



Universidad Autónoma de San Luis Potosí

Facultad de Ingeniería

Centro de Investigación y Estudios de Posgrado

“Análisis de los factores que influyen en la estimación de la incertidumbre de las máquinas de medición por coordenadas (MMC)”

T E S I S

Para obtener el grado de
Maestro en Ingeniería Mecánica

Presenta:

Pablo James Martínez Moreno

Asesor:

Dr. Orlando Guarneros García

Febrero, 2013

19 de julio de 2012

**AL ING. PABLO JAMES MARTÍNEZ MORENO
P R E S E N T E. –**

En atención a su solicitud de Temario, presentada por el **Dr. Orlando Guarneros García** Asesor de la Tesis que desarrollará Usted, con el objeto de obtener el Grado de **Maestría en Ingeniería Mecánica**. Me es grato comunicarle que en la Sesión de Consejo Técnico Consultivo celebrada el día 19 de julio del presente año, fue aprobado el Temario propuesto:

TEMARIO:

**“ANÁLISIS DE LOS FACTORES QUE INFLUYEN EN LA ESTIMACIÓN DE
LA INCERTIDUMBRE DE LAS MÁQUINAS DE MEDICIÓN POR
COORDENADAS (MMC)”**

INTRODUCCIÓN.

- I. ANTECEDENTES.
- II. MÁQUINAS DE MEDICIÓN POR COORDENADAS.
- III. INCERTIDUMBRE.
- IV. DISEÑO DE EXPERIMENTOS.
- V. METODOLOGÍA DE EXPERIMENTACIÓN.
- VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.

CONCLUSIONES.

BIBLIOGRAFÍA.

ANEXOS.

“MODOS ET CUNCTARUM RERUM MENSURAS AUDEBO”

ATENTAMENTE



M. I. JORGE ALBERTO PÉREZ GONZÁLEZ
DIRECTOR

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE SAN LUIS POTOSÍ
FACULTAD DE INGENIERÍA
DIRECCION



**FACULTAD
DE INGENIERÍA**

Av. Manuel Nava 8
Zona Universitaria • CP 78290
San Luis Potosí, S.L.P.
tel. (444) 826 2330 al39
fax (444) 826 2336
www.uaslp.mx

**bcb

AGRADECIMIENTOS

Con la presente tesis concluye una etapa de mi vida y a todas las personas que confiaron en mí les estaré eternamente agradecido.

Agradezco a Dios por las pruebas que en el trayecto de este trabajo me ha dado y la fortaleza que me dio para poderlas superar.

A mi esposa Daney García Zamarripa, por su incondicional apoyo en todo momento a lo largo de estos años, por su amor, por su comprensión, por ser mi principal inspiración a lo largo de este tiempo.

A mis padres Ma. Ofelia Moreno Reyna y Paulino Martínez Esquivel, por su amor, por todo lo que me han dado en la vida, quien soy es por ustedes. Muchas gracias.

A mis abuelitos Leocadio Moreno Rojas y Tomasa Reyna Ponce, por todo el cariño que he recibido, por ser un modelo a seguir en mi vida.

A mis hermanos Gustavo, Hugo, Pedro quienes a pesar de la distancia que nos separa, han sabido estar siempre presentes; a Jonathan, Cristian, Zuleima y Yael Martínez Moreno por su apoyo y cariño incondicional que sólo un hermano puede dar.

A mi asesor Dr. Orlando Guarneros García, por la confianza en mí depositada, su asesoría, su tiempo, su amistad, su constante apoyo personal y profesional, por ser el precursor de este proyecto.

A mis amigos, por su interés y apoyo en la realización este proyecto.

A mis compañeros Javier, José Luis, Laura, Claudia, Dulce, Guillermo, Miguel, Nery, Carlos, Abraham, Daniel, por sus conocimientos e interés a este proyecto.

Finalmente agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), al Fondo de Apoyo a la Investigación (FAI), por haber financiado

parte de mis estudios de maestría, también doy las gracias a la Universidad Autónoma de San Luis Potosí y al Posgrado de Ingeniería Mecánica por el apoyo otorgado.

RESUMEN

El trabajo se centra en la importancia de la estimación de la incertidumbre en las Máquinas de Medición por Coordenadas (MMC), la contribución de sus fuentes y su influencia, para ello se analiza el comportamiento del equipo al identificar aquellos factores (cantidad de puntos, longitud de muestreo, diámetro de palpador, velocidad, etc.) que inciden en una mayor o menor magnitud en el parámetro de salida (incertidumbre). Se recurre al uso del diseño de experimentos como una herramienta estadística que es capaz de cuantificar diferencias significativas en los resultados de los experimentos. Finalmente y con los resultados de dos fases experimentales se generan las recomendaciones de operación del equipo.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	i
RESUMEN	iii
ÍNDICE	v
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
ÍNDICE DE TABLAS	xii
INTRODUCCIÓN	1
Planteamiento del problema	3
Objetivos.....	4
Estructura de la tesis	4
I. ANTECEDENTES.....	7
1.1 <i>Historia y desarrollo de las MMC</i>	7
1.2 <i>Importancia y uso de las MMC</i>	9
1.3 <i>Trabajos relacionados</i>	11
II. MÁQUINAS DE MEDICIÓN POR COORDENADAS	13
2.1 <i>Las ventajas de la MMC y su economía en la industria.</i>	13
2.2 <i>Las características de las MMC y sus funciones</i>	14
2.3 <i>Componentes funcionales de las MMC</i>	26
2.4 <i>Exactitud de medición de las MMC</i>	29
2.5 <i>Unidades de procesamiento de datos para el sistema MMC</i>	30
2.7 <i>Palpadores y accesorios para la MMC</i>	31
2.8 <i>Condiciones ambientales</i>	34
2.9 <i>Avances en las MMC</i>	37
2.10 <i>Proceso de medición</i>	37

III. INCERTIDUMBRE	39
3.1 Fuentes de incertidumbre	40
3.2 Materiales de referencia certificados.....	42
3.3 Trazabilidad	42
3.4 Calibración.....	43
3.5 Diagrama de niveles	44
3.6 Definiciones	45
3.7 Observaciones al Diagrama de niveles.....	46
3.8 Bloques patrón.....	47
IV. DISEÑO DE EXPERIMENTOS.....	51
4.1 Procedimiento recomendado del diseño de experimentos.....	53
4.2 Uso de técnicas estadísticas en la experimentación.....	55
4.3 Diseño factorial	55
4.4 Definición de experimento factorial	56
4.5 Ventajas de los diseños factoriales	56
4.6 Efecto principal y efecto de interacción.....	57
4.7 Diseño factorial general	57
4.8 Diseño factorial general 2^k	58
4.9 Estimación de contrastes, efectos y suma de cuadrados.....	59
4.10 Análisis de varianza (ANOVA) del diseño factorial 2^k	61
4.11 Coeficiente de determinación.....	62
V. METODOLOGÍA DE EXPERIMENTACIÓN	65
5.1 Factores de estudio	65
5.2 Equipo utilizado en la experimentación.....	69
5.3 Experimentación	70
5.4 Primera fase experimental	77

5.5 Segunda fase experimental	79
5.6 Plan de medición	80
5.7 Influencia de las diferentes fuentes de incertidumbre	83
VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	87
6.1 Resultados de la primera fase experimental	87
6.2 Conclusión de primera fase experimental	95
6.3 Resultados de la segunda fase experimental	96
6.4 Comparación y discusión de resultados.....	102
CONCLUSIONES	105
Contribuciones.....	107
Trabajos posteriores	108
BIBLIOGRAFÍA	109
ANEXO A: Procedimiento de encendido de la MMC	113
ANEXO B: Procedimiento para iniciar un nuevo plan en la MMC	117
ANEXO C: Procedimiento de calibración de la MMC	127
ANEXO D: Certificado Bloques Patrón.....	133
ANEXO E: Certificado de Calibración de la Mesa de Coordenadas	137
ANEXO F: Manual de operación del “Data Logger”	143
ANEXO G: Informe de calibración del “Data Logger”	151
ANEXO H: Informe de medición para la empresa Remy Remanufacturing, S. de R.L. de C.V.	153
ANEXO I: Tablas de resultados 1° fase de experimentación	163
ANEXO J: Tablas de resultados 2° fase de experimentación	171
ANEXO K: Diagramas de nivel	175
ANEXO L: Tipos de distribuciones de probabilidad.....	177

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Fig. 1.1 Esquema de codificador lineal.</i>	8
<i>Fig. 2.1 MMC tipo puente movable.</i>	15
<i>Fig. 2.2 MMC tipo puente-piso.</i>	16
<i>Fig. 2.3 MMC tipo puente fijo.</i>	17
<i>Fig. 2.4 MMC tipo puente en forma de L.</i>	18
<i>Fig. 2.5 MMC tipo voladizo (cantiléver) en eje Y móvil.</i>	19
<i>Fig. 2.6 MMC tipo columna de movimiento simple.</i>	19
<i>Fig. 2.7 MMC tipo columna con mesa XY.</i>	20
<i>Fig. 2.8 MMC tipo brazo horizontal mesa movable.</i>	21
<i>Fig. 2.9 MMC tipo brazo horizontal mesa fija.</i>	22
<i>Fig. 2.10 MMC manual.</i>	23
<i>Fig. 2.11 MMC CNC.</i>	25
<i>Fig. 2.12 Mecanismo de conducción cremallera y piñón.</i>	28
<i>Fig. 2.13 Palpadores y accesorios para MMC.</i>	32
<i>Fig. 2.14 Centrado cinemático.</i>	34
<i>Fig. 3.1 Calibración del palpador con esfera de referencia.</i>	44
<i>Fig. 3.2 Nomenclatura para bloques patrón.</i>	49
<i>Fig. 5.1 Diámetro de punta del palpador.</i>	65
<i>Fig. 5.2 LM-MMC-01.</i>	69
<i>Fig. 5.3 LM-JBP-01.</i>	70
<i>Fig. 5.4 Data Logger 174H.</i>	71
<i>Fig. 5.5 Accesorios de sujeción.</i>	72
<i>Fig. 5.6 Colocación del bloque patrón.</i>	72
<i>Fig. 5.7 Calibración de la punta con la esfera de referencia.</i>	73
<i>Fig. 5.8 Modelo CAD del bloque patrón 100 mm.</i>	74
<i>Fig. 5.9 Modelo CAD del bloque patrón 8 mm.</i>	74
<i>Fig. 5.10 Construcción de cubo de seguridad bloque patrón 100 mm.</i>	75

<i>Fig. 5.11 Construcción de cubo de seguridad bloque patrón 8 mm.</i>	75
<i>Fig. 5.12 Lista de características por medir.</i>	76
<i>Fig. 5.13 Medición de patrones de 8 y 100 mm.</i>	77
<i>Fig. 5.14 Puntos que conforman los planos de alineación para el bloque de 100 mm.</i>	80
<i>Fig. 5.15 Puntos que conforman los planos de alineación para el bloque de 8 mm.</i>	81
<i>Fig. 5.16 Medición con 6 y 12 puntos para el bloque de 100 mm.</i>	81
<i>Fig. 5.17 Medición con 6 y 12 puntos para el bloque de 8 mm.</i>	81
<i>Fig. 5.18 Puntos de medición bloque patrón 100 mm.</i>	82
<i>Fig. 5.19 Puntos de medición bloque patrón 8 mm.</i>	82
<i>Fig. 5.20 Plano de referencia y puntos sujetos a medición.</i>	82
<i>Fig. 5.21 Configuración de la medición en modo automático.</i>	83
<i>Fig. 6.1 Gráfica de probabilidad normal para incertidumbre.</i>	92
<i>Fig. 6.2 Diagrama de Pareto estandarizado para incertidumbre.</i>	93
<i>Fig. 6.3 Efectos principales.</i>	93
<i>Fig. 6.4 Interacción entre diámetro y longitud.</i>	94
<i>Fig. 6.5 Interacción entre diámetro y velocidad.</i>	94
<i>Fig. 6.6 Interacción entre longitud y puntos</i>	95
<i>Fig. 6.7 Valores óptimos de trabajo para reducir incertidumbre.</i>	96
<i>Fig. 6.8 Gráfica de probabilidad normal para incertidumbre</i>	99
<i>Fig. 6.9 Diagrama de Pareto estandarizado para incertidumbre del diseño 2³.</i>	99
<i>Fig. 6.10 Estimación de efectos.</i>	100
<i>Fig. 6.11 Interacción entre diámetro y longitud</i>	100
<i>Fig. 6.12 Interacción entre longitud y velocidad.</i>	101
<i>Fig. 6.13 Interacción entre diámetro y velocidad.</i>	101
<i>Fig. A.1 Interruptores.</i>	113
<i>Fig. A.2 Sistema de aire seco.</i>	113
<i>Fig. A.3 Control aire acondicionado.</i>	114
<i>Fig. A.4 Palanca de encendido principal.</i>	114
<i>Fig. A.5 Consola de mando.</i>	114

<i>Fig. B.1 Requisitos para el plan de medición.</i>	117
<i>Fig. B.2 Posición inicial de la máquina “Home”.</i>	118
<i>Fig. B.3 Configuración de la punta y el palpador.</i>	118
<i>Fig. B.4 Selección de la punta y el palpador.</i>	118
<i>Fig. B.5 Alineación.</i>	119
<i>Fig. B.6 Crear nueva base de alineación.</i>	119
<i>Fig. B.7 Configuración de la alineación.</i>	120
<i>Fig. B.8 Cubo de seguridad.</i>	121
<i>Fig. B.9 Determinación del cubo de seguridad.</i>	121
<i>Fig. B.10 Cargar base de alineación existente.</i>	122
<i>Fig. B.11 Puntos a tomar para el plano de referencia A.</i>	122
<i>Fig. B.12 Puntos a tomar para el plano de referencia B.</i>	123
<i>Fig. B.13 Puntos a tomar para el plano de referencia C.</i>	123
<i>Fig. B.14 Medición de un diámetro.</i>	124
<i>Fig. B.15 Selección de comando de medición de un diámetro.</i>	124
<i>Fig. B.16 Configuración de la medición.</i>	125
<i>Fig. C.1 Configuración de la punta y el palpador.</i>	127
<i>Fig. C.2 Selección de punta de palpado “MasterProbe”.</i>	127
<i>Fig. C.3 Selección del ángulo de desplazamiento de la punta de palpado.</i>	128
<i>Fig. C.4 Selección de la posición de la esfera patrón.</i>	128
<i>Fig. C.5 Selección de la orientación del patrón esférico.</i>	128
<i>Fig. C.6 Palpar en dirección del eje de la punta.</i>	129
<i>Fig. C.7 Resultados de los valores de la calibración con “MasterProbe”.</i>	130
<i>Fig. C.8 Configuración de la punta y el palpador.</i>	130
<i>Fig. C.9 “New” para nombrar una nueva punta.</i>	131
<i>Fig. C.10 “QualifyStylus” para calificar la punta.</i>	131
<i>Fig. C.11 Palpar en dirección del eje de la punta.</i>	132
<i>Fig. C.12 Resultados de los valores de la calibración.</i>	132

