al taladrar la estructura principal del patrón usando una broca de puntear con suficiente profundidad para que su geometría se ajuste al diámetro de la esfera del palpador. De esta manera, cada conjunto de 4 asientos cinemáticos determina una esfera virtual en el espacio (VSph1-VSph2) (Piratelli, 2009) (Piratelli, 2012). Las esferas virtuales se han posicionado en los extremos del patrón para incorporar la distancia entre sus centros de forma equivalente a la distancia entre esferas sólidas utilizada en las normas de evaluación. La medición de las esferas virtuales es rápida y cómoda. Además, la repetibilidad y reproducibilidad de las esferas virtuales es superior a la de las demás características geométricas debido a su medición guiada por su geometría. Como característica propia de las esferas virtuales, su medición minimiza la influencia del operario ya que el operario sigue una medición guiada y los parámetros de medición se restringen en mayor grado. Piratelli et al. (Piratelli, 2009) propusieron este tipo de características porque el coste del patrón y la duración de la evaluación se reducen significativamente. Este tipo de elementos se utilizan también para estudiar la evaluación de los brazos de medir como un método rápido de identificación de malfuncionamientos o pérdidas de calibración de los brazos en revisiones periódicas, aunque no permiten conocer el error total cometido en mediciones reales.

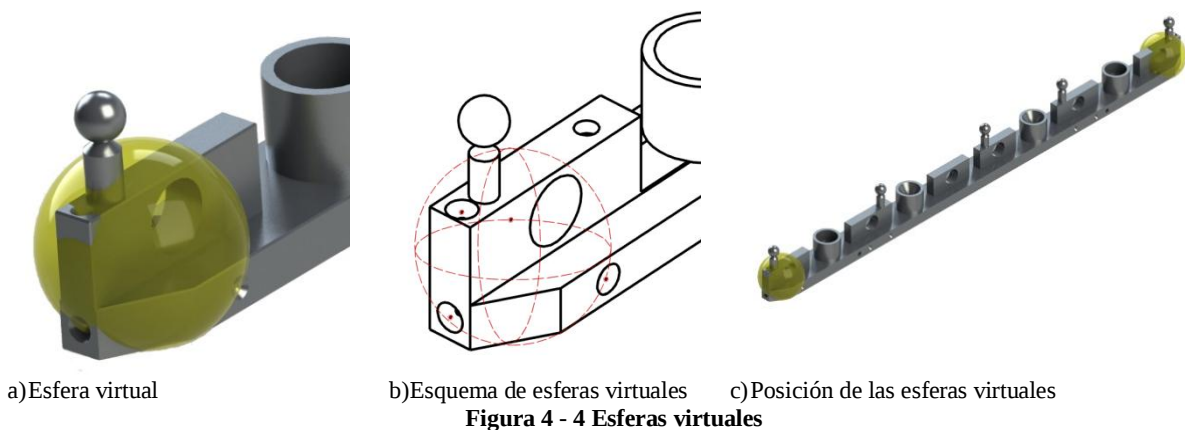


Figura 4 - 4 Esferas virtuales

Análogamente, también se han considerado círculos virtuales, formados por la medición de 3 asientos cinemáticos. El objetivo de estudiar estas características es reducir la cantidad de información necesaria para conocer el estado de los brazos de medir por coordenadas. Los asientos cinemáticos utilizados para formar los círculos virtuales han sido mecanizados en el patrón de características utilizado en los apartados anteriores, Figura 4 - 5. El patrón dispone de dos pares de círculos virtuales (1-2 y 3-4). Los círculos virtuales tiene un diámetro de 63 mm y la distancia que les separa es de 921 y 500 mm, círculo 1-2 y círculo 3-4 respectivamente.

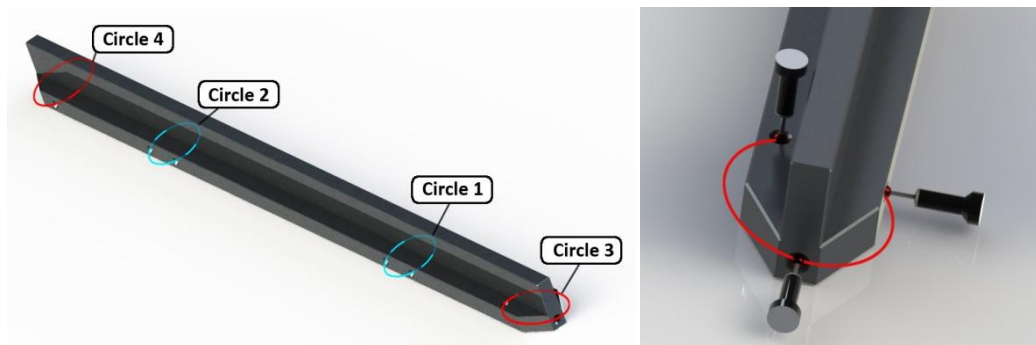


Figura 4 - 5 Círculos virtuales del patrón

El patrón también está caracterizado por que cada característica geométrica tiene una superficie de palpado lo suficientemente grande como para permitir su medición manual en puntos muy distintos de su superficie y que sea representativa del rango del CMA, siendo el error de forma de cada característica geométrica igual o inferior a $1/5$ de la precisión (estimada por el fabricante o dada por la calibración) del brazo. Si se tiene en cuenta los brazos disponibles para la investigación, un Romer Sigma y un Romer Omega, ambos de 1800 mm de rango y con precisiones de la última calibración de 0.048 y 0.060 respectivamente, estaríamos hablando de fabricar el patrón con características con errores de forma del orden de 0.010-0.012 mm. Las características del patrón fueron medidas con una MMC DEA Global Image 091508, cuya incertidumbre expandida viene dada por la expresión $MPE_E = 2.2 + 3L/1000$ [μm]. La precisión de la MMC es considerablemente mejor que la del brazo de medir por coordenadas por lo que los resultados de sus mediciones se utilizan como valores de referencia.

4.2.2 Descripción del sistema de posicionamiento

De manera similar a las metodologías de evaluación establecidas en las normas y por los distintos investigadores, el patrón ha sido medido en varias posiciones dentro del espacio de trabajo del brazo de medir por coordenadas. Generalmente este posicionamiento se consigue mediante dos alternativas: la primera, en la cual es el patrón el que se posiciona en cada posición definida en el procedimiento de evaluación o la segunda, en la cual el patrón permanece en una posición fija y es el brazo de medir por coordenadas el que rota alrededor de su eje principal para simular la traslación del patrón. La primera técnica requiere que todo el volumen que ocupa el espacio de trabajo del brazo este accesible y también requiere tener cuatro o más posiciones estables para colocar el patrón. Además, son necesarios sistemas accesorios de posicionamiento tanto para el patrón como para el brazo, ambos portátiles y que no supongan interferencia en el proceso de medición. La segunda técnica minimiza el volumen necesario a una parte del espacio (normalmente un cuadrante) manteniéndose fija la posición del patrón y del brazo en todo el proceso de medición, ya que el brazo únicamente es rotado. La segunda opción reduce considerablemente el tiempo empleado en el posicionamiento, el espacio requerido y la planificación del procedimiento. Por las mencionadas razones se ha elegido la segunda alternativa a la hora de realizar la evaluación de los brazos de medir por coordenadas.

Por otra parte, el patrón debe ser orientado en varias inclinaciones para alcanzar el hemisferio superior e inferior del espacio de trabajo del brazo de medir por coordenadas. Por ello, se ha construido un aparato complementario de soporte del patrón capaz de orientar el patrón en posición horizontal, vertical e inclinada (cada 15°). Está compuesto de una columna que ajusta la altura del patrón a la medición manual, una articulación rotativa de orientación del patrón y una estructura de soporte del patrón. El mecanismo minimiza la flecha de deformación del patrón y es suficientemente rígida para que el patrón tenga una posición estable en el espacio. El patrón se monta sobre un trípode mientras que el brazo de medir se monta sobre una mesa de trabajo especialmente diseñada para este uso, Figura 4 - 6.



a) Sistema de posicionamiento



b) Posición horizontal



c) Posición vertical



d) Posición inclinada

Figura 4 - 6 Sistema de posicionamiento del patrón de características

4.3 Ensayo de evaluación con patrón de características geométricas

Una vez que se dispone de los medios necesarios para estudiar el comportamiento del brazo de medir por coordenadas frente a las diferentes características geométricas, se procede a diseñar una metodología de evaluación completa. El ensayo de evaluación con el patrón de características plantea el estudio pormenorizado de cada tipo de tolerancia dada la variabilidad en el comportamiento de brazo de medir por coordenadas. Además se plantea la definición de varios volúmenes de trabajo que cubren las distintas posiciones que adopta el patrón para generalizar los resultados a todas las mediciones futuras. Por otra parte, este ensayo también supone un estudio detallado sobre el comportamiento del brazo de medir por coordenadas en la medición de geometrías encontradas en piezas reales y no únicamente con esferas.

4.3.1 Metodología de evaluación

Las posiciones del patrón durante la evaluación varían según la norma que se aplique. La norma ASME define 20 posiciones divididas en: 2 verticales, 10 horizontales y 8 inclinadas a 45°. Estas posiciones recorren el espacio de trabajo y se miden en cada una dos distancias. La norma VDI reduce el número de posiciones a 7 pero mide 5 distancias en cada posición. Piratelli et al. (Piratelli, 2009) compararon la evaluación de su patrón y su metodología con la definida por ASME, Figura 4 - 7. Su propuesta reduce la cantidad de posiciones a 9 sin embargo la distancia estudiada es de 200 mm. Uno de los principales objetivos de estas metodologías que proponen posiciones del patrón en el volumen de trabajo es garantizar los resultados de la evaluación para cualquier medición dentro del volumen de trabajo.

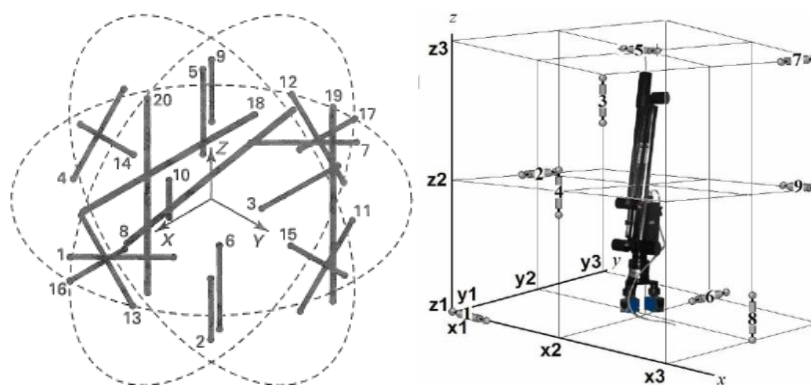
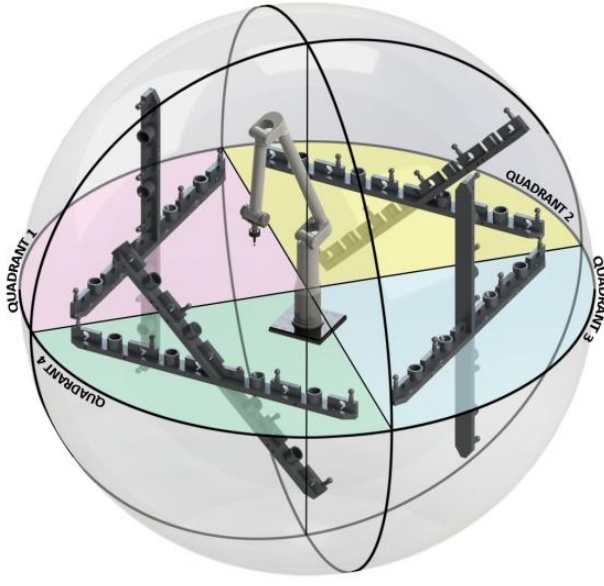


Figura 4 - 7 Distintas posiciones del patrón durante su evaluación
Fuente: (ASME, 2004), (Piratelli, 2009)

En la propuesta de metodología de evaluación del presente trabajo de investigación se definen 8 posiciones del patrón, lo que permite cubrir una distancia de hasta 1000 mm con lo que se incluye la mayor parte del espacio de trabajo del brazo de medir. Este número de posiciones y la longitud del patrón es suficiente de acuerdo a las normas de evaluación y los trabajos de Piratelli et al. (Piratelli, 2009) (Piratelli, 2012). Además, la longitud máxima del patrón se encuentra cercana a los límites del rango del brazo de medir. Las 8 posiciones se definen de acuerdo al cuadrante del espacio de trabajo que ocupa y la orientación del patrón, Tabla 4. 3.

Tabla 4. 3 Posiciones del patrón propuestas

Posición	Orientación	Cuadrante
1	Horizontal	1
2	Horizontal	2
3	Horizontal	3
4	Horizontal	4
5	Vertical	1
6	Vertical	3
7	Inclinado a 45°	2
8	Inclinado a 45°	4



Para cada posición del patrón se han realizado 3 repeticiones por cada elemento por lo con un total de 24 mediciones por elemento. Las mediciones de este ensayo han sido realizadas por un único operario para evitar la influencia de éste. Aunque este ensayo está enfocado a un operario se puede repetir para varios operarios y establecer sus diferencias. En un ensayo posterior se presenta una metodología para evaluar la influencia de varios operarios y su técnica de medición.

El brazo utilizado en el ensayo es un 2018 Sigma Romer[®] con 6 grados de libertad y 1800 mm de alcance. El palpador utilizado es de 50 mm de largo con una esfera de rubí de 6 mm de diámetro. De acuerdo con la precisión indicada por el fabricante, el brazo tiene un resultado de precisión volumétrica de ± 0.025 mm y una repetibilidad de ± 0.010 mm en la medición de una esfera, aunque en la última calibración la incertidumbre obtenida fue de 0.048 mm. El programa de medición utilizado ha sido PCDMIS[®].

En cuanto a las condiciones ambientales del ensayo, éste se ha realizado en un entorno controlado dentro de un rango de $20\pm 1^{\circ}\text{C}$. Además, PCDMIS permite compensar las deformaciones por temperatura conocido el material y la temperatura.

Los parámetros más importantes de la distribución de los puntos se han mantenido constantes: cantidad de puntos por elementos y su distribución principal (Tabla 4. 4) para evitar añadir factores externos a la propia medición.

Tabla 4. 4 Estrategia de medición de las características de medición

Tipo de característica geométrica	Cantidad de puntos	Distribución
Cilindros interior	12	3 niveles, 4 puntos por nivel
Cilindros exterior	12	3 niveles, 4 puntos por nivel
Esferas	15	Uniformemente repartidos
Planos	9	3 niveles, 3 puntos por nivel

4.3.2 Resultados del ensayo

Los resultados del ensayo se muestran en función el tipo de tolerancia estudiada:

a) Tolerancias dimensionales

En esferas, cilindros exteriores y cilindros interiores se ha evaluado su diámetro, Figura 4 - 8. El valor representado corresponde al error obtenido por el brazo de medir con respecto a las mediciones con MMC para poder comparar los resultados entre ambos dispositivos (valor 0.000 mm corresponde con el valor de referencia MMC correspondiente a cada diámetro). Se ha representado tanto el error de diámetro medio como la desviación estándar, en forma de barra de error. Cada valor ha sido calculado con los 24 valores de las mediciones resultantes de las 8 posiciones del patrón y 3 repeticiones por cada posición. Los valores nominales de diámetro son de 20 mm para la esfera, 50 mm para el cilindro externo y 30 mm para el cilindro interno. La repetibilidad de las mediciones de referencia calculadas con la MMC es inferior a la micra.

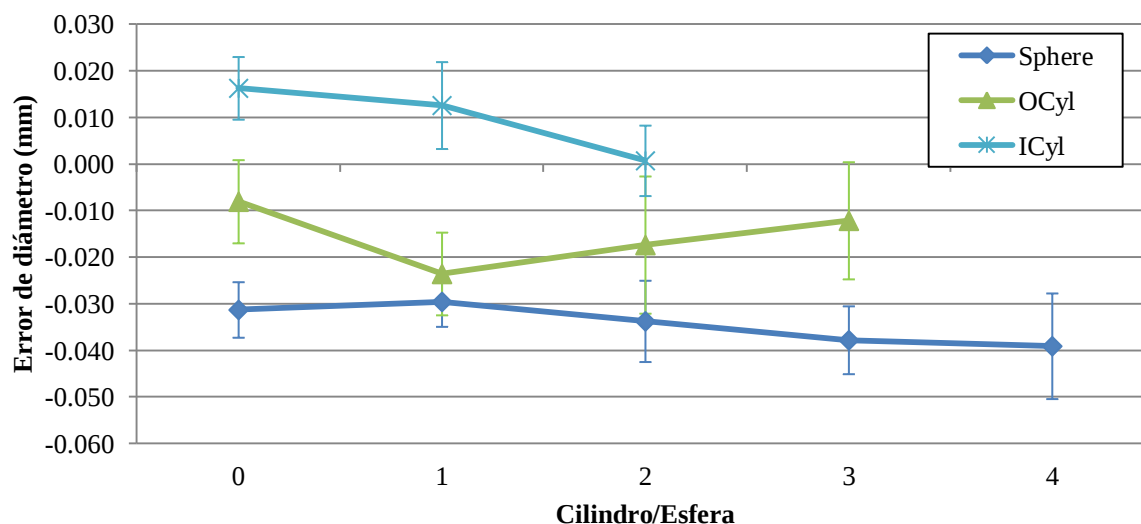


Figura 4 - 8 Error de diámetro

En primer lugar se observa que tanto el diámetro de la esfera como el del cilindro externo son inferiores al de referencia y el cilindro interior obtiene un diámetro superior. Este hecho se explica en mayor detalle en el siguiente capítulo, pero es explicado por la dirección de la deformación del palpador en la medición. Es decir, en las características de superficie externa (esferas y círculos externos) la posición sin deformación del palpador se sitúa en una posición más cercana al centro dentro de la característica, lo que conlleva a una lectura de diámetro inferior al real. En el caso de características internas, cilindros internos, la posición sin deformación del palpador se sitúa en una posición más alejada del centro de la característica de la geometría por lo que el diámetro es mayor. A este razonamiento se le puede añadir la influencia de otras fuentes de error y la variación en la fuerza de medir (principal causa de la deformación del palpador) con lo que se obtienen un rango de diámetros mayores o menores al de referencia pudiéndose dar en algún caso particular un diámetro mayor para las esferas o cilindros exteriores o un diámetro inferior para los cilindros interiores.

En cuanto al valor de diámetro medido, los cilindros se ajustan en mayor grado a la geometría real mientras que las esferas conllevan errores mayores. Los cilindros interiores (ICyL) obtienen un error inferior a 0,017 mm de media, los cilindros exteriores (OCyL) aumentan su error hasta los 0,025 mm y las esferas se mantienen en un rango de error de 0,030 a 0,040 mm. Estas diferencias (tanto en la magnitud del error como en su signo) son explicadas por la técnica de medición y la geometría de los elementos. La forma de los cilindros interiores restringe la accesibilidad y las posibles orientaciones de medida con el palpador del brazo de medir. Por ello, la medición (parámetros de medición) de los cilindros

interiores se mantiene constante en mayor grado al compararlas con las esferas o los cilindros exteriores. Estas dos últimas características geométricas son medidas de diferentes formas incluso en repeticiones del mismo elemento con el mismo operario (en paralelo, inclinado, perpendicular, en paralelo vertical, horizontal o inclinado). Al no estar restringida la medición por su geometría, la distribución de los puntos es seguida en menor grado y no todos los puntos son medidos de la misma manera. Especialmente se cambia la técnica de medición en la parte de la superficie opuesta a la posición del operario (falta de accesibilidad y visibilidad). Estos hechos también afectan a la repetibilidad (desviación estándar) aunque los valores son más similares. De acuerdo a la normas de evaluación de brazos, se puede calcular la máxima desviación o la desviación con respecto a la referencia de calibración como errores para la medición de estas tolerancias. Por otra parte, las esferas tienen una geometría particular, difícil de medir en los primeros intentos, debido a la facilidad con la que se producen deslizamientos con pérdida de contacto o movimiento en la medición. A medida que se gana experiencia en la medición manual, pasan a ser un elemento más cómodo para el operario lo que se traduce en mejores resultados.

Las tolerancias dimensionales de distancias también han sido estudiadas. Estas tolerancias surgen de la comparación de la posición de dos elementos: plano - plano, cilindro exterior - cilindro exterior, cilindro interior – cilindro interior y esfera-esfera. Al participar varios elementos la relación entre ellos aumenta la dificultad en su interpretación, aunque aporta también información sobre la capacidad del brazo para medir en su rango de medida y bajo muy distintas posiciones de las articulaciones. Los errores de distancia se presentan como la diferencia entre la distancia obtenida con el brazo de medir y la de referencia obtenida con la MMC.

En el caso de la distancia entre planos, Figura 4 - 9, se han obtenido 11 distancias de la combinación de los 12 planos de las almenas (Pln0-Pln11) utilizando como plano de referencia el plano 0 (plano extremo Pln0). La distancia entre caras opuestas viene dada por los planos impares (Pln1, Pln3, Pln5, Pln7, Pln9 y Pln11) y la distancia entre caras no opuestas utiliza los planos pares (Pln2, Pln4, Pln6, Pln8 y Pln10). De los resultados se observa que el error medio se sitúa en el rango de 0,100 a 0,150 mm. Además, no se aprecia una clara relación entre el error de distancia y la distancia entre los planos. En este punto se distingue el comportamiento de los brazos de medir por coordenadas con respecto a las MMC, donde hay una clara relación entre ambos parámetros debido a su estructura. La combinación de los 6 grados de libertad de la estructura del brazo de medir y la falta de reproducibilidad en las

mediciones elimina la mayor parte de dicha relación. En las dos primeras distancias, más cortas, el error cometido es inferior lo que puede ser debido a que en dichas distancias las posiciones de medición del brazo varían en menor grado. En cuanto a la repetibilidad, los resultados muestran una desviación estándar máxima de 0,052 mm y tampoco muestra una clara relación con la distancia entre los planos utilizados.

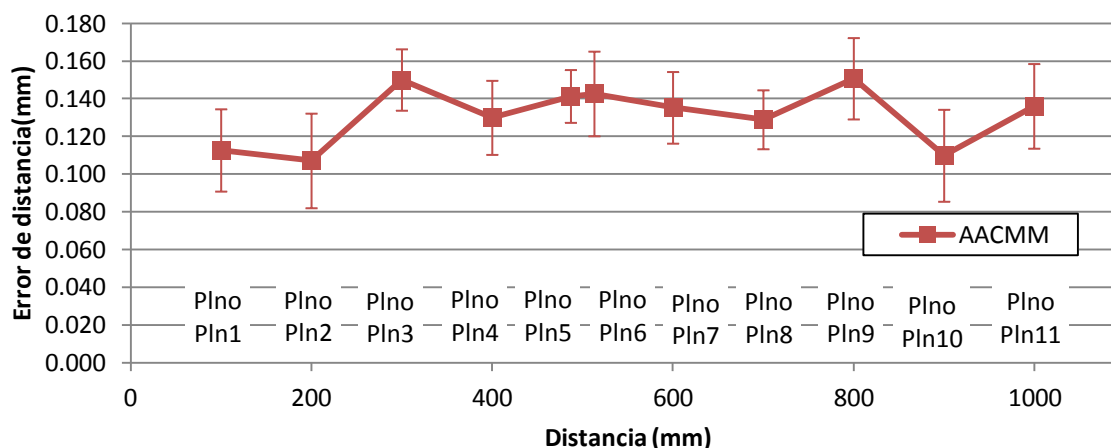


Figura 4 - 9 Error de distancia entre planos

También se ha estudiado la distancia entre esferas, Figura 4 - 10. Los errores medios son inferiores a los obtenidos por los planos con un valor máximo de error de 0,080 mm. En cuanto a la desviación estándar, ésta aumenta considerablemente hasta los 0,088 mm en el peor de los casos. La distancia entre esferas, en algunos casos planos, se utiliza en las normas para calcular la capacidad de medición volumétrica de los brazos de medir por coordenadas, por lo que esta medida podría utilizarse para comparar con dichas normas.

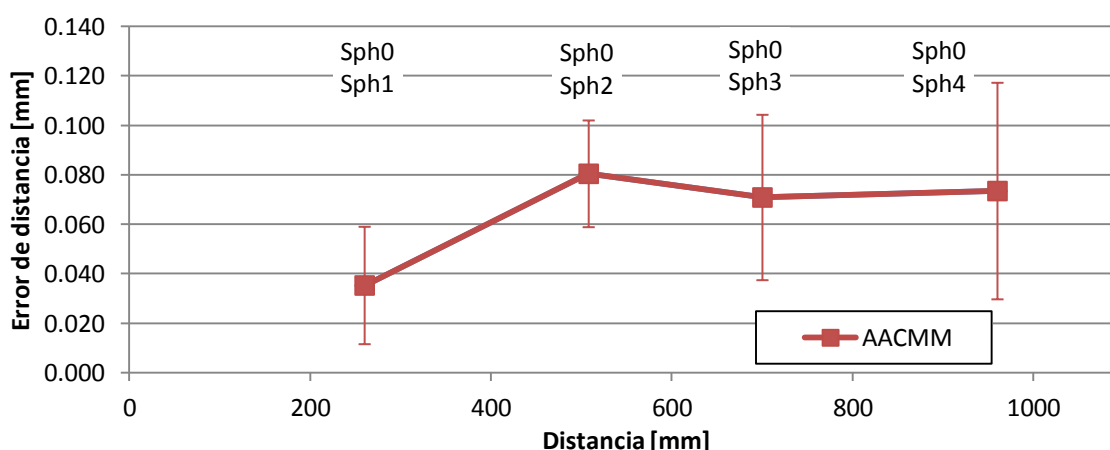


Figura 4 - 10 Error de distancia entre esferas

En cuanto a los cilindros, tanto los interiores como los exteriores, la mayoría reducen los valores del error de distancia y la repetibilidad en las mediciones, Figura 4 - 11. La distancia entre cilindros exteriores alcanza un máximo de 0,100 mm y una desviación

estándar máxima de 0,075 mm. Los cilindros interiores obtienen un error máximo de 0,052 mm y una desviación estándar máxima de 0,080 mm. Nuevamente los cilindros interiores obtienen mejores resultados, lo que puede ser explicado en este caso por sus diferencias geométricas (al igual que en el caso del diámetro de cilindros) y porque los cilindros exteriores son piezas externas al cuerpo principal del patrón y fueron ensambladas posteriormente.

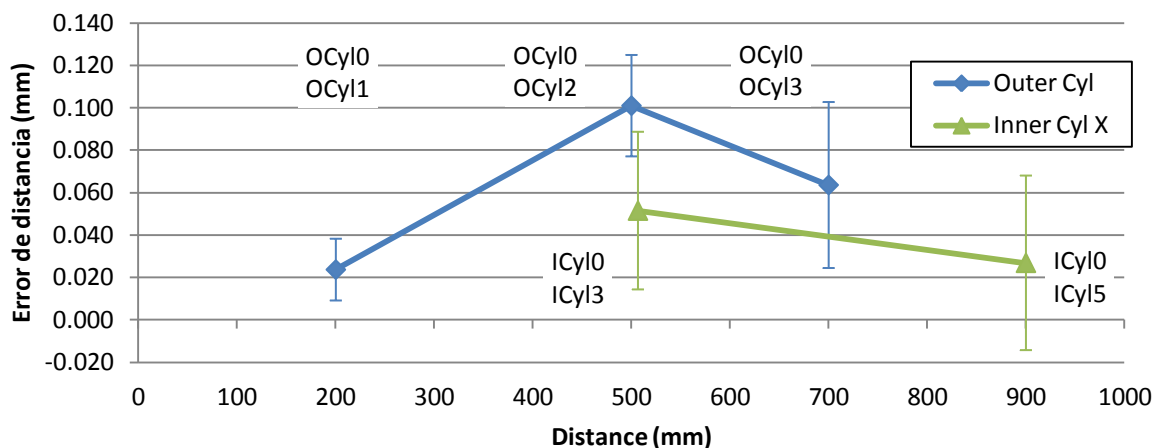


Figura 4 - 11 Error de distancia entre cilindros

b) Evaluación de las tolerancias geométricas (errores de forma)

Los errores de forma se han calculado como la media de todas las mediciones de cada elemento. Al igual que sucedía con las medidas dimensionales anteriores, la desviación estándar se muestra en forma de barra de error para cada elemento medido. En el caso de las mediciones de error de forma proporcionas por la MMC, la desviación es muy inferior a 1 μm .

En el caso de la planitud se ha considerado cada uno de los 12 planos verticales y paralelos que delimitan las almenas, Figura 4 - 12. La medición de los planos con el brazo de medir aumenta considerablemente el error de planitud asignado a los planos. El error de planitud asciende hasta un máximo de 0,017 mm con un mínimo de 0,012 mm. Por otra parte, la repetibilidad de los elementos muestra que mientras las MMC miden con muy baja repetibilidad, en el caso de los brazos de medir puede alcanzar hasta 0,007 mm. Se observa así que existe un límite inferior de planitud, es decir, el brazo de medir no tienen la capacidad de obtener mediciones por debajo de este límite aunque en mediciones aisladas puede llegar a errores inferiores o incluso mediciones que muestran errores inferiores a los marcados por la MMC. Aunque este límite depende de muchos factores (estructura del brazo, encoders,

modelo cinemático, calibración, técnica de medición, etc.), reducir este límite puede mejorar la precisión de los brazos de medir. Además, este dato y otros similares asociados con las otras tolerancias sirven para delimitar el campo de acción de los brazos de medir por coordenadas o como referencia en procesos de evaluación para controlar tanto el error cometidos por estos instrumentos como el debido a los operarios.

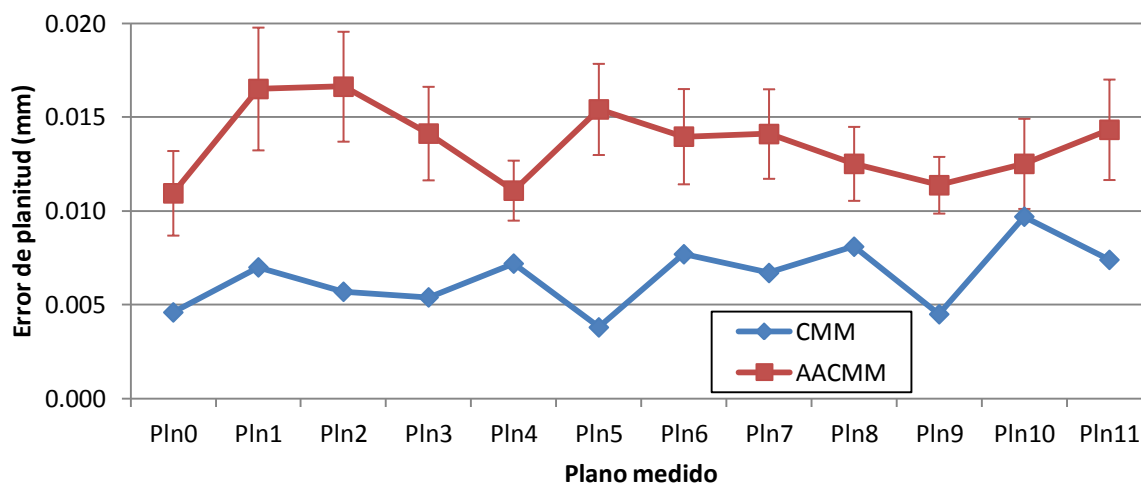


Figura 4 - 12 Error de planitud

En los resultados de esfericidad se ha obtenido un valor máximo de 0,025 mm y una desviación estándar de 0,007 mm, Figura 4 - 13. En este caso también se aprecia que el brazo es incapaz de sobrepasar un límite inferior (en la media de las repeticiones) de 0,014 mm.

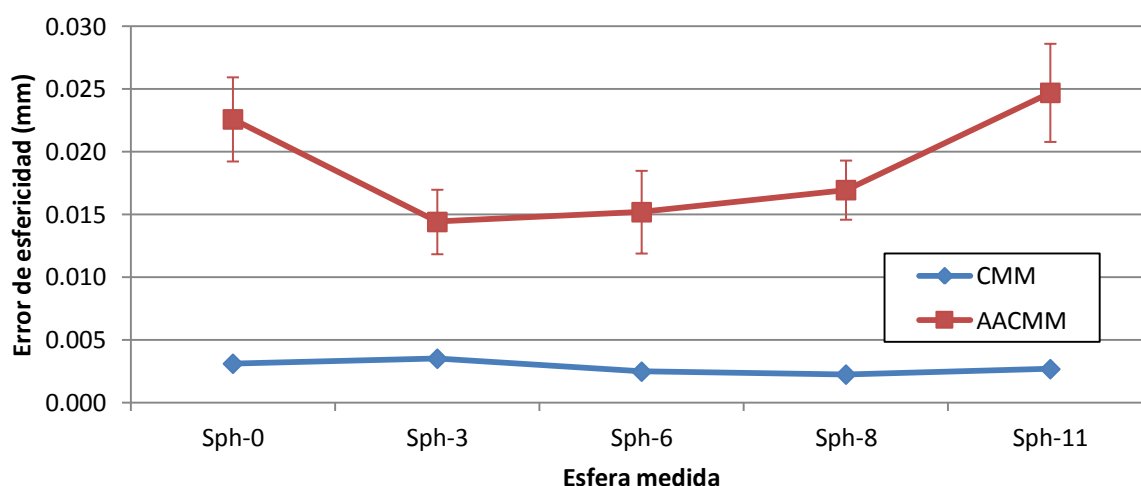


Figura 4 - 13 Error de esfericidad

Los cilindros tienen un comportamiento similar. En este aspecto no se han encontrado diferencias significativas entre los cilindros interiores y exteriores, Figura 4 - 14. El límite inferior alcanzado por el brazo de medir es de 0,023 mm para exteriores y 0,025 para exteriores. La desviación estándar. Nuevamente la desviación estándar supera ampliamente la

repetibilidad de la MMC, los cilindros exteriores obtienen un máximo de 0,015 mm y los interiores un máximo de 0,013 mm.

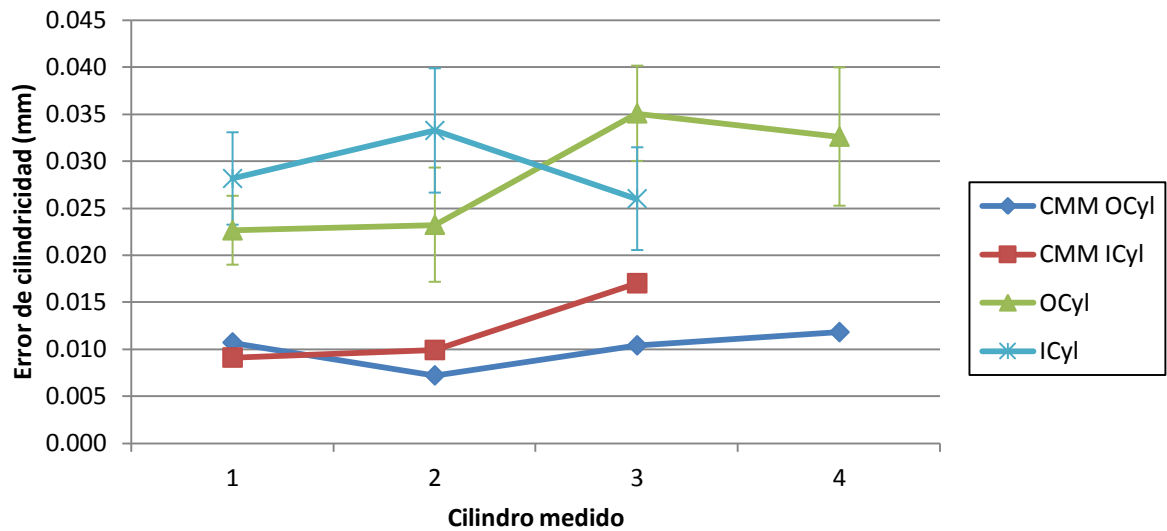


Figura 4 - 14 Error de cilindridad

c) Evaluación de las tolerancias de orientación

Otra tolerancia comprobada normalmente en la inspección es la de paralelismo entre varios elementos: plano – plano o eje – eje entre otros, Figura 4 - 15. El error de paralelismo se muestra como la diferencia entre el error de paralelismo cometido por el brazo de medir y el error de paralelismo detectado por la MMC. La diferencia en paralelismo adopta una forma aproximada lineal con pendiente negativa, es decir, el error cometido por el brazo de medir es superior en distancias cortas pero inferior en distancias largas. En las mediciones donde interviene la distancia (distancia entre elementos y paralelismo) se ha observado una menor influencia al obtenerse valores más constantes independientemente de la distancia, lo que es debido a la estructura no lineal de los brazos de medir por coordenadas a diferencia de la MMC. La desviación estándar aumenta hasta los 0,022 mm.

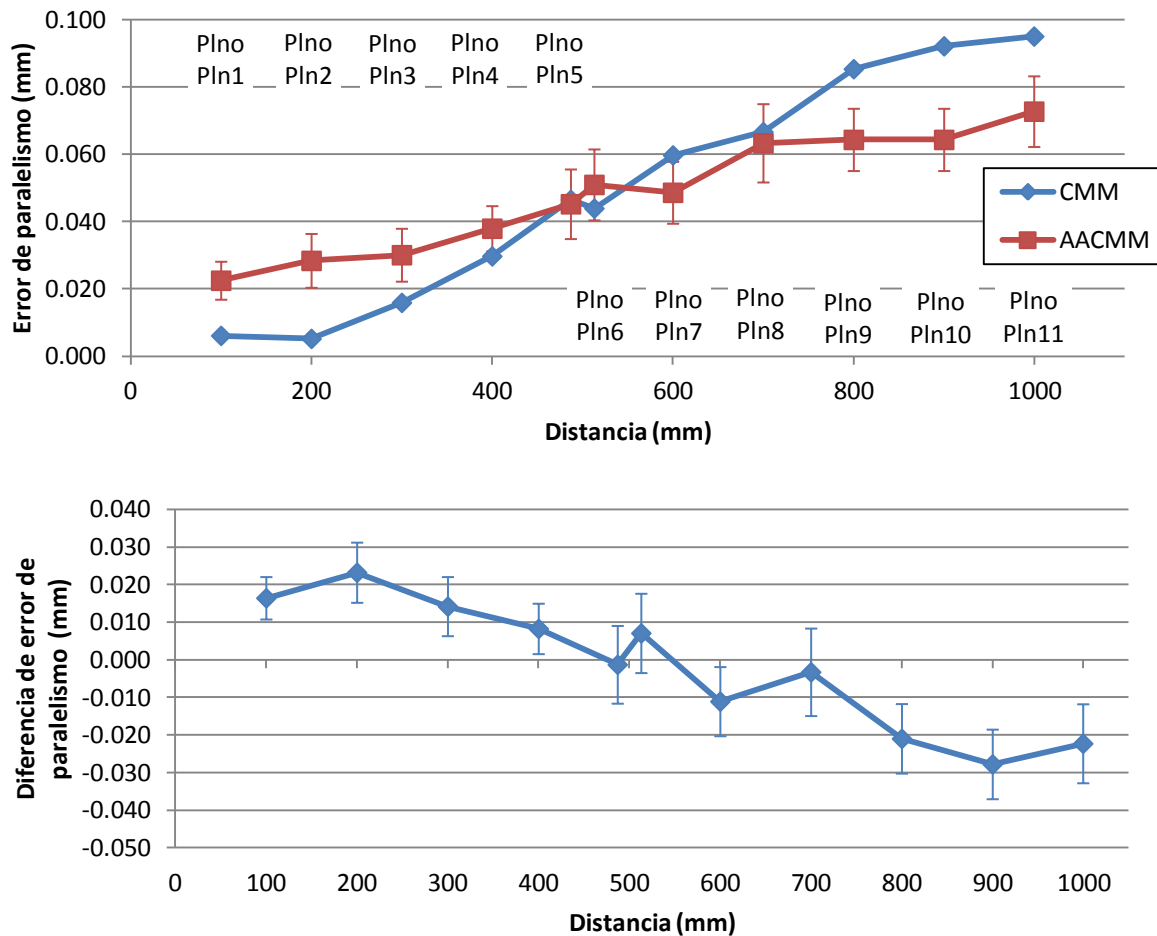


Figura 4 - 15 Error de paralelismo y diferencia de error con respecto a MMC

En cuanto al paralelismo entre cilindros se obtienen resultados diferentes según sean interiores o exteriores, Figura 4 - 16. En el caso de cilindros exteriores el error cometido por el brazo de medir es inferior (0,040 mm) respecto a los cilindros interiores. Este comportamiento puede ser explicado por el mayor error de paralelismo de los cilindros exteriores del patrón provocado probablemente porque son piezas independientes ensambladas en la estructura. A lo largo del ensayo se ha observado que para aquellas características con errores de forma elevados, el brazo puede llegar a obtener errores por debajo de los de referencia. Esto es debido al alto valor de incertidumbre de los brazos (falta de precisión) que hace que se puedan solapar las zonas de conformidad del patrón y la precisión de fabricación del brazo. De todas formas, lo esporádico de este fenómeno permite minimizar claramente su importancia. En cuanto a la desviación estándar, ésta permanece prácticamente constante en todas los casos entorno a 0,020.