<i>Fig. F.1 “Data Logger”</i>	143
<i>Fig. F.2 Pantalla de visualización del “Data Logger”</i>	144
<i>Fig. H.1 Metodología de la medición del rotor</i>	154
<i>Fig. H.2 Medición del rotor lado derecho</i>	154
<i>Fig. H.3 Concentricidades internas del rotor lado derecho</i>	156
<i>Fig. H.4 Concentricidades externas del rotor lado derecho</i>	156
<i>Fig. H.5 Medición del rotor lado opuesto</i>	157
<i>Fig. H.6 Concentricidades internas del rotor lado opuesto</i>	158
<i>Fig. H.7 Concentricidades externas del rotor lado opuesto</i>	158
<i>Fig. H.8 Metodología de medición</i>	160
<i>Fig. H.9 Medición de la flecha</i>	160
<i>Fig. L.1 Distribución normal</i>	177
<i>Fig. L.2 Distribución rectangular</i>	179

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 3.1 Clasificación de los Bloques Patrón en Sistema Métrico.</i>	48
<i>Tabla 3.2 Juego de Bloques Patrón en Sistema Métrico.</i>	48
<i>Tabla 4.1 Familia de diseños factoriales 2^k ($k \leq 4$).</i>	58
<i>Tabla 4.2 Diseño factorial 2^k y sus efectos de interés, $k \leq 4$.</i>	60
<i>Tabla 4.3 ANOVA para el diseño 2^4.</i>	61
<i>Tabla 5. 1 Número de puntos.</i>	68
<i>Tabla 5.2 Niveles de los factores.</i>	78
<i>Tabla 5.3 Matriz de diseño en orden aleatorio 2^4.</i>	78
<i>Tabla 5.4 Niveles de los factores.</i>	79
<i>Tabla 5.5 Matriz de diseño en orden aleatorio 2^3.</i>	80
<i>Tabla 6.1 Incertidumbre estándar combinada.</i>	89
<i>Tabla 6.2 Totales de réplicas observadas para incertidumbre.</i>	90
<i>Tabla 6.3 Valores de los efectos calculados.</i>	91
<i>Tabla 6.4 Análisis de varianza.</i>	91
<i>Tabla 6. 5 Incertidumbre estándar combinada para segunda fase experimental.</i>	97
<i>Tabla 6.6 Valores de efectos para diseño 2^3.</i>	97
<i>Tabla 6.7 ANOVA para diseño 2^3.</i>	98
<i>Tabla C.1 Orientación de la esfera de referencia.</i>	129
<i>Tabla F.1 Datos técnicos del "Data Logger".</i>	149
<i>Tabla H.1 Resultados de la medición del rotor lado derecho.</i>	155
<i>Tabla H.2 Resultados de la medición del rotor lado opuesto.</i>	159
<i>Tabla H.3 Resultados de medición de la flecha.</i>	161

INTRODUCCIÓN

Actualmente en el área de manufactura del sector industrial se busca más exactitud, velocidad y funcionalidad de las tecnologías de medición. Es cuando, las máquinas de medición por coordenadas (MMC) revelan su potencial demostrando exactitud, innovando los procesos haciéndolos más eficientes. Se puede definir la MMC como “una máquina que emplea tres componentes móviles que se trasladan a lo largo de guías con recorridos mutuamente perpendiculares, para medir una pieza por la determinación de las coordenadas X, Y y Z de los puntos en la pieza con un palpador de contacto o sin contacto, y sistemas de medición del desplazamiento, que se encuentran en cada uno de los tres ejes mutuamente perpendiculares” [1]. La MMC puede realizar varios tipos distintos de mediciones, como la dimensional, posicional, desviaciones geométricas y mediciones de contorno. Lo anterior porque dichas mediciones están representadas en el sistema tridimensional de coordenadas.

Décadas atrás, las MMC eran conocidas solamente en limitados sectores de la industria. Los progresos de la electrónica, la tecnología de las computadoras y los dispositivos de detección, incrementaron de manera progresiva la eficiencia y funcionalidad de la MMC. El acelerado desarrollo y la expansión de las industrias han creado la necesidad de una mejora en la funcionalidad, mayor eficiencia en los sistemas de medición. Debido a esos progresos tecnológicos y demandas industriales, las MMC ahora se utilizan extensivamente en la industria como máquinas de medición, poderosas y versátiles. Las MMC son un instrumento necesario en las áreas de control de calidad que buscan un incremento de la eficiencia y de la exactitud en las mediciones dimensionales, geométricas y de contornos.

Los planos de referencia se utilizan para realizar mediciones, de acuerdo a los métodos convencionales se utilizan diversos instrumentos de medición para cada tipo de medición requerida o específica, gracias a la introducción de máquinas herramientas de control numérico (CN) en la industria, las técnicas de manufactura han experimentado acelerados progresos. Debido a esto se ha

producido un incremento de la complejidad de las piezas que son fabricadas, aumentando los requerimientos para una mayor exactitud para un producto de alta calidad.

El aumento en la demanda de las MMC se debe principalmente a factores como lo son; el progreso en la tecnología digital para los sistemas de medición tridimensional, la integración en la estructura de las MMC con la implementación de computadoras más rápidas, poderosas y de bajo costo, de igual manera se reducen los tiempos de medición, junto con la inspección de productos con formas complejas fabricados por las máquinas herramientas (CN) que ya no pueden analizarse con métodos convencionales y finalmente las compañías requieren que sus proveedores impongan un control de la calidad más estricto.

En el desarrollo de los planes de medición para las MMC, se requieren elegir parámetros para su correcta ejecución y en consecuencia la conveniente interpretación de sus resultados, para lo cual un operador deberá de decidir entre otras cosas; la cantidad de puntos para definir un elemento geométrico, el diámetro del palpador, la velocidad de operación, así como las condiciones en la realización de la medición (temperatura, limpieza y organización), aun cuando la experiencia de los operadores puede sugerirles las mejores condiciones de trabajo, cierto es que difícilmente se encontrarán estudios relacionados con “buenas prácticas” en el manejo de la MMC, por ello los planes de medición no estarán sustentados en la disminución de la incertidumbre, definida por el vocabulario internacional de metrología como: “El parámetro no negativo que caracteriza la dispersión de los valores atribuidos a un mensurando, a partir de la información que se utiliza”[2].

La incertidumbre juega un papel muy importante en la determinación de las magnitudes que el equipo obtiene, no sólo en las MMC sino en cualquier equipo de medición y materiales de referencia, como calibradores, micrómetros y bloques patrón, a tal grado que se ha convertido en un valor inclusive mucho más importante que la misma resolución del instrumento. Siendo que la conformidad de un producto normalmente depende de una tolerancia, la incertidumbre podría dejar

fuera de especificación no a la pieza como tal, sino al equipo de medición en su contexto. A partir de lo anterior es claro que puede existir un vínculo entre la forma de medir y los consecuentes efectos en la incertidumbre, para lo cual el uso de una herramienta estadística como el diseño de experimentos, podría dar certeza a diferencias significativas modificando las condiciones en el proceso de medición.

El diseño de experimentos son técnicas estadísticas que permiten identificar y cuantificar las causas de un efecto (anteriormente llamada condiciones) de tal manera, que se manipulan deliberadamente uno o más efectos con el propósito de medir su efecto en la variable de salida que para efectos de este trabajo será la incertidumbre.

Planteamiento del problema

En la operación de las MMC se necesitan definir ciertas condiciones para la realización de los planes de medición, la mayoría de las condiciones están sujetas a criterio y juicio del operador, y una pocas definidas por alguna norma, como lo sería el caso de la temperatura. Los casos que se pretenden estudiar en el presente trabajo giran en torno a las condiciones de medición (a partir de ahora llamadas factores) y su variación para que en dependencia de ello se aprecie una diferencia en la estimación de la incertidumbre junto con la contribución de sus fuentes.

El análisis de las diferentes fuentes de incertidumbre y los factores a considerar en las mediciones que se realizan con las MMC, requieren de un estudio para cuantificar y realizar una evaluación detallada de sus aportaciones, con ello estimarla y en consecuencia analizar la posibilidad de minimizar la incertidumbre.

Objetivos

Objetivo general

Cuantificar el efecto de los factores que intervienen para la determinación de la incertidumbre en las máquinas de medición por coordenadas.

Objetivos particulares

1. Reconocer en el ejercicio práctico de la MMC aquellas condiciones que pueden repercutir en la incertidumbre de medición.
2. Identificar la influencia de los factores en el cálculo de la incertidumbre.
3. Recurrir al uso del diseño experimental para valorar dicha influencia.
4. De los resultados obtenidos considerar las mejores condiciones para aminorar la incertidumbre.
5. Proponer una metodología de uso general para la interpretación de los resultados proporcionados por el diseño de experimentos.
6. Generar recomendaciones para el manejo de la MMC.

Estructura de la tesis

El trabajo se desarrollará en los siguientes términos.

En el capítulo I se hace una descripción de los antecedentes y además se presenta una breve historia de las MMC, así como su importancia en el ámbito industrial. También se presentan estudios relacionados con la estimación de la incertidumbre y la utilización de diseño de experimentos, diferenciando estas con el propósito del presente trabajo.

En el capítulo II se mencionan algunas de sus principales ventajas en relación con otros equipos de medición y los principios que se requieren para su operación. Además se hace una descripción de normas referidas a exactitud en las MMC.

En el capítulo III se desarrolla el tema de incertidumbre, así como sus fuentes, además de la importancia de la relación existente entre incertidumbre, trazabilidad, calibración y materiales de referencia certificado como lo son los bloques patrón.

El capítulo IV hace referencia al diseño de experimentos, en este se desarrolla a detalle el tema de diseño factorial, se muestra como calcular los efectos principales y sus interacciones, además del cálculo del análisis de varianza.

El capítulo V presenta la metodología llevada a cabo para el estudio de la incertidumbre, además se muestran los factores estudiados y la manera en que se llevaron a cabo dos fases experimentales, se presentan la influencia de las diferentes fuentes de incertidumbre.

En el capítulo VI se realiza un análisis y discusión de resultados obtenidos en las dos fases experimentales, se presentan los resultados para incertidumbre típica combinada y se muestra el comportamiento de los factores y sus interacciones, además del análisis de varianza llevado a cabo en cada fase experimental.

Finalmente se presentan las conclusiones del trabajo de tesis realizado.

I. ANTECEDENTES

La necesidad de medir es evidente en la mayoría de las actividades técnicas o científicas. Para ello debemos recordar la definición de medición como el "proceso por el cual se asignan números o símbolos a atributos de entidades del mundo real de tal forma que los describa de acuerdo con reglas claramente definidas" [3]. La validez de la medición en cualquier disciplina técnica o científica se basa en el respeto a los principios de la teoría general de la medición. Esta idea es análoga a lo que se hace en matemáticas (por ejemplo, en geometría) donde se definen una serie de axiomas básicos y, a partir de ellos, se van estableciendo nuevas conclusiones. El fundamento de la teoría representacional consiste en que toda medición debe asegurar una adecuada representación del atributo real medido mediante los símbolos o números asignados. Una representación por medición de un atributo de una entidad es adecuada si es coherente con la idea conceptual que sobre dicho atributo es comúnmente aceptada por los expertos [4].

Los instrumentos de medición son el medio por el que se hace esta conversión o medida.

1.1 Historia y desarrollo de las MMC

La empresa Ferranti desarrolló una MMC de uso industrial en 1960. Esta máquina incorporó una pantalla digital, que mejoraba el sistema análogo convencional. Para la medición de la longitud, utilizó una retícula óptica (codificador Moiré) que desarrolló el NPL (National Physical Laboratory) en el Reino Unido. Fue en este mismo año, en la Oficina Central de Inspección de Metrología de Japón, que se desarrolló una MMC para la medición de patrones para cuerdas API (Instituto Estadounidense del Petróleo). La primera MMC comercial, empezó a introducirse por Mitutoyo en 1968, con el modelo A1. En ella se utilizaron escalas vernier para determinar los puntos coordenados. Sony desarrolló un magnescape (sistemas de escalas con un codificador magnético) que tenía una resolución de 0.01 mm, para el mercado comercial. Esta escala fue adoptada por Tokyo Seimitsu y por Mitutoyo

(modelo A2), para sus MMC digitales, que fueron lanzadas al mercado en 1969 y 1970. A partir de entonces muchos otros fabricantes han desarrollado varios tipos de MMC, que utilizan diferentes principios de medición de longitud, incluyendo el codificador Moiré, el codificador rotatorio de cremallera, el codificador inductosyn, el magnético y el óptico lineal.

Se desarrolló por Mitutoyo un codificador lineal (ver Fig. 1.1), el cual se empleó en la MMC modelo A21 en el año de 1971, el cual era altamente exacto y sofisticado con una resolución de 0.001 mm, que era capaz de realizar mediciones a alta velocidad. El modelo A1 de lectura por vernier era simple de operar y económico, a éste se le incorporaron codificadores rotatorios. Estos codificadores emplean un mecanismo de cremallera y piñón.

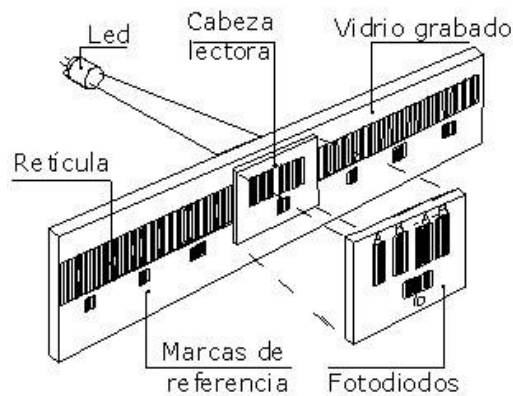


Fig. 1. 1 Esquema de codificador lineal.

Las primeras MMC's fueron el producto de implementar a los equipos de control numérico computarizado dispositivos de apoyo para obtener las mediciones deseadas, la idea de sumar el uso de la computadora a un sistema de coordenadas es completamente opuesta a la concepción que se tenía con el uso de equipos que se caracterizaban a la par con la pieza de trabajo [5].

Posteriormente en 1973 la compañía Carl Zeiss creó una máquina, equipada con un palpador, una computadora y un control numérico. Desde entonces han surgido muchas marcas y modelos de máquinas de coordenadas,

que se distinguen entre sí por sus materiales de fabricación utilizados, software utilizado, versatilidad, alcances de medición [6], etc.

1.2 Importancia y uso de las MMC

Las MMC puede resultar hasta cierto punto rutinaria y de fácil uso. Sin embargo, es un equipo que dispone de sistemas automatizados donde se ejecutan programas incorporados para medición. Además hay que reconocer que como todo instrumento de medición, la obtención de sus magnitudes dependerá de la debida aplicación de sus diferentes capacidades (configuración de los palpadores, variación del ángulo, de la estructura de la MMC y de su resolución).

La medición tridimensional por coordenadas aplicada a los procesos productivos de moldes y herramientas para productos, es de vital importancia en la industria no sólo para cumplir con estándares reglamentarios a los que todos los productos están sujetos, sino que es primordial que los recursos de cualquier empresa se maximicen para lograr obtener una mayor utilidad que es el objetivo básico en cualquier lugar. La aplicación para el control de calidad dimensional (cilindricidad, distancia entre planos, medición de ángulos, paralelismo, planicidad, redondez, etc.) es la actividad inicial para la cual se desarrolló la MMC y se estima que corresponde hoy al 87% de utilización de las tridimensionales instaladas [7].

El desarrollo en las MMC es paralelo en función al aumento de la producción, del nivel de calidad y de complejidad que se tiene hoy en día. La globalización permite que un sin número de empresas intercambian piezas entre sí, exigiendo que el control dimensional sea cada vez más preciso para que garantice, por ejemplo, que una pieza producida en México pueda ser montada en un automóvil fabricado en Alemania, así como una pieza sea desarrollada por diferentes fabricantes. Esta demanda técnica juntamente con la necesidad de mercado donde es cada vez menor el tiempo de lanzamiento de nuevos productos, revolucionó los procesos productivos.

El aumento de demanda que exige mayor eficiencia de los sistemas productivos con un menor tiempo de preparación, así como menor incidencia de mantenimiento y reducción de desperdicios, son factores que alteran la forma de fabricar un producto, y es considerando este panorama que el desarrollo de las funciones de la MMC se acontecen, la vanguardia en MMC es capaz de combinar herramientas y participar de diversos momentos del proceso de producción y así contribuir para el aumento de la calidad, la reducción de tiempo y el aumento de la productividad con un elevado grado de confiabilidad y bajo costo de implantación.

La MMC se utiliza como comparador para verificar si la pieza producida está conforme a los datos del proyecto. En la fabricación de herramental es importante la adecuación de la exactitud de la MMC de acuerdo a las tolerancias del proyecto. Actualmente existen diferentes clases de exactitud para MMC, variando de 0.5 mm hasta máquinas con exactitud de 0.000 1 mm (o inclusive menos), cuanto mayor la exactitud, mayor el costo, de aquí la importancia de elegir la MMC que es más conveniente a las necesidades de medición.

En el control dimensional de productos terminados es donde más se utiliza la MMC, lo cual le da una contribución importante en el proceso productivo. Diferentes herramientas permiten el control dimensional de productos y el análisis de los resultados obtenidos durante la inspección, los cuales pueden relacionarse con software de estadística, para facilitar la interpretación de causas y efectos en la producción, estos resultados pueden transferirse en acumuladores donde puedan estar disponibles las informaciones de producción para diversos sectores interesados en el trámite de la producción.

La MMC tiene un gran impacto para el aumento de la calidad y la productividad en un proceso de producción, debido a la versatilidad de la tecnología con que cuenta. El uso de una misma MMC para todas las actividades en las que ella puede contribuir depende de un detallado estudio de costo – tiempo en cada actividad y de la configuración de los accesorios disponibles. En general se utiliza más de una MMC para ejecutar las diferentes tareas dentro de

un proceso, debido a la influencia que ella puede tener en los resultados, aumentando así la demanda de servicio sobre este tipo de equipamiento.

1.3 Trabajos relacionados

Piratelli-Filho [8] presentó un método para estimar la incertidumbre en las MMC. El método se basa en un ensayo de rendimiento utilizando un calibrador de barra de bola y una técnica de diseño factorial. En este estudio se consideró un diseño factorial 3^2 (3 niveles, 2 factores); sus factores de estudio fueron la longitud de una barra de bola y la orientación con el objetivo de estudiar errores asociados a la orientación y la longitud del volumen de trabajo.

Barini [9] estudió el muestreo punto por punto de superficies complejas utilizando una MMC, este trabajo se basó en un diseño factorial 2^4 completamente al azar, sus factores de estudio fueron densidad de muestreo, la estrategia de medición, la configuración del sonda de palpado y la alineación de la MMC.

Chang-Xue [10] utilizó el diseño factorial fraccionado 2^{5-1} con seis repeticiones de experimentos para examinar la incertidumbre. Esta investigación se enfocó en el diseño experimental para investigar los factores y sus interacciones en la incertidumbre, basándose en la guía ISO para expresiones de incertidumbre de medida (GUM). Utilizaron para demostrar su metodología la incertidumbre de la medida de la ubicación de un agujero medido por una máquina de medición por coordenadas.

Aquino [11] realizó un método para conocer la incertidumbre las MMC de cuatro ejes. Su estudio se basó en el uso de esferas patrón, la técnica propuesta fue colocar 7 esferas, posteriormente obtenía una medición en cada una de estas, luego giraba las esferas un ángulo de 15° hasta completar los 360° , los puntos totales que palpo para determinar la incertidumbre fueron 175.

II. MÁQUINAS DE MEDICIÓN POR COORDENADAS

2.1 Las ventajas de la MMC y su economía en la industria.

Sobre los métodos convencionales de medición las MMC tienen las siguientes ventajas.

1. Eficiencia mejorada de medición, ya que pueden efectuar mediciones que antes eran complicadas de realizar.
2. Minimiza los errores humanos y reduce la fatiga del operador. Se eliminan accesorios de fijación, dispositivos y patrones de referencia.
3. Mayor confiabilidad debido a que la variación en las mediciones causada por el uso de diferentes instrumentos se reduce.
4. Manejo automático de datos.
5. Ventajas de la medición automática usando MMC CNC.
6. Mejoramiento en la calidad del producto.

Las ventajas de las MMC en relación con otros equipos se mencionan a continuación.

1. Todas las caras de la pieza de trabajo, a excepción de la base pueden ser medidas sin cambiar su orientación.
2. La MMC puede determinar las coordenadas de un punto por la operación del palpador. A diferencia de los métodos convencionales donde es mucho más complicado.
3. En inspecciones pasa no pasa las MMC pueden inspeccionar directamente la pieza con el uso de programas donde se quedan predefinidas las tolerancias a utilizar, en cambio el método convencional necesitaba tomar las mediciones para conocer las dimensiones de la pieza; después esas dimensiones se comparan con los valores del diseño y tolerancia.
4. La reducción de tiempos usando equipos MMC es mucho menor que utilizando métodos convencionales.

5. Los tiempos perdidos en la línea de producción, causados por retardos en la línea de producción, pueden ser minimizados [1].

El uso de las MMC en trabajos de inspección, actualmente es muy importante por su alta eficiencia, reducción de tiempos y costos; debido a que se programan procedimientos de medición en una MMC.

Estos programas pueden almacenarse para seguir midiendo piezas idénticas. El tiempo requerido para la creación del programa está incluido en el tiempo de medición estimado de la MMC lo cual genera menores costos. Con métodos convencionales se tenía un gran número de instrumentos para realizar un trabajo de inspección, debido a esto era muy difícil inspeccionar el 100% de las piezas en una línea de producción, lo cual en muchos casos causaban retrasos y en consecuencia aumento en los costos.

2.2 Las características de las MMC y sus funciones

Las normas ISO 10360-1 y la norma ASME B89.4. 1 presentan clasificaciones similares en cuanto a la estructura de las MMC [12][13], a continuación se presenta una descripción de las mismas.

2.2.1 Clasificación por estructura

Existen diferentes estructuras de MMC, las cuales están diseñadas para satisfacer distintos requerimientos de maniobrabilidad, intervalo de medición y exactitud.

2.2.1.1 Tipo de puente móvil

- Estructura

El carro que guía el eje Z se desplaza en la dirección del eje X, a lo largo de la viga horizontal que es perpendicular al eje Z, que se mueve en dirección vertical y

que esta soportada en sus dos extremos por dos columnas. La viga y las columnas forman un “puente” que se mueve en la dirección del eje Y, a lo largo de dos guías, que están en un plano horizontal y perpendiculares a los ejes X y Z (ver Fig. 2.1).

- Características

La flexión es mínima en estas MMC, debido a que la viga es sostenida en sus dos extremos, lo cual ofrece mayor exactitud. La MMC tiene un espacio muy amplio, ya que se puede mover el puente a uno de sus extremos, esto facilita la colocación de piezas de trabajo. Además este tipo de MMC, puede ser fabricada sin cambiar su diseño en diferentes intervalos de medición

Entre sus desventajas se tiene que el peso del puente tiene una inercia grande, lo que hace difícil mover el palpador manualmente. Cuando se tienen máquinas con intervalos de medición grande en la dirección longitudinal, el operador debe pararse a un lado de la máquina durante la medición, en estos casos se utiliza un control remoto para el manejo de máquinas grandes.

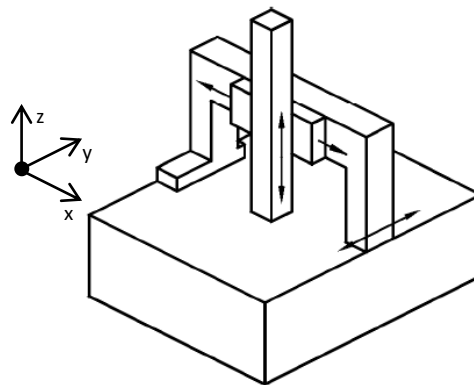


Fig. 2.1 MMC tipo puente móvil.

2.2.1.2 Tipo puente-mesa

- Estructura

El eje Z se desplaza en dirección vertical. El carro que guía el eje se mueve en la dirección del eje X, a través de la viga que es perpendicular al eje Z. Esta viga se

mueve en dirección al eje Y a lo largo de dos guías que se encuentran en un plano horizontal. Las guías se colocan sobre las bases en el extremo superior de dos columnas que están fijas a la base de la máquina.

- Características

La flexión de la viga es mínima ya que está sostenida en ambos extremos, así se proporciona una mayor exactitud.

2.2.1.3 Tipo puente-piso (tipo pórtico)

- Estructura

Estructura igual que la del tipo puente móvil, su diferencia oscila en que está directamente en el piso con un asentamiento firme, lo cual proporciona una rigidez mucho mayor. Esta estructura se utiliza en MMC relativamente grandes (ver Fig. 2.2).

- Características

Tiene un intervalo de medición grande. Como sus componentes móviles son pesados, cada eje es movido por un motor. En algunos tipos extra- ancho, tiene un mando dual con el objetivo de prevenir un movimiento irregular de la viga, que pueda afectar la exactitud de la medición.

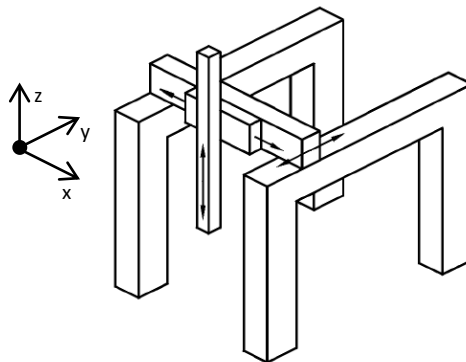


Fig. 2.2 MMC tipo puente-piso.

2.2.1.4 Tipo puente fijo

- Estructura

El eje Z se mueve en la dirección vertical. El carro que guía ese eje se desplaza en la dirección del eje X, a lo largo de la viga horizontal que es perpendicular al eje Z y se apoyan en ambos extremos por dos columnas. La mesa de medición se mueve en dirección al eje Y (ver Fig. 2.3).

- Características

El tipo de puente fijo no tiene movimiento en el puente o en su viga, esto permite que la viga sea diseñada para una rigidez máxima que proporcione alta exactitud. Cada eje es movido por un motor para asegurar la exactitud en el desplazamiento.

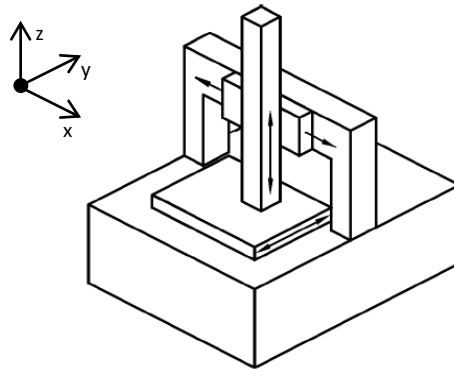


Fig. 2.3 MMC tipo puente fijo.

2.2.1.5 Tipo puente en forma de L

- Estructura

Es una variación del tipo puente deslizante para minimizar la inercia cuando se mueve el puente en la dirección longitudinal (ver Fig. 2.4).

- Características

La inercia de los miembros en movimiento es menor, por lo que resulta una operación más fácil. Como cada miembro móvil es más ligero en su peso, es menos rígido y menos fuerte.

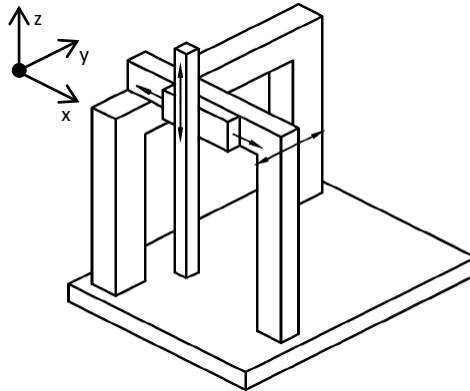


Fig. 2.4 MMC tipo puente en forma de L.

2.2.1.6 Tipo voladizo (cantilever) con eje Y móvil

- Estructura

El eje Z se mueve en la dirección vertical. El carro que guía el eje se desplaza en la dirección del eje Y, a lo largo de la viga horizontal en voladizo. La viga se mueve en la dirección del eje X a lo largo de una guía que está en el plano horizontal y perpendicular a los ejes X y Z (ver Fig. 2.5).

- Características

Como tres lados de la MMC están abiertos, se facilita cargar/descargar piezas de trabajo. También ofrece la ventaja de poder medir una pieza de trabajo que sobresalga a los extremos de la mesa de medición. Como la viga del eje Y se sostiene únicamente por un lado, se flexiona más que los tipos que están sostenidos por sus extremos. El tipo voladizo se está volviendo menos popular.

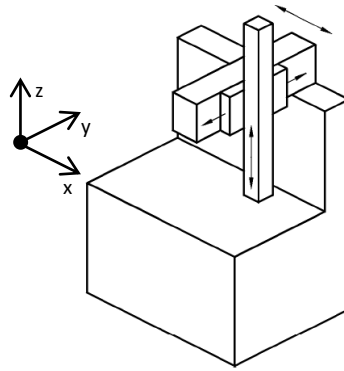


Fig. 2.5 MMC tipo voladizo (cantiléver) en eje Y móvil.

2.2.1.7 Tipo columna de movimiento simple

- Estructura

El eje Z se mueve en dirección vertical. La columna entera se incorpora a la guía del eje Y a lo largo de una guía horizontal y perpendicular a Z. La mesa de medición se mueve en dirección del eje X a lo largo de una guía horizontal y que es perpendicular a Y y Z (ver Fig. 2.6).

- Características

Este diseño se emplea en tipos de gran exactitud, debido a que cada escala lineal está colocada cerca del eje para satisfacer el principio de Abbe. Este tipo de MMC usa un mando por motor, ya que el palpador y la pieza de trabajo tiene que ser desplazados para la medición.

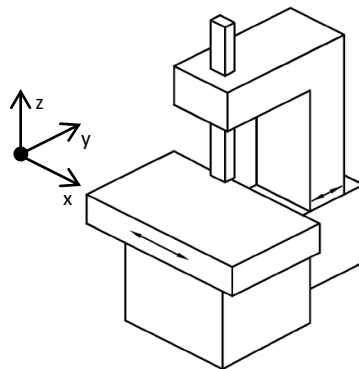


Fig. 2.6 MMC tipo columna de movimiento simple.

2.2.1.8 Tipo columna con mesa XY

- Estructura

El eje Z se mueve en dirección vertical y la mesa de medición se mueve en dos direcciones ortogonales (X y Y) en un plano horizontal (ver Fig. 2.7).