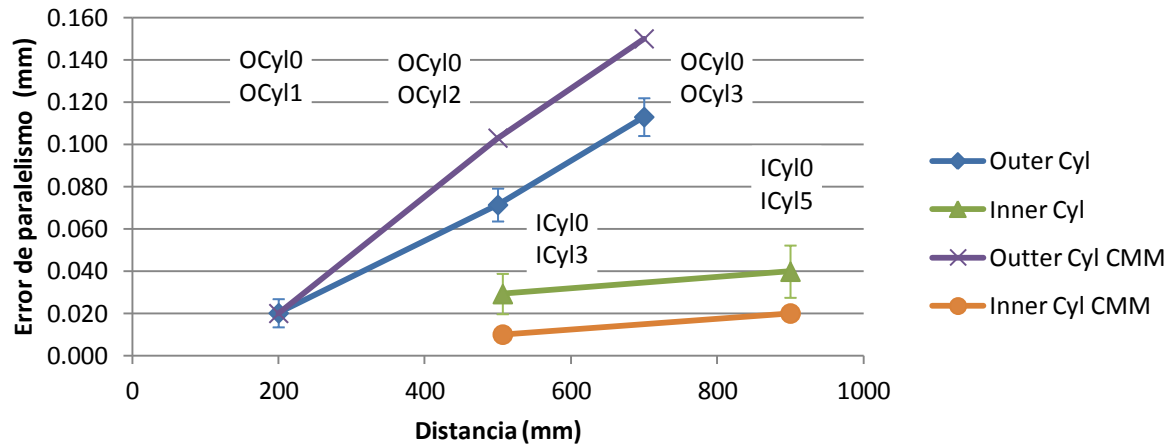


Figura 4 - 16 Error de paralelismo

Por último se recogen los errores de forma de perpendicularidad y angularidad (60°), Tabla 4. 5. En el caso de perpendicularidad se obtiene valores pequeños en comparación con el error mostrado por la MMC. Por otra parte la angularidad obtiene errores máximos de 0,0136 mm y la desviación estándar aumenta hasta los 0,0311 mm.

Tabla 4. 5 Errores de perpendicularidad y angularidad

	Error (AACMM-MMC)	Std. Deviation
Perpendicularity	0,0066 mm	0,0064 mm
Angularidad R	-0,0048 mm	0,0286 mm
Angulariad L	-0,0136 mm	0,0311 mm

4.3.3 Conclusiones

Las mediciones del brazo han mostrado claramente valores de repetibilidad mayores que los de las MMC. Además, se ha encontrado valores límites inferiores por debajo de los cuales no se pueden alcanzar mediciones fiables, aunque en ocasiones puntuales se pueda reducir e incluso obtener una medición con un error inferior al de la MMC. Por otra parte, el comportamiento del brazo de medir no está influenciado por la relación de linealidad característica de las MMC. Respecto a la distancia entre características (distancia entre planos, ejes de cilindros, paralelismo), los resultados de las mediciones se asemejan a un error constante independiente a la distancia. En cuanto a las tolerancias que dependen únicamente de un elemento (diámetro, esfericidad, cilindridad, planitud) el brazo encuentra un límite inferior en cuanto al error de medición.

De estos resultados se desprende que la aceptación de las medidas con brazo de medir por coordenadas es, en concepto, diferente a la verificación en MMC. Aunque sigue siendo necesario estudiar todo el volumen de trabajo, no resulta fundamental estudiar sus resultados

en función de la distancia o los errores de sus ejes de coordenadas globales (los cuales no están definidos en brazos de medir). Por otra parte, el estudio del comportamiento de los brazos de medir por coordenadas debe realizarse por cada característica geométrica y tolerancia ya que el comportamiento difiere de un tipo a otro. Esto es debido al conjunto de características del propio brazo de medir, el operario y los parámetros del proceso de medición. Como resulta obvio, el factor operario no puede ser controlado hasta el nivel de la automatización de las MMC, por lo que los resultados pueden variar significativamente entre las repeticiones (alta desviación estándar). En la evaluación de los brazos de medir, por tanto, es recomendable con mayor razón estudiar varias repeticiones de las mediciones. Además, en este tipo de evaluación el factor operario y la técnica de medición se estudia indirectamente por medio de los resultados globales medidos. En una propuesta posterior estos factores serán evaluados en mayor detalle para delimitar el grado de entrenamiento o la aptitud de las mediciones con brazo de medir por coordenadas.

Como resumen se muestran los errores en distancia para los diferentes elementos (esferas, planos y cilindros), Figura 4 - 17. El error de distancia entre esferas y cilindros obtiene valores inferiores a los de los planos, sin embargo la desviación estándar es significativamente mayor. Una explicación para este comportamiento se basa en la geometría de los elementos: los planos tienen una desviación estándar baja en la medición de su planitud, por lo que se puede considerar que quedan definidos con alta repetibilidad; sin embargo, el error cometido en todos los planos tiene un error similar (la dirección de palpado y orientación es similar) por lo que, aunque la planitud esté correctamente definida, el plano construido está desplazado de su posición original en el patrón (al medir todos los puntos del plano en la misma dirección). En cuanto a las esferas y cilindros la repetibilidad mayor se debe a la forma de medir, que varía en mayor grado que los planos (orientación, posición del brazo parámetros, zona de pérdida de visibilidad) pero el centro se encuentra, hasta cierto punto, compensado por la medición en toda la superficie de revolución. Con ello se consigue un error menor de posicionamiento-distancia entre los dos centros.

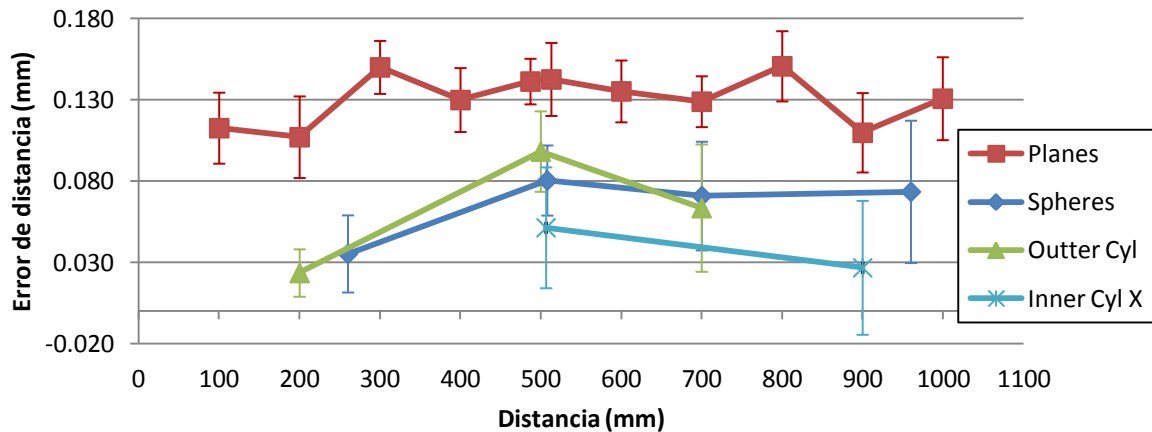


Figura 4 - 17 Comparación de errores de distancia

De igual forma, en la se muestra la comparativa para el error de paralelismo para diversos elementos, Figura 4 - 18. En este caso los resultados muestran cierta relación lineal con la distancia entre las características, pero la dependencia es inferior a la que muestran las mediciones con MMC.

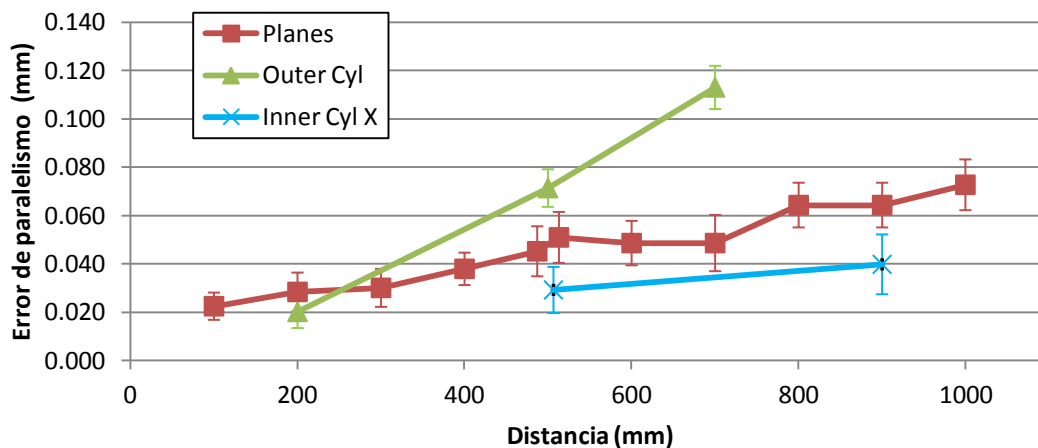


Figura 4 - 18 Comparación de errores paralelismo

Como conclusión de esto se puede decir que la caracterización realizada de cada tipo de tolerancia permitirá establecer metodologías de evaluación o verificación específicas, es decir, se pueden marcar límites para cada tipo de característica a partir de los cuales sea necesario una calibración completa o una corrección en su caso. Además permitirá, al minimizarlos o corregirlos realizar procedimientos de calibración con resultados de mayor precisión y repetibilidad. El tratamiento único de la distancia entre esferas dentro de la calibración o evaluación no implica la correcta medición de otras características o tipos de tolerancia debido a la diferencias de comportamiento entre estas características geométricas.

Por otra parte, el cálculo RMS (Root Mean Square) (ASME, 2004) muestra la desviación entre los valores medidos con el brazo y los valores de referencia de la MMC, Ec. 4. 1. Estos valores aportan un parámetro que incorpora la desviación con respecto a los valores calibrados y la repetibilidad en la medición de ese valor.

$$2RMS = 2 \sqrt{\frac{\sum D_i^2}{n}} \quad \text{Ec. 4. 1}$$

Donde: D es la diferencia entre los valores de cada medición con brazo y el valor de referencia de la MMC y n es el número de mediciones realizadas. La Tabla 4. 6 muestra los valores que se obtendrían siguiendo la norma ASME (cambiando las posiciones) y ampliándola a cada tipo de característica. Con estos resultados se observa que cada tipo de tolerancia conlleva un error propio. Por tanto, el proceso de evaluación tradicional donde únicamente se considera la distancia entre esferas es insuficiente para aceptar cualquier medición futura del brazo de medir por coordenadas.

Tabla 4. 6 RMS para cada tolerancia

Tolerancia	Característica	RMS (mm)	Tolerancia	Característica	RMS (mm)
Angularidad	Planos	0.0309	Planitud	Planos	0.0179
Distancia	Planos	0.1378	Cilindricidad	Cil. Ext.	0.0331
Distancia	Cil. Ext.	0.0878	Cilindricidad	Cil. int.	0.0426
Distancia	Cil. Int.	0.0870	Esfericidad	Esferas	0.0336
Distancia	Esferas	0.0918	Paralelismo	Planos	0.0466
Diámetro	Cil. Ext.	0.0277	Paralelismo	Cil. ext.	0.0641
Diámetro	Cil. Int.	0.0196	Paralelismo	Cil. int.	0.0582
Diámetro	Esferas	0.0360	Perpendicularidad	Planos	0.0180
			Perpendicularidad	Cil.	0.0157

Con el fin de profundizar en el comportamiento de los brazos de medir por coordenadas se ha propuesto un parámetro que permita evaluar su fiabilidad para realizar una determinada medición, Tabla 4. 7. En este sentido se define el parámetro Qp, dado como la relación entre el valor medio de las mediciones asociadas a un tipo tolerancia con el brazo de medir y el valor medio de las mediciones con MMC. De esta manera, un valor de Qp próximo a 1 indicaría que el brazo tiene una medición similar a los resultados de las MMC, es decir que es apto para capturar un determinado error, bien dimensional o bien error de forma. Teniendo en cuenta esta definición, en la tabla se muestran los valores que adopta el citado parámetro Qp para los distintos valores de las tolerancias estudiadas. Estos valores adoptan la forma de rangos de valores para algunos casos, como paralelismo o cilindricidad, donde el valor de Qp varía para en función de la distancia.

Tabla 4. 7 Qp para cada tolerancia

Tipo de tolerancia	Característica geométrica	Qp	Tipo de tolerancia	Característica geométrica	Qp
Angularidad	Planos	1.000	Planitud	Planos	1.540-4.058
Distancia	Planos	1.000-1.001	Cilindricidad	Cilindros	1.529-3.372
Distancia	Cilindro externo	1.000	Esfericidad	Esferas	1.040-2.684
Distancia	Cilindro interior	1.000	Paralelismo	Planos	0.754-5.456
Distancia	Plano-eje	1.000	Paralelismo	Cilindros	0.693-2.921
Distancia	Esferas	1.000	Perpendicularidad	Planos	1.649
Diámetro	Cilindros	0.999-1.000	Perpendicularidad	Cilindros	1.349
Diámetro	Esferas	0.998-0.999			

La tabla muestra que los valores de dicho parámetro son totalmente diferentes para las tolerancias dimensionales que para las geométricas. Los valores de Qp para las tolerancias dimensionales tienen un valor muy cercano a 1 mientras que para las tolerancias geométricas tienen valores muy superiores a 1 en su gran mayoría. El análisis de este parámetro en la evaluación de los brazos de medir por coordenadas determina si el instrumento es adecuado (fiable) o no. Este parámetro puede incluso ser objeto de mejora por medio de avances en la tecnología de los brazos de medir por coordenadas, un mejor diseño o el entrenamiento del operario y las técnicas de medición. No cabe duda que otro importante parámetro es la incertidumbre proporcionada por los fabricantes, obtenida por verificación de acuerdo a normas. Sin embargo, esta incertidumbre no puede ser directamente utilizada en medición de cilindros, conos, planos o esferas virtuales, porque las características del test utilizado por el fabricante o las normas para determinar la incertidumbre han sido efectuadas con elementos totalmente distintos (esferas solidas).

El procedimiento de calibración o verificación utilizando un patrón como el que aquí se ha presentado se fundamenta en la necesidad de comprobar las mediciones efectuadas con estos equipos no sólo en tolerancias dimensionales (como hacen los patrones tradicionales sino también, y sobre todo, en la medición de una gama de tolerancias geométricas. Esto permite evaluar la precisión real (o cuantificar la incertidumbre si hablamos de calibración) de los brazos de medir por coordenadas en la medición de todas sus características. La metodología propuesta y el patrón de características permiten realizar esta evaluación y posible calibración que garantiza la fiabilidad y la trazabilidad de las mediciones con brazo de medir por coordenadas. En la metodología se considera todo el volumen de trabajo por lo que los resultados son extrapolables a las mediciones en cualquier posición del espacio. A la vista de los ensayos realizados, el patrón puede ser utilizado de acuerdo a las normas ASME y VDI. Además, los parámetros de evaluación permiten la comparación entre modelos de

brazos de medir por coordenadas especialmente de fabricantes distintos en mayor profundidad. Incluso es útil para la evaluación del operario y su entrenamiento.

La repetibilidad de los brazos de medir está todavía muy lejos de la repetibilidad de las MMC pero eso no quiere decir que no se pueda minimizar la influencia del operario en la medición con CMA. Para empezar, ha quedado claro que debe analizarse cada característica de manera independiente, asegurando que la técnica de medición es la correcta, esto es, que la distribución es adecuada, que no se supera un determinado valor de los esfuerzos y que la estabilidad de los puntos es óptima (evitando deslizamiento), etc., en definitiva obteniendo no sólo las medidas sino dando parámetros de calidad de las mismas. Lo deseable es que estos parámetros los diese el propio equipo “in-process”, cuando se está midiendo una determinada característica. Pero mientras los fabricantes no suministren esa nueva funcionalidad -la calidad del proceso de inspección-, debemos conformarnos con seguir realizando verificaciones temporales con patrones y procedimientos como los que aquí se presentan y realizarlas entre periodos de calibración. La ventaja de esta metodología (patrón de características + procedimiento) es que permite ambas, verificar y entrenar en la técnica de medida o en su caso calibrar el AACMM.

4.4 Balance de incertidumbre en un proceso de medición: patrón, operario, técnica de medición y AACMM

Junto con la definición del patrón de características, del accesorio de multiposición y del propio método de calibración con dicho patrón, se propone también un ensayo dirigido a estudiar el comportamiento y la contribución del operario y la técnica de medición con brazo de medir por coordenadas sobre la incertidumbre de las mediciones. Al cuantificar las incertidumbres producidas por estos factores es posible incluso obtener la incertidumbre real del brazo de medir por coordenadas sin la influencia del operario. De esta manera se proporciona una herramienta que permite cualificar operarios y brazos de medir por coordenadas de forma simultánea. Por otra parte, el ensayo se realiza por tipo de tolerancia, ya que ha quedado demostrada la importancia del elemento geométrico y del tipo de tolerancia a comprobar en el proceso de medición.

En este ensayo se utiliza el patrón de características mencionado anteriormente, el cual es medido por tres operarios. La repetibilidad y reproducibilidad del ensayo es utilizada para determinar la aptitud de los operarios y su técnica de medición. Además, en el proceso se calcula la incertidumbre (en términos de varianza y desviación estándar) de los factores involucrados, por lo que es posible analizar el comportamiento de éstos.

El presente ensayo presenta una herramienta para la evaluación completa de la medición con brazo de medir por coordenadas. De los datos también se puede desprender las tolerancias mínimas que se pueden comprobar con garantía en la medición con el brazo de medir, en función del operario que realice las medidas. Además, esta herramienta puede adaptarse en futuras investigaciones al estudio detallado de otros factores de influencia.

4.4.1 Metodología

Este ensayo se ha realizado en el laboratorio de la Universidad de León con un brazo de medir por coordenadas Romer modelo Omega 2018 con un alcance de 1800 mm. El palpador utilizado es de 50 mm y esfera de 4 mm. La repetibilidad de este modelo para el rendimiento volumétrico es de 0,050 mm y para los ensayos de esfera y cono de 0,036 y 0,020 mm, respectivamente. Sin embargo, en el certificado de dicho brazo se encuentra un valor de precisión volumétrica de 0,060 mm. Tanto el brazo de medir como el patrón se han montado

sobre la mesa de una MMC, Figura 4 - 19. La temperatura se mantuvo en un rango de $20 \pm 1^{\circ}\text{C}$.

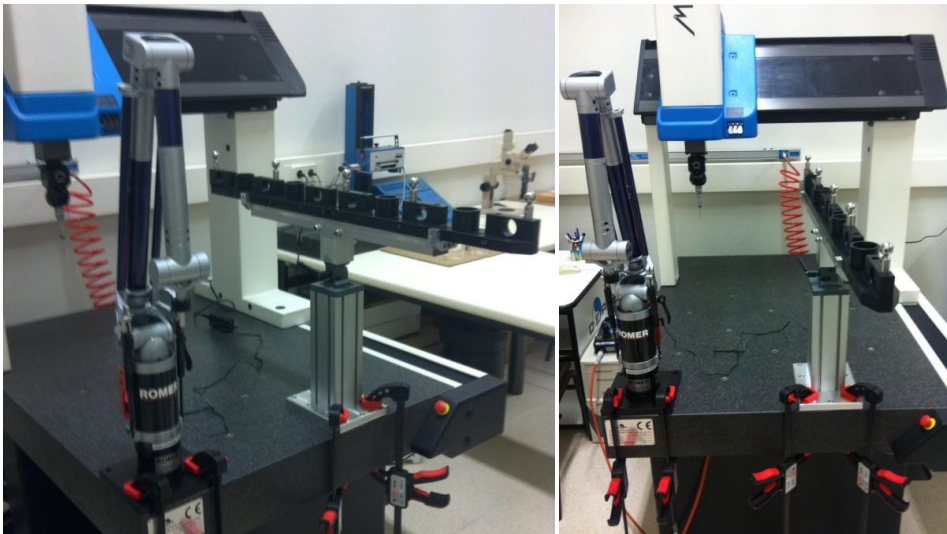


Figura 4 - 19 Posición del brazo y del patrón

El ensayo estudia todas las fuentes principales de error, las que afectan al propio brazo, las producidas por el operario y las debidas a la técnica de medición empleada. En los procesos de evaluación existentes se analiza conjuntamente el brazo de medir con todas sus fuentes de error. Esta situación conduce a decisiones de aceptación de los brazos de medir por coordenadas que son deficientes o con escasa información. Con operarios no entrenados o con una técnica de medición incorrecta, los resultados de la evaluación de un brazo de medir por coordenadas se ven afectados negativamente. La cuantificación de este efecto es de gran importancia, pues podría llegar a concluirse que el brazo de medir necesita una calibración completa sin necesidad de requerirlo. Con el fin de solventar este problema y aumentar el conocimiento del comportamiento de los brazos de medir por coordenadas se ha propuesto este ensayo.

Los estudios de repetibilidad y reproducibilidad fueron originalmente diseñados para evaluar el error en procesos de medición manual, como por ejemplo la medición de una longitud entre dos planos paralelos con calibre o la medición de diámetros con micrómetros. La adaptación de ese tipo de estudios a las características de los brazos de medir por coordenadas permite analizar los factores que afectan a sus mediciones. Se propone la medición del patrón de características con 3 operarios distintos en 5 conjuntos de mediciones distintas con 10 repeticiones por cada conjunto de mediciones. De esta manera y conocidas las dimensiones de patrón, la variación en las mediciones se atribuye al efecto del operario y la técnica de medición así como al propio brazo de medir. Además, este ensayo se ha

particularizado también para cada característica geométrica y cada tipo de tolerancia a evaluar, para estudiar su influencia en la incertidumbre de medida y cómo el factor operario afecta de manera distinta a cada tipo de geometría y tolerancia. El ensayo simula los procesos de medición reales con brazo de medir por lo que el patrón se mide en una posición.

Además, también son posibles otras variantes de evaluación con este proceso. Por ejemplo, una posible variante consiste en adoptar diferentes posiciones del patrón en lugar de medir 5 veces el mismo patrón en una sola posición. Para ello se pueden utilizar las 8 posiciones propuestas en el ensayo anterior para evaluar todo el volumen de trabajo. Este planteamiento de ensayo se asemeja a los procedimientos de evaluación establecidos en las normas internacionales. Otra variante, dirigida al estudio pormenorizado de las técnicas de medición, consiste en utilizar una técnica de medir determinada para una característica geométrica en cada grupo de mediciones (10 repeticiones). Esto permite estudiar las diferentes técnicas de medición con las que se puede medir una característica geométrica determinada.

Se ha elegido el ensayo en una posición debido a que las mediciones reales en proceso se suelen realizar en una posición previamente conocida. Además, la medición del patrón en 5 grupos de mediciones permite también evaluar la influencia del patrón y, por lo tanto, deducir si el patrón es apto para la propia evaluación de los brazos de medir por coordenadas. Aunque sería interesante medir las 8 posiciones de la evaluación con tres operarios y 10 repeticiones para cada tipo de tolerancia, el tiempo consumido en el proceso sería excesivo. Con el ensayo elegido se obtiene un estudio detallado del comportamiento de los factores de medición por cada tipo de tolerancia, que permite simultáneamente evaluar a los operarios aunque en un ámbito más acotado.

La técnica estadística ANOVA de dos factores estudia la influencia al variar dos factores (operario y pieza medida, en este caso) sobre la variable dependiente (resultados de medición). De esta manera cada factor se divide en varios niveles categóricos (Operario 1, 2 y 3 y cada conjunto de medición del patrón: 1, 2, 3, 4 y 5). De esta manera se espera que la mayoría de la variación se deba al factor operario y no del patrón. La variación debida a cada factor es calculada y utilizada para deducir la importancia de los factores involucrados.

Por otra parte, también se considera la interacción entre los dos factores como un factor de influencia, es decir, si la acción conjunta de dos factores altera los resultados que se obtendrían al operar los factores por separado. La interacción resulta del efecto conjunto de

ambos factores actuando al mismo tiempo, de forma que refuerzan o debilitan sus efectos (factor significativo) o resulta un factor que no altera los efectos individuales de cada factor (factor no significativo). La Tabla 4. 8 muestra los resultados de la medición del diámetro de la esfera 0 (Sph0) del patrón de características siguiendo la metodología del ensayo propuesto. Cada operario ha realizado 5 conjuntos de mediciones del patrón (diámetro de esfera en este caso) con 10 repeticiones en cada conjunto. En total se tomaron 150 mediciones, 50 por cada operario. Estos datos se trataron de varias maneras para evaluar el comportamiento del operario y del brazo de medir por coordenadas.

Tabla 4. 8 Mediciones para el diámetro de la esfera

Diámetro de esfera	Operario 1		Operario 2		Operario 3	
Medición 1	19.981	19.957	19.979	19.980	19.997	19.971
	19.970	19.974	19.953	19.940	19.953	19.951
	19.974	19.978	19.967	19.966	19.946	19.947
	19.946	19.960	19.967	19.966	19.971	20.006
	20.019	19.949	19.949	19.982	20.024	19.993
Medición 2	19.977	20.000	19.974	19.965	20.021	20.016
	19.985	19.959	19.974	19.993	19.986	20.004
	19.946	19.975	19.962	19.968	20.022	19.979
	19.941	19.965	19.973	19.990	20.070	19.980
	19.964	19.936	19.985	20.003	19.998	19.963
Medición 3	19.971	19.951	19.979	20.002	20.008	20.026
	20.004	19.948	19.975	20.002	19.957	19.955
	19.980	19.967	19.993	19.990	20.037	20.000
	19.991	19.968	19.992	19.988	19.972	19.961
	19.959	20.004	19.996	19.986	20.048	20.007
Medición 4	19.983	19.934	20.011	19.996	19.978	19.952
	19.988	19.974	20.004	19.974	19.968	19.959
	19.979	19.974	19.959	20.000	19.990	20.044
	20.030	19.969	20.001	20.005	20.024	20.026
	20.020	20.000	19.982	19.996	20.012	20.004
Medición 5	19.965	19.985	20.022	20.020	19.950	19.982
	19.977	19.988	20.020	19.971	19.956	19.983
	19.988	19.964	20.021	20.003	19.996	19.982
	19.964	19.964	19.994	19.985	19.999	20.000
	19.949	19.969	19.992	20.020	20.000	19.973

La repetibilidad es expresada como la variabilidad que aporta el instrumento de medida a las mediciones y la reproducibilidad como la variabilidad que aporta el operario a la medida. De esta manera y tras los cálculos se obtiene si cada factor es significativo en las mediciones y cuantifica la variabilidad que aporta c. La Tabla 4. 9 muestra el proceso de cálculo para determinar la significancia de cada factor.

Tabla 4. 9 Cálculos ANOVA

Factor	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F	p
Operario	SCO	GLO	CMO=SCO/GLO	CMO/CME	0,05
Patrón	SCP	GLP	CMP=SCP/GLP	CMP/CMP	0,05
Interacción	SCI	GLI	CMI=SCI/GLI	CMI/CMI	0,05
Error	SCE	GLE	CME=SCE/GLE		
Total	SCT	GLT			

La suma de cuadrados se calcula de forma similar a las planeadas en el capítulo anterior salvo que en este caso se estudian 2 factores y su interacción, Ec. 4. 2, Ec. 4. 3, Ec. 4. 4, Ec. 4. 5, Ec. 4. 6.

$$SCO = \sum rb(\bar{X}_{\text{operarios}} - \bar{X}_{\text{total}})^2 \quad \text{Ec. 4. 2}$$

$$SCP = \sum ra(\bar{X}_{\text{piezas}} - \bar{X}_{\text{total}})^2 \quad \text{Ec. 4. 3}$$

$$SCI = \sum r(\bar{X}_{\text{int}} - \bar{X}_{\text{operario}} - \bar{X}_{\text{pieza}} + \bar{X}_{\text{total}})^2 \quad \text{Ec. 4. 4}$$

$$SCE = \sum (X_{\text{indiv}} - \bar{X}_{\text{grupo}})^2 \quad \text{Ec. 4. 5}$$

$$SCT = \sum (X_{\text{indiv}} - \bar{X}_{\text{total}})^2 \quad \text{Ec. 4. 6}$$

Donde:

- SCO (Suma de Cuadrados “Operario”) mide la variabilidad del factor operario con respecto a la media total.
- SCP (Suma de Cuadrado “Piezas”) mide la variabilidad obtenida en la 5 mediciones del patrón con respecto a la media total.
- SCI (Suma de Cuadrados (“Interacción”) mide la variabilidad de las mediciones debida a la acción conjunta del operario y el patrón. Se calcula como se calcula estadísticamente como la multiplicación entre ambos factores.
- SCE (Suma de Cuadrados “Error”) mide la variabilidad no explicada por los factores de las mediciones con respecto a la variación total.
- SCT (Suma de Cuadrados “Total”) mide la variación total de las mediciones.

- $\bar{X}_{\text{operarios}}$ es la media de todas las mediciones de cada operario, en este caso 3 valores distintos obtenidos de las 50 mediciones de cada operario.
- $\bar{X}_{\text{Total}}$ es la media de todas las mediciones.
- $\bar{X}_{\text{piezas}}$ es la media obtenida por cada conjunto de mediciones del patrón, en este caso 5 valores obtenidos de las 30 repeticiones realizadas en cada medición (por tres operarios).
- $\bar{X}_{\text{inte}}$ es la media obtenida de la interacción de cada grupo.
- X_{indiv} es el valor obtenido en cada repetición de cada conjunto de mediciones del patrón.
- $\bar{X}_{\text{grupo}}$ es la media obtenida por el conjunto de mediciones de cada operario y cada conjunto de mediciones del patrón, en este caso 15 valores (Media del conjunto de mediciones de: Operario 1-Medición 1, Operario 1-Medición 2 ...Operario 3-Medición5).
- a es el número de conjuntos de mediciones del patrón, 5.
- b es el número de operario, 3.
- r es el número de repeticiones por medición del patrón, 10.

La Tabla 4. 10 resume el cálculo de las medias de los diferentes grupos de mediciones y operarios.

Tabla 4. 10 Resumen de cálculos de medias de ANOVA

Diámetro de esfera	Operario 1	Operario 2	Operario 3	Media
Medición 1	$\bar{X}_{\text{grupo1-1}}$	$\bar{X}_{\text{grupo2-1}}$	$\bar{X}_{\text{grupo3-1}}$	$\bar{X}_{\text{Medición1}}$
Medición 2	$\bar{X}_{\text{grupo1-2}}$	$\bar{X}_{\text{grupo2-2}}$	$\bar{X}_{\text{grupo3-2}}$	$\bar{X}_{\text{Medición2}}$
Medición 3	$\bar{X}_{\text{grupo1-3}}$	$\bar{X}_{\text{grupo2-3}}$	$\bar{X}_{\text{grupo3-3}}$	$\bar{X}_{\text{Medición3}}$
Medición 4	$\bar{X}_{\text{grupo1-4}}$	$\bar{X}_{\text{grupo2-4}}$	$\bar{X}_{\text{grupo3-4}}$	$\bar{X}_{\text{Medición4}}$
Medición 5	$\bar{X}_{\text{grupo1-5}}$	$\bar{X}_{\text{grupo2-5}}$	$\bar{X}_{\text{grupo3-5}}$	$\bar{X}_{\text{Medición5}}$

Media	$\bar{X}_{Operario1}$	$\bar{X}_{Operario2}$	$\bar{X}_{Operario2}$	$\bar{X}_{Total}$
-------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	-------------------

Los grados de libertad se calculan como el número de elementos de cada grupo menos 1, Ec. 4. 7, Ec. 4. 8, Ec. 4. 9, Ec. 4. 10, Ec. 4. 11.

$$GLO = b - 1 \quad \text{Ec. 4. 7}$$

$$GLP = a - 1 \quad \text{Ec. 4. 8}$$

$$GLI = (a - 1)(b - 1) \quad \text{Ec. 4. 9}$$

$$GLE = a \cdot b(r - 1) \quad \text{Ec. 4. 10}$$

$$GLT = (a \cdot b \cdot r) - 1 \quad \text{Ec. 4. 11}$$

Análogamente a los cálculos de ANOVA de un factor, se calculan los cuadrados medios como suma de cuadrados partido por sus grados de libertad. Además, el ratio entre estos dos factores, “F”, se utiliza con la distribución de Fisher para calcular el valor “p” (probabilidad que cubre el parámetro F dentro de la distribución). Si “p” es menor de 0,05 se acepta que el factor es significativo en las mediciones con un nivel de confianza del 95%. Estadísticamente un valor inferior a 0,05 expresa que los operarios, en este caso, han realizado mediciones significativamente distintas, al menos dos operarios. Aunque esto no implica que alguno de ellos realice una medición deficiente, si expresa que el operario es un factor que afecta a los resultados. Los resultados de los operarios deben ser comparados con límites aceptados para aceptar sus mediciones o simplemente establecer los errores con los que mide cada operario.

La Tabla 4. 11 muestra, a modo de ejemplo, los resultados del estudio para el diámetro de la esfera 0 (Sph0). De los valores de “p” obtenidos se concluye que el operario, el patrón y la interacción entre ambos son factores significativos en la medición del diámetro de esferas. Estos resultados han sido calculados para todas las tolerancias verificadas del patrón.

Tabla 4. 11 Ejemplo de cálculos ANOVA para el diámetro de la esfera 0 (Sph0)

Factor	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F	p
Operario	0,0084	2	0,0042	8,55	0,000
Patrón	0,0075	4	0,0019	3,80	0,006
Interacción	0,0092	8	0,0012	2,35	0,021
Error	0,0663	135	0,0005		
Total	0,0914	149	0,0006		

Al estudiar los diferentes factores que participan en el cálculo de los parámetros estadísticos mencionados, éstos se atribuyen a las partes del sistema de medición. La componente “error” se atribuye a la parte de la variabilidad no explicada por los factores estudiados (operario y patrón), es decir, al instrumento de medida. El brazo de medir por coordenadas obviamente aporta incertidumbre a la medición y, además, los factores estudiados no explican toda la variación de los resultados; por ello, esta componente se asocia al instrumento de medida. Por otra parte la interacción entre los factores (operario y tipo de tolerancia) hace referencia a la forma en que actúa conjuntamente el operario y la tolerancia verificada, es decir, la técnica de medición. La técnica de medición es la forma en la que cada operario mide una tolerancia y ésta aporta variabilidad a la medición, ya que esta puede variar en menor grado para repeticiones de un mismo operario o en mayor grado para mediciones de distintos operarios.

4.4.2 Resultados

Se han obtenido dos tipos de resultados de este ensayo: la comparación directa entre operarios y la contribución del operario, de la geometría a medir y del brazo de medir a los resultados de medición. En el primer grupo de resultados se encuentran dos tipos de gráficas que permiten la comparación directa entre operarios, de forma que se puede elegir el mejor operario para medir una característica geométrica. Así, la Figura 4 - 20 muestra los resultados de las mediciones con una gráfica de frecuencia. Gracias a esta gráfica se puede estudiar tanto la desviación con respecto a la media como la dispersión que logra cada operario. La curva asignada a cada operario representa las 50 mediciones que ha realizado, mientras que la curva total es la suma de las 150 mediciones realizadas por los tres operarios. La desviación estándar de las 50 mediciones de cada operario muestra el grado de dispersión, siendo de 0,0210, 0,0195 y 0,0296 mm para los operarios 1, 2 y 3, respectivamente. Los operarios 1 y 2 obtienen una distribución de medidas visualmente distinta aunque la desviación estándar es similar y relativamente baja, por lo que se puede aceptar sus mediciones. Sin embargo, las mediciones del operario 3 están mucho más dispersas y se debe recomendar que adquiera mayor experiencia o entrenamiento.

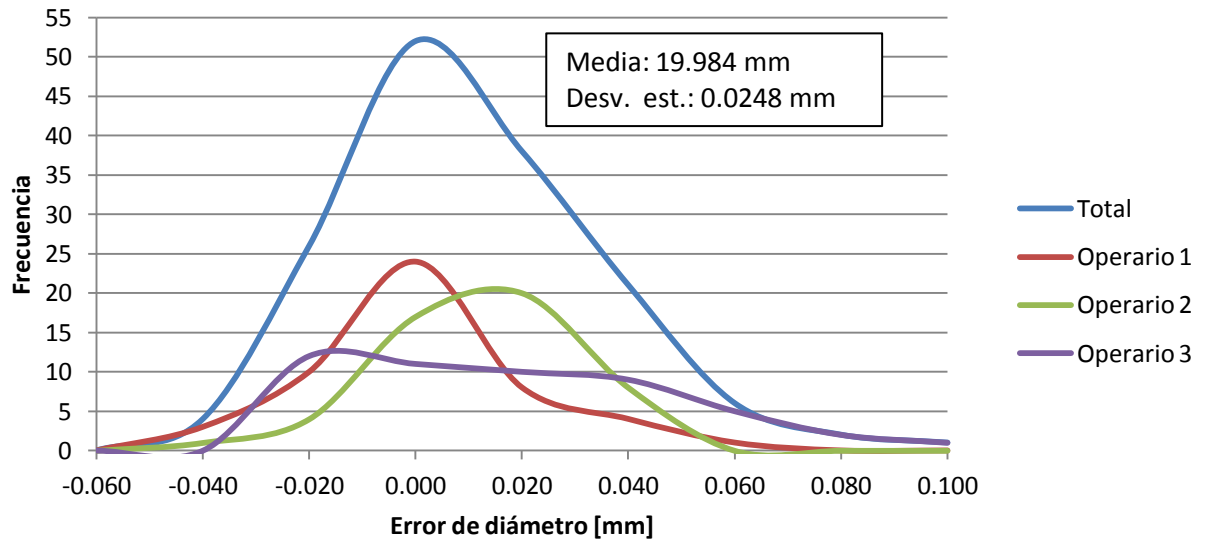
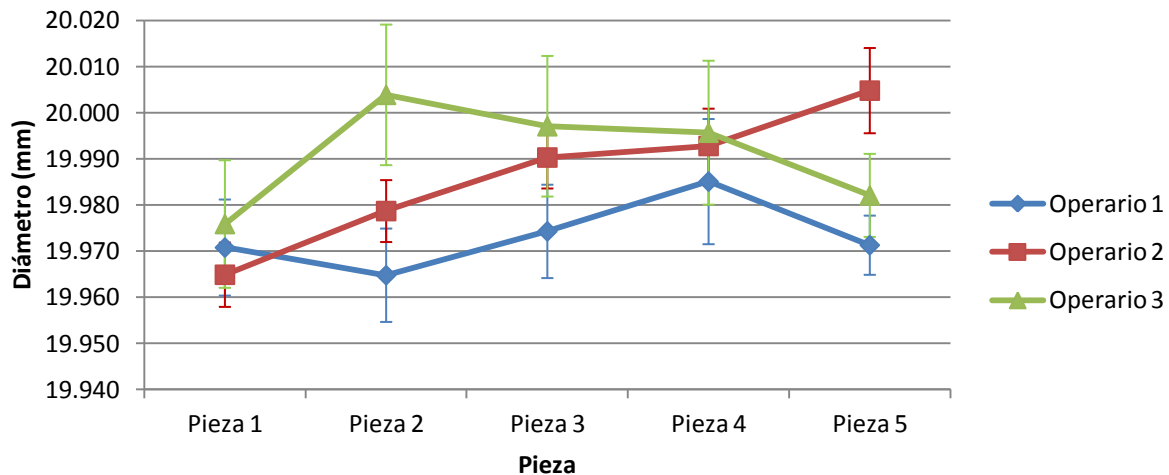


Figura 4 - 20 Ejemplo de gráfica de frecuencia por cada operario

Otro tipo de gráfica es la mostrada en la Tabla 4. 12, donde se representa la media de las mediciones y la desviación estándar para cada medición del patrón y por operario. Esta gráfica muestra en mayor detalle el comportamiento del operario en cada grupo de medición. Nuevamente se vuelve a observar el mayor grado de dispersión del operario 3, sin embargo en el caso de los operarios 1 y 2 se observan diferencias en su comportamiento que no se apreciaban claramente en la gráfica anterior. La dispersión media del operario 1 en las cinco mediciones es de 0,0196 mm mientras que para el operario 2 resulta de 0,0150 mm. El operario 2 tiene mejor comportamiento en los grupos de medición aunque su dispersión global aumenta, por que la media de cada grupo de medición varía en mayor grado. En el caso del operario 1 las medias de sus grupos de medición se mantienen en un rango menor.

Tabla 4. 12 Resultados de desviación para diámetro de esfera

	Operario 1	Operario 2	Operario 3	Total por patrón
Medición 1 del patrón	0,0208	0,0139	0,0276	0,0213
Medición 2 del patrón	0,0202	0,0134	0,0305	0,0272
Medición 3 del patrón	0,0202	0,0134	0,0305	0,0247
Medición 4 del patrón	0,0271	0,0162	0,0312	0,0251
Medición 5 del patrón	0,0128	0,0185	0,0180	0,0214
Total por operario	0,0210	0,0195	0,0296	0,0248



Por otra parte, también se consigue la contribución de los factores de la medición a los resultados obtenidos. Una vez obtenidos los valores del parámetro "p" se puede calcular la contribución de cada factor y para cada tipo de tolerancia en términos de varianza y desviación típica. Se ha comprobado que, en la mayoría de casos, el operario, el patrón y la técnica de medición son factores estadísticamente significativos. En los casos en los que esto no se cumple los valores de varianza o desviación estándar se reducen a 0, ya que se eliminan de los cálculos posteriores. Cuando estadísticamente se dice que un factor no es significativo los resultados se explican mejor por la media de los resultados que por la variación de los factores implicados en la medición. Como se ha mencionado, se calcula la varianza y la desviación estándar para calcular la contribución de cada factor, Tabla 4. 13. Además sea calculado el porcentaje de varianza que pertenece a cada factor ya que la suma de la varianza de cada factor proporciona la varianza total, característica que no ocurre con las desviaciones estándar.

Tabla 4. 13 Ejemplo de varianza y desviación estándar para diámetro de esferas

Factor de incertidumbre	Varianza (mm ²)	Desviación estándar (mm)	% Varianza
Operario/Reproducibilidad	0,000061	0,007804	9,48%
Patrón	0,000024	0,004870	3,69%
Técnica de medición	0,000066	0,008155	10,36%
Brazo de medir/Repetibilidad	0,000491	0,022159	76,47%
Total	0,000642	0,025341	100,00%

De esta manera, al unificar todos los resultados de la contribución de los factores de medición por tipo de tolerancia se puede estudiar el comportamiento de éstos en detalle. La Figura 4 - 21 muestra los resultados para las distintas tolerancias geométricas. La desviación estándar de las tolerancias geométricas se mantiene por debajo de los 0.020 mm, excepto en el caso de perpendicularidad entre cilindros. De acuerdo a estas tolerancias, las mediciones con el brazo de medir por coordenadas se pueden aceptar, ya que estas incertidumbres se encuentran por debajo de la repetibilidad dada por el fabricante para este modelo de brazo de medir, por debajo de los 0.010 mm. También se observa que la componente asociada al patrón es, en la mayoría de los casos, muy inferior al del resto de componentes, por lo que se puede aceptar el patrón como medio para el estudio o evaluación del brazo de medir por coordenadas. En cuanto la técnica de medición, ésta supone una contribución inferior a la del brazo de medir y al operario pero del mismo orden. La planitud de los planos presenta la menor desviación estándar, probablemente debido a la sencillez de medición.

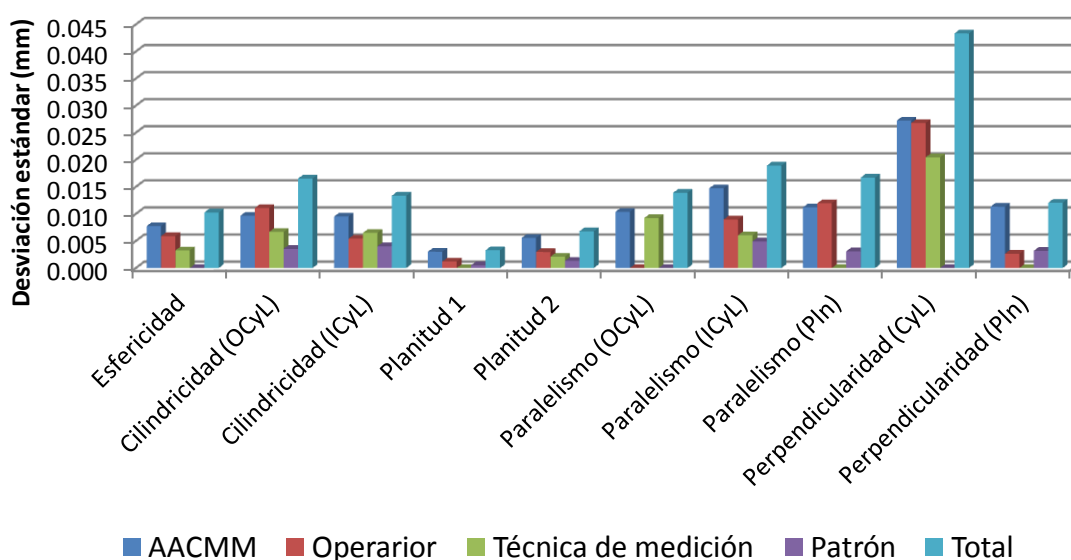


Figura 4 - 21 Desviación estándar para tolerancias geométricas

De los resultados del ensayo también se obtiene la varianza que aporta cada factor a las mediciones. La varianza se obtiene de las medias cuadradas y el número de mediciones

tomadas en cada caso. En el caso de que la interacción, es decir, la técnica de medición, sea significativa su contribución en varianza se resta a la de operario y patrón para que en estos factores no se incluyan los efectos de la interacción. La raíz cuadrada de la varianza pasa entonces a ser la desviación estándar, parámetro comparable con los errores de medición calculados por las normas. También se obtiene el porcentaje de la varianza atribuible a cada factor, representado en la Figura 4 - 22. Porcentualmente se comprueba que la contribución del patrón es muy reducida, por lo que este patrón es aceptado para la evaluación de brazos de medir por coordenadas.

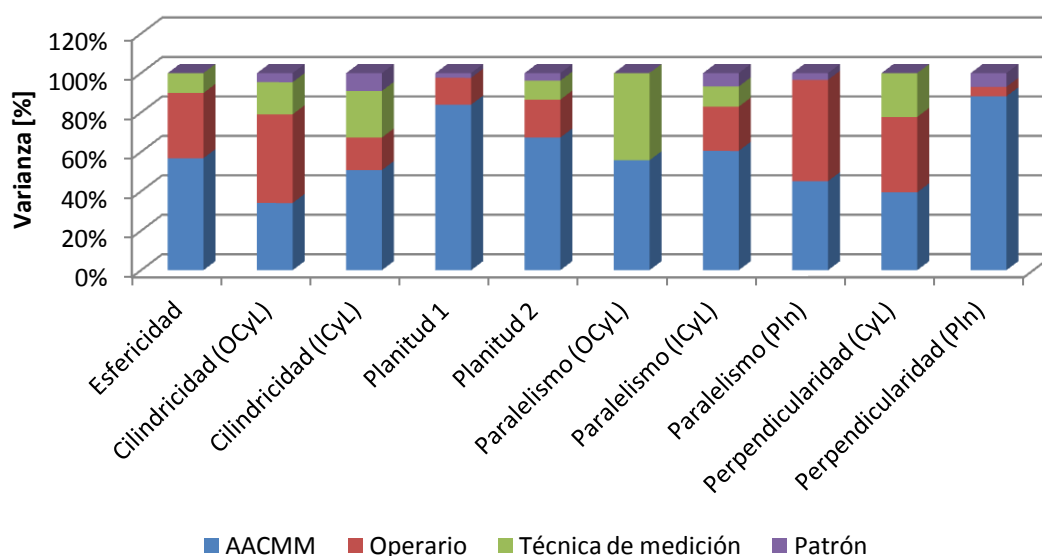


Figura 4 - 22 Porcentaje de varianza para tolerancias geométricas

Análogamente a los resultados anteriores se comprueba que la mayor parte de la variabilidad viene dada por el brazo de medir por coordenadas, siendo en la mayoría de los casos superior al 50%. Esta contribución al error es tan elevada debido a que la incertidumbre total es pequeña, por lo que el error inherente al brazo, a priori un valor constante a lo largo del tiempo para cada tolerancia, es mayor en porcentaje. Por ejemplo, en el error de planitud que corresponde a la tolerancia con menor error total (0.004 mm) la contribución del operario es la menor en porcentaje. En el caso de tolerancias combinadas de planos (perpendicularidad y paralelismo) la diferencia es mayor. Mientras que la perpendicularidad entre planos tiene también una baja contribución del operario a la incertidumbre de medida, en el paralelismo si influye el operario, lo que puede deberse a la distancia entre los planos (1000 mm) y la diferente medición que hace el operario de estos dos planos opuestos y distantes. En el caso de la perpendicularidad los dos planos se han medido de forma similar a pesar de su posición, ya que ambos planos se encuentran muy cercanos en el espacio y en el programa de medición.

El factor operario es el siguiente en importancia, sobretudo en características geométricas más complejas, como esferas y cilindros y en tolerancia que relacionan varios elementos como paralelismo o perpendicularidad entre planos. La contribución de la técnica de medición varía sensiblemente de acuerdo al tipo de elemento, llegando a reducirse al mínimo en el caso del plano. También se observa que en las características donde la dispersión es menor (planos) la contribución del brazo de medir es mayor, lo que indica que cuando el factor operario y técnica de medición son óptimos el brazo de medir resulta más significativo.

En la Figura 4 - 23 se muestran los resultados para las tolerancias dimensionales del ensayo. En el caso de las tolerancias dimensionales de un único elemento (diámetro de esferas y cilindros la desviación estándar es inferior a 40 μm . En los tres casos la incertidumbre debida al brazo de medir por coordenadas es similar, en torno a 0,020 mm. Sin embargo, la incertidumbre debida al operario y la técnica de medición varía significativamente. Las esferas presentan el menor error, lo que se debe a que son elementos que con experiencia en medición resultan cómodos de medir y con uniformidad. En el caso de los cilindros, los interiores presentan menor incertidumbre, debido a las restricciones en la medición provocadas por su geometría. La mayor incertidumbre de los cilindros exteriores se debe a la mayor libertad en la elección de los parámetros de medición y la falta de accesibilidad y visibilidad en algunas partes de la geometría. En cuanto a las tolerancias de distancias, el comportamiento cambia considerablemente. Las contribuciones más importantes a la incertidumbre de la medida son debidas al factor operario y a la técnica de medición, lo que puede deberse a la mayor importancia de estos factores al involucrar la medición de dos características para una tolerancia.

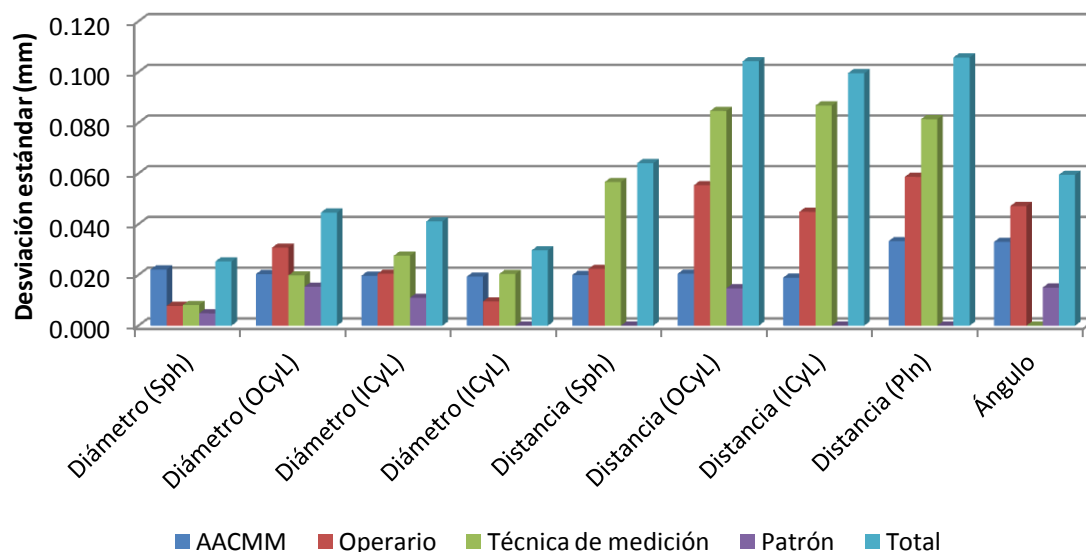


Figura 4 - 23 Desviación estándar para tolerancias dimensionales

En cuanto al porcentaje que cada factor tiene en los resultados de la variabilidad de las mediciones, se observa un comportamiento distinto al de las tolerancias geométricas, Figura 4 - 24. La contribución del brazo de medir por coordenadas es muy inferior con respecto al caso de las tolerancias geométricas salvo en el diámetro de la esfera que puede ser explicado por su baja desviación. El factor operario sigue siendo importante en este caso aunque ligeramente menor que con las tolerancias geométricas y, en todo caso, superior a la contribución del brazo de medir por coordenadas. La técnica de medir aumenta considerablemente su contribución.

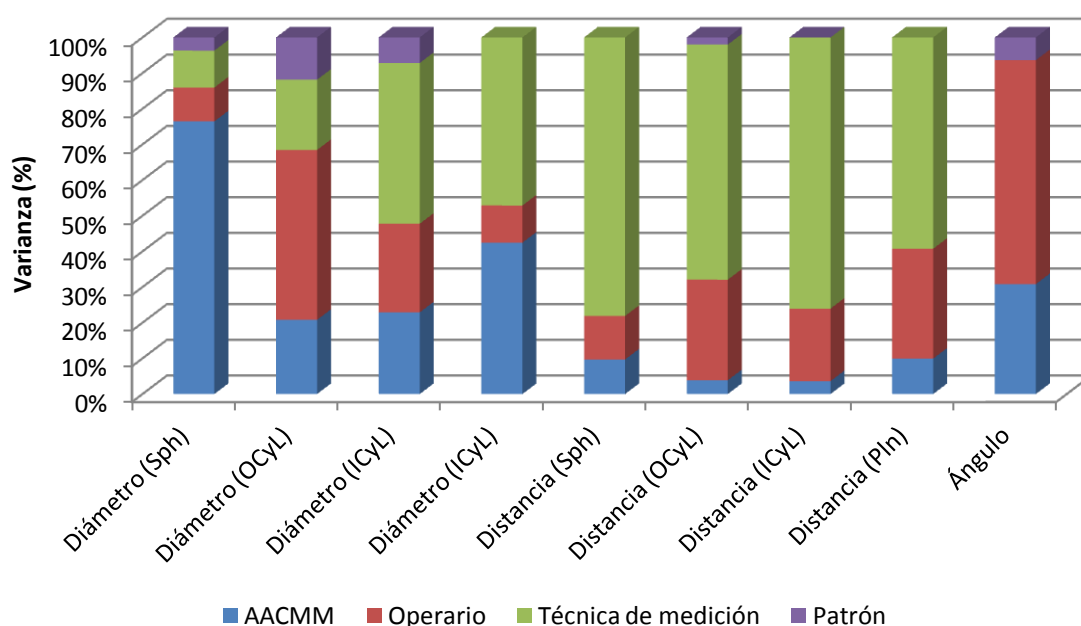


Figura 4 - 24 Porcentaje de varianza para tolerancias dimensionales

De acuerdo a los resultados, las tolerancias dimensionales parecen ser más sensibles al operario y la técnica de medición, lo que se explica por la mayor dispersión total en los resultados de medición mientras el error del brazo se mantiene sobre los 0,020 mm. Es decir, el aumento de error obtenido se debe a la acción del operario y principalmente a la técnica de medición, por lo que es necesario mejorar estos factores ya sea con corrección de la fuerza aplicada, la orientación del palpador, el entrenamiento en técnicas de medición adecuadas, etc., de forma que se pueda reducir el error al mínimo posible y aproximarse al verdadero error del brazo. En el conjunto de tolerancias dimensionales también se observa que la contribución del patrón es también mínimo, por lo que el patrón se considera válido para evaluación de brazos de medir por coordenadas.

Conclusiones parciales

La metodología de evaluación y el patrón de características se presentan como una herramienta capaz de medir la contribución de los operarios, la técnica de medir y del propio brazo en sí. Esta metodología permite evaluar a los operarios y cualificarlos del mismo modo que se hace actualmente con los brazos de medir. Además, es capaz de medir el verdadero error de los brazos de medir y justificar realmente su calibración cuando sea necesario, evitando falsas necesidades provocadas por una deficiente medición del operario o una mala aplicación de la técnica de medición.

Otro de los resultados de la investigación es la posibilidad de utilizar este patrón y metodología como herramientas de entrenamiento y para resalta las deficiencias en la medición operario.

4.5 Ensayo de evaluación con esferas y círculos virtuales

El uso de esferas y círculos virtuales se plantea como una alternativa a las metodologías de evaluación actuales. Estos tipos de características contribuyen con varias ventajas: medición sencilla y rápida, patrón sencillo y barato y su fácil adaptación a las normas de evaluación existentes. Sin embargo, el inconveniente de utilizar estos elementos es que no se mide como se mide realmente una esfera: minimiza la influencia del operario, la distribución de los puntos y la cantidad de puntos. A pesar de que la evaluación con esferas virtuales es incapaz de determinar el error o incertidumbre real que alcanzan los brazos de medir en piezas reales, el procedimiento se presenta como una herramienta útil para los usuarios finales. Los usuarios finales pueden utilizar estos elementos periódicamente para controlar la evolución en el tiempo de sus brazos de medir por coordenadas. Al alcanzar un límite en el proceso de evaluación con esferas virtuales, se deberá evaluar el brazo con características no virtuales y corregir los posibles errores.

En el patrón de características utilizado en los apartados anteriores se han mecanizado asientos cinemáticos para formar los círculos virtuales, Figura 4 - 25. El patrón dispone de dos pares de círculos virtuales (1, 2, 3 y 4). Los círculos virtuales tiene un diámetro aproximado de 63 mm y la distancia que les separa es de 921 y 500 mm, círculo 1-2 y círculo 3-4 respectivamente.

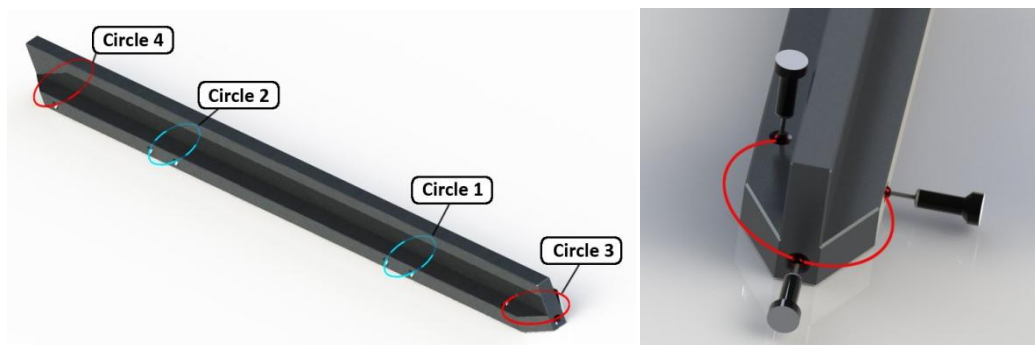
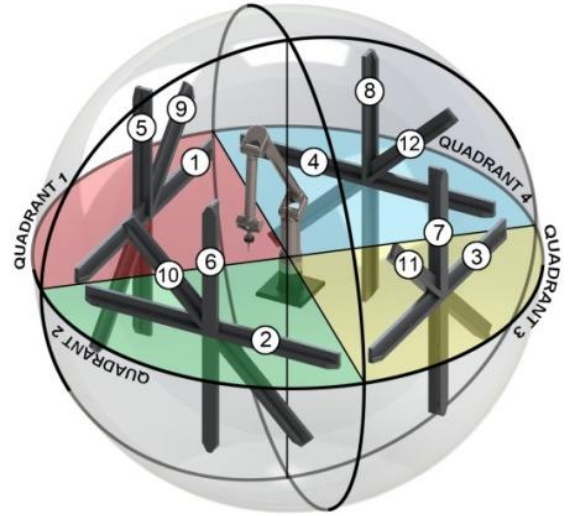


Figura 4 - 25 Círculos virtuales del patrón

Tanto las esferas virtuales como los círculos virtuales se han medidos siguiendo la misma metodología que se utilizó con el patrón de características. Sin embargo, debido a la mayor rapidez del ensayo se ha elevado a 15 las repeticiones para cada esfera o círculo virtual y las posiciones se han ampliado a 12, Tabla 4. 14. Las condiciones ambientales del ensayo también se han mantenido como en el ensayo anterior, 20 ± 1 °C.

Tabla 4. 14 Posiciones de evaluación para las esferas virtuales

Posición	Orientación del patrón	Cuadrante
1	Horizontal	1
2	Horizontal	2
3	Horizontal	3
4	Horizontal	4
5	Vertical	1
6	Vertical	2
7	Vertical	3
8	Vertical	4
9	45°	1
10	45°	2
11	45°	3
12	45°	4



4.5.1 Resultados

La evaluación del brazo de medir se realiza con tres parámetros de los círculos virtuales: el error de centro, el error de diámetro y el error de distancia. La imposibilidad de medir los círculos virtuales con la MMC obliga a utilizar los valores medios para el conjunto de mediciones como valores de referencia. El error de centro se calcula como la distancia entre el centro de cada medición y las coordenadas medias del centro, Ec. 4. 12. El error de diámetro es la diferencia entre el diámetro leído en cada medición y el diámetro medio, Ec. 4. 13. El error de distancia es la diferencia entre la distancia entre centros de cada medición y la distancia media Ec. 4. 14.

$$\text{Error de centro} = \sqrt{(X_i - X_m)^2 + (Y_i - Y_m)^2 + (Z_i - Z_m)^2} \quad \text{Ec. 4. 12}$$

$$\text{Error de diámetro} = \phi_i - \phi_m \quad \text{Ec. 4. 13}$$

$$\text{Error de distancia} = d_i - d_m \quad \text{Ec. 4. 14}$$

Estos parámetros han sido calculados para cada esfera y círculo virtual en cada medición. Posteriormente, se ha calculado la media de cada parámetro y la desviación estándar para cada posición medida. Estos parámetros se utilizaron para evaluar los brazos de medir por coordenadas análogamente a las normas internacionales ASME y VDI. La Figura 4 - 26 muestra, a modo de ejemplo, los resultados de los errores de centro para las esferas 1 y 2 y círculos virtuales 1.1 y 1.2. Como se puede observar, el error de centro es siempre positivo por la propia definición de distancia; la mayoría de mediciones presenta un error inferior a 0,040 mm para ambas características virtuales. Las mediciones de cada esfera o círculo se han

separado horizontalmente ligeramente sobre su indicador de posición para mejorar la comprensión visual de los resultados.

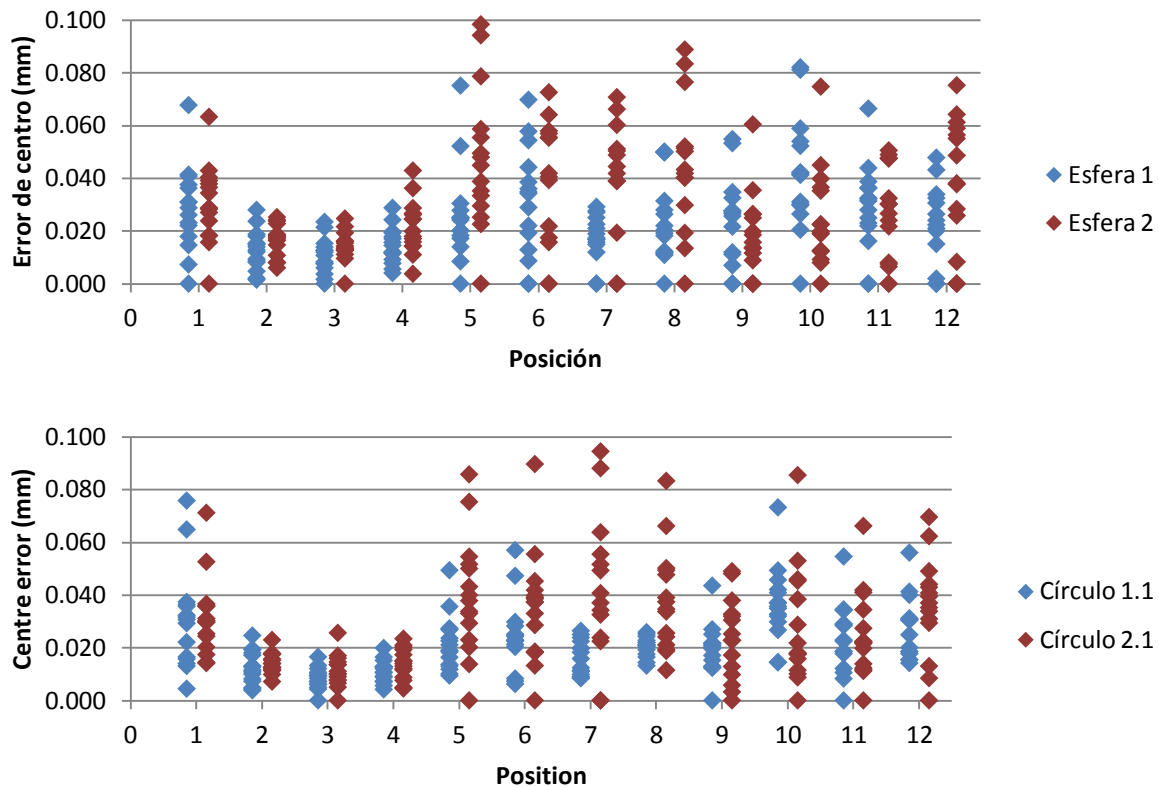


Figura 4 - 26 Error de centro para esfera 1 y 2 y círculos 1.1 y 2.1

Se han obtenido resultados similares para los errores de diámetro y de distancia, Figura 4 - 27 y Figura 4 - 28. En estos casos, tanto el error de diámetro como de distancia pueden ser negativos o positivos según sean menores o mayores al diámetro y distancia media, utilizados como referencia.

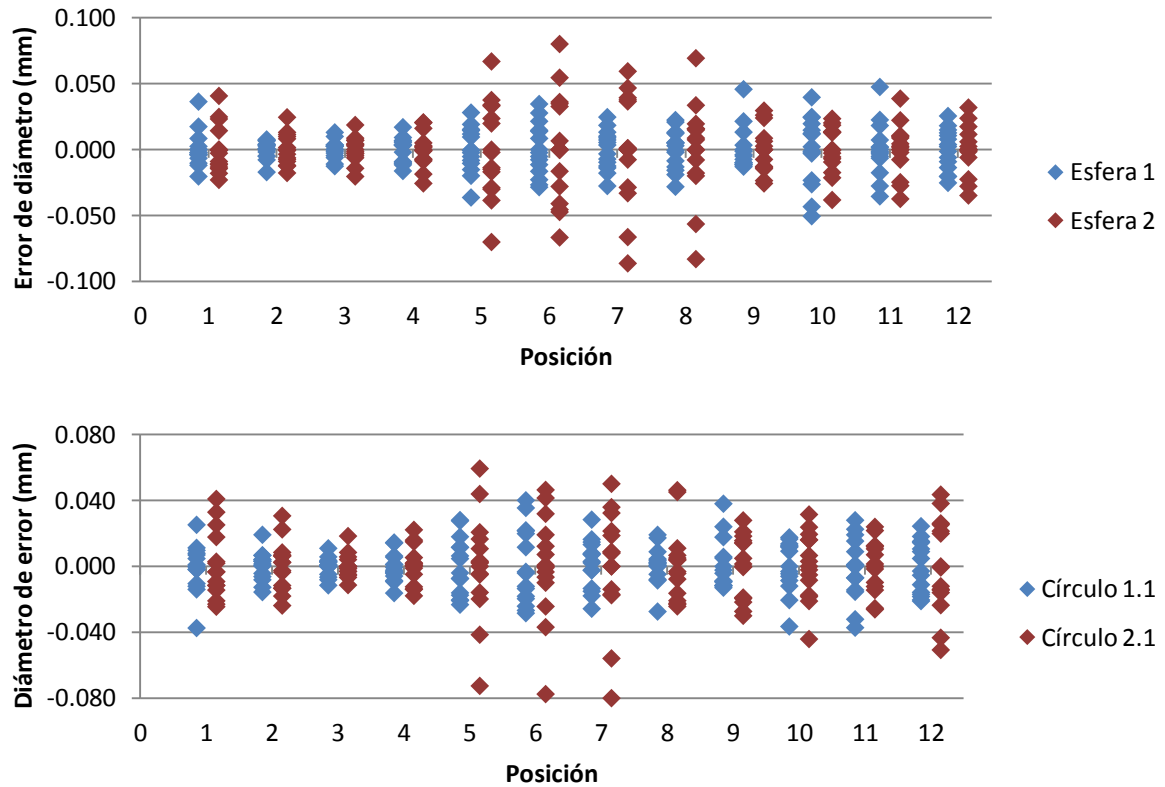


Figura 4 - 27 Error de diámetro para esfera 1 y 2 y círculos 1.1 y 2.1

En cuanto al error de distancia, se muestran el error entre las esferas y la distancia entre los círculos 1.1 y 1.2 y los círculos 1.2 y 2.2, Figura 4 - 28.

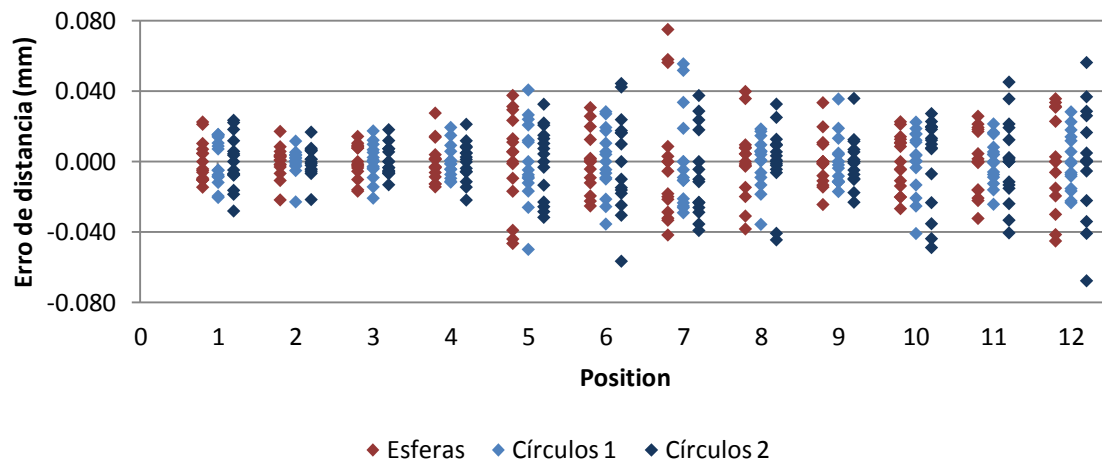


Figura 4 - 28 Error de distancia para esfera 1 y 2 y círculos 1.1 y 2.1

Los datos obtenidos de las mediciones se trataron para obtener la media de los resultados y su desviación estándar, Figura 4 - 29. El error de centro muestra que ambos elementos (círculos y esferas) tienen un comportamiento semejante por posiciones por lo que podrían utilizarse, a priori, como elementos equivalentes.

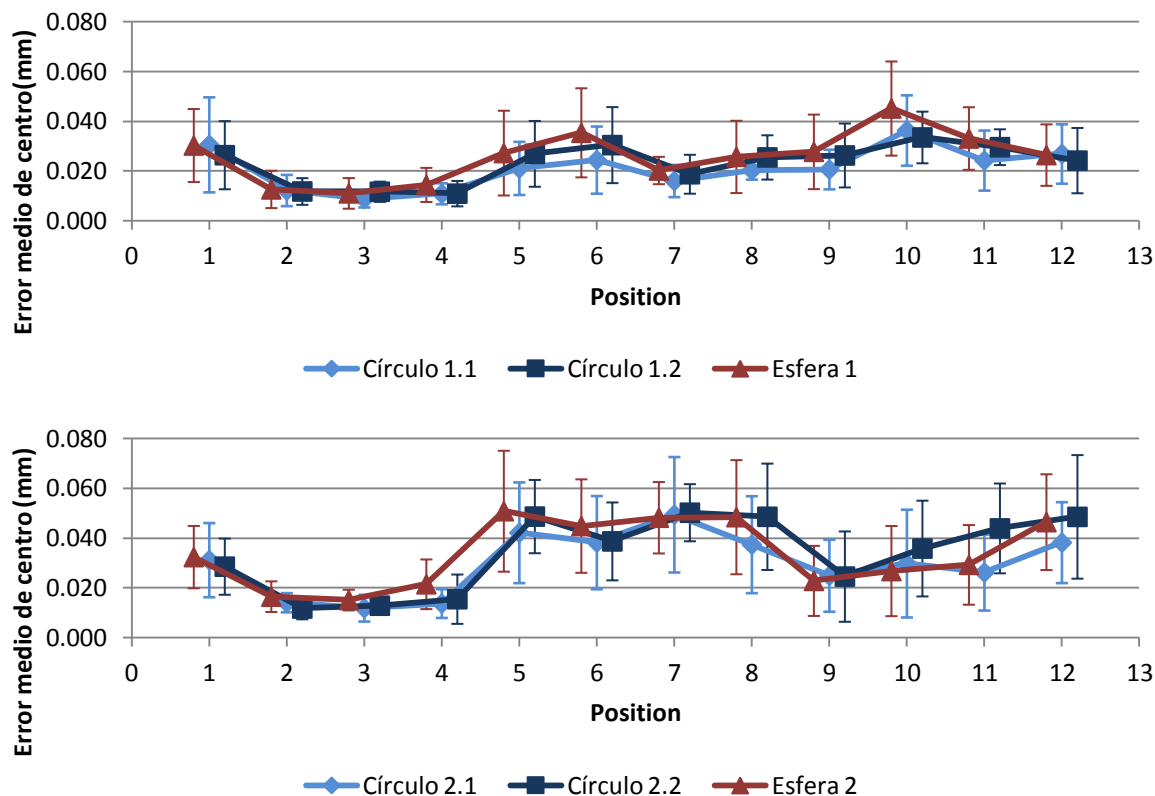


Figura 4 - 29 Error medio de centro para esferas y círculos virtuales

En el caso del error de diámetro y de distancia no tiene sentido calcular el error medio ya que cada error se calcula sobre la media del total de mediciones por cada posición. Por esta razón los resultados de estos parámetros se presentan como la desviación estándar de cada posición, Figura 4 - 30, Figura 4 - 31. Además se han comparado las esferas y los círculos de cada extremo (esfera 1 con círculos 1.1 y 1.2 por una parte y esfera 2 y círculos 2.1 y 2.2 por otra parte) ya que ambas utilizan los mismos asientos cinemáticos. En primer lugar se observa que el círculo virtual es semejante a la esfera virtual aunque a los círculos virtuales les afectan en mayor grado los posibles errores de medición al tener menos puntos para compensar su desviación. Por otra parte se ha notado que las posiciones extremas de algunos puntos a medir en algunas posiciones del patrón conllevan a una medición menos cuidadosa y a mayores errores. En general las posiciones horizontales (1-4) tienen mejores resultados ya que su medición es cómoda para el operario. En el caso de las mediciones inclinadas y verticales los elementos del extremo 2 tienen a situarse a una altura de peor accesibilidad para el operario por lo que las mediciones muestran mayor variabilidad.

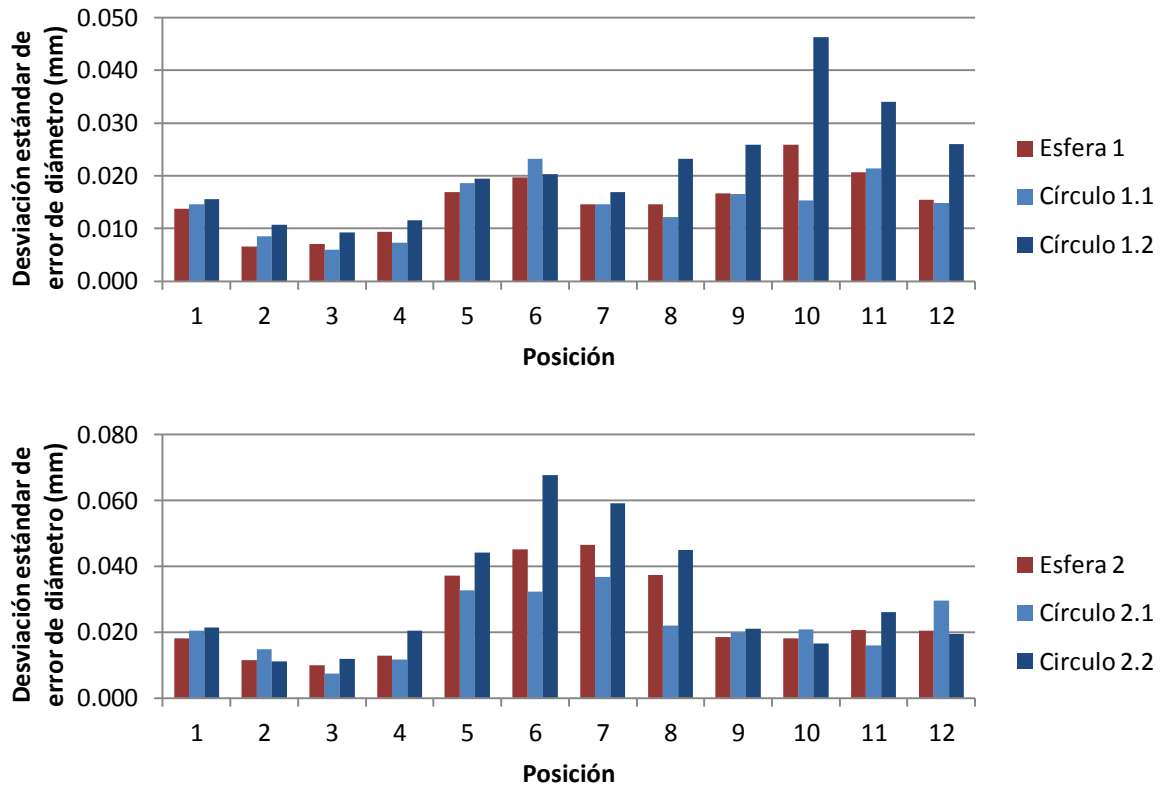


Figura 4 - 30 Desviación estándar para error de diámetro de esferas y círculos virtuales

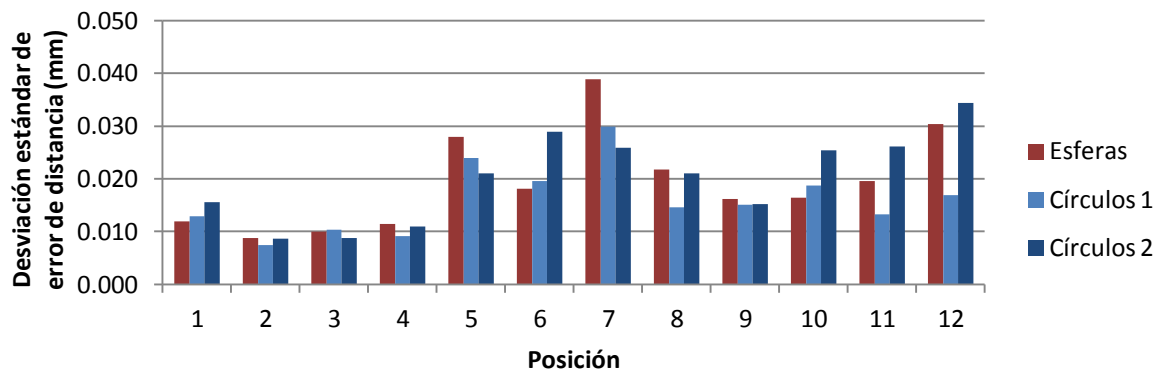


Figura 4 - 31 Desviación estándar para error de distancia de esferas y círculos virtuales

La desviación del conjunto de mediciones se utiliza como parámetro final de comprobación del estado del brazo de medir, de forma similar al valor RMS mostrado en la norma ASME y la desviación estándar mostrada en los ensayos del patrón de características. De los resultados de esta Tabla 4. 15 se obtiene que el valor RMS de las esferas es siempre mayor a la desviación estándar ya que añade el efecto de la desviación con respecto al valor de calibración del elemento (distancia o diámetro). También se extrae que las desviaciones estándar del diámetro de los elementos virtuales son superiores a las de las esferas tradicionales aunque dentro de niveles aceptables. Sin embargo en el caso de las distancias la

desviación estándar de los elementos virtuales es notablemente inferior a la distancia entre esferas tradicionales.

Tabla 4. 15 Desviaciones estándar globales de esferas y círculos virtuales.