- Características

Este diseño se utiliza para MMC de tamaño pequeño. La mesa como el palpador con el eje Z, tienen que ser desplazados para la medición, por esto se dificulta la operación manual. El mantenimiento de una mesa de alta exactitud con recorrido cruzado es difícil.

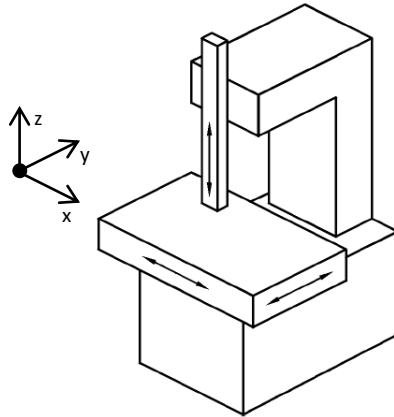


Fig. 2.7 MMC tipo columna con mesa XY.

2.2.1.9 Tipo brazo horizontal mesa movable

- Estructura

El carro que soporta el brazo horizontal se mueve en la dirección vertical (eje Y). El palpador está colocado horizontalmente al brazo, la columna se mueve en la dirección del eje X, con una guía perpendicular al eje Y. Este tipo normalmente tiene una mesa giratoria (ver Fig. 2.8).

- Características

Sufre una flexión de su brazo cuando avanza y retrocede en la dirección del eje Z. La carga y descarga de las piezas de trabajo es fácil por el diseño de abertura, no es adecuada para piezas de mucho peso. Cada eje esta movido por un motor, por que la operación manual es difícil.

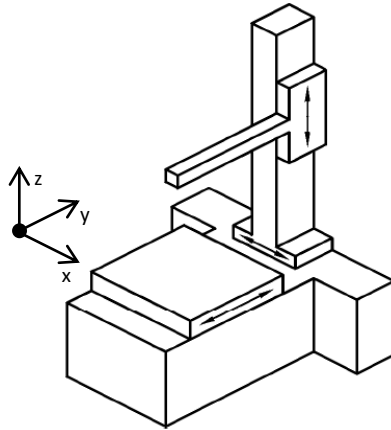


Fig. 2. 8 MMC tipo brazo horizontal mesa movable.

2.2.1.10 Tipo brazo horizontal mesa fija

- Estructura

El carro que soporta el brazo horizontal se mueve en la dirección vertical (eje Y). El palpador está colocado horizontalmente al brazo. La columna se mueve en la dirección del eje Z a lo largo de una guía que se coloca en el eje X. La mesa deslizante se mueve perpendicular al eje Y (ver Fig. 2.9).

- Características

Como la columna se mueve en la dirección del eje Y sin usar el recorrido de la mesa, un objeto pesado puede medirse haciendo a un lado la desventaja del tipo de mesa movable. La fabricación y mantenimiento no son fáciles, ya que este tipo está provisto de una mesa giratoria.

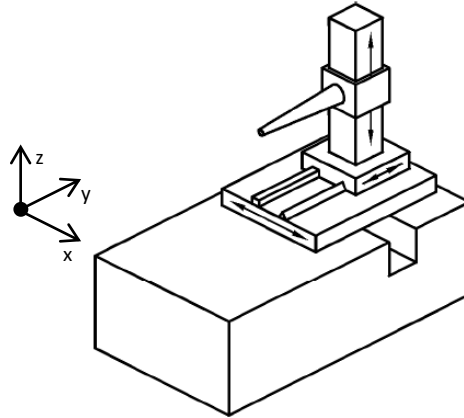


Fig. 2.9 MMC tipo brazo horizontal mesa fija.

2.2.1.11 Tipo brazo horizontal

- Estructura

El brazo del eje Z se mueve en la dirección horizontal. El carro que guía el brazo se desplaza en la dirección del eje X, a lo largo de una guía que está en un plano horizontal y perpendicular a los ejes Y y Z.

- Características

Este tipo de MMC es generalmente menos costoso, porque los miembros que se mueven son más compactos y de diseño más simple. Una ventaja es su tamaño pequeño. El tipo de brazo horizontal no es adecuado para las mediciones que requieran alta exactitud, debido a la flexión del brazo cuando avanza y retrocede.

Todos estos tipos de arquitecturas no tienen la misma difusión, por varias razones, por ejemplo, algunas son adecuadas para MMC de grandes dimensiones y por tanto, que no se usan con tanta frecuencia. Otras, simplemente no aportan ninguna ventaja comparado con arquitecturas que son más fáciles y baratas de producir.

La arquitectura de una MMC cambia según una serie de parámetros, el más importante es el volumen de medición. Algunos tipos de arquitectura se diseñaron

en un principio para controlar las máquinas manualmente. Por tanto, intentar crear MMC grandes con esos tipos de estructura sería imposible o ilógico, debido a consideraciones ergonómicas y de prestaciones [14].

2.2.2 Clasificación por el método de operación

Según su método de operación, las MMC pueden clasificarse dentro de los siguientes tres puntos: tipo manual, tipo desplazable con motor y tipo CNC.

2.2.2.1 MMC manual

En este tipo de MMC, el operador mueve con su mano el palpador a lo largo de los tres ejes (ver Fig. 2.10). La MMC manual es ampliamente utilizada en base a su precio y su desarrollo histórico. Muchos tipos de palpadores están disponibles en las MMC manuales, incluyendo lo de señal de contacto, los de punta de bola, los rígidos y los palpadores sin contacto.

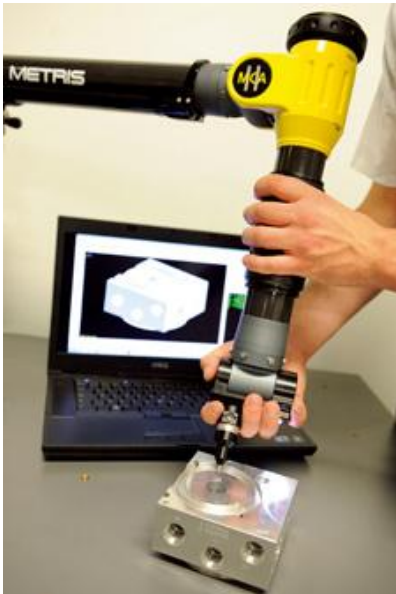


Fig. 2. 10 MMC manual.

Cuando se use una MMC manual debe considerarse los siguientes puntos para asegurar la exactitud de la medición:

1. Cuando se utilice un palpador rígido, como un palpador con punta de bola o un palpador cilíndrico, asegúrese de aplicar una fuerza de medición mínima y uniforme.
2. Cuando tome mediciones sosteniendo el palpador, una aceleración excesiva puede ocasionar que los miembros estructurales y axial de la MMC se flexionen, por ello se aplica una fuerza de medición constante.

2.2.2.2 MMC movidas con motor

Este tipo de MMC tiene motores que se operan mediante control remoto, para mover cada uno de los tres ejes.

Las MMC desplazadas con motor cuentan con las siguientes ventajas:

1. Gran exactitud de medición
 - a) La operación de la medición es por control remoto, con flexión mínima en el eje Z.
 - b) La velocidad de la medición es uniforme con lo que se mejora la repetibilidad de las mediciones.
2. Su operación es fácil y reduce la fatiga del operador

Para proteger el palpador de colisiones con la pieza de trabajo, algunas MMC con mando por motor cuentan con una función de “paro al contacto” como mecanismo de seguridad. En el momento en que la punta del palpador de señal de contacto toca la pieza y manda la función de paro, es activada al contacto automáticamente para detener la alimentación del movimiento de cada eje y prohíbe el movimiento del palpador.

Algunas MMC accionadas con motor pueden cambiar entre la operación manual y el mando por motor en la caja de control remoto.

2.2.2.3 MMC CNC (Automático)

Este tipo de MMC se accionan con motor en sus ejes X, Y y Z, y ejecutan automáticamente las mediciones de acuerdo con los comandos preprogramados en la computadora (ver Fig. 2.11). Como las MMC de CNC ejecutan mediciones automáticas en respuesta a los comandos programados, el control debe conocer la posición actual del palpador todo el tiempo. Existen dos sistemas de retroalimentación de la posición: uno es el sistema de “retroalimentación de escala” que recibe las señales de retroalimentación de las escalas incorporadas en cada eje de la MMC, y el otro “sistema de pulso generador de retroalimentación” que recibe señales de generadores de pulsaciones colocadas en los motores de mando.

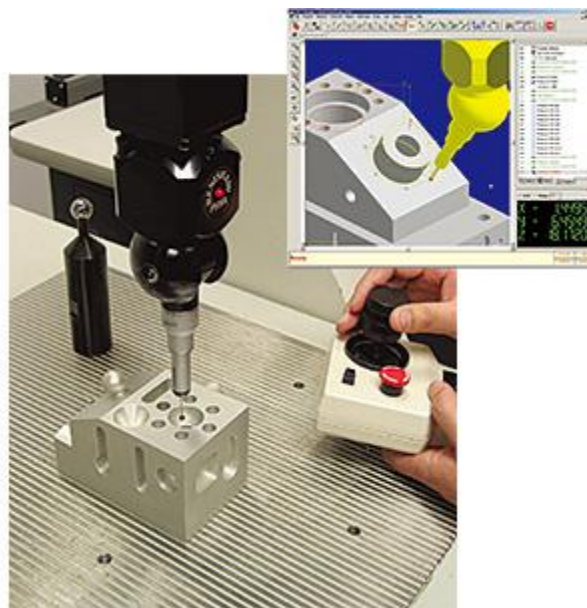


Fig. 2. 11 MMC CNC.

La medición MMC de CNC se clasifica como sigue:

- Medición CNC: Medición dimensional.
- Medición de contornos de superficies curvas.
- Medición de punto a punto.
- Medición de barrido.

Las ventajas de las MMC de CNC son:

- Mejoramiento de la exactitud de medición.
- La MMC de alta velocidad mejoran en gran medida la eficiencia de la inspección.
- Las MMC son capaces de medir contornos de las piezas que no pueden medirse sin CNC.
- Ahorro de mano de obra y modernización de procesos debido a las mediciones automáticas.

Los tipos de palpadores usados para las MMC incluyen el palpador de señal de contacto y para mediciones de punto a punto, el palpador de barrido.

2.3 Componentes funcionales de las MMC

La unidad principal de las MMC consiste en componentes y miembros con una estructura rígida. Componentes funcionales:

2.3.1 Mecanismo de guías axiales

Las guías axiales de las MMC tienen superficies guía, maquinadas con exactitud, a lo largo de los cuales los cojinetes adaptados al elemento móvil se deslizan.

Los tipos de mecanismos guía adaptados a una MMC son los siguientes:

- Guía con cojinetes de aire.
- Guía con cojinete de rodillos.
- Guía de bolas o rodillos.

2.3.2 Sistemas de medición del desplazamiento (escalas)

Las MMC cuentan actualmente con lecturas digitales para cada uno de los tres ejes que muestran en el desplazamiento de cada componente móvil. Los tipos de sistemas de medición de los desplazamientos son:

1. Codificador lineal; tipo flexión y tipo transmisión.
2. Codificador de franjas Moiré.

Ventajas de los sistemas de lectura digital:

- a) El tiempo para la lectura de datos es menor.
- b) La puesta a cero puede hacerse en cualquier posición.
- c) El dato medido siempre está disponible para procesarse en una computadora.
- d) Los errores humanos en la lectura de los datos se eliminan.
- e) No se requiere ser experto en la lectura de datos

La resolución de las MMC se ha incrementado, de 0.001 mm de los modelos convencionales a 0.0005 mm, 0.0002 mm y a 0.0001 mm.

2.3.3 Mecanismos de alimentación (para MMC movidas con motor y CNC)

El mecanismo típico de conducción usado por las MMC accionadas con motor y CNC son:

1. De esferas en tornillo.
2. De cremallera y piñón (ver Fig. 2.12).
3. De tuerca dividida.
4. De mando por banda.
5. De eje y rodillos.
6. De torillo y rodillos.



Fig. 2. 12 Mecanismo de conducción cremallera y piñón.

2.3.4 Mecanismo de elevación de la mesa

Para mover la mesa hacia arriba y hacia abajo, existen algunas MMC con un mecanismo de mando por motor, con la finalidad de hacer mínima la extensión del husillo del eje Z. Las MMC actuales no usan este mecanismo porque tienen un recorrido grande del eje Z y las exactitudes estimadas están aseguradas.

2.3.5 Mesa giratoria

Una mesa giratoria es usada como una MMC cuando la eficiencia y la exactitud de la medición pueden mejorarse girando la pieza de trabajo. Las ventajas por el uso de una mesa giratoria son las siguientes:

- 1) Para MMC con brazo horizontal, el intervalo de medición de eje Y puede ser duplicado.
- 2) Los agujeros con un eje inclinado y superficies inclinadas pueden medirse sin cambiar la orientación del palpador.

2.4 Exactitud de medición de las MMC

2.4.1 Normalización de la exactitud de la medición

El gran uso y el aumento de la importancia de las MMC en la industria han propiciado la formación de la Asociación de Fabricantes de Máquinas por Medición por Coordenadas (CMMA, fundada en 1978) a causa de los inconvenientes e incompatibles normas de exactitud de los fabricantes de las MMC, la asociación urgentemente se propuso crear una norma internacional de exactitud para la MMC. Basadas en la norma de CMMA, se establecieron las siguientes normas de inspección.

- VDI/VDE 2617-1983 (Genauigkeit von Koordinatenmeßgeräten; Kenngrößen und deren Prüfung, Grundlagen) Alemania Occidental. Esta es la principal norma de exactitud en Europa.
- ANSI/ASME B 89.1.12 M-1990 (Método para la evaluación de las máquinas de medición por coordenadas). Esta norma fue aprobada y publicada por la American Society of Mechanical Engineers en 1991 [13].
- JIS B 7440 (1987, 1980, 1981). La norma japonesa para la exactitud de las MMC estuvo basada en las normas CMMA, VDI/VDE e ISO.
- La ISO inauguró un grupo de trabajo en 1987, titulado Medición Dimensional de Forma con una MMC. Ellos empezaron por discutir la terminología, las características y los métodos de normalización y exactitud.

2.4.2 Criterios para la selección de una MMC

1. Tolerancia dimensional.
2. Tolerancia dimensional y exactitud de la medición.
 - a) Exactitud de medición requerida.
 - b) Intervalo de medición.
 - c) Facilidad de operación y eficiencia de la medición.

2.5 Unidades de procesamiento de datos para el sistema MMC

Existe una amplia variedad de sistemas de procesamiento de datos para MMC de acuerdo a los diferentes requerimientos. Estas unidades de procesamiento se clasifican en dos tipos, las de operación simple que no requieren de uso especial y el otro tipo son la de trabajo pesado utilizadas para conversión de datos y medición de contornos, entre otros.

2.6 Base del sistema de procesamiento de datos de las MMC

2.6.1 Fundamentos que se requieren para la operación de una MMC

2.6.1.1 Alineación del eje y del plano

Las dimensiones de una pieza necesitan que el plano de referencia de la pieza a medir este paralelo con la superficie de la mesa y que el eje de referencia de la pieza se alinea en dirección de la medición. También considerando que las dimensiones de la pieza de trabajo estén en la dirección que se indica en el dibujo de ingeniería y con la ayuda de la computadora de la MMC se alinea todo el sistema de coordenadas donde se indique.