	Error de centro (mm)	Error de diámetro (mm)	Error de distancia (distancia) (mm)
Esferas 0	-	0,0121 RMS: (0,0312)	0,088 (RMS: 0,0918) (960)
Esferas 4	-	0,0162 RMS: (0,0384)	
Esf. virt.1 1	0,0160	0,0155	0,0201 (921)
Esf. virt. 2	0,0201	0,0263	
Cír. virt 1.1	0,0129	0,0148	0,0163 (921)
Cír. virt 2.1	0,0227	0,0227	
Cír. virt 1.1	0,0126	0,0231	0,0209 (500)
Cír. virt 2.2	0,0207	0,0338	

4.5.2 Conclusiones

La metodología de evaluación con esferas virtuales se presenta como una herramienta rápida capaz de controlar la evolución del estado de los brazos de medir por coordenadas aunque no es capaz de cuantificar su error real. Ante la dificultad de establecer la distancia y diámetro de los elementos virtuales con MMC las lecturas se realizan con respecto a la media. Por lo tanto, esta metodología comprueba variaciones en el estado de los brazos de medir por coordenadas en términos de repetibilidad y no de desviación de los valores calibrados. Además, la medición de los asientos cinemáticos está guiada por su geometría lo que permite limitar y reducir el efecto de los operarios sobre las mediciones. Por otra parte y dada la rapidez del proceso, se puede ampliar el proceso a un mayor número de posiciones, distancias y repeticiones.

Las ventajas que ofrecen estos elementos animan a seguir con su estudio. El diseño de patrones con un mayor número de esferas o círculos, ya sea en barra o placa, presenta la posibilidad de reducir aún más el tiempo de evaluación. Además, asientos cinemáticos adicionales ayudarían a extender su estudio a elementos virtuales con error de forma o incluso a otros elementos como cilindros virtuales aunque la complejidad de fabricación aumentaría.

Evaluación de la influencia del operario: fuerza de contacto

5.1 Introducción

Los instrumentos de medición están sujetos a numerosas fuentes de error que alteran las mediciones y añaden incertidumbre al proceso de medición. Estas fuentes de error producen pequeños cambios en la estructura de los brazos de medir no contemplados en el modelo cinemático que los define. La acción conjunta de todas las fuentes de error genera el error final de estos instrumentos y determinan la precisión que pueden alcanzar. Por otra parte, la redundancia de la estructura de los brazos de medir por coordenada complica el cálculo de los errores de medición así como el cálculo de las posibles correcciones y la incertidumbre de asociada a la medición. Los factores que afectan a la precisión final de los instrumentos de medida se dividen en: el propio instrumento, las condiciones de medición (temperatura, vibraciones, suciedad, presión etc.), las características de la pieza a medir (forma, tamaño, características geométricas, rugosidad, accesibilidad) y la estrategia de medición (número de puntos, distribución, velocidad de medición, fuerza de disparo de contacto orientación del palpador etc) como se ha visto en los capítulos anteriores (*Shen, 1996*) (*Cauchick-Miguel, 1996*) (*Schwenke, 2008*).

Comúnmente los errores propios de las MMC se separan en errores de la propia máquina y en los errores del sistema palpador (*Schwenke, 2008*). El estudio y corrección de las fuentes de error de estos sistemas y la corrección de sus efectos negativos han permitido alcanzar la precisión actual de las MMC. Los estudios relativos a las MMC analizan cómo estudiar los errores de los ejes que componen el sistema de referencia de la MMC, los efectos térmicos, el comportamiento dinámico de los componentes de la MMC entre otros. Sin embargo, la estructura cinemática de los brazos de medir por coordenadas es totalmente distinta y no puede ser estudiada de igual manera. En este punto, se han realizado estudios del modelo cinemático de los brazos a través de la optimización de dicho modelo por diferentes metodologías de calibración y métodos matemáticos que establecen una base para la posibles correcciones de las fuentes de error que afecten a las medidas. En cuanto a los errores del sistema palpador, los autores estudian su comportamiento con parámetros de medición específicos (orientación, fuerza de contacto...) y desarrollan modelos para predecir o calcular su error. El palpador es un elemento común a MMC y brazos de medir por coordenadas aunque en el caso de las MMC han sido mucho más desarrollados y estudiados. En el capítulo 3, se ha visto que los tipos de palpadores de brazo de medir por coordenadas son más simples,

generalmente pasivos y aunque existen palpadores con detección de contacto su comportamiento parece no aportar mejoras en la precisión del brazo a la vista de que no existe una mejora significativa en la precisión presentada por los fabricantes y tampoco señalan mejoras en la calibración con el uso de estos palpadores. Además, no existen estudios de evaluación con estos palpadores y asimismo deben ser ajustados a la medición manual, muy diferente a la medición automatizada de las MMC.

De los factores que afectan a los brazos de medir por coordenadas Vrhovec et al. (*Vrhovec, 2007*) señalaron que la deflexión es uno de los factores más importantes en magnitud y naturaleza por su carácter no predictivo. Asimismo, 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. El operario en el uso de los brazos de medir utiliza normalmente dos puntos de apoyo: uno en la articulación del codo para posicionar el brazo en la forma deseada; 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 asegurar que el punto se toma “correctamente” lo que supone directamente la fuerza de contacto soportada por el palpador.

Por otra parte, existen palpadores especializados en la tarea de calibración que no corresponden con el palpador usado en la medición de piezas reales. Santolaria et al. (*Santolaria, 2008*) o Furutani et al. (*Furutani, 2003*) fabricaron sus propios palpadores para agilizar la toma de datos en la calibración. Sin embargo, la omisión del palpador real en el proceso de calibración de los brazos provoca que los errores inherentes a las mediciones con los palpadores reales no estén optimizados y el error de los palpadores se traduzca directamente en errores de medición. En algunos modelos de brazos actuales el palpador es calibrado antes de tomar mediciones pero este proceso únicamente corrige la posición del palpador en el montaje en el brazo de medir. De esta manera, el estudio de la deflexión en el palpador cubre una importante fuente de error en los brazos de medir por coordenadas no considerada actualmente.

Además, el factor operario influye en los errores de los brazos de medir por medio de los parámetros de medición. El control manual causa falta de uniformidad en los parámetros de medición, es decir, el operario es el encargado de establecer (intuitivamente) la fuerza de contacto en cada punto, la orientación del palpador con respecto a la superficie de medición, la velocidad de medición, la estrategia de medición (en continuo o punto a punto), la

distribución de los puntos (aunque se preestablezca de antemano una distribución determinada), la posición del brazo y el momento de toma de las coordenadas del punto de contacto. Toda la variabilidad que inevitablemente es aportada por el operario está lejos de parecerse a la medición con MMC lo que provoca que cada punto tenga un error desconocido y dependiente de los parámetros de medición impredecibles de antemano. La variabilidad de los parámetros de medición también se ve afectada por el tipo de elemento medido ya que los cambios en la superficie y la accesibilidad a todos los puntos de contacto provoca el cambio de orientación y el esfuerzo aplicado durante la medición. La complejidad del estudio de estos parámetros en el comportamiento de los brazos de medir estriba en la imposibilidad de establecer niveles fijos para cada parámetro al contrario que en las MMC.

El estudio del operario y del palpador en el comportamiento del brazo de medir por coordenadas requiere analizar los estudios sobre palpadores en MMC. Los autores estudian el error que añaden los palpadores, llamado *pretravel*, a través de distintos métodos para compensarlo en las mediciones posteriores, Figura 5 - 1.

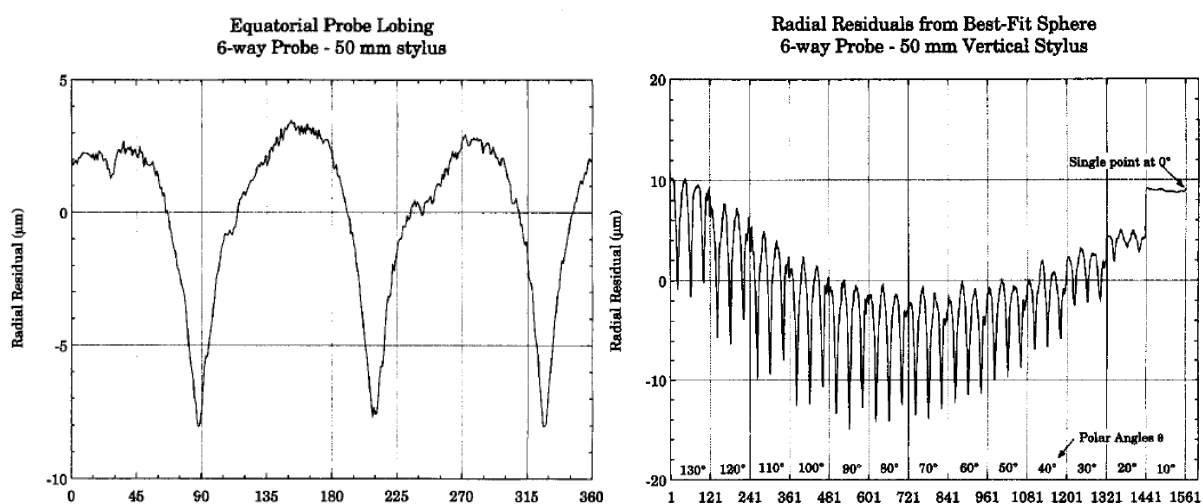


Figura 5 - 1 Error del palpador
Fuente: (Estler, 1996)

Una forma de estudiar los palpadores consiste en utilizar instrumentos ajenos a la propia MMC para medir la posición verdadera del palpador en el momento de contacto y compararla con la lectura de la MMC. Otra forma incluye el modelado geométrico-matemático del comportamiento del palpador para después ser aceptado en ensayos con la máquina. También existe la posibilidad de estudiar los errores del palpador al medir la geometría de una pieza-patrón para obtener los errores del palpador con respecto a una superficie conocida. De esta manera las gráficas de *pretravel* suelen mostrar el error cometido

de acuerdo a la posición radial del punto de contacto en la esfera del palpador y la posición acimutal, Figura 5 - 1. El error cometido por los palpadores depende de: el tipo de palpador, la suspensión (touch-trigger), condiciones del palpador, esfera del palpador y la fuerza del palpador. El estudio de los palpadores en las MMC se centra en los palpadores del tipo touch-trigger por ser los de uso más común.

a) Tipo de palpador

Existen varios tipos de palpadores y cada uno lleva asociado una estrategia de detección de contacto y unas características cinemática distintas. Los palpadores rígidos están formados por una geometría fija sin ningún sistema de percepción de contacto donde el contacto es determinado por el operario. Aunque estos palpadores son los más comunes en brazos de medir por coordenadas (justificado por su control manual) en las MMC no se utilizan.

Los palpadores de disparo por contacto (touch trigger) detectan el contacto automáticamente al superar una fuerza de contacto determinada. Este tipo de palpadores son los más utilizados en MMC (*Cauchick-Miguel, 1998*) ya que permiten la automatización de la medición y eliminar el error de percepción de contacto del operario. Su error depende de la cinemática del palpador y el mecanismo de detección de contacto. El error de estos palpadores tiene una forma característica en concordancia con la geometría del sistema de detección de contacto.

Los palpadores de contacto continuo (scanning) permiten capturar puntos de medición de forma cuasi-continua a lo largo de una línea. Este tipo de palpador logra mantener el contacto entre palpador y pieza durante la medición y recoger grandes cantidades de puntos en poco tiempo. Como desventaja, al error cometido por estos palpadores se añade el error inducido por la medición en movimiento (*Pereira, 2007*).

b) Suspensión

La suspensión que asegura la posición del palpador (touch trigger) puede ser: pasiva (muelle) o activa (electromagnético). En el primer caso las propiedades dinámicas, debido a su menor masa y el precio son una ventaja. En el segundo se puede alcanzar un error de palpado independiente de la dirección de la fuerza de palpado. La fuerza con la que actúa la suspensión es un parámetro configurable que se mantiene fijo durante una medición y puede llegar a ser de pocas milésimas de Newton. En algunos estudios de los parámetros de los

palpadores algunos trabajos no consideran este parámetro y se mantienen fijo (*Shen, 1999*) (*Estler, 1996*). Otros analizan su influencia en las mediciones con repeticiones con fuerzas fijadas a distintos niveles (*Wozniak, 2005a*).

c) Cinemática del palpador

Los palpadores poseen patrones de respuesta en función de la dirección de contacto ya sea por su cinemática, la suspensión, asimetría de las inercias, disposición de sensores internos, disposición de ejes, la superficie de contacto o desviaciones en la bola de la punta. La cinemática de los palpadores puede dividirse en serie o en paralela (*Yagüe, 2009*). La dirección en la que el palpador reacciona al contacto de la superficie determina la forma en la que abre el circuito y por lo tanto el error que comete (*Estler, 1996*). El estudio de este tipo de palpadores en brazos de medir puede resultar más complejo debido a la variación continua de la posición del palpador y del acercamiento al punto de contacto.

d) Condiciones ambientales

La temperatura cambia las dimensiones de los componentes de palpador y de la pieza a medir de manera compleja. Las vibraciones añaden errores en las propias mediciones y alteran la posición relativa de los componentes del palpador. Sus efectos pueden ser minimizados en las MMC debido a su ubicación en salas acondicionadas y bancadas anti-vibración sin embargo no son tan controlables en el uso de brazos de medir. La limpieza se considera otra condición ambiental ya que puede alterar el comportamiento de los palpadores de alta precisión.

e) Esfera del palpador

Las esferas son el elemento encargado de establecer el punto de contacto con la pieza por lo que los errores que contenga (error de forma y diámetro) se transmiten directamente al error de medición. Además el tamaño de las esferas suaviza el perfil de las superficies de la pieza a medir ya que no entra en las hendiduras (*Weckenmann, 2004*), Figura 5 - 2

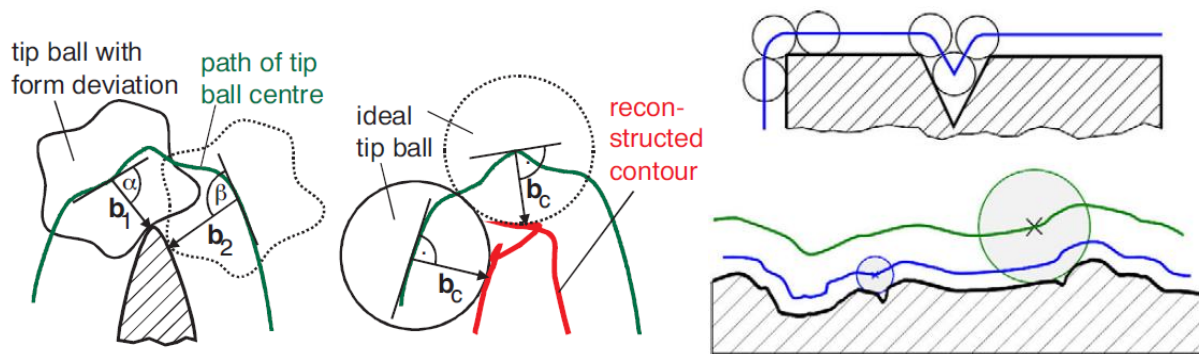


Figura 5 - 2 Error en la esfera del palpador

Fuente: (Weckenmann, 2004)

f) Fuerza de palpado

La fuerza de palpado es el límite de fuerza que determina el contacto o apertura del circuito del palpador. Cuanto mayor fuerza de contacto permita el sistema mayor será el error cometido por el palpador. En MMC, este error se sitúa en décimas o centésimas de Newton y es constante por lo que sus efectos son mínimos. Sin embargo, en la medición con brazos de medir por coordenadas su control depende del operario y para asegurar el contacto con la pieza el operario ejerce un exceso de fuerza. La fuerza de contacto produce deflexión en el palpador de acuerdo a la longitud del palpador, el diámetro del eje del palpador, el material del palpador, la dirección de la fuerza, (Cauchick, 1998) o las deformaciones plásticas (Hertz) al hacer contacto con la pieza. Además, la dirección de la fuerza, dada por la superficie de la pieza, influye en la forma de abrir el contacto y el error cometido (Estler, 1996).

g) Calibración

La calibración y el estudio de los errores de los palpadores se realizan habitualmente con una esfera de calibración cuyo error de forma es muy bajo y el diámetro es conocido con alta precisión. Como resultado de la calibración se obtiene la localización del centro de la esfera del palpador y su diámetro efectivo así como los posibles errores que comete el palpador en la medida, Figura 5 - 3. El estudio simultáneo de todas las fuentes de error es complejo por lo que normalmente se calcula el error del palpador experimentalmente con instrumentos complementarios. Algunos autores utilizan esferas de calibración y a partir de sus datos conocidos calculan la diferencia con las mediciones obtenidas con la MMC de acuerdo a los parámetros de medición preestablecidos (Estler, 1996) (Weckenmann, 2004). De esta manera, la posición medida por el palpador es corregida con el *pretravel* calculado con la esfera de calibración. En el caso de brazos de medir por coordenadas el estudio del error del

palpador se complica debido a la imposibilidad de mantener constantes los parámetros de medición en la calibración y establecer un “mapa” del *pretavel* o error del palpador de acuerdo a los parámetros de medición. En los estudios de palpadores analizados, cada autor considera su propio criterio para determinar cuáles son los errores de calibración apropiados y su propio método para compensarlos.

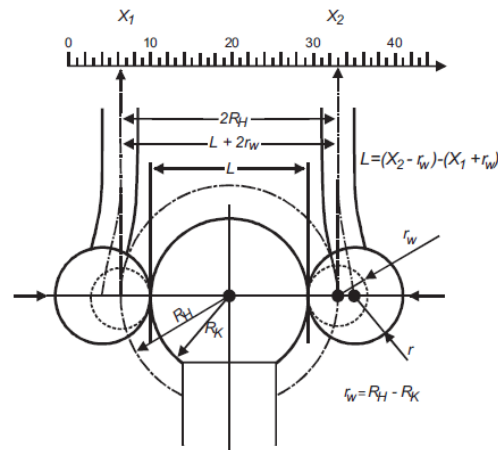


Figura 5 - 3 Error en la calibración con esfera
Fuente: (Estler, 1996)

Los autores estudian los palpadores proponiendo modelos de su comportamiento, realizando ensayos en los que se cuantifica el error del palpador o se verifica el modelo propuesto y calculando la compensación aplicable al palpador.

i. Modelado del error del palpador

Estler et al. (Estler, 1996) estudian los palpadores de disparo por contacto en posición vertical y horizontal ya que la gravedad afecta al mecanismo de detección de contacto de distinta manera en función de su posición. Además, los autores consideran la deflexión del palpador, el ángulo de contacto y las fuerzas de medición, Figura 5 - 4. En este estudio además se comprobó que la fuerza a compresión es despreciable al ser la deformación a compresión 1500 veces inferior a la deflexión del palpador.

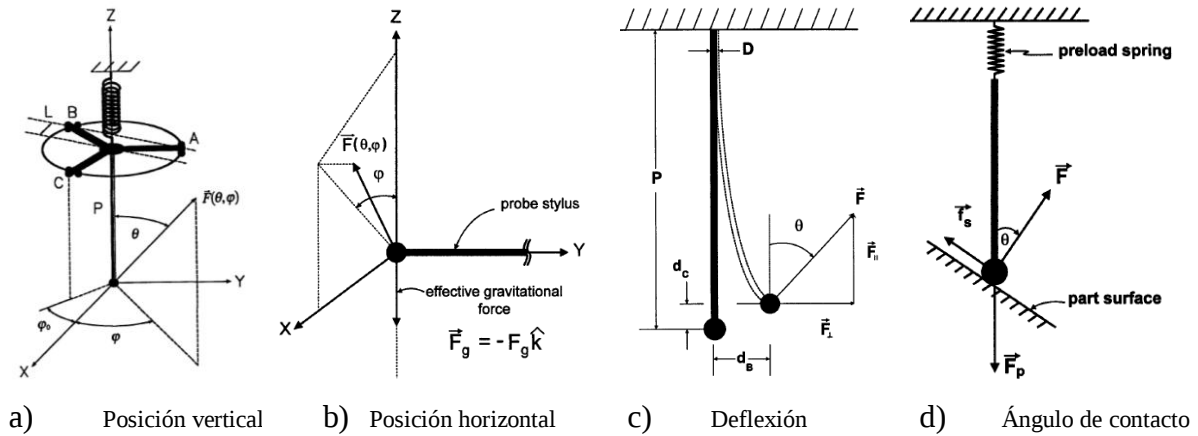


Figura 5 - 4 Parámetros de medición del palpador

Fuente: (Estler, 1996)

En un trabajo posterior, Estler et al. (Estler, 1996) añaden al modelo la asimetría del sistema, por defectos de fabricación y la cantidad de puntos necesarios para validar el modelo. Philips et al. (Philips, 1998) estudiaron el error del palpador al medir un anillo patrón y considerar la dirección del palpador. Además también estudiaron la relación entre la distribución de los puntos y el error de palpado. El estudio lo repite para tres valores de ángulo acimutal y, con ello, generaron un modelo de acuerdo al ángulo radial de contacto.

Yang et al. (Yang, 1996) también utilizaron un modelo ayudado de redes neuronales en el que consideran las condiciones ambientales, la fuerza de impacto, la geometría del palpador y su rigidez para obtener el error del palpador. Shen et al. (Shen, 1999) diseñaron su propio modelo para palpadores en posición horizontal considerando el ángulo radial y polar, la acción de la gravedad y la deflexión del palpador en la medición sobre cilindros de pequeño diámetro. Para cada valor de ángulo acimutal obtuvieron el error del palpador. Además, estudiaron la influencia de la velocidad de medición en el error del palpador. En un trabajo posterior Shen et al. (Shen, 2001) propusieron otro modelo para palpadores que incluye las fuerzas de contacto, el ángulo de aproximación y el peso de la punta del palpador.

Wozniak et al. (Wozniak, 2003) proponen un modelo basado en (Estler, 1997) en el que marcan dos fases en la medición: contacto y aseguramiento. Además, incluyen el estudio de la rigidez de la esfera del palpador, la velocidad de palpado y la histéresis del palpado. El estudio se extiende a varias posiciones del palpador, Figura 5 - 5.

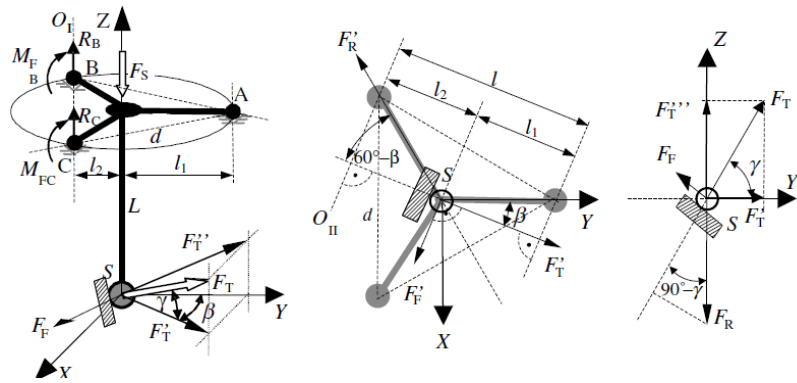


Figura 5 - 5 Modelo de corrección del palpador
Fuente: (Wozniak, 2003)

También se considera la deformación de Hertz del palpador provocada por la interacción entre la esfera y la pieza. El modelo fue implementado para obtener los movimientos del palpador en 3D, lo que permite estudiarse simultáneamente más parámetros y sus efectos: longitud del palpador, su diámetro, la fuerza del muelle de la suspensión, la dirección de aproximación, la fricción y la histéresis, Figura 5 - 6. El modelo se puso a prueba satisfactoriamente en ensayos experimentales documentados en su siguiente trabajo (Dobosz, 2003).

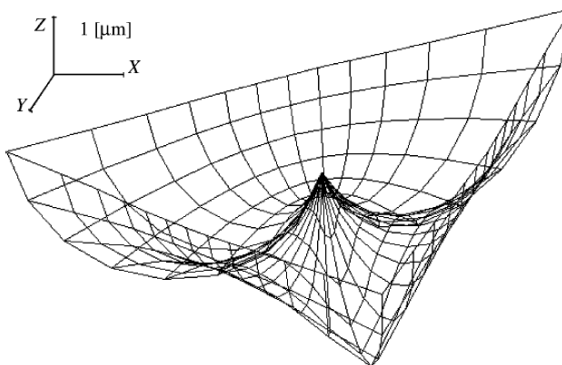


Figura 5 - 6 Modelo 3D de corrección de error de palpador
Fuente: (Dobosz, 2003)

En otro trabajo Wozniak et al. (Wozniak, 2005b) consideran la dirección de palpado, la deflexión del palpador proporcional a la fuerza aplicada y la deformación de Hertz considerando varias rigideces y radios de punta y de curvatura de la pieza. Aunque no se incluye directamente en el modelo matemático analizan también piezas de distintas rugosidades y varias fuerzas de aseguramiento del muelle para posteriormente comprobar su influencia en el error cometido por medio de técnicas estadísticas, Análisis de varianza (ANOVA).

ii. Metodologías de cálculo del error del palpador

Los ensayos llevados a cabo por los autores, tanto para verificar sus modelos como para obtener los valores reales de *pretravel*, consisten en medir una superficie patrón con el palpador. De esta manera algunos autores utilizan esferas o cilindros de calibración en el que conocen la geometría medida y el error en la medición es asignado al palpador. En sus estudios sobre la separación de los errores debido a la MMC y al palpador, Nafi et al. (Nafi, 2011a) (Nafi, 2011b) obtienen el error de los palpadores al medir una esfera de calibración.

Otros autores utilizan artilugios externos capaces de leer la posición de la punta del palpador en el momento del contacto para medir el error del palpador. Además el palpador puede estudiarse en su funcionamiento conjunto con la MMC o por separado. Wozniak et al. (Wozniak, 2003) señalan que no es una técnica precisa ya que la precisión de la MMC es comparable a la del palpador y por ello realizan sus ensayos con el sistema del palpador por separado.

Dobosz et al. (Dobosz, 2003) proponen un nuevo método para conocer la posición real del palpador en el momento del contacto mediante un transductor de alta precisión, Figura 5 - 7. El palpador ocupa una posición fija y el transductor simula el movimiento de medición para calcular los errores reales del palpador. De esta manera obtienen el error del palpador para cada orientación con el que corrigen las futuras mediciones en la MMC.

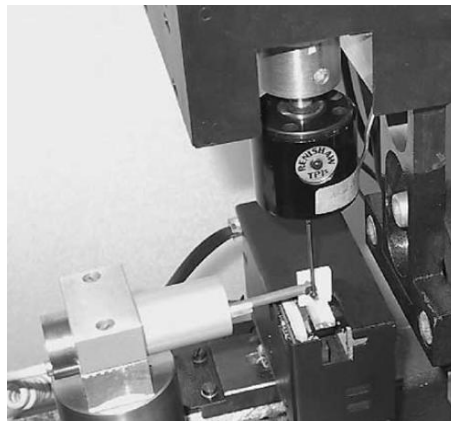


Figura 5 - 7 Estudio del palpador con transductor
Fuente: (Wozniak, 2003)

En una trabajo similar. Wozniak et al. (Wozniak, 2005b) y Dobosz et al. (Dobosz, 2005) presentan un transductor en una mesa rotativa, Figura 5 - 8. El palpador permanece en una posición fija y es el transductor con la mesa rotativa el que simula el movimiento y el contacto con el palpador. Además, este estudio analiza la influencia de la geometría de la pieza al adherir piezas de geometrías diferentes en el extremo del transductor.

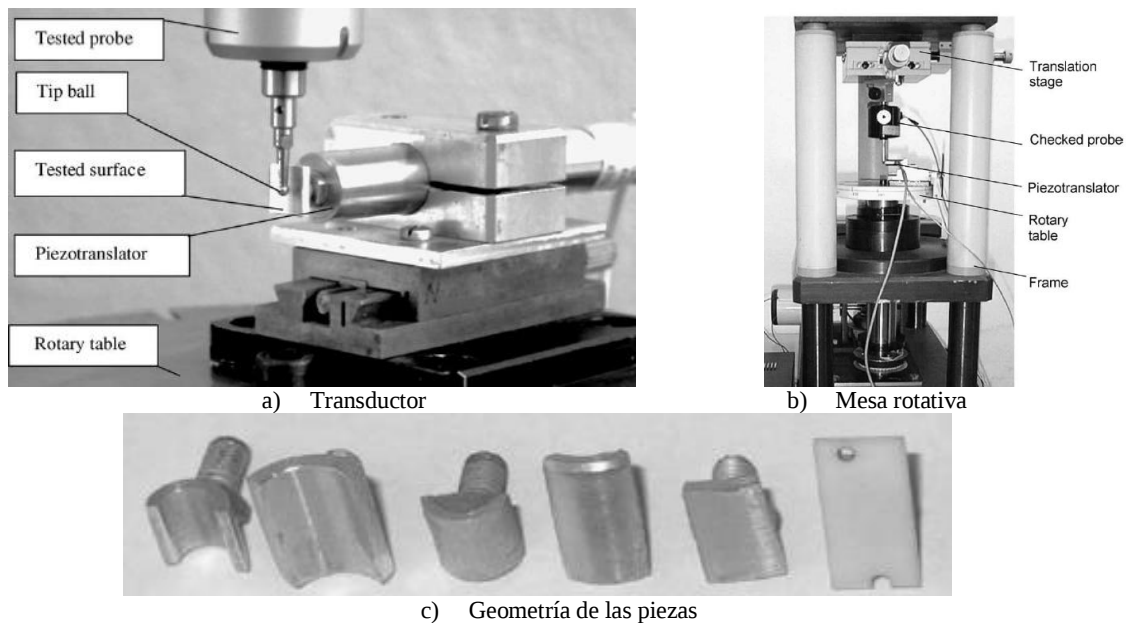


Figura 5 - 8 Estudio de palpador con transductor y mesa rotativa
Fuente: (Wozniak, 2005a) (Dobosz, 2005)

Wozniak et al (Wozniak, 2005b) caracterizan el comportamiento de los palpadores variando la fuerza de contacto, la longitud del palpador y su rigidez con la ayuda de un transductor de alta precisión que mide la posición del palpador en el momento que este percibe el contacto.

Desde otro enfoque, al estudio de los palpadores, Pereira et al. (Pereira, 2007) utilizan anillos patrón unidos a transductores que permiten medir la fuerza de palpado en todo momento, Figura 5 - 9. Además también hace uso de un encoder de rejilla de no contacto para comprobar el contorno que describe la MMC en su medición.

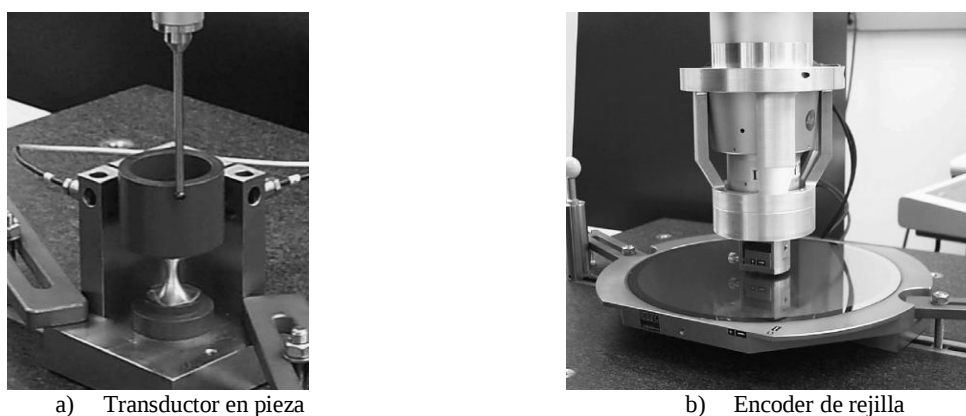


Figura 5 - 9 Estudio de palpador con transductor en pieza y encoder de rejilla
Fuente: (Pereira, 2007)

Desde otro punto de vista, Liang et al. (Liang, 2012) diseñaron su propio palpador en el que implementaron galgas extensiométricas para conocer los esfuerzos de medición, Figura 5 - 10. Además aplicaron el método de elementos finitos al diseño del patrón para unir el

modelo y su deformación a las mediciones obtenidas por las galgas. Weckenman et al. (Weckenmann, 2004) en su repaso a los sistemas de palpado recogen el uso de galgas extensiométricas como una manera de calcular la deflexión del palpador.

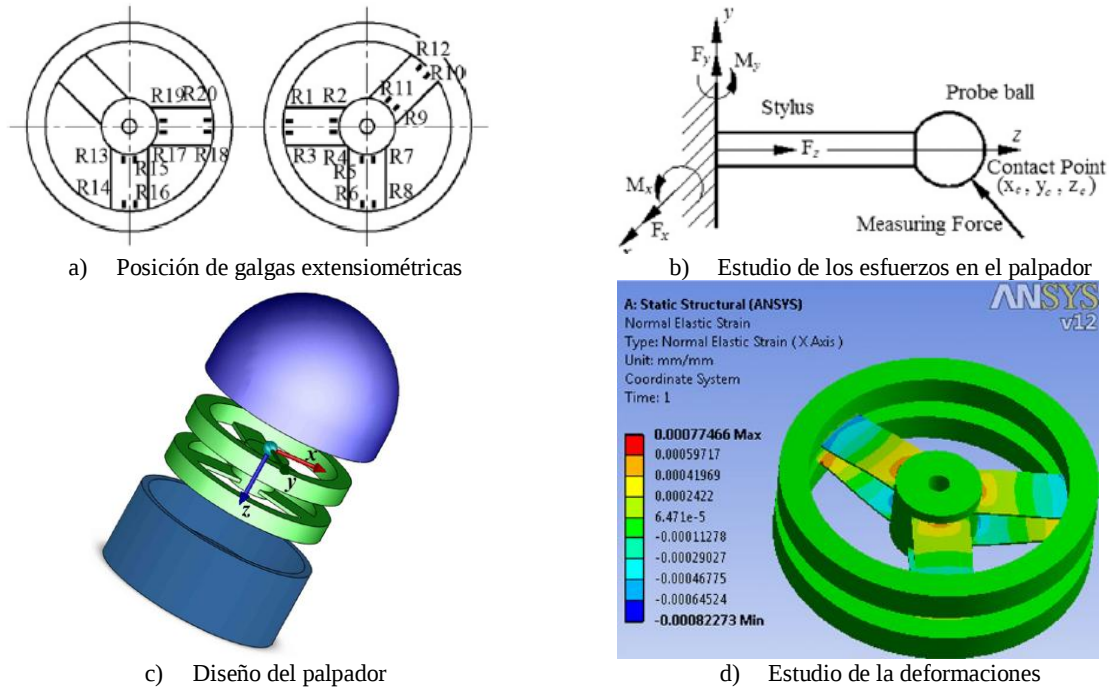


Figura 5 - 10 Estudio de palpadores con galgas extensiométricas

Fuente: (Liang, 2012)

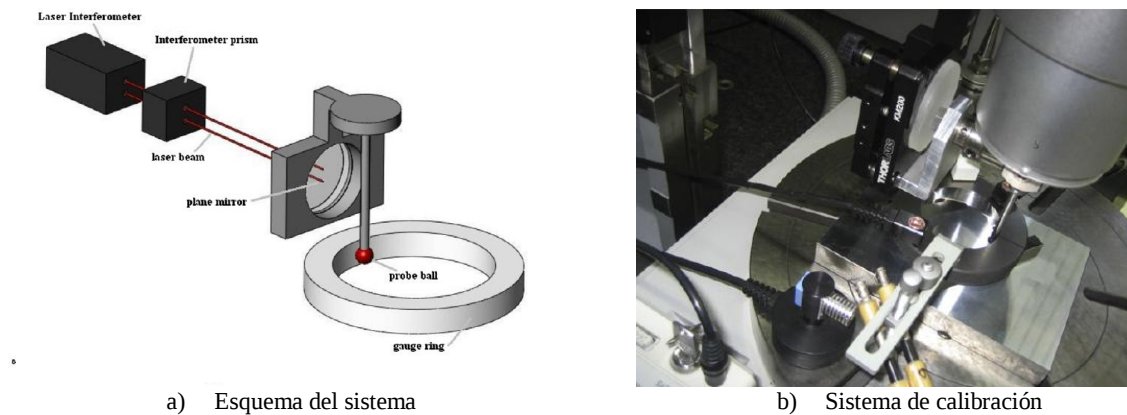
Yagüe et al. (Yagüe, 2009) propusieron un sistema para calibrar los palpadores en continuo con un patrón con repetibilidad por debajo de la micra. Este patrón puede adoptar varias posiciones y orientaciones gracias a sus asientos cinemáticos, Figura 5 - 11. Con su medición se obtienen los errores del palpador y su calibración de forma rápida. Además el palpador es estudiado independientemente de la MMC, por lo que se utilizó un sistema para sujetar el palpador y simular la medición.



Figura 5 - 11 Calibración de palpador con cubo patrón

Fuente: (Yagüe, 2009)

Otra forma de cuantificar el error de los palpadores es medir su posición en el momento de contacto con interferómetros. Tadej et al. (Tadej, 2011) mide un anillo patrón y con un sistema recoge la variación entre la posición del palpador y la posición leída por la MMC, Figura 5 - 12.



a) Esquema del sistema

b) Sistema de calibración

Figura 5 - 12 Calibración de palpador con interferómetro

Fuente: (Tadej, 2011)

iii. Compensación

En cuanto a la forma de compensar los errores obtenidos por el modelo o experimentalmente los autores aplican varias técnicas. Shen et al. (Shen, 1996) modelan los errores del palpador con redes neuronales para después corregir los errores. Yang et al. (Yang, 1996) también hace uso de esta técnica. En los casos donde se realizaron modelos matemáticos predictivos, la corrección se realiza tras la verificación del modelo compensando las coordenadas de la MMC de acuerdo a los parámetros del modelo (Phillips, 1998) (Wozniak, 2003) (Dobosz, 2003) (Wozniak, 2005a) (Dobosz, 2005).

La aceptación de los ensayos se realiza generalmente estudiando la reducción en el error cometido con una pieza de geometría conocida. Wozniak et al (Wozniak, 2003) (Wozniak, 2005b) y Dobosz et al. (Dobosz, 2003) utilizan técnicas estadísticas ANOVA para aceptar la mejora en los resultados y la influencia de los parámetros sobre las medidas. Pereira et al. (Pereira, 2007) reconstruyen el error del palpador obtenido en sus ensayos con Fourier para después compensar los valores de acuerdo a los parámetros de la medición.

El error asociado al sistema de palpador es uno de los elementos que aporta más incertidumbre a las MMC. Estas máquinas trabajan en un rango de errores menor que los brazos de medir por coordenadas y aunque sus factores están altamente controlados y estudiados los palpadores son una parte importante a tener en cuenta en la mejora de las MMC. En el caso de los brazos de medir por coordenadas, la fuerza de deformación que

soportan los palpadores y los errores que aportan son mayores y no se han estudiado por lo que este capítulo se dedica a estudiar el factor fuerza de contacto y sus efectos sobre el palpador para proponer posteriormente modelos de corrección.

5.2 Desarrollo de sensor de medición de la fuerza de contacto

El factor operativo, además de otros factores relativos a la característica geométrica medida y del palpador, ha sido identificado como un factor que necesita un estudio más detallado ya que incluye multitud de parámetros que directamente o indirectamente dependen de su control. Del estado del arte, Vrhovec et al. (*Vrhovec, 2007*) ya señalaron la deflexión como un error importante la cual está provocada por la fuerza de contacto en el palpador y no está actualmente corregida. Además se trata de un factor que aunque el operario desarrolle habilidades de medición óptimas seguirá siendo muy superior a la fuerza de contacto de las MMC y con efectos negativos importantes. Por otra parte, la deflexión provocada por el contacto se aplica en el palpador, que normalmente se omite en el proceso de calibración del brazo de medir. En resumen, se considera que la fuerza de contacto ejercida por el operario sobre el palpador produce una deflexión que altera la posición del palpador y que afecta directamente al comportamiento cinemático del brazo al no estar considerados, los palpadores reales, en los procesos de calibración existentes. Por estas razones, en este capítulo se plantea la medición de la fuerza de contacto con varios objetivos:

- Estudiar la influencia de los diferentes operarios y su técnica de medición en el uso de los brazos de medir por coordenadas.
- Relacionar la fuerza de contacto en la medición con los errores cometidos al medir diferentes las características geométricas.
- Proponer modelos de corrección de fuerza de contacto y sus efectos con la información obtenida en los puntos anteriores.

De las técnicas de medir la fuerza de contacto mostradas en el apartado anterior, se ha elegido el uso de galgas extensiométricas por varios motivos. En primer lugar se decidió medir las fuerzas de contacto en el palpador cuando éste está instalado en el brazo de medir y en mediciones reales ya que, aunque el estudio del palpador por separado es posible, la forma de medir manual no puede ser simulada fácilmente sin un operario y un brazo de medir por coordenadas. En segundo lugar, el uso de transductores de alta resolución no es necesario ya que las fuerzas son de 1 N aproximadamente y superiores a este valor habitualmente y es complicado ajustar la dirección de la fuerza al sistema de coordenadas del palpador. Además se debe implementar algún mecanismo que permita conocer la fuerza captada por el

transductor (en módulo y dirección) sobre el sistema de referencia del palpador y no del transductor, para estudiar sus efectos en la deformación de este. Por la misma razón se descarta métodos de medición del error del palpador con interferómetros. En tercer lugar, existen en el mercado sensores triaxiales o sensores similares que permiten medir las fuerzas en brazos robot o sistemas similares pero no están ajustados en tamaño, peso y rango de medida a los brazos de medir. Por último, aunque algunos de estos métodos son posiblemente aplicables a los brazos de medir por coordenadas el coste de la adquisición de los equipos necesarios (sensores triaxiales, transductores) es excesivo. En conclusión, se han elegido galgas extensiométricas porque permiten conocer la fuerza de contacto directamente en el palpador, se ajustan a la medición con brazo de medir y este método no supone un coste excesivo.

Los palpadores básicos y más utilizados están formados por cilindros de varios diámetros acabados en la esfera de medición o una punta. La longitud de los cilindros así como su diámetro y material determina la deflexión que sufrirán bajo una fuerza de contacto determinada. Los tipos de palpadores disponibles para el brazo de medir son los siguientes:

- Palpador pasivo con esfera de rubí. Se poseen dos modelos de este tipo: uno de 45 mm de largo y esfera de rubí de 4 mm y otro de 85 mm de largo y esfera de rubí de 6 mm. A mayor longitud mayor deflexión que sufren en la medición pero un palpador más largo permite medir geometrías más complejas en toda su extensión, especialmente agujeros cilíndricos.
- Palpador pasivo con esfera de acero para calibración. Este palpador de 50 mm de longitud y esfera de 15 mm está pensado para la calibración de los palpadores y la verificación del propio brazo. Su uso no se extiende a las mediciones de las piezas de inspección.
- Palpador pasivo de punta, Figura 5 - 13. Este palpador carece de esfera (se considera esfera de radio 0). La medición se realiza de forma similar a la de palpadores con esfera pero el operario debe asegurar que el punto se toma con la punta del palpador. Además este palpador puede sufrir deformación o desgaste en la punta lo que significa pérdida en la precisión de medición.



Figura 5 - 13 Palpadores del brazo de medir por coordenadas

El palpador elegido para instalar el sistema de medición de la fuerza de contacto es el palpador de esfera de rubí de 6 mm y 85 mm de longitud. La elección se debe a razones de medición y accesibilidad a las características geométricas y de espacio para instalar el sistema de medición de fuerza de contacto.

5.2.1 Diseño

Las fuerzas de contacto que actúan en la medición con brazo de medir son las mismas que en la medición con MMC salvo por su magnitud. La dirección de la fuerza es perpendicular a la superficie y su punto de aplicación se encuentra en el propio punto de contacto entre la esfera del palpador y la superficie de la pieza. La fuerza puede ser descompuesta en las direcciones de los ejes de los sistemas de referencia del palpador, Figura 5 - 14. Esto es, eje Z en dirección longitudinal del palpador y eje X y Y formando un plano perpendicular al eje Z y también perpendiculares entre ellas. La descomposición de la fuerza de contacto en el sistema de referencia del palpador es adecuado para conocer las fuerzas que actúan sobre el palpador ya que producen compresión (eje Z) o deflexión (eje X y Y). De esta manera la fuerza de contacto se descompone en componentes F_x , F_y y F_z . Cada fuerza se mide por un conjunto de galgas extensiométricas en forma de puente Wheatstone en un circuito independiente. Debido a la geometría de palpador únicamente hay espacio para colocar dos galgas, por tanto para medir dos componentes de la fuerza. Se eligieron una de las componentes de deflexión F_x y la componente de compresión F_z para estudiar los efectos de los dos tipos de esfuerzos.

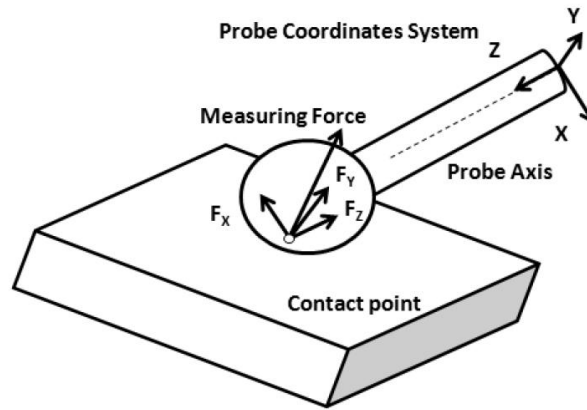


Figura 5 - 14 Fuerza en el contacto entre palpador y pieza

El sistema está compuesto por dos circuitos de galgas en la superficie del palpador. El puente de Wheatstone utilizado en el palpador se sitúa en su superficie, Figura 5 - 15. Se implementaron dos circuitos en el palpador, uno para cada tipo de fuerza. El circuito compuesto por las resistencias o galgas R3, R4, R5 y R6 está diseñado para la medición de la fuerza F_z a compresión. La colocación del circuito se realiza en el extremo de la parte más ancha del palpador ya que la compresión es teóricamente igual en todo el elemento. Dos de las galgas se colocan longitudinalmente y otras dos transversalmente de forma que en la medición de la compresión se eliminan los efectos de la deflexión y los cambios en la resistencia debidos a la temperatura. En el caso de la fuerza a flexión (F_x o F_y) el circuito está formado por las resistencias R1, R2 y Rint. La medición de la fuerza a flexión es suficiente con medio puente de Wheatstone, R1 y R2. Las resistencias Rint corresponden a resistencias pasivas, no galgas, que utiliza el instrumento de recogida de la señal del puente para completar el circuito. Estas galgas se sitúan longitudinalmente en el cilindro mayor en la zona de mayor sensibilidad a flexión. El esquema de la colocación de las galgas en el palpador se repite por el lado opuesto del palpador.

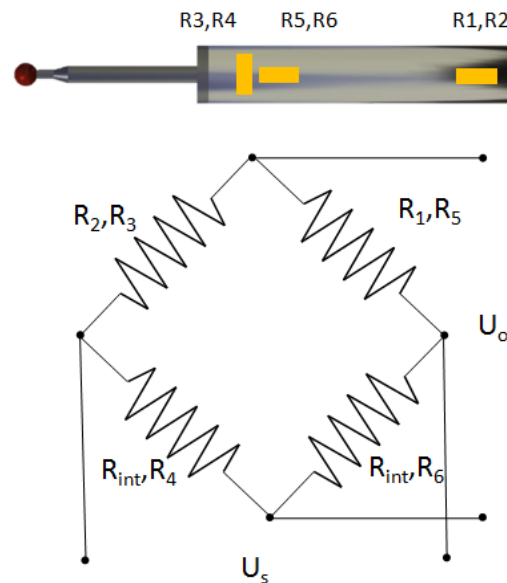
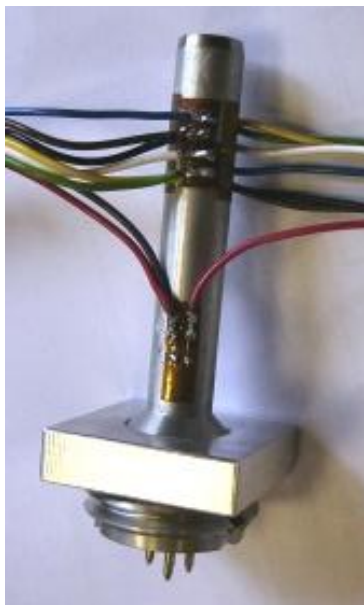


Figura 5 - 15 Distribución de las galgas extensiométricas en el palpador

Las galgas utilizadas son específicas para el material del palpador y del fabricante HBM. Las resistencias R1 y R2 son modelo 1-LY13-3/350 formado por galgas individuales y las galgas R3, R5 y R4, R6 son modelo 1-XY13-3/350 formado por dos galgas perpendiculares unidas. La resistencia nominal de las galgas es de 350 ohmios, dato necesario para la configuración posterior del equipo de recogida de la señal del circuito de galgas. Tras implementar las galgas en el palpador y cablear el circuito el palpador está preparado para leer las señales de fuerza, Figura 5 - 16.



a) Palpador con el sistema de medición de la fuerza de contacto



b) Palpador montado en el brazo de medir



c) Brazo de medir con el sistema

Figura 5 - 16 Sistema de medición de la fuerza de contacto

El siguiente paso consiste en recoger las señales de los puentes de Wheatstone y transformarlas en las fuerzas de contacto. Para esta tarea se utilizó un instrumento de

adquisición de señales Dewetron 3201, Figura 5 - 17. Este es un equipo que puede recoger un amplio tipo de señales y tratarlas primariamente. El cableado de cada circuito se organiza en un conector db9 que se conecta al Dewetron. El sistema permite recoger las dos señales de los dos circuitos al mismo tiempo por lo que no es necesaria una sincronización de ambas señales. Las señales son recogidas a 1000 Hz y se pueden almacenar en distintos tipos de formatos (.xls, .mat entre otros). El tratamiento de las señales y el ajuste de la señal primaria se realiza con el programa Dewesoft del mismo fabricante que el equipo Dewetron.

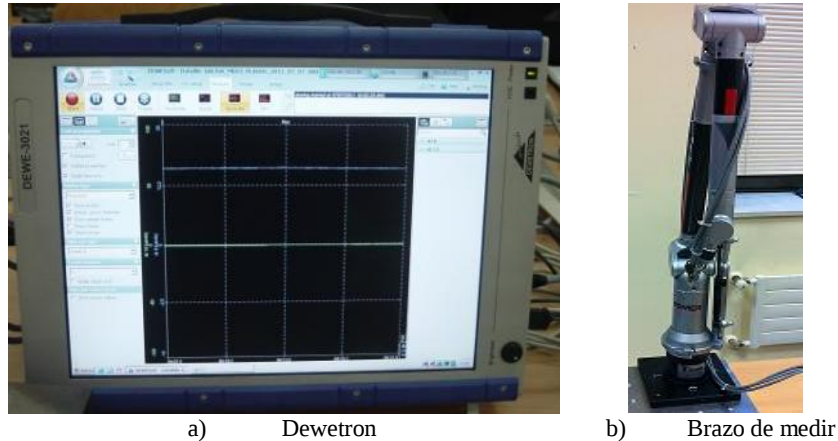


Figura 5 - 17 Equipo de adquisición de datos y brazo de medir por coordenadas

Para calibrar la señal es necesario aplicar cargas de fuerza conocida y ajustar la lectura obtenida tanto para cargas a compresión como a flexión. La relación entre el peso aplicado y la lectura de las galgas se supone lineal, por lo que sólo es necesario determinar dos puntos. En ensayos posteriores se puede comprobar que la fuerza puede llegar en muchos casos a 5 N y en algunos casos superar 10 N. Por esta razón se eligió un peso de 1300g (13 N aproximadamente) para la calibración, a priori elevado o muy superior a la fuerza en MMC. El primer punto se realiza sin carga, es decir, 0 g de masa calibrada, que se asocia a la señal recibida sin carga o 0 N. El segundo punto se consigue con la pesa de 1,3 kg, que se asocia a la señal proporcionada por los circuitos con ese peso. De esta manera las señales finalmente almacenadas son directamente señales de fuerza en Newtons.

Para asegurar la linealidad se realizó un ensayo aplicando diferentes pesos en las direcciones de las fuerzas F_x y F_z . Visualmente la relación entre el peso utilizado para simular la fuerza y la fuerza leída es lineal. Los coeficientes de determinación (R^2) entre ambas variables son de 0.9997 y 0.09994 para flexión F_x y compresión F_z , respectivamente. De acuerdo con este resultado se considera el sistema calibrado y que se ajusta a la lectura de la fuerza de contacto.

Para el tratamiento posterior de la señal de la fuerza de contacto se utilizó Matlab. Las fuerzas se almacenaron en formato .mat. Como ejemplo, la Figura 5 - 18 muestro el resultado de un registro de fuerza de contacto. La fuerza a compresión F_z , línea roja, es negativa por tratarse de compresión y la fuerza a flexión F_x , línea verde, puede variar en positivo o negativo dependiendo del sentido de la fuerza a flexión. Aunque en apartados posteriores se analizará más en detalle, se puede observar que es posible obtener información como la cantidad de puntos tomados en la medición por el número de picos, la magnitud de las fuerzas, la enorme variabilidad entre los parámetros de medición para todos los puntos o la predominancia de la fuerza a compresión o a flexión.

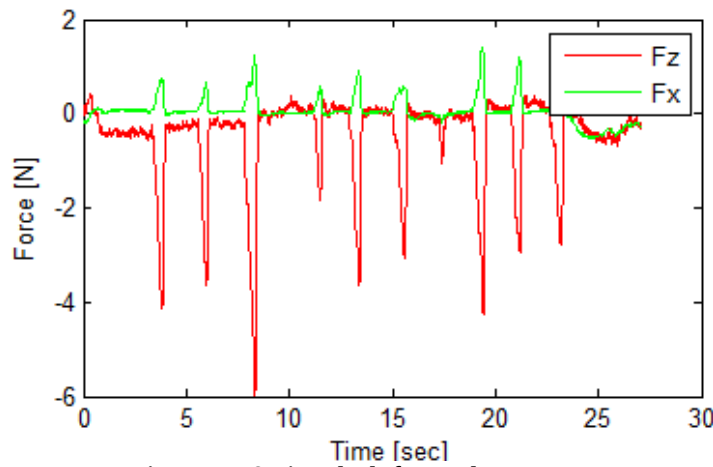


Figura 5 - 18 Ejemplo de fuerza de contacto

5.2.2 Incertidumbre del sensor

La incertidumbre del sistema de medición de la fuerza de contacto se calcula de acuerdo a GUM (*GUM, 2008*) con el uso de masas calibradas de categoría M1, OIML R111-1, (*OIM, 2004*). La incertidumbre combinada (u_{com}) está compuesta por los términos que contribuyen a la incertidumbre del proceso de medición: incertidumbre de los pesos calibrados (u_{stw}), incertidumbre de deriva de las masas patrón (u_{cre}), incertidumbre de cero (u_{Eo}), incertidumbre por la resolución, (u_{res}), incertidumbre por la histéresis (u_{hys}), incertidumbre de repetibilidad ($u_{rep.}$) y la incertidumbre por la temperatura ($u_{tem.}$), Ec. 5. 1, Ec. 5. 2. El cálculo de la incertidumbre se repite para las dos fuerzas, F_x y F_z .

$$u_{com}^2 = u_{stw}^2 + u_{cre}^2 + u_{Eo}^2 + u_{res}^2 + u_{hys}^2 + u_{rep}^2 + u_{temp}^2 \quad \text{Ec. 5. 1}$$

$$u_{com}^2 = \left(\frac{U_{stw}}{k}\right)^2 + \frac{M1_e^2}{12} + \frac{s(x)^s}{N} + \frac{H_e^2}{12} + \frac{E_{oe}^2}{12} + \frac{R^2}{12} + (L\Delta T u_{CTE}(\alpha))^2 \quad \text{Ec. 5. 2}$$

En primer lugar se exponen los términos de incertidumbre del tipo B, es decir, los que se calculan por medios no estadísticos. La incertidumbre de los pesos calibrados (u_{stw}) se obtiene del certificado de calibración que define su incertidumbre extendida (para un factor de cubrimiento $k=2$), en este caso 0,8 g. La incertidumbre de deriva del patrón (u_{cre}) se calcula con respecto a la tolerancia máxima de su categoría de peso, M1_e, de 100 mg máximo para 2 kg de peso (*OIML, 2004*) y una distribución de probabilidad rectangular. La incertidumbre de la temperatura ($u_{tem.}$) se calcula como la máxima variación en la lectura de la fuerza que puede producir la variación de la temperatura. Durante las mediciones la variación de temperatura ha sido de 0,2°C y la mayor variación posible será de 2°C por las condiciones de regulación de la sala. Además la incertidumbre del material del patrón es de $1 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ y la longitud de la zona aplicada a las galgas es de 10 mm. Este término se encuentra minimizado además por la propia construcción de las galgas que elimina el factor de la temperatura y la distribución de las galgas en el circuito que neutralizan los efectos de la temperatura. La incertidumbre de cero (u_{Eo}) corresponde a la incertidumbre del sistema sin ninguna carga. Para calcular este término se parte del sistema sin ninguna carga y se añaden cargas hasta el máximo. Una vez se ha llegado al máximo se descarga el sistema desde el máximo peso a carga 0. La diferencia entre las lecturas sin carga (E_{oe}) es considerada el valor del error de cero que pertenece a una distribución de probabilidad rectangular. La incertidumbre de resolución (u_{res}) corresponde a la capacidad de lectura del sistema. El último decimal significativo de la resolución del sistema es considerado con una distribución de probabilidad rectangular. La incertidumbre de histéresis se refiere a la capacidad del sistema de medición (principalmente debido a la histéresis del material) de conservar su deformación en ausencia de la carga o con una carga diferente. El ensayo de histéresis consiste en la carga y descarga de los pesos calibrados en el sistema de medición. Se utilizan tres cargas: máximo del peso calibrado, la mitad y carga cero. De las tres repeticiones de los ciclos de carga y descarga se obtiene la diferencia de lectura en las cargas de la mitad del peso calibrado (H_e), tanto en carga como en descarga. La diferencia entre ambos valores se considera el error de histéresis con una distribución de probabilidad rectangular.

Las demás incertidumbres son del tipo A, es decir, por cálculos estadísticos. La incertidumbre de repetibilidad mide la capacidad del sistema de medir la misma fuerza en distintos momentos. El ensayo se realizó con 10 ciclos de cargas con saltos de aproximadamente el 10 % del peso total, es decir, primero se mide 10 veces la fuerza con el 10 % del máximo de carga, después se repite con el 20 % y sucesivamente hasta llegar al 100

%. Entre cada medición el sistema se deja sin carga. Se calcula la desviación estándar para cada valor de peso medido (10%, 20%,... 100%). El valor de incertidumbre de repetibilidad es el mayor de los calculados para cada peso con respecto a la raíz del número de mediciones, es decir, la mayor desviación típica experimental de la media ($s(x)/\sqrt{N}$).

Con el cálculo de la incertidumbre se obtiene una incertidumbre expandida de 0,0923 N y 0,1445 N para las fuerzas a flexión y compresión, respectivamente, Tabla 5. 1. Estas incertidumbres corresponden al peor caso, 13 N de carga. La incertidumbre superior de la fuerza a flexión se debe principalmente a que las compresiones sufridas por el palpador son muy pequeñas y su lectura es más sensible a otros efectos ajenos. Esto es, las compresiones pequeñas producen señales muy pequeñas que se ven afectadas más fácilmente por agentes externos o el ruido del sistema. Se ha observado que la mayor contribución a la incertidumbre del sistema es la repetibilidad y la histéresis. Estos términos pueden ser minimizados a través de galgas de mayor capacidad y un mejor diseño del palpador.

Tabla 5. 1 Cálculo de incertidumbre para el sensor de fuerza de contacto

Término	Tipo	Distribución	Grados de libertad	Coef. de sensibilidad	Incertidumbre	
					F_x [N]	F_z [N]
u_{stw}	B	Rectangular	∞	1	0.0040	0.0040
u_{cre}	B	Rectangular	∞	1	0.0001	0.0001
u_{Eo}	B	Rectangular	∞	1	0.0081	0.0081
u_{res}	B	Rectangular	∞	1	0.0003	0.0003
u_{hys}	B	Rectangular	∞	1	0.0380	0.0550
u_{rep}	A	Normal	9	1	0.0250	0.0460
u_{tem}	B	Rectangular	∞	1	0.0000	0.0000
Incertidumbre combinada					0.0464	0.00723
Grados de libertad efectivos					29	29
Factor de cubrimiento k					2,1	2,1
Incertidumbre expandida $U_{95\%}$					0.0974	0.1518

El sistema se considera apto para la medición de la fuerza en brazos de medir considerando que los pesos de 9.7 y 15.2 g (incertidumbre expandida) son prácticamente imperceptibles durante el palpado manual de un operario.

5.2.3 Tratamiento de las curvas de fuerza

Las curvas obtenidas con el sistema de medición de la fuerza de contacto aportan información sobre la forma de medir y el nivel de fuerza utilizado. La señal de las fuerzas de medición se recoge en continuo pero la información realmente relevante es la fuerza en los puntos de contactos. Además, el resto de la señal aporta información del proceso de medición

pero no afecta directamente al error de los puntos tomados. Por estas razones, estas curvas necesitan ser tratadas para obtener la fuerza en los puntos de contacto y conocer realmente su relación con el operario y los resultados de medición.

En primer lugar se calculó la fuerza que resulta de la combinación de la componente a flexión y a compresión; este será un parámetro más de fuerza para analizar su influencia en la medición, Ec. 5. 3.

$$F_{total} = \sqrt{F_x^2 + F_z^2} \quad \text{Ec. 5. 3}$$

Los puntos de contacto coinciden con el mayor momento de aplicación de la fuerza. El operario intenta asegurar el contacto mediante la aplicación de una fuerza extra. Además, en el momento de leer el punto de contacto el operario aprieta el botón de lectura y ejerce también un exceso de fuerza. Por tanto, la cantidad de puntos tomados en cada medición coincide con el número de picos en las curvas. Se asume que la fuerza de contacto está representada por la amplitud de cada pico. Como se ha indicado, la fuerza F_z es siempre negativa, mientras que la fuerza a flexión puede ser positiva o negativa en función del sentido de la flexión. Para corregir este hecho y dado que, en este momento no es relevante el sentido de la deflexión todos los valores se toman en valor absoluto. Uno de los objetivos del sistema es conocer el nivel de fuerza aplicado en la operación de medición independientemente de la dirección de la deformación, ya que la fuerza en un punto en un sentido no compensa los errores con otra fuerza en otro punto en el sentido contrario. Como ejemplo se presenta la gráfica correspondiente a la medición de un cilindro con 12 puntos y las fuerzas representadas en valor absoluto, Figura 5 - 19.

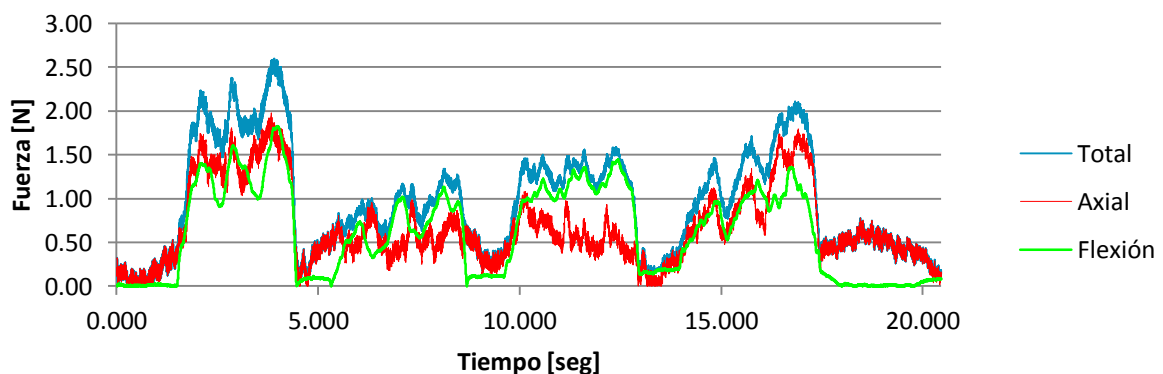


Figura 5 - 19 Fuerza de contacto en valor absoluto

Como se puede deducir de la gráfica el cilindro ha sido medido con 12 puntos en 4 grupos de 3 puntos, Figura 5 - 20. Los cuatro grupos se distinguen por los puntos de las

curvas que llegan a 0 N. En cada uno de los grupos se identifican los tres picos más relevantes. Cada pico coincide con un punto de contacto.

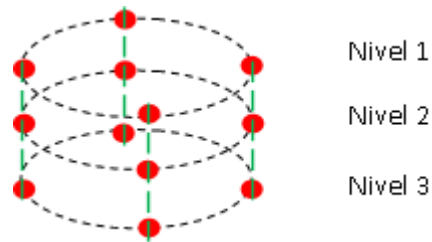


Figura 5 - 20 Distribución de puntos uniforme en cilindro

En la medición con MMC la estrategia de medición generalmente consiste en medir 4 puntos por cada nivel y entonces pasar al siguiente nivel. Además, sólo existe contacto en los puntos. En la medición con brazos de medir se ha encontrado habitualmente que aunque los operarios mantengan la distribución general de los puntos, la trayectoria o el orden de los puntos se modifica para realizar una medición más cómoda o más rápida. En este caso el operario del brazo de medir por coordenadas toma los puntos de los cilindros por generatriz de éstos, es decir, los puntos de los diferentes niveles que coinciden en una generatriz se toman en orden. Además, en los tres puntos de cada generatriz se mantiene el contacto por comodidad o por no perder el contacto. En cambio, en los cambios de generatriz el contacto con la pieza se pierde. La curva de fuerza resultante es la anteriormente comentada, cuatro grupos de tres puntos sin eliminar el contacto dentro de cada grupo pero si entre grupos. Cabe decir que la lectura de la curva no es sencilla en algunos casos, por lo que para los ensayos se utilizaron mediciones que no indujeran a duda en la identificación de los puntos y las fuerzas de contacto, Figura 5 - 21.

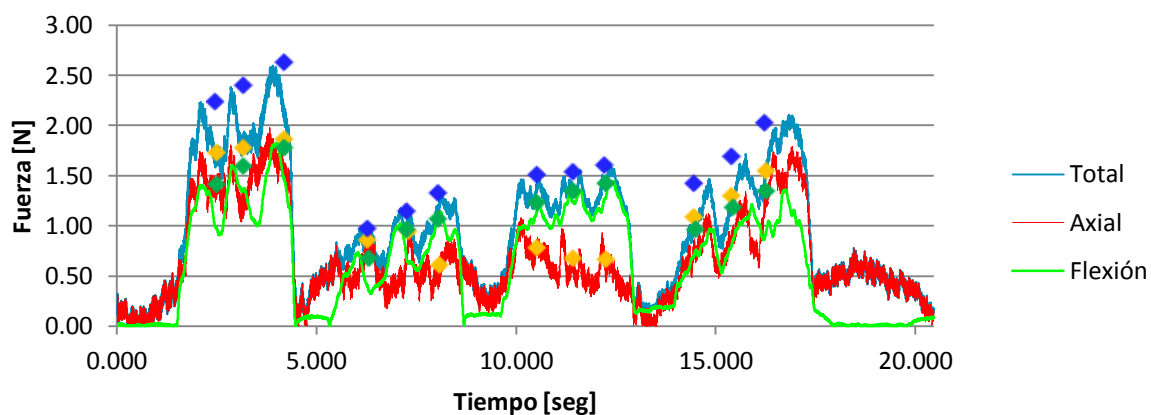


Figura 5 - 21 Identificación de puntos de contacto

De la curva de fuerza también se puede obtener información sobre la duración de la operación de medida, la fuerza aplicada en cada punto y la evolución de la fuerza o el tipo de medición realizada.

Como se ha dicho, para el análisis de la fuerza de contacto es necesario quedarse únicamente con los valores de los momentos de lectura del punto. Para ello, se identifican los valores máximos de cada pico. El instante de tiempo para las tres curvas de fuerza es el mismo ya que las señales están sincronizadas. En el siguiente paso se elimina el resto de la curva de fuerza así como la escala de tiempo, Figura 5 - 22.

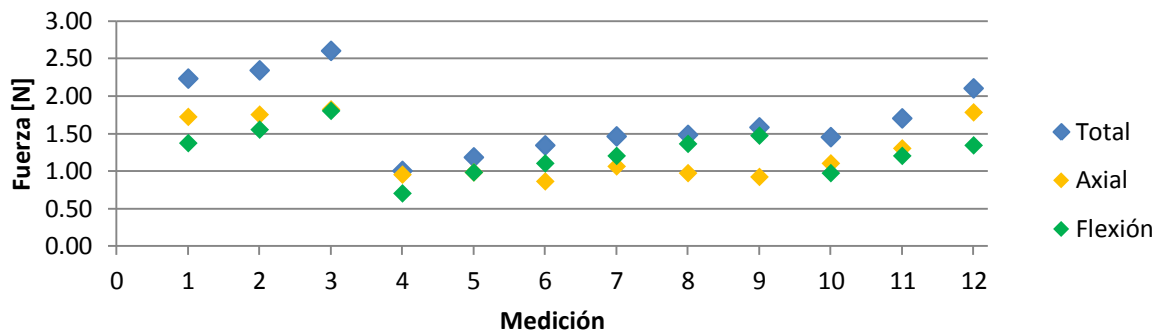


Figura 5 - 22 Fuerza de contacto de medición

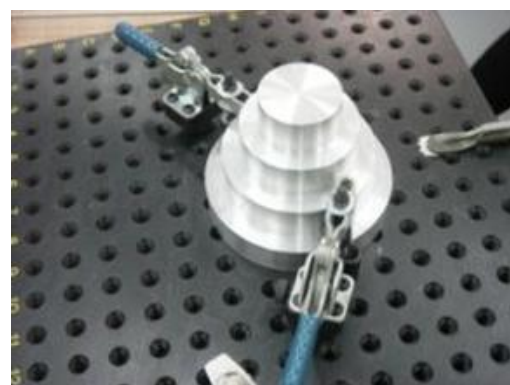
De esta manera se obtiene únicamente la información de la fuerza que realmente produce la deformación que afecta a la medida. Además, también se puede observar la dispersión y la irregularidad de la fuerza aplicada. Otro factor importante que se puede desprender de las fuerzas de flexión y compresión es la forma de medición, como la orientación del palpador. Cuando la fuerza a flexión sea superior a la de compresión, es probable que se haya realizado una medición en paralelo a la superficie de la pieza, mientras que cuando la fuerza a compresión sea superior lo más probable es que haya sido una medición en perpendicular a la superficie. En los demás casos la orientación del palpador tendrá una posición intermedia. Esta afirmación no es definitiva ya que no se dispone de las tres componentes de fuerza que actúan en la medición.

5.3 Ensayos de fuerza de contacto con patrones geométricos

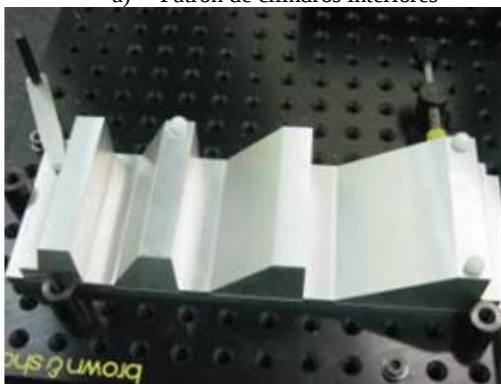
En los capítulos anteriores se determinó que el operario, el tipo de característica geométrica y la fuerza de contacto tienen gran influencia en el comportamiento de los brazos de medir. Para profundizar y confirmar esta dependencia se diseñó un ensayo en el que la fuerza de contacto se mide y se compara con los resultados de medición. De esta manera se eligieron patrones que contienen diferentes características geométricas con los que se analizará la respuesta del brazo y del operario durante su medición. Las características geométricas elegidas son las más comunes en inspección: cilindros internos, cilindros externos, esferas y planos. Para aumentar el conocimiento del comportamiento del brazo de medir y del operario durante las mediciones, las características se variaron en tamaño o posición. La Figura 5 - 23 muestra los patrones utilizados, con cilindros internos con diámetros de 8, 10, 15, 20, 25, 30 mm; un anillo patrón de 125 mm; cilindros externos con diámetros 20, 40, 60 y 80 mm; esferas de 25 mm de diámetro; planos que se sitúan a diferentes ángulos con respecto a la horizontal: 0°, 30°, 45°, 60° y 90°.



a) Patrón de cilindros interiores



b) Patrón de cilindros exteriores



c) Patrón de planos



d) Patrón de esferas

Figura 5 - 23 Patrones de características geométricas

Para este ensayo se utilizó un brazo de medir Romer Sigma 2018. Este brazo consigue 0,010 mm de repetibilidad en la medición del centro de una esfera de calibración, 0,018 mm

de repetibilidad en la medición de un asiento cinemático cónico y 0,025 mm en la medición de un patrón de longitud aunque su último certificado muestra un error de 0,048 mm. El palpador utilizado fue el adaptado para medir la fuerza de contacto, de 85 mm de longitud y 6 mm de radio de esfera.

Para el ensayo se dispuso de una mesa de trabajo rígida. Esta mesa tiene en su parte superior placas adaptadas para situar el brazo de medir por coordenadas y los patrones descritos anteriormente. El ensayo se desarrolló en un entorno controlado en temperatura a $20 \pm 1^\circ\text{C}$. En este ensayo 5 operarios midieron cada elemento 3 veces. PC-DMIS es el programa utilizado para analizar las coordenadas de los puntos de contacto, construir las entidades geométricas asociadas al conjunto de puntos de cada medición y la obtención de los errores de medición. Como referencia se utilizaron los valores obtenidos al medir con una MMC. La MMC fue una Dea Global Image 091508, con una incertidumbre expandida de $U = 2.2 + 3L/100 [\mu\text{m}]$, calibrada por un laboratorio certificado ENAC.

Todos los operarios utilizaron la misma secuencia de puntos para mantener fuera del estudio de los parámetros de medición la influencia de la distribución y el número de puntos, Tabla 5. 2.

Tabla 5. 2 Distribución de puntos por característica geométrica

Característica geométrica	Número de puntos	Distribución
Cilindros internos	12	Tres niveles; cuatro puntos por nivel
Cilindros externos	12	Tres niveles; cuatro puntos por nivel
Esferas	15	Uniformemente distribuidos
Planos	9	Cuadrícula de 3 x 3

5.3.1 Análisis de los datos

De los ensayos se obtuvieron datos de medición (cilindricidad, diámetro, esfericidad, o planitud) y los valores de fuerza en cada punto de contacto. Para la comparación de la fuerza y los errores asociados a ella es necesario disponer de un valor para cada una de las dos variables, pero en el caso de la fuerza se obtienen tantos valores de fuerza como puntos de contacto, que deben compararse con un único valor de error de medición. Por esta razón, se eligieron diversos valores únicos representativos de la fuerza empleada en la medición. Los parámetros de fuerza se dividen en tres categorías:

- Parámetros de nivel de fuerza: media aritmética, media logarítmica, media cuadrática. Estos valores muestran el nivel de fuerza utilizado en las

mediciones. En la media logarítmica y cuadrática influyen en mayor grado los valores de fuerza más grandes, los cuales producirán mayor deformación y error en las mediciones.

- Parámetros de dispersión: desviación estándar y rango. Estos valores muestran el grado de variación entre los puntos medidos. La variabilidad en la fuerza de medición entre puntos puede indicar mayor diferencia entre unos puntos y otros por lo que el error puede verse negativamente afectado.
- Parámetros característicos: máximo y mínimo. Los valores máximos determinan el punto individual con mayor y menor error, por lo que estos valores singulares pueden dirigir los errores de medición.

Estas suposiciones de cómo afectan los valores de las fuerzas sobre los errores de medición son generalistas y se eligen para comprobar si existe relación entre la fuerza de contacto y los errores. Es presumible, por ejemplo, que el punto con mayor fuerza producirá el mayor error pero se debe considerar que los errores dependen de la construcción de la geometría asociada a todos los puntos de contacto. Esta construcción depende de todos los puntos por lo que el error de un punto puede ser compensado, desviado en otra dirección o aumentado por el algoritmo de construcción de la geometría. Es decir, el error de un punto no es directamente transferido al error de diámetro o de forma de una característica geométrica. Además, es presumible un comportamiento distinto para tolerancias dimensionales y geométricas. Por ejemplo, en el caso de diámetro el error medio de la fuerza podría ser el más apropiado para explicar la diferencia en diámetros con el diámetro de referencia aunque el ajuste de la geometría dependa de todos los puntos, al igual que el eje del cilindro que es el lugar geométrico de referencia para calcular el valor de error de diámetro. En el caso del error de cilindridad, el máximo y mínimo diámetro podrían ser explicados por el valor de fuerza máximo y mínimo aunque nuevamente todos los puntos dependen del ajuste de la geometría a partir de los puntos de contacto. En conclusión, se pretende buscar el grado de relación de los parámetros de fuerza en los errores de los brazos de medir sin intentar explicarlos únicamente con un solo parámetro ya que el cálculo de las geometrías asociadas a un conjunto de puntos es complejo y todos los puntos interaccionan entre ellos. A pesar de ello se considera, por ejemplo, que un error medio provocado por una fuerza media produce una desviación en las medidas del brazo aproximadamente proporcional. Es decir, si se ejerce una fuerza que produce una deflexión de 0,010 mm en la captura de todos los puntos, parece comprensible

que en la medición de un diámetro el valor obtenido será 0,020 mm mayor. A partir de esa base puede entrar en juego la variabilidad de cada punto y el algoritmo no lineal de construcción de la geometría. Por otra parte, en el cálculo del error de cilindridad un aumento constante del error de todos los puntos no alterará la relación entre el diámetro máximo y mínimo ya que la distancia entre ambos seguirá siendo la misma. Sin embargo, la variabilidad de la fuerza de contacto utilizada por el operario altera las coordenadas de cada punto de manera impredecible de antemano por lo que el error de forma o cilindridad se ve alterado al modificar la posición del punto que marca el diámetro máximo y el punto que marca el diámetro mínimo en magnitudes distintas.

ANOVA

El comportamiento de los operarios fue señalado como un factor relevante en el comportamiento en la fuerza ejercida en la medición y los errores del brazo de medir por coordenadas. Esta relación determinada en los ensayos preliminares se basa en la observación de los resultados de varias muestras de mediciones realizadas por operarios. El análisis de varianza es una técnica estadística que permite comparar las medias de varias muestras y concluir si dichas muestras son diferentes. ANOVA es la generalización de la comparación de la media de dos muestras por medio de la distribución t-student. Esta técnica se aplica a la comparación entre más de dos grupos. En el caso de tener 5 grupos la comparación entre todos ellos conllevaría realizar 10 pruebas t-student. Si existe alguna muestra diferente significa además que el factor por el cual se han separado las muestras tiene un efecto significativo en la variable dependiente. ANOVA estudia la influencia de factores categóricos o cualitativos (independientes) sobre una variable numérica o cuantitativa (dependiente). De esta manera ANOVA se presenta como una técnica capaz de relacionar matemáticamente el factor operario con la fuerza (forma de medición) y los errores de medición (capacidad de los brazos de medir por coordenadas).

Las técnicas ANOVA incluyen varios tipos de análisis dependiendo de la cantidad y tipo de variables. En nuestro caso se estudia ANOVA de un factor, técnica dirigida al estudio de las muestras cuando depende de un único factor (operario). Más adelante se estudiará ANOVA de dos factores en el que se estudia la influencia de dos factores simultáneamente en el comportamiento de una variable dependiente.

Como su propio nombre indica ANOVA estudia la varianza de las muestras y del total para explicar la diferencia entre las medias de las muestras. Esta comparación se hace a través

de un contraste de hipótesis donde se analiza la varianza, las diferencias de medias entre las muestras y el tamaño de la muestra. La aplicabilidad de esta técnica está sujeta al cumplimiento de dos requisitos:

- Normalidad de la muestra: la prueba de Shapiro-Wilk permite verificar este requisito.
- Homocedasticidad u homogeneidad de las varianzas: las varianzas de las muestras deben ser similares. La prueba de Levene permite verificar este requisito.

En el caso de no cumplir los requisitos es posible realizar la comparación por una técnica no paramétrica similar a ANOVA, la prueba Kruskal-Wallis que utiliza la mediana y el rango de forma similar a la media y la varianza en ANOVA.

Para el estudio ANOVA se presentan las siguientes hipótesis:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_i \quad \text{Ec. 5. 4}$$

$$H_A: \mu_1 \neq \mu_2 \neq \dots \neq \mu_i \quad \text{Ec. 5. 5}$$

La hipótesis nula H_0 (Ec. 5. 4) se plantea al afirmar que la media de todas las muestras son iguales y la contrahipotesis H_A (Ec. 5. 5) se define como que no todas las muestras tienen la misma media. Para resolver la afirmación de la hipótesis nula ANOVA calcula las varianzas de varios grupos y representa los cálculos en la Tabla 5. 1.