2.6.1.2 Punto medido

Las MMC usan comandos para determinar ciertas características de medición como coordenadas, ángulos, donde cada uno de esto requiere cierto número de puntos tomados de la pieza para generarlos. Cuando el número requerido de puntos ha sido introducido, uno de esos puntos es determinado con otras dimensiones, se le conoce como punto medido.

2.6.1.3 Plano de referencia y eje de referencia

El plano de referencia es un plano de proyección de un dibujo y ayuda como plano base para la proyección de los demás puntos. Como ya se sabe los ejes X, Y y Z son ejes de referencia que se toman por conveniencia, para referenciar los ejes de referencia y se asignan como primero, segundo y tercero.

2.6.2 Sistemas de Coordenadas

2.6.2.1 Sistemas de coordenadas de las máquinas

Son los mismos ejes X, Y y Z de la MMC que se usan para referenciar el desplazamiento de los mismo ejes. Por lo general el origen del sistema de coordenadas de la máquina es la oposición del palpador. Este origen se puede cambiar usando la esfera maestra o un bloque de origen. En una MMC CNC el origen se coloca en un punto indicado por un programa.

2.6.2.2 Sistemas de coordenadas de partes

Es importante establecer un origen independiente al origen de la máquina, para este se puede utilizar como referencia la pieza de trabajo a medir. A este nuevo sistema de referencias se le denomina “sistema de coordenada de la parte”, este sistema se establece por nivelación y la alineación de la pieza. Ya establecido este sistema las mediciones tomadas se referencian a este nuevo sistema, por ello hay que considerar en donde se establecerá este nuevo sistema.

2.6.2.3 Origen de referencia

Debido a que el origen de la MMC se encuentra en la posición central del palpador, sí se requiere que en una operación cambie de palpador, El origen de la MMC se reespecificará, esto se puede hacer con la ayuda de la esfera maestra o el bloque de punto de origen de la mesa de MMC.

2.7 Palpadores y accesorios para la MMC

Definición de palpador: Dispositivo mecánico que consta de un vástago y una punta de palpado [12].

Punta de palpado: Elemento físico que realiza el contacto con la pieza, la punta de palpado puede ser una bola, un cilindro, un disco, un cono, etc.

La exactitud de la medición y la eficiencia de que es capaz una MMC depende mucho del palpador seleccionado.

2.7.1 Tipo de puntas de palpado

1. Palpador de punta de esfera.
2. Palpador cónico.
3. Palpador cilíndrico.
4. Palpador universal.
5. Palpadores para propósitos especiales (ver Fig. 2.13).



Fig. 2. 13 Palpadores y accesorios para MMC.

2.7.2 Palpadores de señal de contacto

Estos pueden dar salida a una señal de detección de un punto en el momento en que la punta del palpador se desplaza de su posición neutral, sin tener en cuenta su dirección de desplazamiento. Los palpadores y cabezales pueden ser:

1. Palpador de señal de contacto TP1S.
2. Palpador de señal de contacto TP2.
3. Cabezal palpador PH1.
4. Cabezal palpador indexable (manual MIH).
5. Palpador de señal de contacto indexable (manual) MIP.

6. Palpador de señal de contacto de baja fuerza.
7. Palpador de señal de contacto TP7M.
8. Cabezal palpador motorizada PH9.
9. Cabezal palpador motorizada PH9A.
10. Cabezal palpador motorizada PH10M.
11. Palpador de barrido MPP-2/2H.
12. Palpador de barrido MPP-4.
13. Palpador de señal de contacto HTP/HTP-S.

2.7.3 Principio de funcionamiento

El centrado cinemático es el componente principal de las sondas de activación por contacto. Un dispositivo mecánico tiene la capacidad de regresar la bola del palpador a la misma posición después de cualquier deflexión.

El centrado cinemático consiste en una placa de pivote (1) de apriete por resorte contra tres puntos de contacto (2) mediante el resorte helicoidal de compresión (3). Estos puntos de contacto están formados por una combinación de rodillos y cojinetes de bola (ver Fig. 2.14).

Los puntos de contacto actúan como contactos eléctricos, de modo que cuando la placa de pivote es desviada, el circuito eléctrico cambia sus características y hace que la interfaz de la sonda envíe una activación al contacto de la MMC.

Después de la activación, la bola del estilete no debe hacer contacto con la superficie para permitir que la sonda devuelva la bola del palpador a su posición repetible [15].

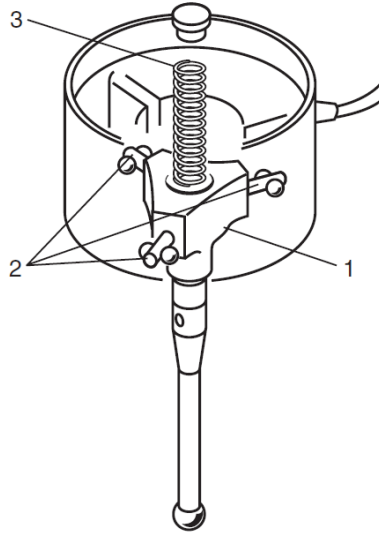


Fig. 2.14 Centrado cinemático.

2.8 Condiciones ambientales

Las condiciones ambientales afectan las mediciones de la MMC en términos de exactitud, eficiencia de la medición y mantenimiento.

2.8.1 Efectos de la temperatura

Es muy importante para los fabricantes hacer partes de tal manera que ellas puedan medir dimensiones correctas a una temperatura específica de 20 °C [15] (llamada temperatura estándar).

Si las condiciones de la temperatura no son controladas satisfactoriamente, se vuelve difícil asegurar la exactitud de las mediciones y la repetibilidad especificada para la MMC.

JISB7440-1987 Procedimientos de prueba para la exactitud de las máquinas de medición por coordenadas. En esta norma se especifican las siguientes condiciones de prueba para comprobar la exactitud de las MMC, para que los fabricantes y usuarios puedan elevar el funcionamiento de sus MMC bajo condiciones normalizadas.

- La máquina de medición por coordenadas, los accesorios normales, los instrumentos de medición, etcétera, que van a ser usados en la medición, deben estar por lo menos 8 horas en el ambiente donde se va hacer la prueba.
- Las condiciones de temperatura donde está localizada la máquina de medición por coordenadas, tienen que quedar claramente indicadas conforme a los siguientes tres criterios:
 - Temperatura ambiental.
 - Variación de la temperatura por hora.
 - Distribución de la temperatura en el lugar donde la máquina de medición está instalada.

2.8.2 Humedad relativa

Una humedad alta puede oxidar superficies maquinadas importantes, ocasionando el deterioro de la exactitud de la medición y el buen funcionamiento de la MMC. La humedad relativa debe ser mantenida entre 55% y 65% (de acuerdo con las especificaciones JIS para la condiciones del ambiente; para probar la exactitud de la MMC la humedad relativa debe estar en $50\% \pm 10\%$).

2.8.3 Vibración

Como los miembros de deslizamiento de la MMC están diseñados para moverse con una fuerza muy pequeña, las vibraciones transmitidas del piso van a causar fluctuaciones en la medición.

- Para frecuencias menores de 10 Hz, la vibración debe ser menor que $2\mu\text{m}$ (pico-pico) en amplitud.
- Para frecuencias entre 10 Hz y 50 Hz, la vibración debe ser menor de $0,004 \text{ gal (cm/s}^2\text{)}$ en aceleración.

(JIS especifica las mínimas tolerancias de vibración para probar las condiciones ambientales en que esta la MMC, y también especifica que los valores de tolerancia deben ser acordados entre el usuario y el fabricante).

2.8.4 Polvo

El polvo puede causar daño a los componentes de las MMC de gran exactitud. Es conveniente instalar la MMC y sus periféricos en un ambiente que esté lo más posible libre de polvo, considerando lo siguiente:

1. El sitio de instalación debe establecerse como un cuarto de medición independiente.
2. El acondicionador de aire debe estar equipado con filtros que eviten la entrada de polvo.
3. Prohibir la entrada al cuarto de medición con zapatos.
4. La sala de medición no tendrá fuentes que generen polvo.
5. El operador debe utilizar ropa de trabajo limpia.

2.8.5 Otras condiciones de medio ambiente

1. Gas corrosivo.
Éstos pueden corroer partes críticas de una MMC y, por lo tanto, afectar la exactitud de la medición.
2. Fuente de energía.
Usar una fuente de energía con los valores especificados, tanto en el voltaje como en el amperaje.
3. Campos eléctricos y magnéticos.
Cerca de la MMC no se debe instalar dispositivos que generen campo eléctrico o magnético fuertes, ya que pueden dañar los datos o programas.
4. Luz directa de sol y salida del aire.
No instalar la MMC donde pueda estar expuesta a la luz directa del sol o cerca de una salida de aire acondicionado con la finalidad de prevenir cambios de temperatura localizados en la MMC.

2.9 Avances en las MMC

Las MMC se están diversificando y especializando en varios aspectos: ser sencilla, de precio bajo, altamente exacta, automática y multifuncional.

Algunos avances notables que han sido desarrollados para las MMC incluyen:

1. Gran exactitud.
2. Multifuncionales.
3. Alta velocidad.
4. Mediciones sin contacto.
5. Sistemas de medición en línea.
6. Integración del sistema MCAT°MSURF°CAD/CAM (sistema de autoprogramación).
7. Grandes dimensiones.

2.10 Proceso de medición

Algunos autores [17] consideran que el proceso de medición con estos equipos se compone de diez pasos:

- 1) Interpretar las características de la magnitud a determinar.
- 2) Seleccionar la MMC y el software que por sus características sea más idónea para las necesidades planteadas.
- 3) Desarrollar el procedimiento de medición (elaborar el programa).
- 4) Llevar a cabo la medición.
- 5) Realizar un registro de los datos obtenidos.
- 6) Calcular la incertidumbre.
- 7) Evaluar su conformidad.
- 8) Definir los lineamientos a seguir para los casos que sean conformes.
- 9) Definir los lineamientos a seguir para los casos que sean no conformes.
- 10) Archivar los resultados.

Con todo ello la MMC se ha creado un lugar dentro de los equipos de medición dimensional.

III. INCERTIDUMBRE

El vocabulario internacional de metrología define a la incertidumbre como: “el parámetro no negativo que caracteriza la dispersión de los valores atribuidos a un mensurando, a partir de la información que se utiliza” [2]. Dicho de otro modo, el llamado “valor verdadero” es el valor que mejor caracteriza las dimensiones de dicho mensurando, pero que carece de una existencia física real. Sin embargo en la práctica, acercarse al “valor verdadero” podría resultar suficiente para los requerimientos particulares de un cliente.

Por ello la incertidumbre es un parámetro que puede ser por ejemplo, una desviación estándar, un múltiplo de ésta o la mitad de un intervalo correspondiente a un nivel de confianza establecido. Sin embargo, la incertidumbre de la medición corresponde en general a muchos componentes. Algunos de estos componentes pueden ser estimados, con base en la distribución estadística de los resultados de una serie de mediciones que pueden ser caracterizados por desviaciones estándar experimentales. Los otros componentes que también pueden ser caracterizados por desviaciones estándar son evaluados por medio de distribuciones de probabilidad asumidas, o basadas en la experiencia así como en otras informaciones [18].

En general, el uso de la palabra incertidumbre se relaciona con el concepto de duda. La incertidumbre de la medición no implica duda acerca de la validez de un mensurando; por lo contrario, el conocimiento de la incertidumbre implica el incremento de la confianza en el resultado de una medición.

Todas las mediciones que se realicen contendrán inevitablemente un grado de incertidumbre respecto a su exactitud. En otras palabras, siempre habrá un cierto rango de distribución de error cuando se mida el mismo objeto varias veces. Esto puede atribuirse a muchos factores, incluyendo las características del instrumento de medición, las condiciones ambientales y los errores humanos [19].

La incertidumbre al igual que la trazabilidad, son de los conceptos metrológicos fundamentales. Al igual que la incertidumbre y precisión de un resultado analítico son términos muy relacionados, donde la diferencia primordial es que el término incertidumbre es más globalizado, debido a que considera todas las fuentes posibles de error que intervienen en el resultado final [20].

3.1 Fuentes de incertidumbre

La identificación de las fuentes de incertidumbre proviene de los diversos factores involucrados en la medición, por ejemplo:

- Los resultados de la calibración del instrumento.
- La incertidumbre del patrón o del material de referencia.
- La repetibilidad de las lecturas.
- La reproducibilidad de las mediciones por cambio de observadores, instrumentos u otros elementos.
- Características del propio instrumento, como la resolución del equipo, además del coeficiente de expansión térmica de sus ejes, etc.
- Variaciones de las condiciones ambientales.
- La definición del propio mensurando, que para el caso de estudio son los bloques patrón.
- El modelo particular de la medición, que son todos los cálculos matriciales que determinan las formas geométricas y las magnitudes solicitadas al equipo.
- Variaciones en las magnitudes de influencia.

Según la “Guía para estimar la incertidumbre de la medición” no es recomendable desechar alguna de las fuentes de incertidumbre por la suposición de que es poco significativa sin una cuantificación previa de su contribución. Es preferible la inclusión de un exceso de fuentes que ignorar algunas entre las cuales pudiera descartarse alguna importante. No obstante, siempre estarán

presentes efectos que la experiencia, conocimiento y actitud crítica del metrologo permitirán calificar como irrelevantes después de las debidas consideraciones [21].

El resultado de una medición no está completo si no posee una declaración de la incertidumbre de la medición con un nivel de confianza determinado. De ningún modo es la incertidumbre de la medición un término equivalente al error de la medición o a la precisión de la misma bajo condiciones de repetibilidad o reproducibilidad.

La incertidumbre de la medición, calificada en ocasiones como un gran problema, verdaderamente no lo es, y no existe situación real alguna donde lo sea, simplemente que su cálculo juzga por sí mismo, cuanto conocemos de los procesos de medición, el nivel de gestión de la calidad de los mismos y por consiguiente saca a relucir las virtudes y los defectos que los sistemas de aseguramiento metrológico tienen implícitos [22].

Algunas reglas generales para la evaluación y expresión de la incertidumbre de la medición pueden seguirse a diferentes niveles de exactitud y en muchos campos de medición, desde metrología científica hasta metrología industrial. Por lo tanto, se pretende que los principios que se analizan sean aplicables a una amplia gama de mediciones.

La incertidumbre del resultado de una medición puede ser evaluada por medios estadísticos, a través de la variación de las fuentes de las cuales depende este resultado.

El análisis puede llevarnos a evaluar la calidad de las mediciones desde los niveles más bajos de exactitud hasta los niveles más altos de exactitud en las cadenas de trazabilidad que se tienen establecidas.

Desde un punto de vista más elemental, la medición en un proceso tiene por objetivo determinar el valor de una magnitud particular siguiendo una serie de operaciones bien definidas, las cuales deben estar documentadas. Este proceso

incluye el acto en sí de medir para la adquisición de los datos, el procesamiento de los mismos y la expresión del resultado final.

El factor de cobertura siempre debe ser señalado para que la incertidumbre estándar combinada de la magnitud medida, pueda ser recuperada para usarse en el cálculo de la incertidumbre estándar combinada de otros resultados de mediciones que dependan de la magnitud.