Tabla 5. 3 Cálculos ANOVA

	Suma de cuadrados	G.L.	Cuadrado Medio	F	p
Entre grupos	SCE	GLE	CME= SCE/GLE	CME/CMD	0.05
Dentro grupos	SCD	GLD	CMD= SCD/GLD		
Total	SCT	GLT			

Las varianzas se calculan para tres conjuntos de datos diferentes a partir de la suma de cuadrados, Ec. 5. 6, Ec. 5. 7, Ec. 5. 8:

$$SCE = \sum n(\bar{X}_{grupo} - \bar{X}_{total})^2 \quad \text{Ec. 5. 6}$$

$$SCD = \sum (X_{indi} - \bar{X}_{grupo})^2 \quad \text{Ec. 5. 7}$$

$$SCT = \sum (X_{indi} - \bar{X}_{total})^2 \quad \text{Ec. 5. 8}$$

Donde:

- SCE (Suma de Cuadrados “Entre de grupos”) es la suma de cuadrados del conjunto compuesto por la media de cada muestra. Mide la variabilidad de los grupos entre ellos o con respecto a la media de todos los datos.
- SCD (Suma de Cuadrados “Dentro de grupos”) es la suma de cuadrados de cada individuo dentro de su propio grupo. Mide la variabilidad que existen dentro de cada grupo que es asociada al error de las muestras ya que puede ser diferente a la variabilidad que se espera en el conjunto de todas las mediciones.
- SCT (Suma de Cuadrados Total) es la suma de cuadrados de cada individuo con respecto a todo el conjunto. Mide la variabilidad de todo el conjunto y se supone la variabilidad de referencia.
- X_{indi} es el valore individual de cada medición.
- $\bar{X}_{grupo}$ es la media de cada grupo
- $\bar{X}_{total}$ es la media de toda la muestra

Los grados de libertad se calculan como el número de elementos de cada grupo menos 1, Ec. 5. 9, Ec. 5. 10, Ec. 5. 11.

$$GLE = r - 1 \quad \text{Ec. 5. 9}$$

$$GLD = n - r \quad \text{Ec. 5. 10}$$

$$GLT = n - 1 \quad \text{Ec. 5. 11}$$

Donde:

- GLE (Grados de Libertad de “Entre grupos”) es el número de elementos independientes del conjunto de los grupos.
- GLD (Grados de Libertad de “Dentro de grupos”) es el número de elementos independientes en cada grupo.
- GLT (Grados de Libertad de “Entre grupos”) es el número de elementos independientes del conjunto de datos.
- r es el número de grupos
- n es el número de individuos por grupo

De esta manera se calcula la varianza para cada caso como, Ec. 5. 12, Ec. 5. 13:

$$CME = \frac{SCE}{GLE} \quad \text{Ec. 5. 12}$$

$$CMD = \frac{SCD}{GLD} \quad \text{Ec. 5. 13}$$

Donde:

- CME (Cuadrado Medio “Entre grupos”) es la varianza de los grupos con respecto al total de los datos.
- CMD (Cuadrado Medio “Dentro de grupos”) es la varianza de los individuos dentro de su grupo.

De esta manera se calcula la relación entre estos dos parámetros, Ec. 5. 14:

$$F = \frac{CME}{CMD} \quad \text{Ec. 5. 14}$$

El parámetro F representa la relación entre la varianza entre los grupos con respecto a la varianza dentro de los grupos, es decir, da información sobre si se varía más dentro de cada grupo o entre los grupos entre sí. Para un valor bajo de F la variabilidad dentro de los grupos es superior a la variabilidad entre los grupos, por lo que no se podrá garantizar que un dato pertenezca a un grupo en particular y no a varios. Para un valor alto de F la variabilidad entre los grupos es grande y dentro de cada grupo la variabilidad es pequeña, por lo que cada dato se puede asignar a un grupo en concreto. El parámetro F se ajusta a la distribución F de Fisher. Para cada valor de F se calcula la probabilidad que cubre la distribución a partir de dicho punto. Si esta probabilidad es inferior a 0,05 (95% de nivel de confianza) se concluye estadísticamente que la hipótesis nula se rechaza. Por lo tanto al menos alguna media de las muestras es diferente.

De esta manera se busca encontrar a través de los resultados una relación entre los factores de fuerza y los resultados de medición con respecto al factor operario, es decir un $p < 0,05$. En este caso se deducirá que el operario influye en la fuerza o las medidas y en caso contrario no será un factor significativo y no serán necesarias acciones correctoras para este factor.

5.3.2 Resultados

En los ensayos se estudió la influencia de los siguientes factores sobre la fuerza de medición y los errores de los brazos de medir: diámetro, inclinación, tipo de características y operario. La Tabla 5. 4 muestra el ejemplo de resultado de ANOVA para el error de forma de cilindros externos medidos por varios operarios. El valor “p” inferior a 0,005 muestra que el factor operario influye en los resultados, es decir, el mismo elemento por operarios distintos produce errores de forma diferentes. El operario es, por lo tanto, un factor de influencia en las mediciones de error de forma de cilindros exteriores.

Tabla 5. 4 Ejemplo ANOVA para error de forma de cilindros

	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media cuadrada	F	p
Entre grupos	0.010	4	0.003	10.099	0.000
Dentro de grupos	0.014	55	0.000		
Total	0.025	59			

Los resultados de los valores “p” de todas las mediciones se muestran en Tabla 5. 5.

Tabla 5. 5 Resultados ANOVA para las características geométricas y la fuerza de contacto

Factor operario		Cilindro interior	Cilindro exterior	Esfera	Plano
Error de forma		0.000	0.000	0.000	0.001
Error de diámetro		0.000	0.000	0.000	-
	Media	0.000	0.000	0.000	0.002
	Media logarítmica	0.000	0.000	0.000	0.002
	Media cuadrática	0.000	0.000	0.000	0.010
Fuerza total	Desviación estándar	0.000	0.000	0.126	0.058
	Rango	0.000	0.001	0.000	0.131
	Máximo	0.000	0.000	0.000	0.053
	Mínimo	0.000	0.000	0.000	0.010
Fuerza a compresión	Media	0.000	0.000	0.001	0.135
	Media logarítmica	0.000	0.000	0.002	0.055
	Media cuadrática	0.000	0.000	0.001	0.103
	Desviación estándar	0.000	0.000	0.003	0.156
	Rango	0.004	0.004	0.000	0.140
	Máximo	0.000	0.000	0.000	0.135
	Mínimo	0.000	0.000	0.262	0.055
Fuerza a flexión	Media	0.000	0.000	0.000	0.000
	Media logarítmica	0.000	0.000	0.000	0.000
	Media cuadrática	0.000	0.000	0.000	0.000
	Desviación estándar	0.000	0.000	0.000	0.001
	Rango	0.000	0.000	0.004	0.006
	Máximo	0.000	0.000	0.000	0.000
	Mínimo	0.000	0.099	0.000	0.002

De los resultados se concluye que los operarios influyen de manera distinta en los errores de forma y diámetro en su manejo del brazo de medir por coordenadas. Los operarios y su forma de medir, ya sea la fuerza, la estrategia de medición, su estabilidad en la medición u otro parámetro, causan diferentes errores en la medición de un mismo elemento con el brazo de medir por coordenadas. Por otra parte, los operarios también producen fuerzas de medición, en la mayoría de sus parámetros, distintas para los mismos elementos. Esto significa que los operarios tienen su forma de medir con diferente nivel de fuerza (unos miden con más fuerza que otros), con diferente dispersión (unos son más constantes que otros) y en valores característicos (unos llegan a valores máximos y mínimo diferentes a los de otros). Probablemente esta diferencia en la fuerza aplicada produce la diferencia en los errores de medición. En el caso de planos la fuerza de compresión es parecida en la mayoría de parámetros entre operarios. Esto puede ser debido a la simpleza de la geometría. La medición de los planos suele ser muy parecida entre los operarios. En cuanto a la fuerza a flexión la diferencia entre los operarios es clara.

El mismo análisis se ha realizado utilizando como factor el diámetro de los cilindros y la inclinación de los planos en lugar del factor operario. En este caso, los valores del parámetro “p” obtenidos (mayores de 0,050) determinan que el diámetro de los cilindros o la inclinación de los planos no es un factor significativo que influya en los resultados de medición ni la fuerza aplicada por el operario.

Por otra parte, durante los ensayos se observó que la accesibilidad y la posición cómoda de los operarios en la medición inducen a una mejor medición. Es decir, en las posiciones en las que los operarios tienen que “esforzarse” excesivamente o mantener una posición no ergonómica se obtienen peores resultados o mediciones claramente erróneas y se tiene que repetir el ensayo o redefinir la posición del brazo y del patrón en cuestión. Se ha observado que la habilidad de cada operario así como la experiencia tienen una importante influencia en los resultados.

De los resultados se obtiene que unos operarios obtienen mejores resultados que otros por lo que esta técnica identifica las buenas prácticas de medición con brazos de medición, permiten “entrenar al operario” y en un paso posterior aceptar o no las mediciones de un operario o incluso su habilitación para realizar mediciones con brazo de medir como medio para aumentar la fiabilidad de los brazos de medir y su trazabilidad.

La relación entre la fuerza aplicada y los errores de medición se ha realizado por medio de la regresión matemática. ANOVA permite la comparación de la media de una variable cuantitativa en función de un factor cualitativo y en nuestro caso ambas variables son cuantitativas. El error o la fuerza podían haberse dividido en intervalos pero este procedimiento no se recomienda ya que los resultados pueden estar influenciados por la elección de los intervalos. Además las técnicas de regresión y correlación permiten establecer la relación entre variables cuantitativas. De esta manera, por cada error de medición se ha planteado varios modelos de regresión. Los modelos de regresión son: lineal, polinómica, potencial, exponencial y logarítmico. La siguiente imagen muestra un ejemplo de los resultados de este estudio. Los gráficos muestran la relación entre la fuerza de flexión media y los errores de forma y diámetro para las características geométricas medidas, Figura 5 - 24.

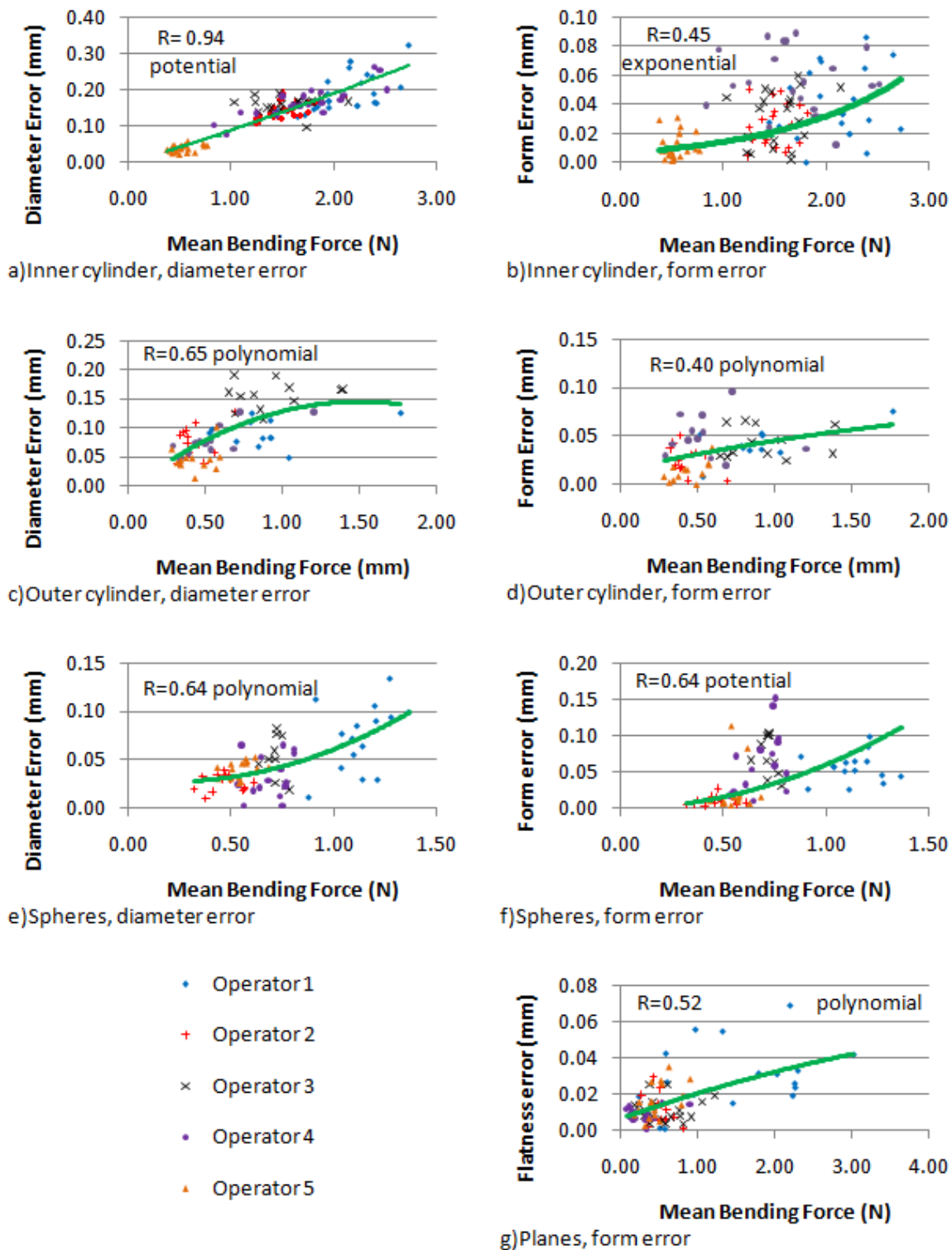


Figura 5 - 24 Relación entre fuerza y errores por característica geométrica

Las mediciones de cada operario se han separado e identificado con diferentes símbolos y colores y el conjunto de las mediciones de todos los operarios se ha utilizado para calcular la regresión que establece la relación entre la fuerza de contacto y los errores de medición. Además, en cada gráfica se expresa el coeficiente de correlación para el parámetro

de fuerza y el error cometido. Los errores son determinados con respecto a las mediciones de la MMC.

La primera conclusión de las gráficas es la disparidad de comportamiento entre los operarios, es decir, cada operario está delimitado por un nivel de fuerza medio, un rango de fuerza y un rango de errores de medición. Por ejemplo, el operario 5 (triángulos naranjas) parece ser el de mejor comportamiento, generalmente es el que aplica menor fuerza y obtiene menores errores. Sin embargo otros operarios como el 1 (rombos azules) o el 3 (aspas negras) tienen una mayor dispersión, mayor rango en la fuerza aplicada y mayores errores de medición. Independientemente de la relación entre las variable cada operario se encuentra en una zona de la relación más ancha o más estrecha.

De los resultados se obtiene que la relación positiva entre la fuerza de contacto (en este caso con la fuerza de deflexión media) y los errores de medición. El coeficiente positivo de correlación entre ambos factores predice que un mayor nivel de fuerza de contacto conlleva mayores errores de medición. Además, la variación del error es significativa, es decir, variaciones comunes en la fuerza de contacto (por ejemplo, de 0,5 N a 1,5 N) producen errores añadidos a la medición grandes (0,100 y 0,020 mm para error de diámetro y de forma en el caso de cilindros exteriores). En cuanto al tipo de modelo de regresión visualmente la relación parece lineal aunque los modelos de mejor ajuste suelen ser otros. Sin embargo, la diferencia entre los coeficientes de correlación de los diferentes modelos de regresión no es significativamente diferente en la mayoría de los casos.

Una característica de la medición manual con brazos de medir por coordenadas es la imposibilidad de establecer una fuerza determinada en la medición, sino que en cada medición se genera una fuerza no preestablecida y con ella se comparan los resultados. Por esta razón es necesario realizar un amplio conjunto de mediciones que garantice que se estudia un rango adecuado de fuerzas de contacto. Además cada característica obtiene un rango de fuerza distinto, por ejemplo, las esferas se miden con menor fuerza en comparación que los cilindros.

Por otra parte, en la comprobación de tolerancias geométricas (errores de forma) se obtienen resultados más dispersos aunque en un rango menor y sus coeficientes de correlación suelen ser menores, lo que puede deberse a la mayor complejidad de su cálculo. En cambio los errores obtenidos en para las tolerancias dimensionales tienen coeficientes de correlaciones mayores.

La comparación entre cilindros parece clara, en la medición de cilindros interiores la variabilidad de la fuerza es menor que en los cilindros exteriores. Esto puede ser debido a que los cilindros exteriores son de medición más complicada y variable. Un cilindro interior prácticamente sólo se puede medir con el palpador en paralelo o ligeramente inclinado, dependiendo del tamaño. Además, se mide desde el centro hacia el exterior, por lo que los movimientos están limitados. En cambio los cilindros exteriores pueden ser medidos desde muchas orientaciones del palpador y la accesibilidad a todos los puntos puede ser complicada, por ejemplo la generatriz opuesta a la posición del operario en la que usualmente se puede perder el contacto visual.

Las esferas son características geométricas singulares, su medición presenta muchos casos de deslizamiento y a menudo el operario encuentra problemas para establecer el punto de contacto. Sin embargo, una vez se tiene experiencia en el uso de brazos de medir, su medición resulta cómoda desde una orientación del brazo concreta, por ejemplo vertical, como en la medición con MMC. Además, si se mantiene el contacto en todo momento los deslizamientos disminuyen.

Por su parte, los planos son elementos que tienden a ser medidos con mayor uniformidad entre los operarios debido fundamentalmente a que se utiliza la misma posición para medir todos los puntos del plano. En la medición en perpendicular se tiene que considerar el peso del propio palpador y la articulación de la muñeca, aunque parezca que el operario ejerce poca fuerza (en realidad no se aplica fuerza hacia la superficie si no que se sujeta el palpador hasta que alcanza la superficie) ya que actúa el peso propio del palpador. Además, se ha observado que en la medición de los planos parece no existir una diferenciación entre operarios tan clara como en las otras características geométricas.

Como dato importante utilizado para el desarrollo de los modelos de compensación del siguiente apartado en el transcurso de estos ensayos se encontró que en las mediciones de diámetros de cilindros interiores se obtienen diámetros mayores y, al contrario, en la medición de diámetros de cilindros exteriores se obtienen diámetros menores. Análogamente, en las esferas se obtiene diámetros menores. Este comportamiento será explicado en el siguiente apartado.

En la Tabla 5. 6 se muestra los valores del coeficiente de correlación para todos los parámetros de fuerza y características geométricas.

Tabla 5. 6 Resultados de correlación para características geométricas y fuerza de contacto

Fuerza		Cilindro interior		Cilindro exterior		Esfera		Plano
		E. Dia.	E. forma	E. Dia.	E. forma	E. Dia.	E. forma	E. forma
Fuerza total	Media	0.92 p	0.44 p2	0.63 p2	0.51 p2	0.26 l	0.41 p2	0.08 l
	Media log.	0.93 p	0.45 p2	0.62 p2	0.52 p	0.30 l	0.41 p2	0.08 l
	M. cuadrática	0.92 p	0.43 p2	0.63 p2	0.47 p	0.24 l	0.42 p	0.10 l
	Desv. estand.	0.74 p	0.30 p	0.49 p2	0.35 p	0.02 l	0.46 p	0.05 l
	Rango	0.75 p	0.32 lo	0.46 p2	0.35 p	0.08 l	0.45 p	0.08 l
	Máximo	0.86 p	0.40 lo	0.55 p2	0.44 p	0.18 l	0.45 p	0.09 l
	Mínimo	0.84 p	0.47 p	0.56 p2	0.49 p	0.33 l	0.69 p	0.08 l
Fuerza compresión	Media	0.79 p2	0.36 p2	0.56 p2	0.48 p	0.06 l	0.24 p2	0.16 l
	Media log.	0.78 p	0.35 p2	0.52 p2	0.47 p	0.05 l	0.12 l	0.16 l
	M. cuadrática	0.78 p	0.36 p	0.56 p2	0.47 p	0.07 l	0.22 l	0.16 l
	Desv. estand.	0.66 p	0.33 l	0.48 p2	0.39 p	0.09 l	0.36 l	0.09 l
	Rango	0.69 p	0.31 lo	0.41 p2	0.38 p	0.10 l	0.37 l	0.13 l
	Máximo	0.74 p	0.33 lo	0.48 p2	0.42 p	0.09 l	0.34 l	0.16 l
	Mínimo	0.54 p	0.28 e	0.35 p	0.32 e	0.00 l	0.01 l	0.17 l
Fuerza flexión	Media	0.94 p	0.45 e	0.65 p2	0.40 p2	0.64 p2	0.64 p	0.57 p2
	Media log.	0.92 p2	0.43 e	0.64 p2	0.43 p	0.45 l	0.15 l	0.56 p2
	M. cuadrática	0.94 p	0.45 e	0.63 p2	0.37 p	0.61 l	0.68 p2	0.58 p2
	Desv. estand.	0.81 p	0.40 p	0.54 p2	0.26 p	0.47 p2	0.73 p	0.53 p
	Rango	0.84 p2	0.42 p	0.55 p2	0.28 p	0.43 l	0.73 p	0.52 p2
	Máximo	0.91 p	0.45 p	0.61 p	0.32 p	0.52 p2	0.74 p	0.56 p2
	Mínimo	0.64 p	0.32 p2	0.45 p2	0.36 p2	0.39 p2	0.02 l	0.48 p2

p=potencial; p2=polinómica; e=exponencial; l=lineal; lo=logarítmica

Los resultados muestran los resultados del coeficiente de correlación para las relaciones entre las fuerzas de medición y los errores de las características geométricas. El coeficiente que se muestra en cada caso es el mayor de todos los modelos de regresión planteados; cada coeficiente va acompañado de una letra que indica el tipo de modelo. En general se observa que existe una relación entre la fuerza (depende del tipo de fuerza y del parámetro de fuerza) y los errores. En particular, la fuerza a flexión parece ser la de mayor relación en la mayoría de casos. Esto es debido a la diferencia en rigidez del palpador en compresión y flexión. La deformación en compresión es aproximadamente 160 veces inferior a la deformación en flexión con el mismo valor de fuerza. De esta manera la deformación a compresión será mucho menor, por lo que para fuerzas similares la deformación a compresión que se traduce a error de medición será insignificante comparada con la deformación a flexión. La variación de la fuerza a compresión no se traduce en un error significativo y, por lo tanto, no tiene la relación tan marcada que tiene la fuerza a flexión.

En cuanto a la fuerza total, está compuesta de la fuerza a flexión y compresión por lo que es comprensible que cuando la mayor de las componentes sea la de flexión la relación con el error de medida se ajustará a la relación con la fuerza a flexión y viceversa. Este

razonamiento puede explicar que la relación de la fuerza total sea ligeramente inferior o claramente inferior a las de la fuerza a flexión y suele ser superior a la de compresión.

En cuanto al tipo de características y el tipo de error la tendencia parece ser similar a la del ejemplo explicado anteriormente. El error en el diámetro tiene mayor relación probablemente debido a que su cálculo es más sencillo. Por el contrario el error de forma tiene menor relación seguramente debido a que su cálculo es más complejo y un único parámetro no es capaz de describirlo.

Los cilindros interiores poseen la mayor relación con la fuerza, claramente diferenciado de los demás (observando la fuerza a flexión), después están los cilindros exteriores, las esferas y los planos. De esta relación se puede concluir que cuanto más restringida sea la características geométrica más relación tendrá con la fuerza. Se puede explicar porque la geometría de los cilindros interiores obliga a medir de una forma más uniforme no solo en todos sus puntos sino en todas las mediciones y por todos los operarios, aunque la gran variabilidad de la medición con brazos de medir no se elimina. Los cilindros exteriores aumentan considerablemente las posibles posiciones de medición aunque la medición en paralelo parece predominante y en algunas posiciones se opta por la medición en perpendicular. Por el contrario, en algunos puntos se pierde el contacto visual y la orientación del palpador varía más. En la medición de esferas las posibilidades de medición también aumentan y se añade el problema del deslizamiento en varias direcciones; la medición y la distribución uniforme de los puntos son más complejas por su geometría que cambia en todas sus direcciones. La medición de planos es también bastante libre, un punto puede ser medido desde muchas orientaciones y dependiendo del tamaño del plano la orientación del palpador variará en mayor o menor grado. Aunque la medición en paralelo se presenta como la idónea debido a su menor deformación, ésta es difícil de llevar a cabo con el control manual; en muchas mediciones la mayor comodidad se obtiene con una medición con orientación inclinada. Además, los operarios desarrollan diferentes tipos de medición de acuerdo a su experiencia y habilidades. Unos prefieren medir manteniendo el contacto entre punto y otros eliminando el contacto entre puntos. El primer método presenta facilidades a la hora de mantener el contacto y no dar golpes en la medición, sin embargo la fuerza de contacto suele aumentar en el tiempo.

En cuanto a los parámetros utilizados para cuantificar las fuerzas se encuentran ligeras diferencias entre ellos. Los parámetros de nivel de fuerza generan los mayores coeficientes de

correlación con los errores, seguido del valor máximo de la fuerza, los parámetros de desviación y por último el valor mínimo. Este fenómeno no es tan pronunciado en los errores de forma. La menor influencia del valor mínimo puede explicarse porque produce el menor error. Además, los parámetros de fuerza están relacionados entre sí por lo menos indirectamente. Si el nivel de fuerza medio es alto es esperable que el valor mínimo sea más alto que el de otra medición con nivel medio de fuerza más bajo.

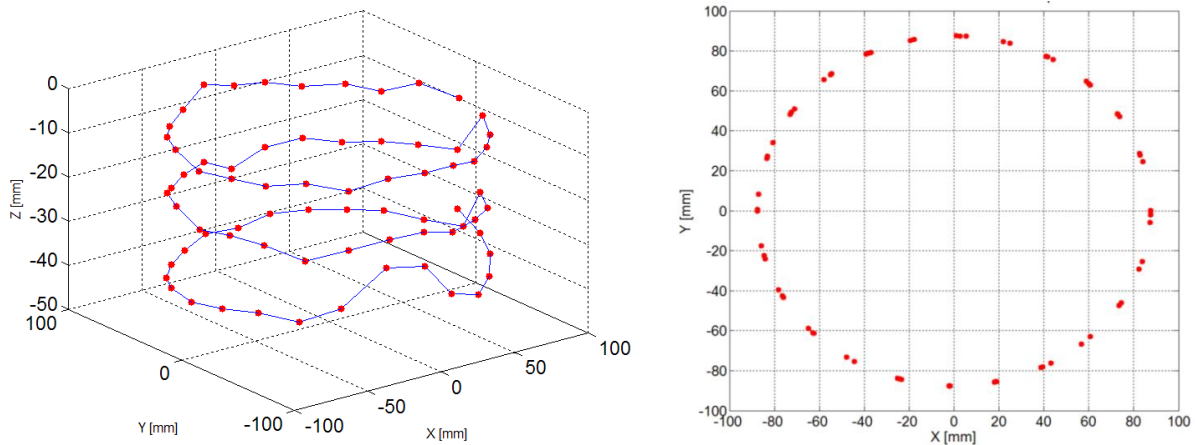
De los coeficientes de correlación (r) se pueden obtener los coeficientes de determinación (r^2). Este parámetro estadístico estima el porcentaje de variación de la variable dependiente que es explicado por la variación de la variable independiente. Por ejemplo para la fuerza media de flexión de los cilindros internos ($r^2 = 0.94^2 = 0.8836$) el 88,36% de la variación de error de diámetro puede ser explicado por la variación de la fuerza. De esta manera la fuerza puede explicar hasta casi el 90 % en algunos casos y sobre un 20% en los casos más desfavorables con los parámetros de fuerza menos relacionados. La corrección de la fuerza o las técnicas de medición apropiadas pueden producir una mejora sustancial en los errores de medición con brazo de medir por coordenadas.

Además parece obvio que el operario debe ser incluido en la evaluación de los brazos de medir por coordenadas, pudiendo estar unido incluso a la aceptación de las mediciones con brazo de medir por coordenadas. En el siguiente apartado se va a ver uno de los modelos de compensación propuestos en esta tesis.

5.4 Modelo de compensación de la fuerza de contacto en anillo patrón

Una vez estudiados los parámetros de la medición más importantes y la gran influencia del factor operario y la fuerza de contacto, se pretende profundizar en el estudio de la fuerza de contacto. Para ello se eligió un anillo patrón de 174,996 mm y 0,005 mm de error de forma como patrón. Las razones de elegir una única característica geométrica se debe a que la medición en cada geometría se desarrolla de forma distinta y requiere de estudios individuales. Los cilindros interiores son los que mayor relación con la fuerza de contacto y en los que el brazo de medir comete mayor error. Además, se ha elegido un cilindro interior por ser una característica habitual en piezas reales. Hay que destacar que el error de forma del anillo patrón es muy inferior a la precisión del brazo, por lo que los errores en su medición son atribuidos al comportamiento del brazo de medir por coordenadas. Por último, se eligió un patrón de diámetro grande para evitar problemas de accesibilidad y posición de medición que requieran demasiado esfuerzo por parte del operario.

La medición con brazo de medir y su control manual producen falta de precisión en la localización de los puntos de contacto y falta de repetibilidad y reproducibilidad en las distintas mediciones, Figura 5 - 25. La representación de las coordenadas de los puntos de coordenadas muestra la falta de uniformidad de la distribución de los puntos de contacto. En la representación de los puntos de contacto se puede observar: la característica geométrica medida, la cantidad de puntos utilizados, su distribución y el orden de los puntos. En la Figura 5 - 25b se puede observar también la dispersión radial de los puntos. Este comportamiento se repite en las distintas mediciones, mostrando similares distribuciones pero con coordenadas de los puntos completamente distintas.



a) Distribución en medición con brazo de medir

b) Distribución vista en alzado

Figura 5 - 25 Ejemplo de distribución en medición con brazo de medir

Para evitar la influencia de diferentes operarios en las mediciones solamente intervino un único operario. Además, para evitar la influencia de distintas distribuciones de puntos en la medición de preestableció una para todas las mediciones. Debido al tamaño del anillo patrón se utilizaron 72 puntos divididos en tres niveles o alturas. Por lo tanto, en cada nivel se midieron 24 puntos separados uniformemente (15°). En la medición de superficies con gran área y con muchos puntos es relativamente fácil que el operario cambie la distribución o que los puntos de contacto se desvíen excesivamente de las coordenadas originales. Por ello se diseñó un patrón rejilla que delimitara el área apta para el palpado de cada punto ($<4 \text{ cm}^2$). A pesar de reducir los puntos de contacto a una zona restringida la repetibilidad en las mediciones no es comparable a las CMM. Con el fin de estudiar el error añadido por el brazo de medir se midió previamente el anillo patrón con la MMC, estableciendo como valores de referencia el valor de diámetro y error de forma obtenidos. En el procedimiento de medición con la MMC se simuló la repetibilidad de los brazos de medir por coordenadas para hacer más comparables las mediciones entre ambas máquinas. El anillo se midió con la MMC varias veces con desviaciones en altura y en radial con respecto al punto central del área. Estas desviaciones delimitan el área destinado a la medición con el brazo de medir por coordenadas. Las medias de los valores de todas las mediciones se utilizaron como los valores de referencia para el diámetro y error de forma del anillo patrón. Además, las mediciones de la MMC se utilizaron también como referencia en la fuerza de las mediciones, 0 N. Tras las mediciones del anillo patrón se aceptaron un total de 17 mediciones.

Se utilizó el programa PCDMIS tanto en la MMC como en el brazo de medir para calcular la geometría asociada a los puntos capturados y a partir de ellos calcular el diámetro y el error de forma. De las mediciones se obtuvieron dos conjuntos de datos: los metrológicos

(coordenadas de los puntos de contacto, diámetro y error de forma) y los de fuerza de contacto. El error de cada punto medido se define como la diferencia entre la distancia de dicho punto al eje del cilindro y el valor del radio de referencia obtenido con la MMC, Figura 5 - 26. De esta manera, el valor cero corresponde al valor del radio de referencia y el valor correspondiente a cada punto es su error. El error de diámetro es el doble del error de radio. El error de radio, medido por el brazo de medir, se puede calcular como la media del error de todos los puntos. Asimismo, el error de forma corresponde a la diferencia entre el error máximo (máximo radio) con el valor mínimo (mínimo radio). La mayoría de los errores de los puntos son positivos aunque algunos pueden ser negativos.

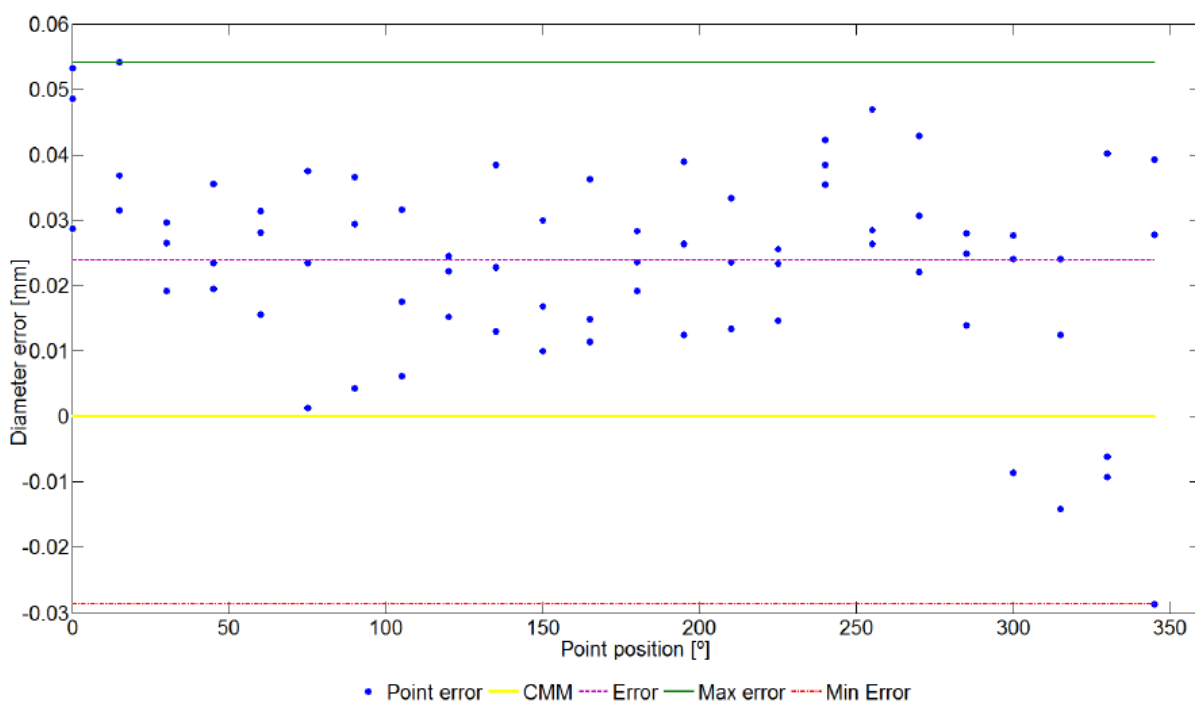


Figura 5 - 26 Error de los puntos de contacto

En todas las mediciones se ha encontrado un error de diámetro positivo, es decir un diámetro superior al diámetro de referencia, Figura 5 - 27. Se ha observado un error medio entorno a 0,100 mm, que en el peor caso puede llegar a 0,200 mm y en el mejor caso a 0,020 mm. Como es común a las mediciones con brazo de medir por coordenadas se observó una gran variabilidad en las mediciones del anillo patrón. El diámetro máximo y mínimo para cada medición muestra el error máximo y mínimo en la medición del diámetro. Además la diferencia entre ambos valores muestra el error de forma, Figura 5 - 28. Estos valores varían desde 0.045 hasta 0.175 mm en las mediciones.

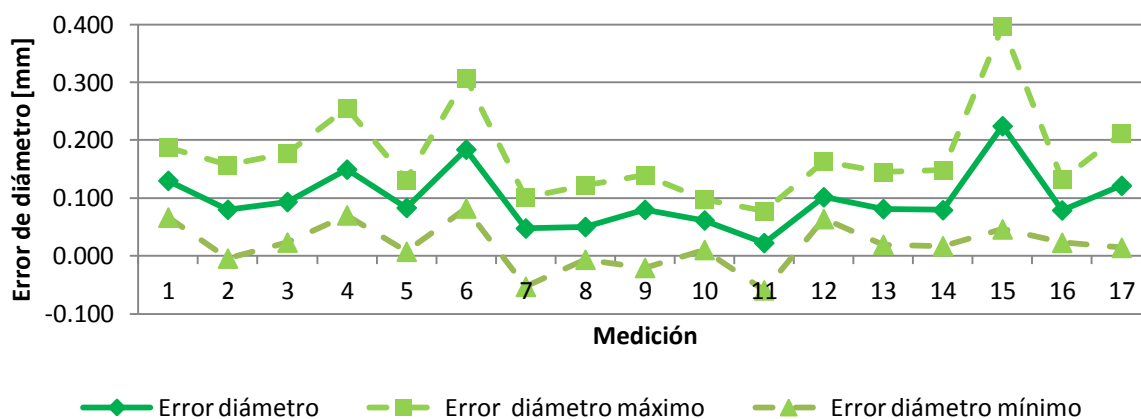


Figura 5 - 27 Error de diámetro de cilindro

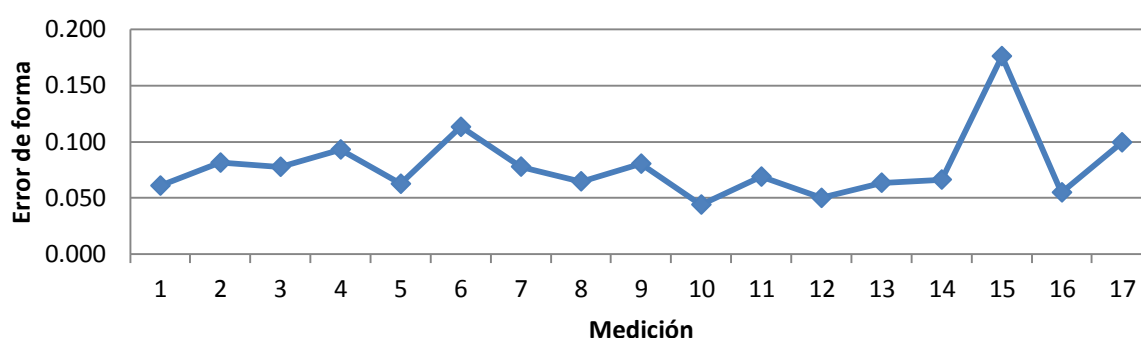


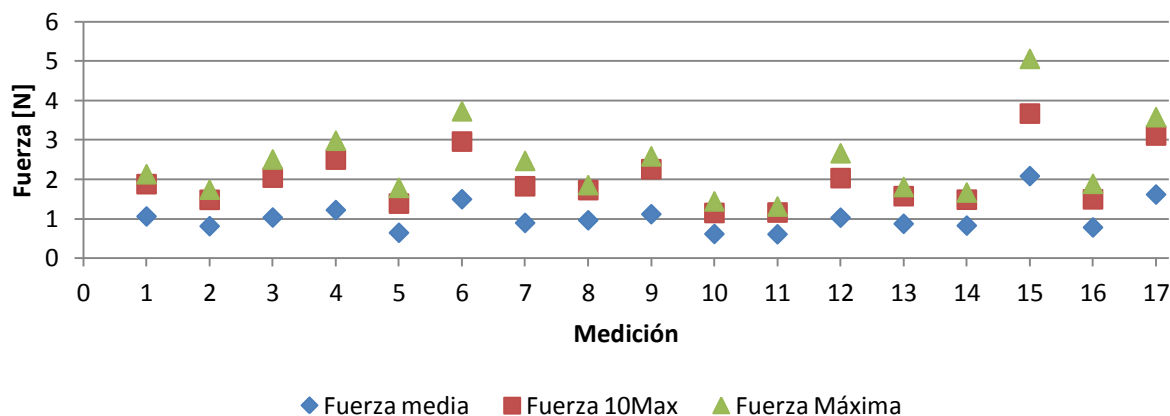
Figura 5 - 28 Error de forma de cilindro

La fuerza en cada punto también se midió para su posterior estudio. En este estudio se calcularon los siguientes parámetros de fuerza: fuerza media, fuerza máxima y la fuerza media de las 10 fuerzas máximas (10Max). Se eligieron estos parámetros de nivel medio de fuerza y el máximo porque son los parámetros que mayor correlación tienen según el ensayo del apartado anterior (apartado 5.3). Una mayor cantidad de puntos en la distribución produce un menor efecto en el cálculo de la media logarítmica y cuadrática asemejándose a la media aritmética. Por esta razón se eligió la media de las 10 mayores fuerzas que representa un valor entre la fuerza media y la máxima. Este valor puede representar la fuerza que más influye en los errores de medición sin llegar al extremo de la fuerza máxima. Además, en el posterior modelo de compensación la deformación es proporcional a la fuerza por lo que la corrección se plantea a partir de parámetros de media o máximos.

Los valores de fuerza en cada punto pueden alcanzar hasta 5 N, aunque la fuerza máxima se sitúa en general en torno a los 2 N, Tabla 5. 7. Los valores máximos de los parámetros 10Max y fuerza media son 3,7 N y 2,1 N, respectivamente, pero los valores más comunes se encuentran en torno a 1,5 y 0,75 N, respectivamente.

Tabla 5. 7 Fuerza de contacto para las mediciones

Medición	Parámetro de la fuerza de contacto				
	Media [N]	10Max [N]	Máxima [N]	Rango [N]	Desviación típica [N]
1	1.0619	1.8807	2.1330	1.9630	0.5540
2	0.8146	1.4828	1.7400	1.5900	0.3897
3	1.0342	2.0468	2.5070	2.4064	0.5849
4	1.2236	2.5043	2.9830	2.8160	0.7396
5	0.6471	1.3882	1.7870	1.6580	0.3865
6	1.4980	2.9616	3.7300	3.6200	0.8716
7	0.8974	1.8272	2.4710	2.3710	0.4862
8	0.9647	1.7300	1.8560	1.7160	0.4643
9	1.1189	2.2603	2.5850	2.4650	0.6141
10	0.6174	1.1498	1.4440	1.3444	0.3239
11	0.6092	1.1614	1.3130	1.2130	0.3062
12	1.0299	2.0338	2.6640	2.5640	0.6125
13	0.8748	1.5762	1.8090	1.4200	0.5371
14	0.8292	1.4868	1.6690	1.3217	0.4123
15	2.0852	3.6713	5.0600	4.6837	0.9827
16	0.7827	1.4967	1.8900	1.8576	0,4420
17	1.6180	3.1159	3.5810	3.4810	0.8523



Para establecer la relación entre la fuerza de contacto y los errores de medición se plantearon modelos de regresión lineales, los cuales tiene buen ajuste de acuerdo a los ensayos anteriores. Uno de los objetivos del ensayo fue comprobar que la relación entre la fuerza y los resultados de las mediciones se mantienen en un nivel similar de correlación, o si la cantidad de puntos y su distribución o las características del ensayo influyen. Los errores producidos por el brazo de medir por coordenadas son considerados como la diferencia entre el valor medido y el valor real del error del anillo medio por la MMC. A su vez las mediciones de referencia con la MMC utilizan una fuerza cercana a 0 por lo que se ha añadido el punto (0,0) en el análisis de los resultados. La adición de este punto no modifica significativamente los resultados de la relación entre los dos parámetros pero si añade la referencia de las mediciones al estudio.

En primer lugar se estudió la relación entre estos parámetros de fuerza y el error de diámetro, Figura 5 - 29. Esta relación mantiene linealidad. El grado de relación de los tres parámetros es similar entre ellos. El coeficiente de correlación entre los factores resulta 0,89, 0,88 y 0,90, respectivamente para la fuerza media, 10 Max y máxima. Los coeficientes de determinación obtenidos muestran que alrededor del 80% de la variación del error de diámetro añadido por los brazos se puede explicar por la variación de la fuerza de contacto aplicada.

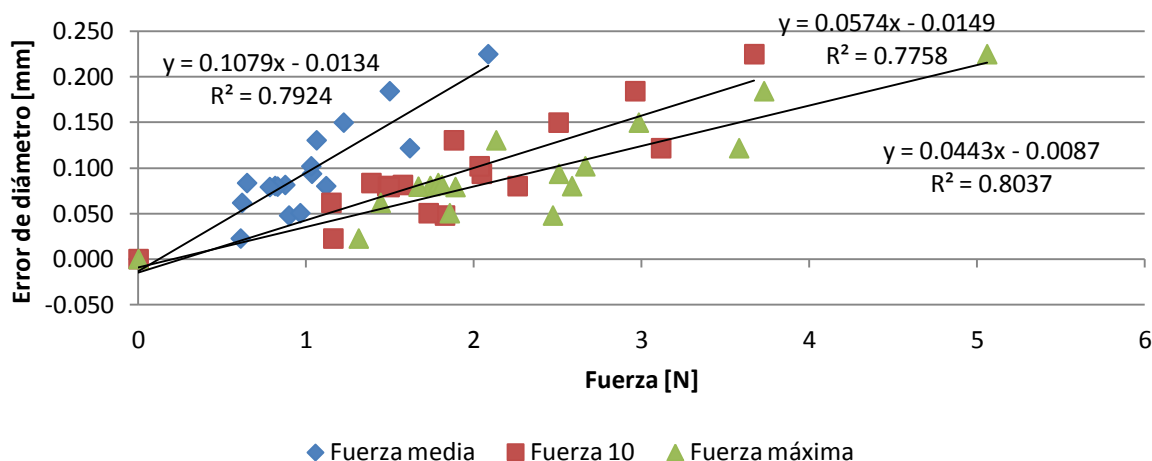


Figura 5 - 29 Relación entre el error de diámetro y la fuerza de contacto

La relación entre la fuerza de contacto y el error de forma también se estudió, Figura 5 - 30.

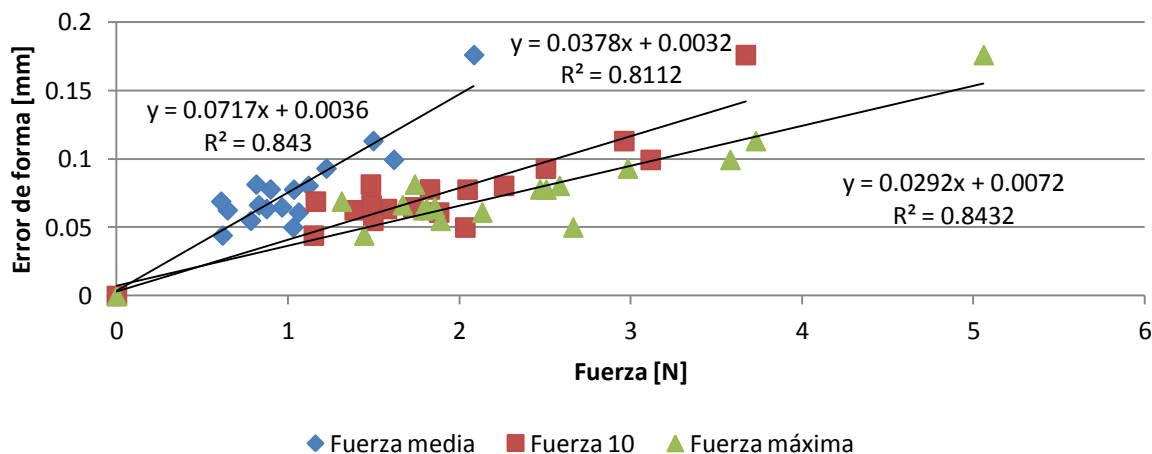


Figura 5 - 30 Relación entre el error de forma y la fuerza de contacto

Los coeficientes de correlación calculados son 0,92, 0,90 y 0,92 para la fuerza media, fuerza 10MAX y la fuerza máxima, respectivamente. En este caso, sobre el 84% de la variación del error de forma puede explicarse por la variación de la fuerza de contacto. En comparación con el ensayo anterior (apartado 5.3) la relación entre la fuerza y el error de forma ha aumentado significativamente (coeficiente de correlación 0,44 a 0,92 para la fuerza

media). Este aumento puede deberse a varios motivos: a) únicamente un operario ha realizado este ensayo, por lo que los parámetros tienden a ser más estables y más constantes en todas las mediciones. Ya se comprobó que cada operario mide de forma distinta y esta variabilidad puede afectar negativamente en la relación entre los resultados y las fuerzas. Se puede concluir que es más preciso estudiar la relación para cada operario individual que en conjunto, ya que cada uno tiene un comportamiento específico. b) Por otra parte la distribución de puntos es más completa que en el ensayo anterior por lo que es presumible que la variabilidad de las mediciones se reduzca y se afiance más la relación con la fuerza. Los rangos de fuerza en los que se han medido los cilindros interiores en ambos ensayos son similares.

Para completar el estudio también se ha utilizado medidas de dispersión de la fuerza para comprobar su influencia en los resultados de la medición, Figura 5 - 31 y Figura 5 - 32. El comportamiento de estos parámetros de la fuerza de contacto es similar al visto en el caso anterior. Este comportamiento se puede explicar con las mismas razones expuestas anteriormente: estudio realizado con un operario único y distribución de puntos más densa.

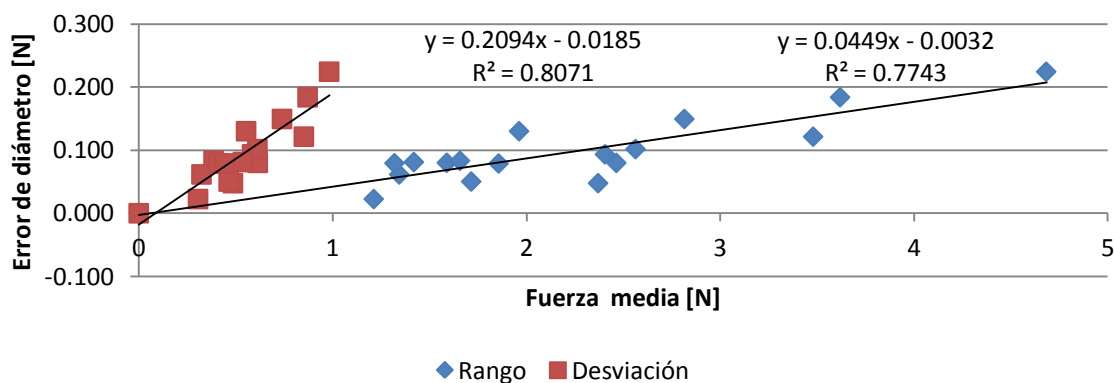


Figura 5 - 31 Relación entre el error de diámetro y parámetros de dispersión de la fuerza de contacto

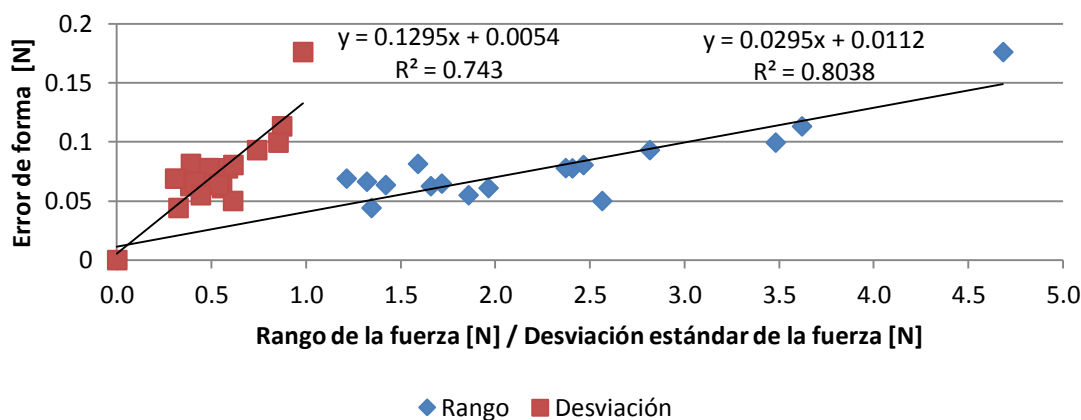


Figura 5 - 32 Relación entre el error de forma y parámetros de dispersión de la fuerza de contacto

Una vez comprobada la relación entre la fuerza de contacto y los errores en la medición se propone un modelo de corrección de las coordenadas de los puntos de acuerdo a la deformación provocada en el palpador durante el proceso de medición. El modelo de corrección se basa en dos aspectos: la deformación del palpador estimada usando el método de elementos finitos y la dirección de la deformación o del error de palpado estimado por la geometría de la pieza y la forma de medición.

5.4.1 Deformación del palpador

Teniendo en cuenta que la geometría del palpador utilizado en los ensayos es simple es posible estimar la deformación que sufre por medio de técnicas de análisis de deformación como el Método de Elementos Finitos. Para ello, la geometría del palpador se modeló de acuerdo a las especificaciones del fabricante hasta la unión con el brazo de medir por coordenadas, Figura 5 - 33. Con la geometría modelada, se simularon dos tipos de fuerza: fuerza a flexión y fuerza a compresión. La fuerza a flexión se aplicó en el ecuador de la esfera de la punta del palpador para simular la medición en paralelo. Debido a la simetría del palpador, la deformación por flexión es similar en todas sus direcciones. La fuerza a compresión se aplicó en el polo de la esfera para simular la medición en perpendicular.

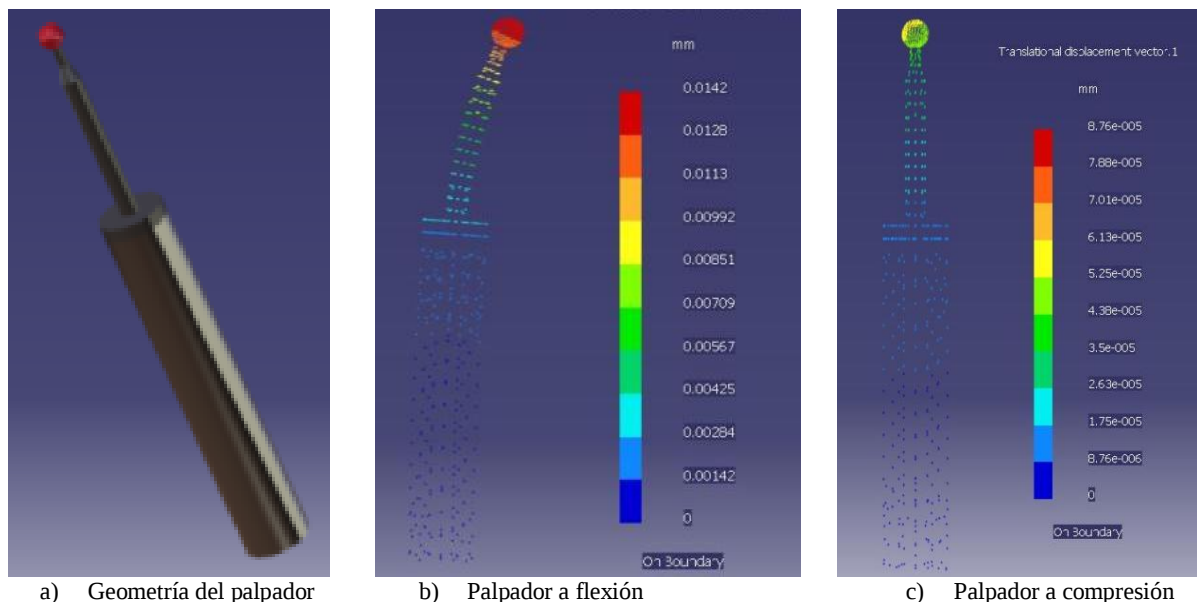


Figura 5 - 33 Modelo del palpador por elementos finitos

Los resultados se calcularon para fuerzas de 1 N, 5 N y 10 N para comprobar la linealidad del sistema. Al comparar los resultados entre los dos tipos de fuerza, se obtuvo que la compresión para 1 N es de 0,0000876 mm mientras que la deflexión fue de 0,0142 mm por

lo que la deformación a compresión es aproximadamente 160 veces inferior a la deformación en deflexión. Esta diferencia es debida a la rigidez del palpador en estas direcciones. Debido a esta característica y teniendo en cuenta que la magnitud de la fuerza aplicada a compresión es similar a la de flexión, la deformación a compresión es insignificante en comparación con la deformación a flexión. Con la relación entre fuerza y deformación se obtuvo el error teórico cometido en el palpado con brazo de medir por coordenadas.

5.4.2 Modelo de corrección de la fuerza de contacto

Los resultados de las mediciones del ensayo se utilizaron para generar el modelo de corrección. Como se ha comentado, los diámetros medidos por el brazo de medir son mayores que el diámetro de referencia medido por la MMC. Esta característica se puede explicar por la deformación que sufre el palpador durante las mediciones. En el contacto la dirección de la deformación del palpador se produce hacia el eje del cilindro Figura 5 - 34b. La fuerza que el operario ejerce para asegurar el contacto provoca, por lo tanto, que el punto realmente leído por el brazo de medir por coordenadas se situó fuera de la superficie del cilindro (diámetro mayor). Debido a la medición en paralelo de los cilindros interiores se asume que el mayor error del palpador se da en el plano perpendicular al eje en la dirección con origen el punto de contacto y fin el punto de corte entre el plano y dicho eje, Figura 5 - 34.

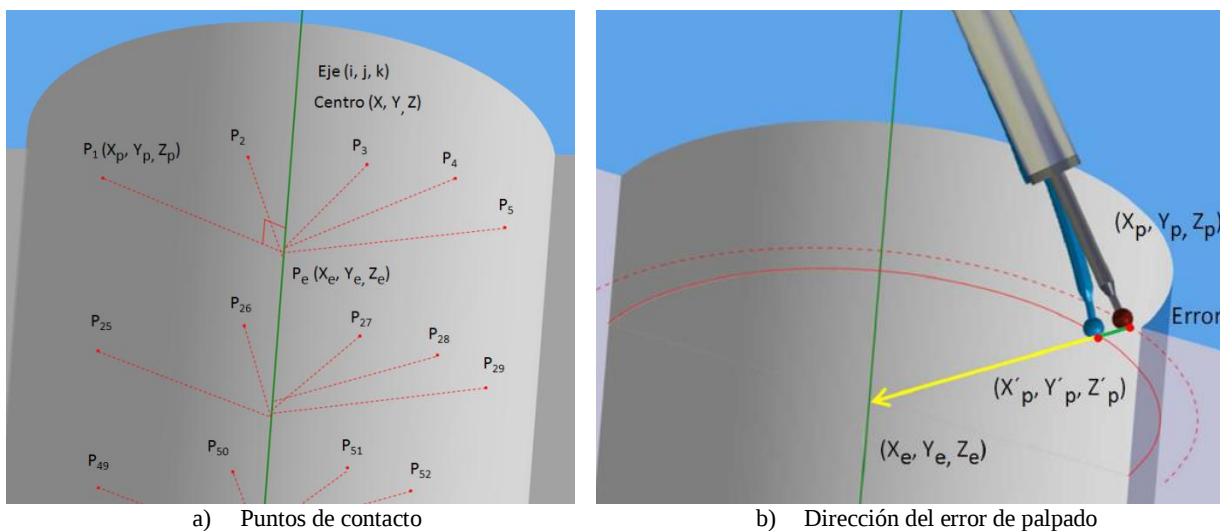


Figura 5 - 34 Modelo de corrección de la fuerza de contacto

El modelo de corrección de la fuerza de contacto propuesto sigue el procedimiento mostrado en Figura 5 - 35.

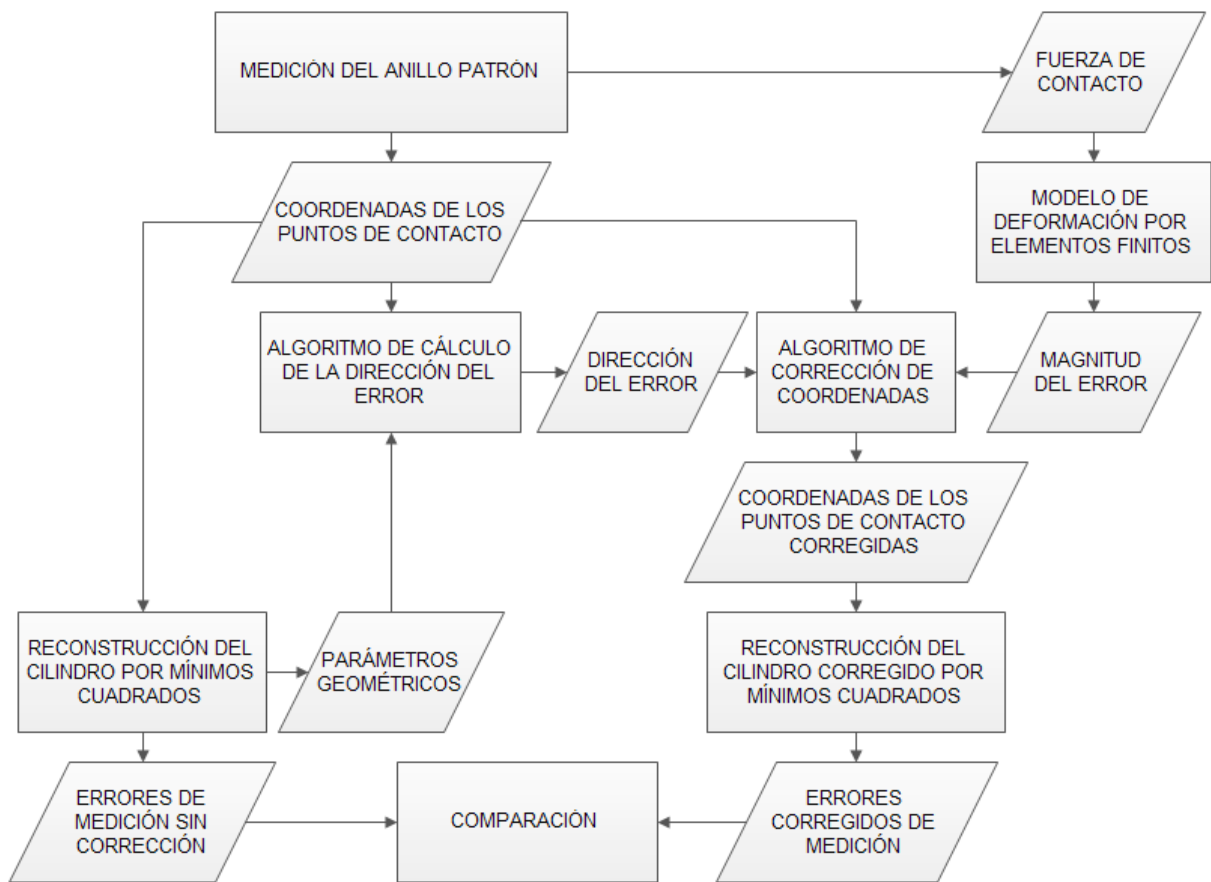


Figura 5 - 35 Modelo de corrección de la fuerza de contacto

Partir de la medición del anillo patrón se consiguen dos conjuntos diferentes de datos. Por una parte las coordenadas de los puntos de contacto aportadas por el programa de medición PCDMIS, el cual construye la geometría del cilindro asociada a dichos puntos por mínimos cuadrados y se obtienen los parámetros geométricos del cilindro (eje, diámetro y error de forma). Por otra parte se recogen los valores de fuerza de contacto de los puntos utilizados para medir el anillo patrón. Estos datos son utilizados por el modelo de corrección para establecer los valores iniciales de los errores de la medición y para establecer la geometría de referencia sobre la cual plantear el modelo de corrección de la fuerza de contacto. Para poder comparar los datos de los cilindros construidos con las coordenadas de los puntos de contacto sin corregir y corregidos se utilizón Matlab y el mismo método de mínimos cuadrados que emplea PCDMIS. Para comprobar este punto, se introdujeron la nube de puntos en el programa de Matlab y se contrataron los resultados con PCDMIS.

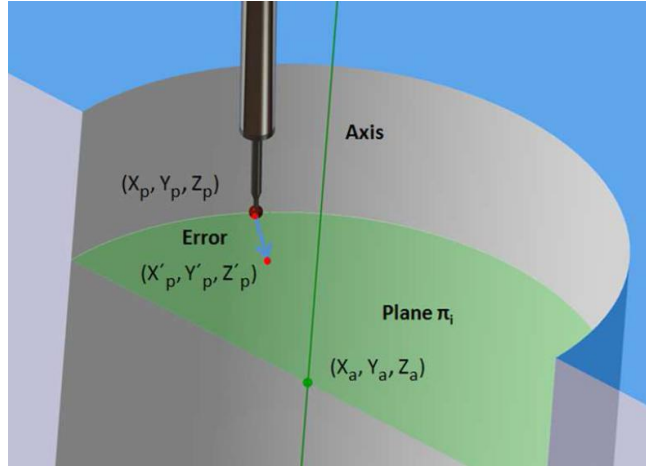


Figura 5 - 36 Cálculo de la dirección del error de palpado

La dirección del error y su corrección se planteó de acuerdo la forma cilíndrica del anillo patrón y a la forma de medir, Figura 5 - 36. Esta dirección del error de deflexión es un vector con origen en cada punto leído hacia el eje del cilindro y es perpendicular a este. Por lo tanto la dirección se calcula como sigue:

Se define el plano (π_i) que pasa por cada punto, un plano por cada punto, Ec. 5. 15.

$$\pi_i: A_i x + B_i y + C_i z + D_i = 0 \quad \text{Ec. 5. 15}$$

Donde: A, B y C son las componentes del vector del eje de cilindro (i,j,k) por ser perpendicular al plano π_i . Por lo tanto D se calcula para cada punto utilizando las coordenadas del punto de contacto (X_p, Y_p, Z_p) y despejando de la ecuación anterior, Ec. 5. 16.

$$D_i = -iX_p - jY_p - kZ_p \quad \text{Ec. 5. 16}$$

Conocido el plano π_i , la dirección es el vector que pertenece a dicho plano con origen en el punto de contacto y fin el punto intersección entre el plano π_i y el eje del cilindro (X_a, Y_a, Z_a) que es cortado por el plano del punto de contacto, Ec. 5.17.

$$(X_a, Y_a, Z_a) = \pi_i \cap \text{eje del cilindro} \quad \text{Ec. 5. 17}$$

Por lo tanto la dirección del error o la dirección en la que se compensa la deflexión del palpador es, Ec. 5. 18:

$$(X_a - X_p, Y_a - Y_p, Z_a - Z_p) \quad \text{Ec. 5. 18}$$

Una vez normalizada la dirección, Ec. 5. 19:

$$\text{Dirección del error} = (i_E, j_E, k_E) \quad \text{Ec. 5. 19}$$

Las coordenadas compensadas se obtienen de la siguiente forma, Ec. 5. 20:

$$(X'_P, Y'_P, Z'_P) = (X_P, Y_P, Z_P) + |deflexión| \cdot (i_E, j_E, k_E) \quad \text{Ec. 5. 20}$$

Por otra parte la deflexión es la fuerza obtenida por el sistema de medición de la fuerza de contacto multiplicado por la deformación conseguida por el método de elementos finitos para 1 N, Ec. 5. 21.

$$deflexión = fuerza \cdot 0,0142 \quad \text{Ec. 5. 21}$$

Se evaluaron varios modelos que aplican la compensación con diferentes parámetros de la fuerza obtenida. En el primer modelo se utilizó la fuerza de contacto medida para cada punto de forma individual. En los restantes modelos se utilizó para todos los puntos la misma fuerza para corregir la deformación pero cada modelo utiliza un parámetro de la fuerza distinto: la fuerza media de todos los puntos, la fuerza media de los 10 puntos de mayor fuerza y la fuerza máxima de todo el conjunto de puntos.

Una vez calculadas las coordenadas de los puntos de contacto corregidos, se volvió a construir el cilindro asociado a la nube de puntos en Matlab por mínimos cuadrados y se compararon los resultados con los valores iniciales sin corregir.

5.4.3 Incertidumbre del proceso de medición

La incertidumbre del proceso de medición descrito en el ensayo se puede cuantificar siguiendo la normativa internacional expuesta en el capítulo 3 (*GUM, 2008*) (*EA-4/02 M, 1999*). La incertidumbre expandida del proceso de medición se puede describir como, Ec. 5. 22:

$$U = k \cdot \sqrt{u_{cal}^2 + u_p^2 + u_{amb}^2 + u_{res}^2 + u_{cor}^2} \quad \text{Ec. 5. 22}$$

donde:

- u_{cal} es la incertidumbre del anillo patrón, obtenida normalmente del certificado de calibración, Ec. 5. 23. En este caso se dispone del certificado que muestra el valor de incertidumbre del diámetro aunque no para el caso del error de forma. Por esta razón, para el valor de la incertidumbre de cilindridad se utilizó la MMC y la repetición de medidas para establecer su incertidumbre. La cilindridad se midió 10 veces y se calculó la incertidumbre de las mediciones de acuerdo a la (*GUM, 2008*), Ec. 5. 24. Además se considera la incertidumbre del coeficiente de dilatación lineal del material del anillo patrón. El certificado de calibración del diámetro muestra que la

incertidumbre del patrón es de 0,0023 mm. La incertidumbre del coeficiente de dilatación del acero es de $1 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$. La variación de la temperatura durante la medición de la cilindridad del patrón fue de 0,2 $^{\circ}\text{C}$.

$$u_{cal(dímetro)} = \frac{U_{cal}}{k} \quad \text{Ec. 5. 23}$$

$$u_{cal(cilindridad)} = \sqrt{\frac{s^2(x_A)}{n} + (L \Delta T u(\alpha))^2} \quad \text{Ec. 5. 24}$$

- u_p es la incertidumbre del proceso de medición en sí, obtenido de la repetición de las mediciones con el brazo de medir por coordenadas, de acuerdo a los cálculos de la GUM, Ec. 5. 25.

$$u_p = \sqrt{\frac{1}{n-1} \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n}} \quad \text{Ec. 5. 25}$$

- u_{amb} es la incertidumbre del proceso del error sistemático inherente al proceso de medición, Ec. 5. 26. En esta expresión $u(\alpha)$ es la incertidumbre del coeficiente de expansión del material del patrón, $1 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$. La variación de la temperatura durante las mediciones con el brazo de medir por coordenadas fue de 0,5 $^{\circ}\text{C}$. L es la longitud evaluada.

$$u_b = L \Delta T u(\alpha) \quad \text{Ec. 5. 26}$$

- u_{res} es la incertidumbre relativa a la resolución del equipo. Se ha trabajado con resolución de cuatro dígitos significativos en las mediciones, Ec. 5. 27.

$$u_{res} = \frac{\text{resolución}}{\sqrt{12}} \quad \text{Ec. 5. 27}$$

- u_{cor} es la incertidumbre relativa a la corrección, aplicable únicamente cuando ésta se utiliza. Partiendo de la relación entre la fuerza de contacto y la deformación del palpador se obtiene la incertidumbre de cada punto. La incertidumbre en la medición de un cilindro se considera el doble de la incertidumbre de la deformación ya que dada la geométrica la máxima incertidumbre sería el doble de la de un punto, Ec. 5. 28. La incertidumbre de la medición de la fuerza de contacto, calculada en este capítulo, es de 0,0923 N.

$$u_{cor} = 2 \cdot 0,0142 \cdot u(\text{fuerza}) \quad \text{Ec. 5. 28}$$

De esta manera la incertidumbre del patrón es, Tabla 5. 8:

Tabla 5. 8 Cálculo de incertidumbre para el anillo patrón

Término	Tipo	Distribución	g.d.l.	Coef. sensibilidad	Incertidumbre	
					Diámetro	Cilindricidad
$u_{p(\text{diámetro})}$	B	Normal	∞	1	0,00105	-
$u_{p(\text{cilindricidad})}$	A	Normal	9	1	-	0,00230
u_t	B	Rectangular	∞	$L\Delta T$	-	1×10^{-9}
Incertidumbre combinada					0,00105	0,0023
Grados de libertad efectivos					∞	9
Factor de cubrimiento k					2	2,3
Incertidumbre expandida $U_{95\%}$					0,00210	0,0053

Calculada la incertidumbre de del patrón se procede a calcular la incertidumbre de la medición con brazo de medir por coordenadas, Tabla 5. 9.

Tabla 5. 9 Cálculo de incertidumbre para las medición del anillo patrón

Término	Tipo	Distribución	g.d.l.	Coef. sensibilidad	Incertidumbre	
					Diámetro	Cilindricidad
u_{cal}	B	Rectangular	∞	1	0,00105	0,00230
u_p	A	Normal	16	1	0,01233	0,00746
u_{amb}	B	Rectangular	∞	$L\Delta T$	0,000088	$1,3 \times 10^{-9}$
u_{res}	B	Rectangular	∞	1	0,00003	0,00003
Incertidumbre combinada					0,01237	0,00781
Grados de libertad efectivos					16	16
Factor de cubrimiento k					2,15	2,15
Incertidumbre expandida $U_{95\%}$					0,02660	0,01679

Además se calculó la incertidumbre del proceso de medición con la compensación, Tabla 5. 10.

Tabla 5. 10 Cálculo de incertidumbre para las medición del anillo patrón con corrección por deformación del palpador

Término	Tipo	Distribución	g.d.l.	Coef. sensibilidad	Incertidumbre	
					Diámetro	Cilindricidad
u_{cal}	B	Normal	∞	1	0,00105	0,00230
u_p	A	Normal	16	1	0,01012	0,00821
u_{amb}	B	Rectangular	∞	1	0,000088	$1,3 \times 10^{-9}$
u_{res}	B	Normal	∞	1	0,00003	0,00003
U_c	B	Normal	∞	$2 \cdot 0,0142$	0,00132	0,00132
Incertidumbre combinada					0,01026	0,00863
Grados de libertad efectivos					16	16
Factor de cubrimiento k					2,15	2,15
Incertidumbre expandida $U_{95\%}$					0,02206	0,01855

Al aplicar la corrección la incertidumbre del diámetro se reduce, ya que el término general, u_p , disminuye y además constituye la mayor componente, a pesar de añadir la

incertidumbre debida a la corrección. En cuanto a la incertidumbre cilíndricidad, ésta aumentó ligeramente debido a la corrección incompleta de la fuerza de cada punto.

5.4.4 Resultados del ensayo

La Figura 5 - 37 muestra las coordenadas de los puntos de contacto de la primera medición del anillo patrón, con los datos iniciales y corregidos de cada punto, usando el modelo de fuerzas individualizado por punto.

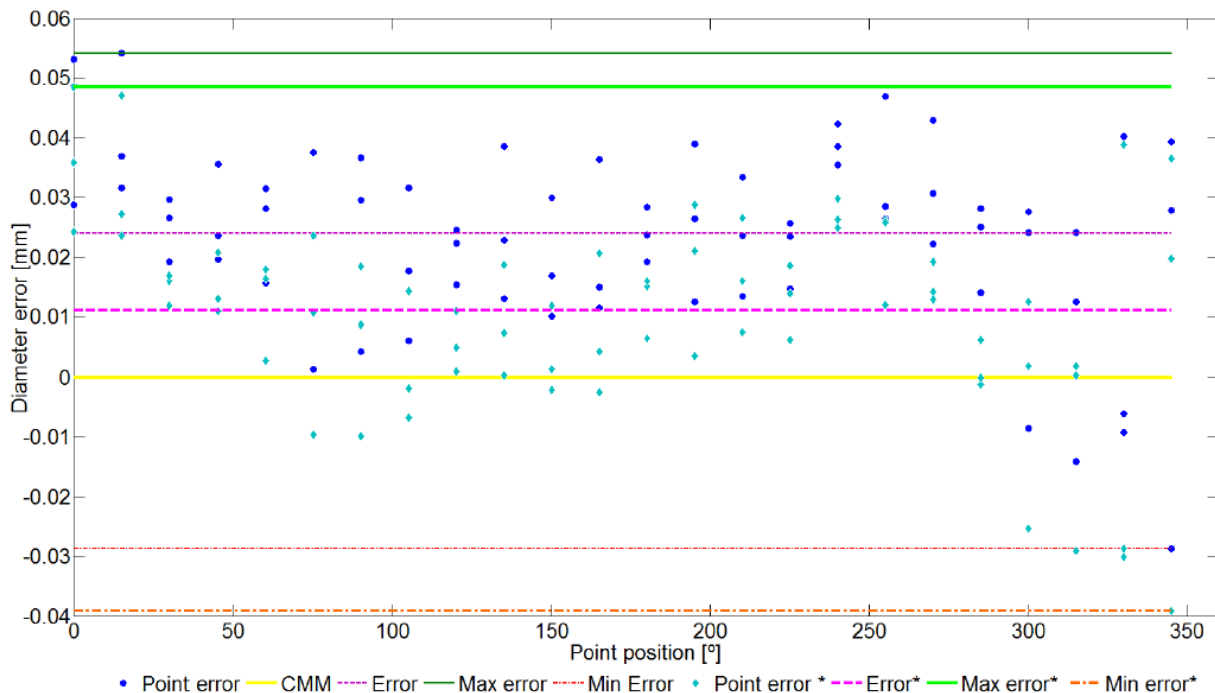


Figura 5 - 37 Puntos de contacto y error de diámetro sin corregir y corregidos (*) para el modelo con fuerza puntual

Tras la corrección de la deflexión, el error de cada punto es menor con respecto a los datos iniciales por lo que el diámetro máximo, medio y mínimo se reducen, Figura 5 - 38. En este caso se puede observar que algunos puntos se han corregido más que otros debido a la diferencia de fuerza de contacto en cada punto.

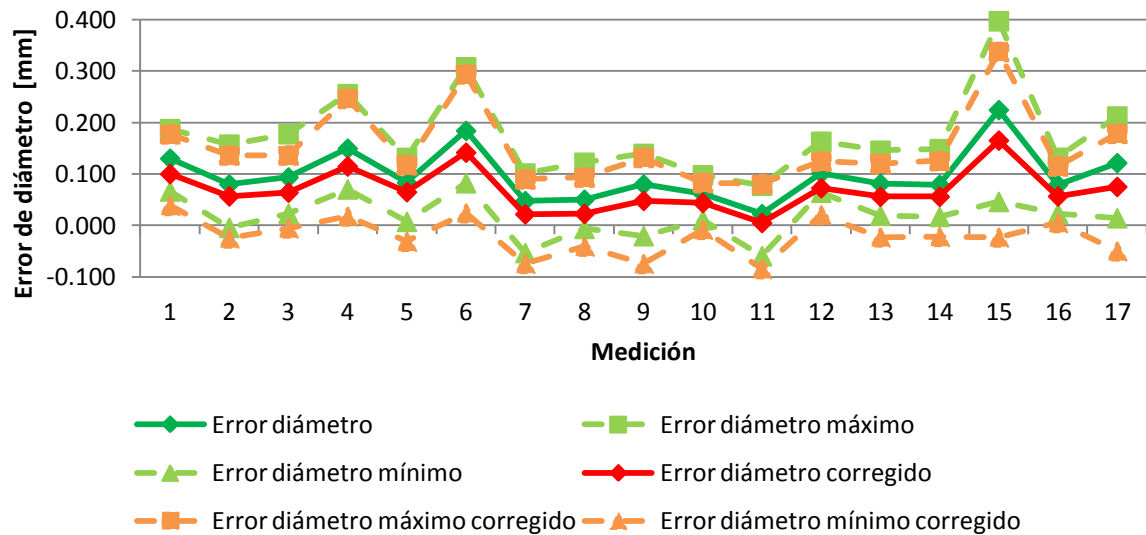
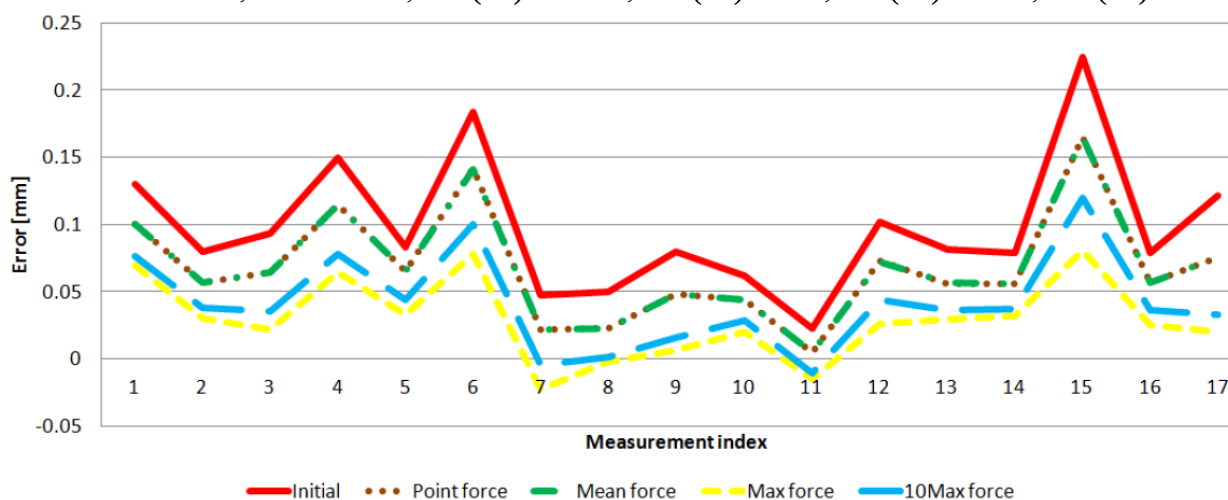


Figura 5 - 38 Resultados del error de diámetro tras aplicar el modelo de corrección

La lectura del error de diámetro mejoró en todas las mediciones y con todos los modelos de fuerza utilizados para la corrección. A menudo la mayor corrección se produce en las mediciones que inicialmente tenían mayor error, debido principalmente a que en estas medidas se produce mayor fuerza. Los diámetros máximos y mínimos también se reducen, llegando a estar la mayoría de diámetros mínimos por debajo del valor de referencia. La Tabla 5. 11 muestra los resultados de mejora al aplicar los distintos modelos de corrección.