3.2 Materiales de referencia certificados

Cuando se habla de un patrón de medida se entiende que es una medida materializada, un instrumento de medida, un material de referencia o un sistema de medida.

Los patrones de medida están concebidos para definir, realizar, conservar o reproducir una unidad o valores de magnitudes, de modo que sirvan de referencia.

En un material de referencia una o más de sus propiedades (física, geométricas, etc.) están certificadas por un procedimiento, que establece su trazabilidad en las unidades en que se expresan los valores de sus propiedades. Cada valor certificado viene acompañado de su incertidumbre para su nivel declarado de confianza.

3.3 Trazabilidad

La investigación y la manufactura demandan mediciones de alta calidad. Esto requiere establecer la incertidumbre de la medición y su acceso a instrumentos debidamente calibrados. La trazabilidad por consiguiente no resulta tan evidente para todos los tipos de metrologías existentes, debido a la gran diversidad de magnitudes que pueden estar inmersas en su determinación, como la complejidad que representa coincidir en un material de referencia a niveles nacional e internacional. Cierta parte de la industria elabora productos cuyo control de calidad se basa en la medición de parámetros complejos, atributos o inclusive

aquellos que no se encuentran debidamente especificados. Muchos de estos parámetros actualmente son medidos por instrumentos sofisticados [23], como lo sería la máquina de medición por coordenadas.

La trazabilidad es la garantía de que la serie de mediciones que se fueron ejecutando para determinar una magnitud, tiene un fundamento. En el vocabulario utilizado en metrología la trazabilidad se define como: “propiedad del resultado de medida, la cual el resultado puede relacionarse con una referencia mediante una cadena ininterrumpida y documentada de calibraciones, cada una de las cuales contribuye a la incertidumbre de medida” [2].

Se conoce como cadena de trazabilidad a una serie de comparaciones ininterrumpidas, todas ellas con incertidumbre establecidas. Esto asegura que un valor de medida o el valor de un patrón está relacionado con referencia de niveles superiores, hasta llegar al patrón primario.

Un usuario final puede obtener trazabilidad al máximo nivel internacional, a través de un Instituto Nacional de Metrología o de un laboratorio secundario de calibración.

3.4 Calibración

La calibración determina las características metrológicas de un instrumento, sistema o material de referencia certificado (ver Fig. 3.1).

Hay cuatro razones principales para tener calibrado un instrumento.

1. Para establecer y demostrar su trazabilidad.
2. Para garantizar que las lecturas del instrumento son compatibles con otras mediciones.
3. Para determinar la exactitud de las lecturas del instrumento.
4. Y para establecer la fiabilidad del instrumento, es decir que se puede confiar en sus indicaciones [24].

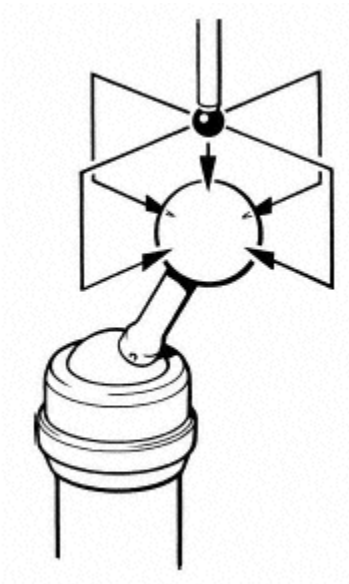


Fig. 3. 1 Calibración del palpador con esfera de referencia.

3.5 Diagrama de niveles

Debido a que la trazabilidad fue descrita como una cadena, se generó la necesidad de interpretarlo de una forma visual, para ello fue creado el Diagrama de niveles, que es un gráfico donde se muestran agrupados y ordenados por niveles de calibración; los patrones, instrumentos y accesorios que se utilizan en los diferentes procesos de medición, y que se aplican a los instrumentos y patrones de un laboratorio.

El criterio para definir la conformación de los grupos, se basa en los siguientes aspectos:

- Los instrumentos (o patrones) deben calibrarse del mismo modo.
- La incertidumbre de la corrección de calibración (de los instrumentos o de los patrones) debe estimarse del mismo modo.
- El uso de los instrumentos (o de los patrones) debe ser similar.

Los criterios para la conformación de los niveles son los siguientes:

- 1) Cada uno de los integrantes de los niveles creados serán calibrados por niveles superiores, nunca por algún integrante del mismo nivel, ni tampoco de nivel inferior. Sin embargo el criterio descrito no estipula estrictamente el orden de los grupos en el diagrama.
- 2) Los niveles con entradas y salidas que se calibran internamente y que participan en otras calibraciones, se colocan en los niveles más elevados posible, porque ello facilitará posibles modificaciones futuras.
- 3) Los niveles que sólo tienen entradas y son de calibración interna, se posicionan todos en el mismo nivel, generalmente el más numeroso y fácil de calibrar, lo que disminuye en lo posible el número de grupos en los niveles intermedios que requieren seguir un orden riguroso.
- 4) Aquellos niveles que contienen sólo salidas y por ende requerirán de calibraciones externas, estarán en los niveles de referencia.

3.6 Definiciones

El nivel de referencia es el nivel más elevado en el diagrama, formado por los grupos de patrones e instrumentos patrones de referencia para el laboratorio, es decir aquellos elementos que han de ser calibrados en otro laboratorio de superior categoría metrológica y cuyas incertidumbres certificadas, son el inicio para calibrar todas las demás, consecuentemente los niveles de referencia tienen salidas, pero no entradas (ver ANEXO K).

Calibraciones de referencia: Son aquellas que reciben los grupos de referencia de un laboratorio.

Calibraciones internas: Son aquellos servicios realizados por el laboratorio, con sus propios medios, para los diferentes niveles de su diagrama.

Calibración o mediciones externas: Son aquellas que efectúa el laboratorio, con todos sus medios, para un equipo o elemento ajeno a su diagrama de niveles.

3.7 Observaciones al Diagrama de niveles

- 1) Conviene prescindir en el diagrama de niveles, del laboratorio donde se recibe el servicio de calibración, ya que muy probablemente podría variar el proveedor con el tiempo y su lugar indicado deberá ser descrito en la carta de trazabilidad.
- 2) Los niveles posteriores a los de referencia (salvo el último) contendrán integrantes que recibirán la calibración pero al mismo tiempo la otorgarán a otros integrantes de niveles más bajos, de aquí resulta la regla práctica de situar a los integrantes en los niveles más elevados posibles.
- 3) El último nivel (por lo general el más numeroso) está integrado por instrumentos o equipos, que no se emplean en la calibración interna del laboratorio, sino directamente para determinar sus diferentes magnitudes.
- 4) Con la debida actuación de los criterios y reglas descritas, se logra un objetivo fundamental en el concepto de *Trazabilidad*: Una cadena ininterrumpida de operaciones, de forma descendente a lo largo de los niveles, sin saltos atrás y sin cerrarse sobre sí misma. Esto asegura la calibración de todo elemento por otro de mayor precisión y la adecuada trazabilidad de los resultados.
- 5) Existen operaciones auxiliares (como inspecciones previas) que no intervienen para nada en el posterior cálculo de la incertidumbre de calibración, pero con el objetivo de diferenciarlas claramente entre los diferentes niveles (no de calibración propiamente dicha), se reserva en dirección horizontal, cualquier comentario para describir dichas operaciones.
- 6) La buena organización de un laboratorio de metrología, se podría determinar en la medida de que su número de niveles sea el menor posible.
- 7) El primer diagrama de niveles tendrá debidamente diferenciado con un número sus diferentes niveles y para posibles modificaciones posteriores deberá mantener dicho número, aun cuando aparente cierto desorden el diagrama, debido a la importancia que remite un archivo histórico de sus datos.

- 8) Una numeración compleja en el diagrama de niveles podría causar mayor confusión en las modificaciones futuras, la sencillez facilitará su utilización e implantación.
- 9) Incluso no afectará cuando desaparecieran números por dar de baja a todos los integrantes de un nivel.
- 10) Por último el diagrama de niveles es un instrumento más de trabajo del laboratorio y deberá encontrarse accesible, con anotaciones, tabla de incidencias, etcétera, pero no por ello deberá ser objeto un uso excesivo e indiscriminado, siendo que deberán existir documentación adjunta para efecto de una mejor descripción.

Por muy sencillo que parezca, el diagrama es una visión en conjunto del comportamiento de la trazabilidad y es (en la experiencia del autor) “difícil comprobar cómo, laboratorios de alto nivel oficial cometen errores inadmisibles de trazabilidad, fundamentalmente cadenas cerradas y saltos atrás” que podrían subsanarse con la utilización de Diagramas de nivel [25].

3.8 Bloques patrón

3.8.1 Exactitud de los bloques patrón

Los bloques patrón se clasifican en términos de exactitud según la tabla 3.1, la cual muestra guías para seleccionar el grado adecuado y satisfacer diferentes aplicaciones.

En las normas JIS, DIN e ISO se encuentran las especificaciones de exactitud de longitud para los bloques patrón.

3.8.2 Requerimientos para los bloques patrón

- 1.- Exactitud dimensional y geométrica. Longitud, paralelismo, planitud.
- 2.- Capacidad de adherencia con otros bloques. Buen acabado superficial.
- 3.- Estabilidad dimensional a través del tiempo.

- 4.- Duros y resistentes al desgaste.
- 5.- Coeficiente de expansión térmica cercano al de los metales comunes.
- 6.- Resistencia a la corrosión [19].

3.8.3 Trazabilidad de los bloques patrón

La trazabilidad es un sistema en el cual el patrón de referencia para un patrón o instrumento de medición (como un producto final) puede calibrarse mediante un patrón de mayor exactitud secuencialmente hasta el patrón nacional de máxima exactitud.

Clasificación	Uso	Grado	
		JIS-ISO-DIN	
Referencia	Investigación tecnológica y científica Calibración de bloques patrón	K	
Calibración	Calibración de instrumentos de medición Calibración de bloques patrón	0	00
Inspección	Inspección de partes, máquinas, herramientas, etc.	1	2
Taller	Fabricación de dispositivos Inspección de instrumentos de medición Montaje de herramientas de corte	2	1

Tabla 3. 1 Clasificación de los Bloques Patrón en Sistema Métrico.

La tabla 3.2 muestra un juego de 46 Bloques Patrón, los cuales forman parte del laboratorio de metrología.

Serie de 0.001 mm (9 bloques)									
1.001	1.002	1.003	1.004	1.005	1.006	1.007	1.008	1.009	
Serie de 0.01 mm (9 bloques)									
1.01	1.02	1.03	1.04	1.05	1.06	1.07	1.08	1.09	
Serie de 0.1 mm (9 bloques)									
1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	
Serie de 1.0 mm (9 bloques)									
1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	
Serie de 10 mm (10 bloques)									
10	20	30	40	50	60	70	80	90	100

Tabla 3.2 Juego de Bloques Patrón en Sistema Métrico.

3.8.4 Adherencia

Es la propiedad de las superficies de medición de un bloque patrón a adherirse por fuerzas moleculares a otras de similar planitud y acabado superficial [26]. Una de las más importantes características de los bloques patrón es que cualquier dimensión puede obtenerse adhiriéndolos unos con otros.

3.8.5 Longitud del bloque

La longitud del bloque en un punto cualquiera de su superficie de medición, es la distancia perpendicular entre dicho punto sobre la superficie del plano libre del bloque y la superficie de la base de referencia, del mismo material al cual se encuentra adherida y cuyo acabado superficial es idéntico al del bloque [27] (ver Fig. 3.2).

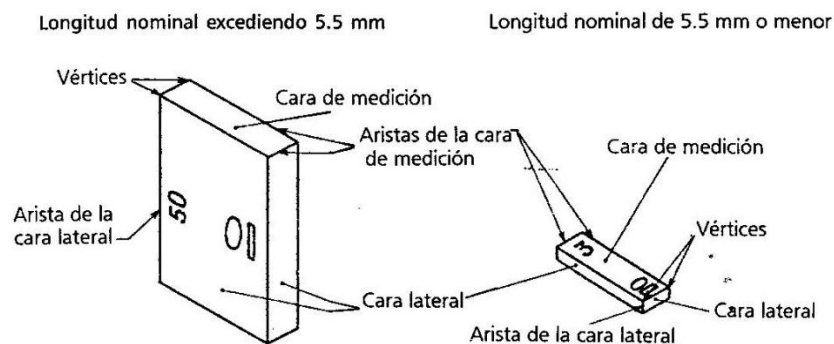


Fig. 3. 2 Nomenclatura para bloques patrón

IV. DISEÑO DE EXPERIMENTOS

Los modelos de diseño de experimentos, son modelos estadísticos clásicos cuyo objetivo es averiguar si unos determinados factores influyen en la variable de interés, si existe influencia de algún factor, y con ello cuantificar su efecto [28]. La variable de interés para el caso de estudio que se está planteando es la incertidumbre de la medición en la MMC, la cual se pretende disminuir realizando estudios de los factores que influyen y en consecuencia tener la capacidad de cuantificar su efecto.

La experimentación se efectúa en todas las áreas de estudio, con el objetivo de comprobar las diferentes hipótesis que se generan día a día en los diferentes campos de investigación, con el propósito de generar teorías, mejorar la calidad de vida de las personas, mayor desarrollo tecnológico, etc.

Un experimento, es un procedimiento mediante el cual se trata de comprobar (confirmar o verificar) una o varias hipótesis relacionadas con un determinado fenómeno, mediante la manipulación de las variables que presumiblemente son la causa.

Al realizar cualquier experimento, los resultados y las conclusiones que de estos se obtengan, dependen de la manera en que se llevó a cabo el recabar de datos.

En diversas áreas se han encontrado con la necesidad de recurrir a métodos de diseño experimental, de hecho, la experimentación se puede considerar parte del proceso científico y uno de los medios para conocer el funcionamiento de sistemas y procesos. En general, el aprendizaje ocurre a través de una serie de actividades en la que se hacen conjeturas acerca de un proceso, se llevan a cabo experimentos para generar datos del proceso, después se usa la información de experimento para establecer nuevas conjeturas, lo que lleva a nuevos experimentos sucesivamente.

La experimentación es una técnica utilizada para conocer el comportamiento de una respuesta a partir de diferentes combinaciones de factores o variables de entrada de un proceso, que al cambiar afectan la respuesta. Para empezar a experimentar es necesario pasar primero por el diseño de experimentos. Esta técnica busca la manipulación sistemática de las variables de entrada de un proceso para entender el efecto que estas pueden causar en la variable de respuesta.

La aplicación de técnicas de diseño de experimentos al iniciar el desarrollo de un proceso puede girar en torno a:

- Mejorar el rendimiento del proceso.
- Variabilidad reducida y conformidad con los requerimientos nominales o proyectados.
- Reducción del tiempo de desarrollo.
- Reducción de los costos globales.

Los métodos del diseño experimental se utilizan en el campo de las actividades del diseño de ingeniería, en este campo se desarrollan productos nuevos, además de realizar mejoras a los productos existentes.

Una estrategia de experimentación común en la práctica es el enfoque de un factor a la vez. Este método consiste en elegir un punto de inicio para cada factor, después se varía cada factor en su rango, mientras se mantiene constante los factores restantes en el nivel base. Una vez que se realizan estas pruebas, se puede construir una serie de gráficas en donde se muestra la forma en que la variable de respuesta es afectada al variar cada factor, manteniendo los demás constantes.