Tabla 5. 11 Resultados de los errores con los modelos de compensación

Medición	Error de diámetro (mm) (% de mejora)				
	Inicial	F. puntual	F. media	F. Max	F. 10Max
1	0,130	0,100 (23)	0,100 (23)	0,070 (46)	0,077 (41)
2	0,080	0,057 (29)	0,057 (29)	0,031 (61)	0,038 (53)
3	0,093	0,064 (31)	0,064 (31)	0,022 (76)	0,035 (62)
4	0,150	0,110 (27)	0,115 (23)	0,065 (57)	0,078 (48)
5	0,083	0,065 (22)	0,065 (22)	0,033 (60)	0,044 (47)
6	0,184	0,142 (23)	0,141 (23)	0,078 (58)	0,100 (46)
7	0,048	0,023 (52)	0,022 (54)	-0,022 (146)	-0,004 (108)
8	0,050	0,023 (54)	0,023 (54)	-0,002 (104)	0,001 (98)
9	0,080	0,048 (40)	0,048 (40)	0,00 (91)	0,016 (80)
10	0,062	0,044 (29)	0,044 (29)	0,021 (66)	0,029 (53)
11	0,023	0,005 (78)	0,005 (78)	-0,015 (165)	-0,010 (143)
12	0,102	0,073 (28)	0,072 (29)	0,026 (75)	0,044 (57)
13	0,081	0,056 (31)	0,056 (31)	0,030 (63)	0,036 (56)
14	0,079	0,056 (29)	0,056 (29)	0,032 (59)	0,037 (53)
15	0,225	0,165 (27)	0,165 (27)	0,081 (64)	0,120 (47)
16	0,079	0,057 (28)	0,057 (28)	0,025 (68)	0,036 (54)
17	0,121	0,075 (38)	0,076 (37)	0,020 (83)	0,033 (73)



Para mayor comprensión visual de la gráfica se debe notar que los resultados del modelo de fuerza puntual y de la fuerza media producen prácticamente los mismos resultados por lo que sus curvas están superpuestas en la gráfica. La menor reducción del error de diámetro se consigue con el modelo que aplica la fuerza media a todos los puntos, seguido de la fuerza 10Max y la fuerza máxima. En algunos casos, en las curvas de fuerza máxima y 10Max, la corrección sobrepasa el diámetro de referencia. Esto es debido a que la corrección de la deformación del palpador se realiza para el caso de mayor deformación en todos los puntos.

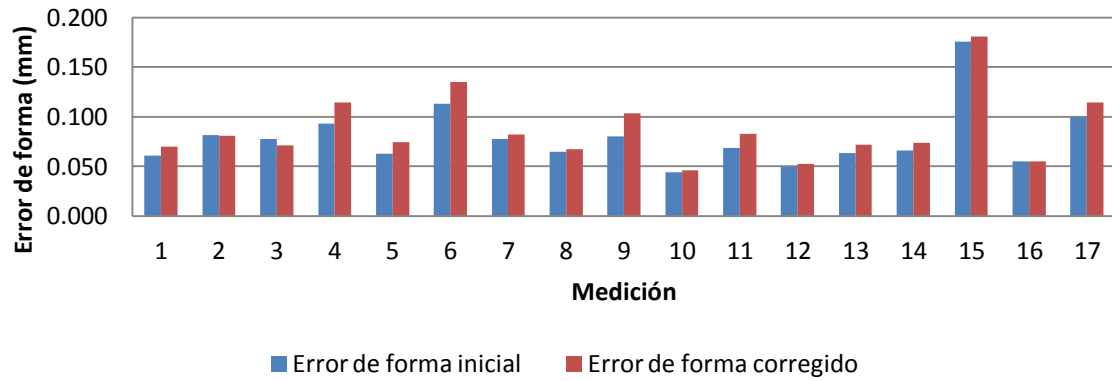


Figura 5 - 39 Resultados del error de forma para el modelo de fuerza puntual

En el caso del error de forma o cilindridad los modelos que utilizan la misma fuerza para todos los puntos mantienen el mismo error de forma, ya que el error máximo y mínimo se corrigen simultáneamente en la misma cantidad, por lo que la diferencia entre ambos permanece constante. Al aplicar el modelo de corrección con la fuerza de contacto en cada punto se encontraron resultados ligeramente peores a los iniciales, Figura 5 - 39. Esta diferencia se debe a la corrección incompleta de la fuerza de contacto (2 de las 3 componentes son medidas por el sensor). Por ello, aunque se reduce el valor de diámetro la deformación en cada punto no se reduce completamente.

5.5 Conclusiones

De los ensayos realizados se ha desprendido conclusiones importantes para el estudio del comportamiento de los brazos de medir por coordenadas. Principalmente, se ha identificado la fuerza de medir por coordenadas como uno de los factores más importantes ya que el aumento de esta produce un considerable aumento del error añadido por estos instrumentos al error base de las características geométricas medidas. Además, el comportamiento del brazo de medir por coordenadas y los resultados obtenidos varían significativamente al considerar los diferentes tipos de características geométricas y los tipos de tolerancia (dimensionales o geométricas).

En cuanto a los operarios que controlan el brazo de medir por coordenadas y los parámetros de medición, se ha comprobado el comportamiento tan diferente que puede llegar a tener. Este comportamiento de los operarios difiere tanto en el nivel de fuerza utilizado como en la dispersión de sus mediciones. De esta manera, los operarios con mayor habilidad (menor fuerza de contacto y dispersión) consiguen los mejores resultados de medición y los operarios que aplican fuerzas mayores obtiene peores resultados y con peor repetibilidad. La diferencia entre los operarios es significativa pudiendo llegar a validar o rechazar la misma pieza al ser medida por un operario u otro con las normativas vigentes. El conjunto de mediciones de los operarios (de niveles de fuerza distintos) permite, además, establecer la relación (prácticamente lineal en todos los casos) entre la fuerza de contacto y los resultados de medición. Además, sólo con el estudio de la fuerza de medición aplicada en el palpador ya supone una mejora significativa en la medición con brazos de medir por coordenadas.

En el estudio detallado de cada característica geométrica los factores de tamaño (diámetro de cilindros o esfera) o posición relativa (inclinación de planos) no es un factor significativo que arroje resultados diferentes. Es decir, la fuerza de contacto produce efectos similares en los resultados para, por ejemplo, cilindros interiores de 20 mm como de 80 mm. Sin embargo en durante el diseño y desarrollo de los ensayos se observó que la accesibilidad o la facilidad de medición para el operario si es un factor importante que se traduce en mayores niveles de fuerza para posiciones de piezas que generan peor accesibilidad.

En cuanto a la magnitud de los errores añadidos por los efectos del aumento de la fuerza de contacto, éstos empeoran considerablemente los resultados de medición para rangos

de niveles de fuerza de contacto comúnmente encontrados en la medición manual con operario. Los resultados varían en función de la característica geométrica y el tipo de tolerancia pero se puede decir que el aumento de la fuerza de contacto media de 0,5 N a 1,5 N produce un aumento de errores de diámetro aproximado de 0,100 y de 0,010 mm para errores de forma, siendo posibles errores mayores. De esta manera debe buscarse operario que actúen dentro del menor nivel de fuerza de contacto medio y dispersión posibles para minimizar los efectos negativos. La adición de mecanismos supletorios a la medición con brazos de medir por coordenadas puede limitar la fuerza de contacto ejercida para garantizar la fiabilidad de estos instrumentos, así como mejorar su precisión.

Además, se han obtenido resultados satisfactorios al aplicar el sensor de fuerza de contacto al estudio de los brazos de medir por coordenadas. Aunque de las tres componentes de la fuerza únicamente se leen 2, es suficiente para comprobar la importancia de la fuerza de contacto y corregir sus efectos. Además, es posible completar y mejorar este sensor, de cara a líneas futuras.

En el caso particular del estudio de una característica específica (ensayo del anillo patrón), el cual ha sido medido con una cantidad mayor de puntos, la relación entre la fuerza de contacto y los errores de medición se mantiene o se intensifica. Este comportamiento es explicado por la menor variabilidad que tiene un operario al medir el mismo elemento y que una mayor cantidad de puntos permite reducir el impacto de errores puntuales excesivos dentro de toda la distribución de puntos. Además, esta información y la geometría de la pieza pueden ser utilizadas para plantear modelos de corrección de la deformación del palpador. Al aplicar estos modelos de corrección se ha logrado la reducción del error de diámetro de manera significativa. Por otra parte, el error de forma se mantiene igual o con un ligero empeoramiento debido a la incompleta lectura de la fuerza de contacto. La posible mejora del sensor en el futuro producirá mayores reducciones del error de diámetro y completar el modelo para el error de forma.

Conclusiones

6.1 Conclusiones

Esta tesis ha mostrado el estado actual de la técnica de los brazos de medir por coordenadas, en relación no sólo con sus características constructivas (su tecnología) sino también con sus características metrológicas y las fuentes de error que las afectan, sobre todo en relación con el factor operario y la técnica o forma de medir. Para ello, también se han detallado y discutido distintas metodologías de calibración y evaluación que se encuentran definidas tanto en la escasa normativa existente en este ámbito, como en los trabajos de otros investigadores. De las conclusiones extraídas de este estudio y del análisis del comportamiento extraído de las investigaciones preliminares, se obtuvieron las principales líneas de actuación sobre las cuales se sustenta esta Tesis. De esta manera, la tesis se ha centrado en el estudio de los factores que aportan mayor incertidumbre a las mediciones utilizando una metodología y un patrón específicamente desarrollados para evaluar los brazos de medir por coordenadas, así como el factor operario y su técnica de medición, factores revelados como fundamentales y no incluidos en las normas actuales. Consecuentemente a los resultados de esta parte, se decidió estudiar la fuerza de contacto que actúa sobre el palpador y que es ejercida por el operario directamente al controlar el brazo de medir como uno de los principales parámetros que definen el comportamiento del operario. Para ello, se diseñó e implementó un sensor capaz de medir la fuerza de contacto ejercida durante la medición con objeto de registrar en tiempo real la fuerza que actúa sobre el palpador. Por último, y coherentemente con estos registros de fuerzas obtenidos, se ha diseñado un modelo geométrico de compensación de errores que permite minimizar los errores cometidos.

A lo largo de la presente Tesis se han identificado varias causas que afectan al nivel de precisión de los brazos así como a la falta de fiabilidad en términos generales. Es sabido que la incertidumbre de sus mediciones es significativamente mayor en comparación con la de las MMC. Por una parte, las características de diseño de los propios brazos, la redundancia de su estructura y el control manual, unido a la capacidad de medir un punto desde casi infinitas posiciones de las articulaciones del brazo y la imposibilidad de conocer la trayectoria de medición de antemano hacen difícil determinar el error que se comete en la medición. Este hecho hace que el control de los parámetros de medición (factor operario y su técnica de medición) sea un aspecto clave. Por otra parte, la falta de conocimiento sobre el comportamiento de los brazos de medir por coordenadas y de estudios fiables sobre sus

fuentes de error provoca una cierta incertidumbre en los resultados de las mediciones con estos instrumentos y en su fiabilidad. Por ejemplo, no se pueden asegurar unos resultados de medición al cambiar de operario. Además, las metodologías de evaluación existentes no permiten conocer realmente el error de los brazos separándolo de la influencia que ejerce cada operario sobre él.

La propuesta del patrón geométrico junto a la metodología de evaluación expuesta en esta Tesis permite la evaluación completa de los brazos de medir por coordenadas mediante la incorporación de características geométricas con diferentes tipos de tolerancias, las cuales obligan a introducir el factor operario y su técnica de medición. De esta manera, los resultados obtenidos muestran que el comportamiento de los brazos de medir por coordenadas no dependen de la distancia, al contrario que las MMC. Además, se ha demostrado el comportamiento diferente que tiene las diferentes características geométricas y el tipo de tolerancia considerado, consiguiendo cada uno de ellos un error y dispersión de las mediciones diferente. Los errores y la variabilidad de los resultados vienen dados por las diferencias en las superficies de cada característica geométrica, la accesibilidad a la medición manual de dicha superficie y en gran medida a la acción del operario. El control de los numerosos parámetros de medición únicamente por parte del operario conlleva un aumento significativo de los errores de medición así como la variabilidad entre mediciones de un mismo elemento.

De forma similar se desarrolló una metodología de evaluación enfocada a cuantificar la incertidumbre aportada tanto por el operario como por la técnica de medición que éste utiliza en función del tipo de tolerancia a verificar. Los resultados muestran que la contribución a la incertidumbre de las mediciones depende de tres grandes factores: el brazo de medir por coordenadas, el operario y la técnica de medición. Estos factores se distribuyen de manera distinta según el tipo de tolerancia: en tolerancias geométricas la mayor parte corresponde al brazo de medir por coordenadas, seguido por el factor operario y por último la técnica de medición. Además, los errores asociados al brazo de medir con este tipo de tolerancias son, en la mayoría de casos, menores a 0,010 mm sobre un error (general) de 0,020 mm, por lo que el error base del brazo prevalece. En el caso de las tolerancias dimensionales, la técnica de medición pasa a ser la componente principal, seguida por el operario y por último el brazo de medir. Este comportamiento se agudiza en tolerancias que relacionan dos elementos. La contribución al error del brazo de medir en este caso es menor a 0,020 mm sobre errores de 0,040 y de 0,100 mm dependiendo del tipo de tolerancia, por lo

que prevalece el factor operario y la técnica de medición. De esta manera se observa un error asociado al brazo de medir inferior o muy inferior al resultado total del error, por lo que se podría llegar a determinar erróneamente que el brazo se encuentra descalibrado.

Los resultados explican que la evaluación o calibración únicamente con un tipo de tolerancia supone una evaluación o calibración incompleta, ya que no se asegura la correcta medición de los restantes tipos de tolerancias. De igual manera, los resultados muestran que el operario es un factor inherente y fundamental en la obtención de mediciones correctas y fiables, por lo que éste debe ser incluido en la evaluación de los brazos de medir pudiendo incluso llegar a establecerse una acreditación o cualificación para cada operario.

Por otra parte, la adición al patrón de características tipo esferas y círculos virtuales se planteó como una metodología de evaluación rápida y de bajo coste. De esta manera, estas características geométricas aportan parámetros en sus resultados similares a la evaluación mediante las normas existentes. Este patrón de características virtuales reduce considerablemente la cantidad de información y el tiempo de la evaluación, permitiendo al usuario final controlar la evolución en el tiempo del brazo de medir por coordenadas y determinar así cuándo es preciso realizar una evaluación completa.

El sensor de fuerza desarrollado para medir la fuerza de contacto ha permitido conocer el comportamiento de los operarios en la medición y estudiar cómo afecta este parámetro a los errores de medición en la verificación de los diferentes tipos de tolerancia. La fuerza de contacto supone una importante contribución a los errores de medición y a la falta de repetibilidad de estos instrumentos, debido principalmente a que es un parámetro no corregido y a que no es uniforme a lo largo de la medición y en repeticiones de éstas. Además, se ha comprobado que los operarios presentan comportamientos distintos, situándose en niveles de fuerza y dispersión diferentes. De esta manera, los operarios que consiguen los mejores resultados de medición son aquellos que aplican la menor fuerza posible con mayor uniformidad. Nuevamente, se encontró que el tipo de tolerancia condiciona la respuesta del operario y los resultados de medición. Sin embargo, el tamaño o posición de los elementos a medir no presentan un comportamiento diferente en cuanto a la fuerza desarrollada en medición o los errores, por lo que la información obtenida, por tipo de tolerancia, es utilizada para caracterizar el tipo de medición de acuerdo a la fuerza de contacto ejercida. De esta manera, el operario debe aplicar la mejor técnica de medición para cada elemento con el objetivo de reducir el error añadido por los brazos de medir al mínimo posible. Como se ha

visto en los resultados, la influencia de la fuerza presenta coeficientes de correlación altos y la mejora de la medición puede significar una reducción superior al 50% del error añadido.

Gracias a la información conseguida se planteó un modelo de corrección particularizado a modo de ejemplo a la medida de cilindros interiores, en el que se corrigen las coordenadas de los puntos de acuerdo a la geometría mencionada y la fuerza de contacto recogida. La aplicación de estos modelos de corrección permite una mejora significativa en la reducción de los errores de medición, en lo que respecta a la influencia de la técnica de medición y del operario.

6.2 Trabajos futuros

Del estudio efectuado de sobre los brazos de medir por coordenadas, los resultados y las conclusiones obtenidas en esta tesis se pueden considerar una serie de acciones planteadas aquí como futuras líneas de investigación y mejora:

- Diseñar y desarrollar nuevos patrones para la evaluación de brazos de medir por coordenadas que reduzcan los errores inherentes a su uso. El uso de nuevos materiales con reducido coeficiente térmico y diseños ligeros permitirán controlar en mayor grado la fiabilidad de las mediciones. Además, estos patrones deben ir acompañados de sistemas complementarios de multiposicionamiento rápido y rígido. El diseño de las características geométricas, su posición y las tolerancias que permiten evaluar es importante y debe ir acorde a la metodología de evaluación completa como la propuesta en esta Tesis.
- Desarrollar un sensor de fuerza de contacto mejorado capaz de medir la fuerza de contacto y la dirección de ésta de forma que se adapte completamente para una medida convencional con brazo de medir por coordenadas sin limitaciones. Además, es conveniente que la recogida de esta fuerza se integre dentro del proceso de medición realizado por el software de control del brazo. Esto permitirá diseñar nuevos modelos de corrección basados en la deformación real del palpador, lo que llevará a reducir en mayor grado los errores de medición.
- Aplicar el modelo de corrección de la fuerza de contacto a la calibración de los brazos de medir por coordenadas. Se puede incluir dentro del modelo cinemático del brazo de los modelos de corrección anteriores, de forma que ya en la calibración se pueda reducir su error de base.
- Extender el estudio de la deformación sufrida durante la medida a todos los segmentos que componen el brazo, de forma que se pueda mejorar el modelo cinemático y alcanzar niveles de precisión más altos.
- A partir del estudio de base presentado en la Tesis, se puede estudiar en profundidad las diferentes técnicas de medición para determinar aquellas que

aporten menor error a las mediciones de cada elemento. Este estudio debe llevar a la propuesta de modelos de corrección adicionales aplicables a los diferentes tipos de características geométricas y tolerancias.

Tanto las actuaciones de la presente tesis, como gran parte de las potenciales actuaciones comentadas como líneas futuras, forman parte de propuestas que se engloban en un proyecto de investigación concedido dentro de la convocatoria del Programa Nacional de Proyectos de Investigación Fundamental en el marco del VI Programa Nacional de Investigación Científica, Desarrollo e Innovación Tecnológica 2008-2011, Subprograma de Proyectos de Investigación Fundamental no Orientada (BOE de 31 diciembre de 2011), titulado “Aseguramiento de la calidad y representación del conocimiento en la medición con sistemas portátiles de medir por coordenadas”, (ref. DPI2012-36642-C02-01, Universidad de Oviedo – E.P.S. Ingeniería de Gijón, IP: Eduardo Cuesta). Proyecto dentro del cual este doctorando participa desde sus orígenes. Sin duda la concesión de esta ayuda es una garantía de que la investigación en este ámbito debe y puede continuar.

6.3 Diseminación de resultados

De la investigación realizada en esta Tesis han resultado las siguientes publicaciones:

Revistas indexadas en el JCR

- D. GONZÁLEZ-MADRUGA, E. CUESTA, J. BARREIRO, A.I. FERNÁNDEZ-ABIA. Application of a force sensor to improve the reliability of measurement with articulated arm coordinate measuring machines. *Sensors*. 13 (8), 10430-1448, 2013.
- E. CUESTA, D. GONZÁLEZ-MADRUGA, B.J. ÁLVAREZ, J. BARREIRO. A new concept of feature-based gauge for Coordinate Measuring Arm evaluation. *Measurement Science and Technology* (en revisión 17 Octubre 2013).
- D. GONZÁLEZ-MADRUGA, J. BARREIRO, E. CUESTA, S. MARTÍNEZ-PELLITERO. Influence of human factor in the AACMM performance: a new evaluation methodology. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. (en revision 7 Octubre 2013).

Patentes

- E. CUESTA, ET AL. Método y patrón de características geométricas para calibración y verificación de la medición con brazos articulados de medir por coordenadas”, Patente española (en revisión) P201300241, Marzo 2013.

Publicaciones en congresos internacionales

- E. CUESTA, B.J. ÁLVAREZ, S. MARTÍNEZ, J. BARREIRO, D. GONZÁLEZ-MADRUGA. Evaluation of Influence Parameters in the Reliability of the Measuring with Coordinated Measuring Arms. *4th Manufacturing Engineering Society International Conference (MESIC-2011)*, Cadiz, 2011. Ponencia publicada posteriormente en *American Institute of Physics Conferences Proceedings 2011*. 1431, 214-224, 2011.
- E. CUESTA, B. J. ÁLVAREZ, F. SÁNCHEZ-LASHERAS, R. I. FERNÁNDEZ, D GONZALEZ-MADRUGA. Feasibility evaluation of Photogrammetry versus Coordinate Measuring Arms for the assembly of welded structures. *Advances in Materials Research (Advances in Materials Processing Technologies, 2011)*. 498, 103-108, 2011.

- D. GONZÁLEZ-MADRUGA, E. CUESTA, J. BARREIRO, S. MARTINEZ-PELLITERO, B.J. ÁLVAREZ. Real-Time contact force measurement system for Portable Coordinate Measuring Arms. *Annals of DAAAM for 2012 & Proceedings of the 23rd International DAAAM Symposium*. 23 (1), 267-272, 2012.
- H. PATIÑO, D. GONZÁLEZ-MADRUGA, E. CUESTA, B. J. ÁLVAREZ, J. BARREIRO. Study of Virtual Features in the Performance of Coordinate Measuring Arms. *Annals of DAAAM for 2013 & Proceedings of the 24th International DAAAM Symposium*, Viena 20 - 27 Octubre 2013.
- D. GONZÁLEZ-MADRUGA, J. BARREIRO, E. CUESTA, B. GONZÁLEZ, S. MARTÍNEZ-PELLITERO. AACMM Performance Test: Influence of Human Factor and Geometric Features. *Annals of DAAAM for 2013 & Proceedings of the 24th International DAAAM Symposium*, Viena 20 - 27 Octubre 2013.
- D. GONZÁLEZ-MADRUGA, E. CUESTA, H. PATIÑO, J. BARREIRO, S. MARTÍNEZ-PELLITERO. Evaluation of AACMM using the virtual circles method. *5th Manufacturing Engineering Society International Conference (MESIC-2013)*. Zaragoza, 2013. Ponencia publicada posteriormente en *Procedia Engineering*, 63, 243-251, 2013.

Bibliografía

- ALICI, G. SHIRINZADEH, B. A systematic technique to estimate positioning errors for robot accuracy improvement using laser interferometry based sensing. *Mechanism and Machine Theory*, 40, pp 879–906, 2005.
- ALICI, G. JAGIELSKI, R. SEKERCIOGLU, A. SHIRINZADEH, B. Prediction of geometric errors of robot manipulators with Particle Swarm Optimisation method. *Robotics and Autonomous Systems*, 2006.
- AGUILAR, J.J. SANTOLARIA, J. YAGÜE, J.A. MAJARENA, A.C. Multi-posture kinematic technique and parameter identification algorithm for articulated arm coordinate measuring machines. *IEMET, International Multi-Conference on Engineering and Technical Innovation*, 2008.
- ASME B89.1.12M. Methods for performance evaluation of coordinate measuring machines, *Mechanical Society of Mechanical Engineers*, 1990.
- ASME B89.4.22-2004. Methods for performance evaluation of articulated arm coordinate measuring machines, *Mechanical Society of Mechanical Engineers*, 2004.
- ASME B89.6.2-1973. Temperature and humidity environment for Dimensional Measurement., *Mechanical Society of Mechanical Engineers*, 1973.
- BRAU, A. SANTOLARIA, J. GELLA, R.M. VILA, L. AGUILAR, J.J. Técnica de verificación de instrumentos de medición por coordenadas portátiles basada en plataforma multi-registro. *XVIII Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica, Asociación Española de Ingeniería Mecánica*, 2010.
- BRAU, A. Diseño, fabricación y calibración de una plataforma multi-registro para la verificación de instrumentos de medir por coordenadas portátiles *Tesis doctoral. Universidad de Zaragoza*, 2013.
- CAUCHICK-MIGUEL, P. KING, T. DAVIS, J. MMC verification: a survey. *Measurement*. 17 (1), pp 1- 16, 1996.
- CAUCHICK-MIGUEL, P.A. KING, T.G. Factors which influence MMC touch trigger probe performance. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 38 (4), pp 363-374, 1998.
- CUESTA, E. ÁLVAREZ, B.J. MARTINEZ, S. BARREIRO, J. GONZÁLEZ-MADRUGA, D. Evaluation of influence parameters on measurement reliability of coordinated measuring arms, *AIP Conference Proceedings*, 1413 (217), pp 214-224, 2012(a).
- CUESTA, E. ÁLVAREZ, B.J. SÁNCHEZ-LASERAS, F. FERNANDEZ, R.I. GONZÁLEZ-MADRUGA, D. Feasibility evaluation of photogrammetry versus coordinate measuring arms for the assembly of welded structures. *Advanced Materials Research*. 498 103-108, 2012(b).

- DENAVIT, J. & HARTENBERG, R.S. A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices. *Journal of Applied Mechanics, Transactions of the ASME*, 77, pp 215-221, 1955.
- DOBOSZ, M. WOZNIAK, A. Metrological feasibilities of MMC touch trigger probes. Part II Experimental verification of the 3D theoretical model of probe pretravel.. *Measurement*. 34 (4), pp 287-299, 2003.
- DOBOSZ, M. WOZNIAK, A. MMC touch trigger probes testing using a reference axis. *Precision Engineering*. 29 (3), pp 281-289, 2005.
- DROUET, PH. DUBOWSKY, S. ZEGHLOUL, S. MAVROIDIS, C. Compensation of geometric and elastic errors in large manipulators with an application to a high accuracy medical system. *Robotica*, 20, pp 341-352, 2002.
- EA-4/02 M. Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration. *European co-operation for Accreditation*. 1999.
- ESTLER, W.T. Error compensation for MMC touch trigger probes. *Precision Engineering*. 19 (2-3), pp 85-97, 1996.
- EVERETT, L.J.; DRIELS, M. & MOORING, B.W. Kinematic modelling for robot calibration. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1, pp 183-189, 1987.
- EVERETT, L.J. & SURYOHADIPROJO, A.H. A study of kinematic models for forward calibration of manipulators. *IEEE International Conference of Robotics and Automation*, pp 798-800, 1998.
- FURUTANI, R. SHIMOJIMA, K. TAKAMASU, K. Kinematical calibration of articulated MMC using multiple simple artifacts. *XVII IMEKO World Congress*, 2003.
- FURUTANI, R. SHIMOJIMA, K. TAKAMASU, K. Parameter calibration for noncartesian MMC. *VDI Berichte*, 1860, pp 317-26, 2004.
- GAO, G. WANG, W. LIN, K. CHEN, Z. Kinematic Calibration for Articulated Arm Coordinate Measuring Machines Base on Particle Swarm Optimization. *Second International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation*, 1, pp 189-192 2009(a).
- GAO, G. WANG, W. LIN, K. CHEN, Z. Structural Parameter Identification for Articulated Arm Coordinate Measuring Machines. *International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation*. 2, pp 128-131, 2009(b).
- GAO, G. WANG, W. ZHOU, J. Study on the error transfer of articulated arm coordinate measuring machines. *Telkomnika*, 22 (2), pp 637-641, 2013.

- GATTI G. DANIELI, G. A practical approach to compensate for geometric errors in measuring arms: application to a six-degree-of-freedom kinematic structure. *Measurement science and technology*, 2008.
- GOSWAMI A, QUAID A, PESHKIN M. Identifying robot parameters using partial pose information. *IEEE Control Syst Mag* 1993;13(5):6–14, 1993(a).
- GOSWAMI, A. & BOSNIK, J.R. On a relationship between the physical features of robotic manipulators and the kinematic parameters produced by numerical calibration. *Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME*, 115 (4), 892-900, 1993(b).
- GUM, Guide to the expression of uncertainty in measurements. *Geneva: International Organization for Standardization – ISO*; 2008.
- HAMANA, H. TOMINAGA, H. OZAKI, M. FURUTANI, R. Calibration of articulated arm coordinate measuring machine considering measuring posture. *10th International Symposium on Measurement and Quality Control*, 2010.
- HAYATI, S. Robot arm geometric link parameter estimation. *Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control*, 3, pp. 1477-1483, 1983.
- HOLLERBACH, J.M. WAMPLER, C.W. The calibration index and taxonomy for robot kinematic calibration methods. *International Journal of Robotics Research*, 15 (6), pp 573-591, 1996.
- HSU, T.W. EVERETT, L.J. Identification of the kinematic parameters of a robot manipulator for positional accuracy improvement. *Computers in Engineering, Proceedings of the International Computers in Engineering Conference and exhibition*, 1, pp 263-267, 1985.
- I-MING CHEN, GUILIN YANG, CHEE TAT TAN, SONG HUAT YEO. Local POE model for robot kinematic calibration. *Mechanism and Machine Theory*, 36, pp 1215-1239, 2001.
- ISO 10360-2. Geometrical product specifications (GPS) -- Acceptance and reverification - tests for coordinate measuring machines (MMC) -- Part 2: MMCs used for measuring linear dimensions, *International Organization for Standardization*, 2009.
- ISO 14253-1. Geometrical product specifications (GPS) – Inspection by measurement of workpieces and measuring equipment – Part 1: Decision rules for proving conformity or nonconformity with specifications. *International Organization for Standardization*, 1999.
- ISO 14253-2. Geometrical product specifications (GPS) – Inspection by measurement of workpieces and measuring equipment – Part 2: Guidance for the estimation of uncertainty in GPS measurement, in calibration of measuring equipment and in product verification, *International Organization for Standardization*, 1999.
- ISO 15530-3. Geometrical product specifications (GPS) – Coordinate measuring machines (MMC): Technique for determining the uncertainty of measurement – Part 3: Use of

- calibrated workpieces or measurement standard. *International Organization for Standardization*, 2011.
- ISO/IEC GUIDE 98-3:2008. Uncertainty of measurement -- Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement, GUM, 1995.
- KOVAC, I. FRANK, A. Flexible arm as a coordinate measuring device in dimensional metrology. *1st international conference and general meeting of the European society for precision engineering and nanotechnology*, Bremen. Conference Proceedings, 2, pp 339-342, 1999(a).
- KOVAC, I. FRANK, A. High-precision testing and calibration metrology for portable coordinate measuring arms. *International Symposium on Laser Metrology for Precision Measurement and Inspection in Industry*, 1999 (b).
- KOVAC, I. FRANK, A. Testing and calibration of coordinate measuring arms. *Precision Engineering*, 25(2), pp 90–97, 2001.
- KOVAC, I. KLEIN, A. Apparatus and a procedure to calibrate coordinate measuring arms. *Journal of Mechanical Engineering*, 48 (1), pp 17–32, 2002.
- LEVENBERG, K. A method for the solution of certain non-linear problems in least squares. *The Quarterly of Applied Mathematics*, 2 , pp 164–8, 1944.
- LI, X.H. CHEN, B. QIU, Z.R. The calibration and error compensation techniques for an Articulated Arm MMC with two parallel rotational axes. *Measurement*, 46, pp 603-609, 2013.
- LIANG, Q. ZHANG, D. WANG, Y. GE, Y. Development of a touch probe based on five-dimensional force-torque transducer for coordinate measuring machine (MMC). *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 28 (2), pp 238-244, 2012.
- LIN, S.W. WANG, P.P. FEI, Y.T. CHEN C.K. Simulation of the errors transfer in an articulation-type coordinate measuring machine. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 30, 879-886, 2005.
- MARQUARDT, D.W. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. *Journal of Society for industrial and Applied Mathematics*, 11(2), pp 431–41, 1963.
- MEGGIOLARO, M. SCRIFIGNANO, G. DUBOWSKY S. Manipulator calibration using a single endpoint contact constrain. *26th Biennial Mechanisms Conference, Baltimore, Maryland, ASME, Estados Unidos*, 2000.
- MOORING, B.W. The effect of joint axis misalignment on robot positioning accuracy. *Computers in Engineering, Proceedings of the International Computers in Engineering Conference and Exhibit*, 2, pp 151-155, 1983.

- MOORING, B.W. & TANG, G.R. An improved method for identifying the kinematic parameters in a six axis robots. *Computers in Engineering, Proceedings of the International Computers in Engineering Conference and Exhibit*, 1, pp 79-84, 1984.
- NAFI, A. MAYER, J.R.R. Wozniak, A. Novel MMC-based implementation of the multi-step method for the separation of machine and probe errors. *Precision Engineering*. 35 (2), pp 318-328, 2011a.
- NAFI, A. MAYER, J.R.R. Wozniak, A. Reduced configuration set for multi-step method applied to machine and probe error separation on a MMC. *Measurement*. 2011b.
- OIML R 111-1. Weights of classes E1, E2, F1, F2, M1 ,M1-2, M2, M2-3 and M3. Part1: Metrological and technical requirements. *International Organization of Legal Metrology*. 2004.
- OUYANG, J.F. LIU, W.L. QU, X.H. Quick error verification of portable coordinate measuring arm. *ISMTII*, 2010.
- PEREIRA, P.H. HOCKEN, R.J. Characterization and compensation of dynamic errors of a scanning coordinate measuring machine. *Precision Engineering*. 31 (1), pp 22-32, 2007.
- PHILLIPS, S.D. BORCHARDT, B. ESTLER, W.T. Buttress, J. The estimation of measurements uncertainty of small circular features measured by coordinate measuring machines. *Precision Engineering*. 22 (2), pp 87-97, 1998.
- PIRATELLI-FILHO, A. LESNAU, G.R. Virtual spheres gauge for coordinate measuring arms performance test. *Measurement*, 3 (2), pp 236-244, 2009.
- PIRATELLI-FILHO, A. TAVARES FERNANDES, F.H. VALDÉS ARENCIBIA, R. Application of Virtual Spheres Plate for AACMMs evaluation. *Precision Engineering*, 32 (2), pp 349-355, 2010.
- PIRATELLI-FILHO, A. TAVARES FERNANDES, F.H. VALDÉS ARENCIBIA. Interlaboratory comparison of articulated arms MMC using virtual spheres plate gauge. *XX IMEKO*, 2012.
- SANTOLARIA, J. Diseño y calibración de brazos articulados de medición por coordenadas e integración de sensor láser por triangulación para medición sin contacto. *Tesis doctoral. Universidad de Zaragoza*, 2006.
- SANTOLARIA, J. AGUILAR, J.J. YAGÜE J.A. PASTOR J. Kinematic parameter estimation technique for calibration and repeatability improvement of articulated arm coordinate measuring machines. *Precision Engineering*, 32:251–68, 2008.

- SANTOLARIA, J. YAGÜE, J.A. BRAU, A. BROSED, F.J. Performance evaluation of probing systems in data capture for kinematic parameter identification and verification of articulated arm coordinate measuring machines. *XIX IMEKO World Congress, Fundamental and Applied Metrology*, 2009 (a).
- SANTOLARIA, J. YAGÜE, J.A. JIMÉNEZ, R. AGUILAR, J.J. Calibration based thermal error model for articulated arm coordinate measuring machines. *Precision Engineering*. 33, 476–485, 2009 (b).
- SANTOLARIA, J. AGUILAR, J.J. BRAU, A. BROSED, F.J. Evaluación de técnicas de captura de datos para identificación de parámetros cinemáticos y verificación de brazos articulados de medición por coordenadas. *Conference Proceedings. Mesic'09*. 1, 8, 2009 (c).
- SANTOLARIA, J. AGUILAR, J.J. Kinematic calibration of articulated arm coordinate measuring machines and robot arms using passive and active self-centering probes and multipose optimization algorithm based in point and length constrains. *Robot Manipulators, New Achievements*, 2009 (d).
- SANTOLARIA, J. AGUILAR, J.J. GUILLOMÍA, D. CAJAL, C. A crenellated-target-based calibration method for laser triangulation sensors integration in articulated measurement arms. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 27, pp 282 – 291, 2010(a).
- SANTOLARIA, J. BRAU, A. VELAZQUEZ, J. AGUILAR, J.J. A self-centering active probing technique for kinematic parameter identification and verification of articulated arm coordinate measuring machines. *Measurement science and technology*, 2010(b).
- SANTOLARIA, J. MAJARENA, A.C. SAMPER, D. GARCÍA, J.J. Aguilar, J.J. Comparación de estándares internacionales de verificación de brazos articulados de medición por coordenadas: ASME B89.4.22-2004 vs VDI 2617_9-2009. *XVIII Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica, Asociación Española de Ingeniería Mecánica*, 2010(c).
- SCHWENKE, H. KNAPP, W. HAITJEMA, H. WECKENMANN, A. SCHMITT, R. DELBRESSINE, F. Geometric error measurement and compensation of machines-An update. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*. 57 (2), pp 660-675, 2008.
- SHEN, Y. MOON, S. Error compensation of coordinate measurement in computer-integrated manufacturing using neural networks. *Journal of Materials Processing Technology*. 62 (1-2), pp 12-17, 1996.
- SHEN, Y. PRETRAVEL Compensation for horizontally oriented touch trigger probes with straight styli. *Journal of Manufacturing Systems*. 18 (3), pp 175-186, 1999.
- SHEN, Y. MOON, S. Investigation of point to point performance test of touch trigger probes on coordinate measuring machines. *Robotics and Computer-Integrated -Manufacturing*. 17 (3), pp 247-254, 2001.
- SHIMOJIMA, K. FURUTANI, R. TAKAMASU, K. ARAKI, K. The Estimation Method of Uncertainty of Articulated Coordinate Measuring Machine. *VDI Berichte*, 1860, pp 245-250, 2004.

- SLADEK, J. OSTROWSKA, K. GASKA, A. Modelling and identification of error of coordinate measuring arms with the use of a metrological model. *Measurement*. 46, pp. 667-679, 2013.
- SLADEK, J. OSTROWSKA, K. GACEK, K. Kinematic Metrological Model of the Coordinate Measuring Arm (MCMA). XIX IMEKO, 2009.
- STONE, H.W. SANDERSON, A.C. NEUMANN, C.F. Arm signature identification. *IEEE International Conference On Robotics And Automation*, 1, pp 41-48, 1986.
- TADEJ, T. BOJAN A. Integration of a laser interferometer and a MMC into a measurement system for measuring internal dimensions. *Measurement*. 44, pp426-433, 2011.
- VDI/VDE 2617 PART 9, Acceptance and reverification test for articulated arm coordinate measuring machines. *Verein Deutscher Ingenieure*, 2009.
- VRHOVEC, M. MUNIH, M. Improvement of coordinate measuring arm accuracy. *Proceedings of the 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, San Diego, CA, USA, 2007.
- VRHOVEC, M. KOVAC, I. MUNIH, M. Measurement and compensation of deformations in coordinate measurement arm. *Optomechatronic Technologies (ISOT)*, Toronto, ON, Canadá, 2010.
- WECKENMANN, A. ESTLER, T. PEQQ, G. MCMURTRY, D. Probing Systems in Dimensional Metrology. *CIRP Annals-Manufacturing Engineering*. 53 (2), pp 657-684, 2004.
- WHITNEY, D.E.; LOZINSKI, C.A. ROURKE, J.M. Industrial robot calibration method and results. *Computers in Engineering, Proceedings of the International Computers in Engineering Conference and Exhibit*, 1, pp 92-100 1984.
- WOZNAK, A. DOBOSZ, M. Metrological feasibilities of MMC touch trigger probes. Part I 3D theoretical model of probe pretravel. *Measurement*. 34 (4), pp 273-286, 2003.
- WOZNAK, A. DOBOZ. M. Factors influencing accuracy of a coordinate measuring machine. Instrumentation and Measurement, *IEEE Transactions on instrumentation and measurement*. 54 (6), pp 2540-2548, 2005a.
- WOZNAK, A. DOBOSZ, M. Influence of measured objects parameters on MMC touch trigger probe accuracy of probing. *Precision Engineering*. 29 (3), pp 290-297, 2005b.
- YAGÜE, J.A. VELAZQUEZ, J. ALBAJEZ, J.A. AGUILAR J.J. LOPE, M.A. SANTOLARIA J. Development and calibration of señ-centring probes for assessing geometrical errors of machines. *Measurement science and technology*. 20, 2009.

YANG, Q. BUTLER, C. BAIRD, P. Error compensation of touch trigger probes. *Measurement*. 18 (1), pp 47-57, 1996.

ZHAO F. XU X. XIE S.Q. Computer-Aided Inspection Planning – The state of the art, *Computers in Industry*, 60, pp 543-466, 2009.

ZHUANG, H. ROTH, Z.S. Robot calibration using the CPC error model. *Journal of Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, 9 (3), pp 227-237, 1992.