La estrategia de un factor a la vez tiene la desventaja de que no puede tomar en consideración cualquier posible interacción entre los factores. Existe una interacción cuando uno de los factores no produce el mismo efecto en la respuesta con niveles diferentes de otro factor.

La visualización que se debe dar para trabajar con varios factores, es conducir un experimento factorial, está se refiere a una estrategia experimental en la que los factores se hacen variar en conjunto y no sólo variando uno a la vez.

El diseño de experimentos se enfoca al proceso que se realiza al plantear los experimentos, esto con el objetivo que se recaben datos adecuados que puedan analizarse por métodos estadísticos que tendrán en consecuencia conclusiones válidas y objetivas.

4.1 Procedimiento recomendado del diseño de experimentos

1. Identificación y enunciación del problema. Pareciera que es muy simple, sin embargo no es fácil darse cuenta de que existe un problema que requiere experimentación, a su vez no es simple realizar una enunciación la cual plasme completamente la experimentación y que sea entendible para todos los que participan en el equipo de trabajo.
2. Elección de los factores, los niveles y los rangos. Al considerar los factores que pueden influir en el desempeño de un proceso o sistema, suelen encontrarse factores potenciales del diseño o bien como factores perturbadores. Los factores potenciales para el diseño son los que posiblemente se quieran variar en el experimento.

Se pueden clasificar los factores dependiendo de su función dentro del experimento, estos pueden ser del diseño, factores que se mantienen constantes y aquellos a los que se permite variar. Los factores de diseño se seleccionan para estudiarlos en el experimento, los factores que se mantienen constantes son variables que pueden tener cierto efecto sobre la respuesta, estos se mantienen fijos en niveles específicos, debido a que para el experimento que se esté llevando a cabo no son de interés.

Los factores perturbadores tienen efectos considerables que deben tomarse en cuenta, aunque no se tenga interés en ellos ni en el experimento que se esté realizando. Estos se clasifican en

controlables, no controlables o de ruido. Los controlables pueden ajustarse sus niveles por el experimentador. Si un factor es no controlable, pero puede medirse, en ocasiones se puede utilizar el análisis de covarianza. Un factor que varía de manera natural y no controlable en el proceso puede controlarse para el experimento, a este factor se lo conoce como ruido.

3. Selección de la variable de respuesta. Para seleccionar la variable de respuesta, se deberá tener seguridad que esta variable en realidad aportará información que servirá en el estudio.
4. Elección del diseño experimental. Si las actividades de planeación previas al experimento se realizan como es debido, este paso es relativamente sencillo. Es aquí donde se determinan el tamaño de la muestra a estudiar, así como el orden de las diferentes combinaciones de factores en los ensayos que se van a realizar y que la aleatoriedad no te afecte en la recuperación de resultados.
5. Realización del experimento. Se deberá observar cada uno de los pasos a seguir durante la experimentación con el fin de corroborar que todo vaya según lo planeado.
6. Análisis estadístico de los datos. Se usan métodos estadísticos para analizar los datos, con el fin de que los resultados obtenidos no sean de una manera apreciativa sino más bien que la información obtenida sea manejada objetivamente.
7. Conclusiones y recomendaciones. Cuando se ha cosechado la información que brindó el proceso de experimentación se deberá hacer una conclusión práctica con la finalidad de ayudar a mejorar el problema propuesto así como ayudarse de gráficos para facilitar la comprensión del personal interesado. Adicionalmente es importante realizar corridas de seguimiento o pruebas de confirmación con el objetivo de validar las conclusiones del experimento [29].

4.2 Uso de técnicas estadísticas en la experimentación

Gran parte de las áreas de investigación es empírica y hace uso extensivo de la experimentación. Los métodos estadísticos incrementan en gran medida la eficiencia de estos experimentos. Por esto la importancia de saber usar las técnicas estadísticas de experimentación, para ello se toman en cuenta los siguientes puntos:

1. Uso de conocimientos no estadísticos del problema. Es por esto que los experimentadores deben ser capaces de comprender ampliamente los campos en los que se incurrirá a medida que el proceso de experimentación avance.
2. Mantener el diseño y el análisis tan simple como sea posible. Es recomendable utilizar métodos de diseño y análisis relativamente simples, ya que si el análisis se realiza de manera cuidadosa y correcta, su análisis será relativamente directo. Y no se necesitará de estadísticas complejas y sofisticadas.
3. Diferenciar entre significación práctica y significación estadística. Esto debido a que las dos condiciones experimentales producen respuestas medias que son estadísticamente diferentes.
4. Los experimentos son generalmente iterativos. Un método iterativo trata de resolver un problema mediante aproximaciones sucesivas a la solución, empezando desde una estimación inicial.

4.3 Diseño factorial

El objetivo del diseño factorial es estudiar el efecto de los factores de interés sobre una o varias respuesta o características, en otras palabras, se busca estudiar la relación entre los factores y la respuesta, con la finalidad de conocer mejor cómo es esta relación y generar conocimiento que permita tomar acciones y decisiones que mejoren el desempeño del proceso.

Los factores pueden ser de tipo cualitativo o de tipo cuantitativo.

Cualitativos:

Sus niveles toman valores discretos o de tipo nominal, que no pueden ser fracciones. Ejemplos: máquinas, tipos de material, operador, la presencia o ausencia de una operación previa, etc.

Cuantitativo:

Sus niveles de prueba pueden tomar cualquier valor dentro de cierto intervalo. La escala es continua, por ejemplo: temperatura, humedad, velocidad, presión, etc.

Para estudiar la influencia de cada factor sobre la variable de respuesta, es necesario elegir al menos dos niveles de prueba para cada uno de los factores. Con el diseño factorial completo se corren aleatoriamente en el proceso todas las posibles combinaciones que pueden formarse con los niveles seleccionados.

4.4 Definición de experimento factorial

Un experimento factorial es el conjunto de puntos experimentales o tratamientos que pueden formarse considerando todas las posibles combinaciones de los niveles de los factores.

4.5 Ventajas de los diseños factoriales

1. Son diseños que se pueden aumentar para formar diseños compuestos en caso de que se requiera una exploración más completa.
2. Se pueden correr fracciones de diseños factoriales, las cuales son de utilidad en las primeras etapas de una investigación que involucra a muchos factores.
3. Pueden utilizarse en combinación con diseños de bloques en situaciones en las que no puede correrse todo el diseño factorial completo bajo las mismas condiciones o circunstancias.

4. La interpretación y cálculo de los efectos en los experimentos factoriales se puede hacer con aritmética elemental, en particular cuando cada factor se prueba en dos niveles.

4.6 Efecto principal y efecto de interacción

El efecto de un factor es el cambio observado en la variable de respuesta debido a un cambio de nivel en el factor. Los efectos principales son los cambios en la media de la variable de respuesta debidos a la acción individual de cada factor. Matemáticamente el efecto principal de un factor es la diferencia entre la respuesta media observada cuando el factor estuvo en su nivel alto y la respuesta media observada cuando el factor estuvo en su nivel bajo.

Los factores interactúan entre sí o tienen un efecto de interacción sobre la variable de respuesta, cuando el efecto de un factor depende del nivel en que se encuentra el otro.

4.7 Diseño factorial general

Al considerar f factores A, B, C, \dots, K con niveles a, b, c, \dots, k , respectivamente, donde K denota al f -ésimo o último factor del conjunto a estudiar. Con estos niveles y factores se puede construir el diseño factorial general $a \times b \times c \dots \times k$, que consiste de $a \times b \times c \dots \times k$ tratamientos o puntos de prueba. Con este diseño se podrá estudiar, $f(f-1)/2$ interacciones dobles, $f(f-1)(f-2)/(3 \times 2)$ interacciones triples, y así sucesivamente hasta la última interacción de los factores (A, B, C, \dots, K) . El cálculo del número de interacciones de ciertas cantidades m de factores se hace mediante la operación “combinación de f en m ” $\left(\binom{f}{m} = \frac{f!}{m!(f-m)!} \right)$ que cuenta el número de maneras diferentes de seleccionar m factores de los f , donde $f! = f \times (f-1) \times \dots \times 2 \times 1$. En resumen, con el factorial general se puede estudiar los $2^f - 1$ efectos.

$$\binom{f}{1} = f \text{ efectos principales } (A, B, \dots, K)$$

$\binom{f}{2} = \frac{f(f-1)}{2}$ interacciones dobles ($AB, AC, \dots, (K-1)K$).

$\binom{f}{f-1} = f$ interacciones de $f - 1$ factores ($AB \dots K - 1, AB \dots (K - 2)K, \dots$)

$\binom{f}{f} = 1$ interacciones de todos los factores ($A, B, C \dots K$).

4.8 Diseño factorial general 2^k

El diseño factorial 2^k considera k factores con dos niveles cada uno, y tiene 2^k tratamientos o puntos de diseño. Las k columnas y 2^k renglones que construir de la siguiente manera, en primera columna, que corresponde a los niveles del factor A , se alternan signos $+$ y $-$, empezando con $-$, hasta llegar a los 2^k renglones; en la segunda columna se alternan dos signos menos con dos signos más, en la tercera cuatro signos menos y cuatro signos más, y así sucesivamente hasta la k -ésima columna compuesta por los $2^k - 1$ signos $-$ seguidos de los $2^k - 1$ signos $+$. A continuación se muestra las familias de diseño factoriales $2^k (k \leq 4)$. obsérvese que el número de tratamientos siempre es potencia de dos (ver Tabla 4.1).

Tratamiento	Notación de Yates	A	B	C	D
1	1	-	-	-	-
2	a	+	-	-	-
3	b	-	+	-	-
4	ab	+	+	-	-
5	c	-	-	+	-
6	ac	+	-	+	-
7	bc	-	+	+	-
8	abc	+	+	+	-
9	d	-	-	-	+
10	ad	+	-	-	+
11	bd	-	+	-	+
12	abd	+	+	-	+
13	cd	-	-	+	+
14	acd	+	-	+	+
15	bcd	-	+	+	+
16	abcd	+	+	+	+

Tabla 4.1 Familia de diseños factoriales $2^k (k \leq 4)$.

Con el diseño factorial completo 2^k se puede estudiar los $2^k - 1$ efectos.

$$\binom{k}{1} = k \text{ efectos principales.}$$

$$\binom{k}{2} = \frac{k!}{2!((k-2)!)} = \frac{k(k-1)}{2} \text{ interacciones dobles.}$$

$$\binom{k}{3} = \frac{k!}{3!((k-3)!)} \text{ interacciones triples.}$$

$$\binom{k}{4} = \frac{k!}{4!((k-4)!)} \text{ interacciones cuádruples.}$$

$$\binom{k}{k} = 1 \text{ interacciones de todos los factores}$$

Donde la operación $\binom{k}{r} = \frac{k!}{r!((k-r)!)}$ son las combinaciones de k en r y cuantifica el número de maneras diferentes en las que se puede elegir r objetos de un grupo de k ($r \leq k$). Aplicando esta operación se puede contar el número de interacciones de cada tipo que existen en el factorial completo 2^k .

Aplicando esto a un diseño factorial 2^4 se tiene $\binom{4}{1} = \frac{4!}{2!((4-1)!)} = 4$ efectos principales, $\binom{4}{2} = \frac{4!}{2!((4-2)!)} = 6$ interacciones dobles, $\binom{4}{3} = \frac{4!}{2!((4-3)!)} = 4$ interacciones triples, $\binom{4}{4} = 1$ interacciones cuádruples, lo que da por resultado $2^4 - 1 = 15$ efectos.

4.9 Estimación de contrastes, efectos y suma de cuadrados

Los efectos se estiman a partir de su contraste, el cual se puede obtener construyendo la tabla de signos del diseño, la tabla de signos tiene por objetivo determinar la columna de signos que llevan los totales en la notación de Yakes para formar el contraste de cada efecto. Las columnas de signos para los contrastes que definen a los efectos principales están dadas directamente por la matriz de diseño, mientras que la columna de un efecto de interacción se obtiene multiplicando las columnas que señala dicho efecto de interacción.

El contraste de cada efecto se obtiene multiplicando su columna de signos por la columna de totales expresados en la notación de Yakes. Al conocer los contrastes se produce a calcular los efectos mediante la fórmula.

$$\text{Efecto } ABC \cdots K = \frac{1}{n2^{k-1}} [\text{Contraste } ABC \cdots K]$$

Para el cual su suma de cuadrados con un grado de libertad está dada por

$$SC_{AB \cdots K} = \frac{1}{n2^k} [\text{Contraste } ABC \cdots K]^2,$$

donde n es el número de réplicas del experimento.

Para el caso del diseño factorial 2^4 se muestra a continuación como obtener el contraste y el efecto de ABC , tomando como base la tabla de signos (ver Tabla 4.2).

Contraste $ABC =$

$$[a + b + c + abc + ad + bd + cd + abcd - 1 - ab - ac - bc - d - abd - acd - bcd]$$

$$\text{Efecto } ABC = \frac{1}{n2^{4-1}} [\text{Contraste } ABC]$$

Notación de Yates	A	B	C	D	AB	AC	AD	BC	BD	CD	ABC	ABD	ACD	BCD	ABCD
1	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-
a	+	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	-	-
b	-	+	-	-	-	+	+	-	-	+	+	+	-	+	-
ab	+	+	-	-	+	-	-	-	-	+	-	-	+	+	+
c	-	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	+	-
ac	+	-	+	-	-	+	-	-	+	-	-	+	-	+	+
bc	-	+	+	-	-	-	+	+	-	-	-	+	+	-	+
abc	+	+	+	-	+	+	-	+	-	-	+	-	-	-	-
d	-	-	-	+	+	+	-	+	-	-	-	+	+	+	-
ad	+	-	-	+	-	-	+	+	-	-	+	-	-	+	+
bd	-	+	-	+	-	+	-	-	+	-	+	-	+	-	+
abd	+	+	-	+	+	-	+	-	+	-	-	+	-	-	-
cd	-	-	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	-	-	+
acd	+	-	+	+	-	+	+	-	-	+	-	-	+	-	-
bcd	-	+	+	+	-	-	-	+	+	+	-	-	-	+	-
abcd	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+

Tabla 4.2 Diseño factorial 2^k y sus efectos de interés, $k \leq 4$.

4.10 Análisis de varianza (ANOVA) del diseño factorial 2^k

La suma de cuadrados totales (SC_T) en el diseño factorial 2^k se calcula aplicando la siguiente ecuación.

$$SC_T = \sum_{i=1}^{n2^k} Y_i^2 - \frac{Y.^2}{n2^k},$$

y tiene $n2^k - 1$ grados de libertad, donde el subíndice i corre sobre el total de observaciones. La suma de cuadrados del error (SC_E) se obtiene por diferencia y tiene $2^k(n - 1)$ grados de libertad (ver Tabla 4.3).

Cada efecto de interés en el ANOVA es una fuente de variación para la cual se prueba la hipótesis $H_0 : Efecto = 0$ vs. $H_A : Efecto \neq 0$, De esta forma cuando se concluye que un efecto esta activo, en otras palabras significa que es estadísticamente diferente de cero [30].

FV	SC	GL	CM	F_0	p-value
<i>A</i>	SC_A	1	CM_A	CM_A/CM_E	$P(F > F_0)$
<i>B</i>	SC_B	1	CM_B	CM_B/CM_E	$P(F > F_0)$
<i>C</i>	SC_C	1	CM_C	CM_C/CM_E	$P(F > F_0)$
<i>D</i>	SC_D	1	CM_D	CM_D/CM_E	$P(F > F_0)$
<i>AB</i>	SC_{AB}	1	CM_{AB}	CM_{AB}/CM_E	$P(F > F_0)$
<i>AC</i>	SC_{AC}	1	CM_{AC}	CM_{AC}/CM_E	$P(F > F_0)$
<i>AD</i>	SC_{AD}	1	CM_{AD}	CM_{AD}/CM_E	$P(F > F_0)$
<i>BC</i>	SC_{BC}	1	CM_{BC}	CM_{BC}/CM_E	$P(F > F_0)$
<i>BD</i>	SC_{BD}	1	CM_{BD}	CM_{BD}/CM_E	$P(F > F_0)$
<i>CD</i>	SC_{CD}	1	CM_{CD}	CM_{CD}/CM_E	$P(F > F_0)$
<i>ABC</i>	SC_{ABC}	1	CM_{ABC}	CM_{ABC}/CM_E	$P(F > F_0)$
<i>ABD</i>	SC_{ABD}	1	CM_{ABD}	CM_{ABD}/CM_E	$P(F > F_0)$
<i>ACD</i>	SC_{ACD}	1	CM_{ACD}	CM_{ACD}/CM_E	$P(F > F_0)$
<i>BCD</i>	SC_{BCD}	1	CM_{BCD}	CM_{BCD}/CM_E	$P(F > F_0)$
<i>ABCD</i>	SC_{ABCD}	1	CM_{ABCD}	CM_{ABCD}/CM_E	$P(F > F_0)$
<i>Error</i>	SC_E	$2^4(n - 1)$	CM_E		
<i>Total</i>	SC_T	$n2^4 - 1$			

Tabla 4.3 ANOVA para el diseño 2^4 .

4.11 Coeficiente de determinación

R^2 se denomina coeficiente de determinación, y se utiliza para estimar la suficiencia de un modelo de regresión [31].

$$R^2 = \frac{SC_T - SC_E}{SC_T} = \frac{SC_{modelo}}{SC_T}$$

$$R_{aj}^2 = \frac{CM_T - CM_E}{CM_T}$$

R_{aj}^2 es el coeficiente de determinación ajustado, para interpretar R^2 y R_{aj}^2 se cumple que $0 \leq R_{aj}^2 \leq R^2 \leq 1$, para obtener el porcentaje de variabilidad se multiplica por 100, estos valores cuantifican el porcentaje de variabilidad en un modelo a partir de los datos presentes en este.

4.12 Definiciones de interés

Réplica: Se llama réplica a cada repetición completa del arreglo factorial.

Efecto de un factor: Es el cambio observado en la variable de respuesta debido a un cambio de nivel en el factor.

Efecto principal: Es igual a la respuesta promedio observada en el nivel alto de un factor menos la respuesta promedio en el nivel bajo.

Efecto de interacción: Dos factores interactúan significativamente sobre la respuesta cuando el efecto de uno depende del nivel en que está el otro.

Por diseño factorial se entiende aquel en el que se investigan todas las posibles combinaciones de los niveles de los factores en cada ensayo completo o réplica del experimento.

El efecto de un factor se define como el cambio en la respuesta producida por el cambio en el nivel del factor. Con frecuencia, éste se conoce como el efecto principal porque se refiere a los factores de interés primordial del experimento.

Los diseños factoriales permiten estimar los efectos de un factor en diversos niveles de los otros factores, produciendo conclusiones que son válidas sobre toda la extensión de las combinaciones experimentales.

El diseño factorial 2^k ocurre cuando se tienen k factores, cada uno con dos niveles. Estos niveles pueden ser cuantitativos como sería el caso de dos máquinas, los niveles “superior” e “inferior” de un factor o, quizás, la ausencia o presencia de un factor. Una réplica completa de tal diseño requiere que se recopilen $2 \times 2 \times \dots \times 2 = 2^k$ observaciones y se conoce como diseño factorial [30].

V. METODOLOGÍA DE EXPERIMENTACIÓN

Esta metodología tiene por objeto analizar la interacción de diferentes factores en relación a su proceso de medición y considerar cuál de ellas afecta más la medición en relación con su incertidumbre.

5.1 Factores de estudio

5.1.1 Diámetro de punta de palpado.

La precisión de la MMC puede ser afectada por el tipo de palpador, los aspectos importantes de este son:

5.1.1.1 La esfericidad del palpador (redondez)

El error de esfericidad (redondez) de las puntas es una componente de incertidumbre de la medida de la MMC, lo cual contribuye a la pérdida de precisión (ver Fig. 5.1).

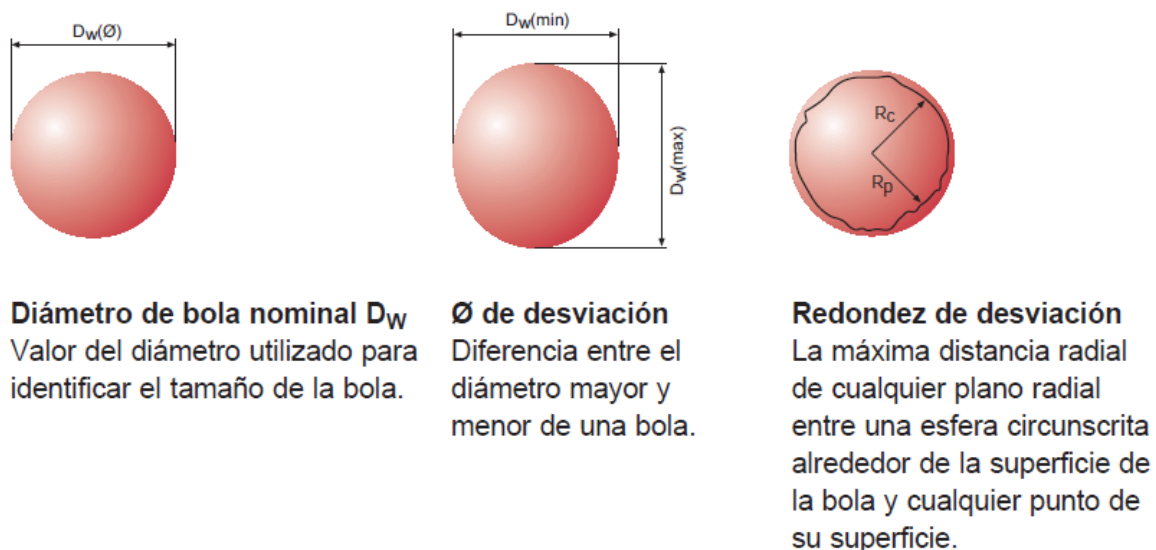


Fig. 5. 1 Diámetro de punta del palpador.

5.1.1.2 La flexión del palpador

Los palpadores entre mayor sea su longitud disminuyen su precisión, por eso es recomendable utilizar palpadores lo más cortos posibles, siempre y cuando la aplicación en que se esté utilizando lo permita.

El palpador no es directamente el responsable de este error, ya que este está relacionado con la longitud de la punta. El error se produce debido a la fuerza necesaria para disparar la sonda en diferentes direcciones. Esto es que se requiere una fuerza que venza la carga del muelle que está dentro del mecanismo del sensor. Esta fuerza deforma elásticamente el palpador. Esta flexión permite que se mueva una pequeña distancia con respecto a la pieza después de que se produzca el contacto físico y antes de que se produzca el disparo. Este movimiento se conoce como variación de desplazamiento.

Dentro de la primera fase experimental se trabajó con la misma configuración de longitud de las puntas de los palpadores, con el objetivo de descartar la posible contribución a la incertidumbre de medida referente a la flexión del palpador debido a la mayor o menor longitud.

5.1.1.3 La estabilidad térmica

La dilatación térmica depende de la longitud, por ello la variación de temperatura provoca errores de medición, la fibra de carbono es un material utilizado en palpadores largos y extensiones, debido a sus características ya que es rígida, ligera y que además su longitud no varía con la temperatura.

5.1.1.4 La selección del material de la punta del palpador (aplicaciones de exploración)

Las bolas de rubí son comúnmente utilizadas para las puntas de palpador, dependiendo la aplicación existen alternativas que pueden ser mejores que el rubí.

En las mediciones de disparo por contacto, que es el caso del palpador utilizado en la experimentación, la punta del palpador entra en contacto con la superficie durante periodos cortos de tiempo. En el caso contrario, en el palpado por exploración, la bola se desliza sobre la superficie del componente, produciendo un desgaste por fricción, lo cual puede afectar la esfericidad debido a eliminación o deposición de material sobre la bola del palpador [32].

5.1.2 Longitud de medición

Cuando se realiza una medición (como es el caso de la longitud) en general es altamente probable que al repetir esta medición los valores que se obtienen no sean todos iguales, lo cual trae como consecuencia variaciones en la medición. De aquí la importancia de conocer la incertidumbre de medida, ya que esta es un parámetro que nos indica que tanto variaron los valores medidos o qué tan dispersos están.

Actualmente cualquier medición no está completa si no va acompañada de su incertidumbre, la importante de la estimación de la incertidumbre de medida es el hecho de que cuando se mide, no se tiene la certeza que el valor que se obtiene es el valor verdadero, lo cual indica que el valor no es único y en consecuencia se encontrará en un cierto intervalo de probabilidad, que es determinado en función de los valores obtenidos y las fuentes de incertidumbre asociadas a la medición realizada.

En la experimentación se utilizan bloques patrón, estos cuentan con su certificado de calibración (ver ANEXO D), en el cual se dispone de información importante como su trazabilidad.

5.1.3 Cantidad de puntos por muestreo

Matemáticamente para cada elemento geométrico, existe un determinado número de puntos. Sin embargo, en las MMC al utilizar la cantidad mínima de puntos es

difícil realizar un análisis en relación con el error de forma de las características medidas.

En la Tabla 5.1 se muestran recomendaciones de diferentes autores para determinar elementos geométricos a partir de la cantidad de puntos [33].










Elemento geométrico	Mínimo matemático	Recomendación 1 [34]	Recomendación 2 [35]	Recomendación 3 [36]
Punto 	1	1	1	1
Línea 	2	5	50	>30
Plano 	3	9	50	N/D
Círculo 	3	7	7-19	>50
Elipse 	4	12	>100	N/D
Esfera 	4	9	N/D	N/D
Cilindro 	5	12-15	N/D	N/D
Cono 	6	12-15	N/D	N/D
Toróide 	7	N/D	N/D	N/D
N/D: No disponible				

Tabla 5. 1 Número de puntos.

5.1.4 Velocidad de palpado

En el sector industrial y de investigación es importante el tiempo en el cual se lleva a cabo un análisis, ya que esto impacta directamente en los costos de operación. Para el caso de estudio en la MMC se analiza su efecto en la incertidumbre al trabajar a distintas velocidades.

Cuando se realiza un plan de medición, generalmente se trabaja a velocidades bajas, una vez que se verifica que el programa no colisiona con la pieza, se puede trabajar a la velocidad que determine el usuario dependiendo de las características de medición.

5.2 Equipo utilizado en la experimentación

5.2.1 LM-MMC-01

Máquina de medición por coordenadas, marca Zeiss, modelo Vista 1620-14 DCC, número de serie 200512301379, de campos de medida longitudinales $C_x = 400$ mm, $C_y = 500$ mm, $C_z = 350$ mm con división de escala digital $E = 0.001$ mm (ver Fig. 5.2).



Fig. 5. 2 LM-MMC-01.

- Mesa de medición de granito.

Insertos roscados en la mesa de medición para fijar las piezas de medición, los cuales se encuentran distribuidos uniformemente a una distancia de 200 mm.

- Software Calypso 4.2

Esfera de calibración de material cerámica con un diámetro de 25 mm.

Máquina certificada según norma 10360-2 [37] y VDI/VDE 2617.

5.2.2 LM-JBP-01

Juego de bloques patrón longitudinales (1 conjunto de 46), marca Mitutoyo, Código No. 516-995-10, Tipo BMI-46-0/PD, número de serie 1105629, grado 0 (JIS), material acero, ensayos básico ISO 3650 / DIN 861 / JIS B7506 (ver Fig. 5.3).

Trazabilidad:

Trazables a NIST No. 821/276375-08

(NIST=National Institute of Standard and Technology)

Trazables a PTB via No. 4937 PTB 06

(PTB=Physikalisch-TechnischeBundesanstalt)



Fig. 5. 3 LM-JBP-01.

5.3 Experimentación

5.3.1 Requisitos técnicos

El personal del laboratorio debe estar debidamente capacitado para operar equipos, realizar ensayos o calibraciones, evaluar los resultados y firmar los informes de ensayos y los certificados de calibración [38].

5.3.2 Instalaciones y condiciones ambientales

Es recomendable mantener las condiciones de ambientales durante todo el desarrollo de las mediciones, la temperatura de referencia es de 20 °C [16]. Para el monitoreo de la temperatura se cuenta con un sensor “Data Logger 174H” (ver Fig. 5.4), el instructivo de operación y el certificado de calibración de este aparato se encuentran en los anexos F y G.



Fig. 5. 4 Data Logger 174H.

Cuando la temperatura sale de los límites establecidos en cualquier medición, el trabajo debe ser suspendido hasta estabilizar nuevamente la temperatura del lugar y poder continuar con la medición.

Los límites de temperatura para la realización de la experimentación se establecieron en 20 ± 1 °C.

5.3.3 Operaciones previas

Encender aire acondicionado para estabilizar la temperatura del laboratorio y todo el equipo así como accesorios que se emplearán en la experimentación.

El laboratorio debe estar perfectamente limpio, se realiza limpieza general de la mesa de granito de MMC y de todo el equipo para realizar el trabajo.

Se enciende la MMC siguiendo el instructivo de trabajo (ver ANEXO A)

Se coloca la esfera de calibración y se fija con un tornillo en un inserto roscado de la mesa de granito.

Se coloca el fixture y los accesorios en la mesa de granito, posteriormente se colocan los bloques patrón sobre los accesorios, al concluir con esta operación se dejan estabilizar los bloques durante 8 horas antes de comenzar el procedimiento de medición, ya que estos deben estar a la temperatura de referencia, esta temperatura se logra por medio del aire acondicionado con el que cuenta el laboratorio de metrología (ver Fig. 5.5).

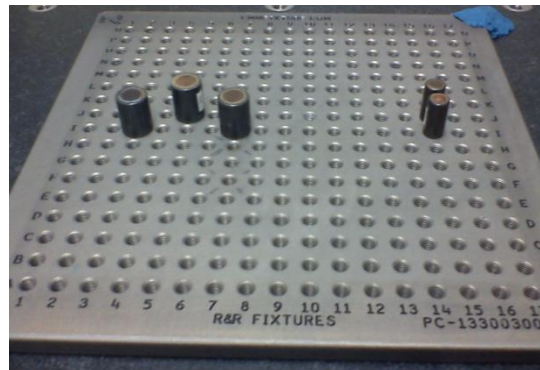


Fig. 5. 5 Accesorios de sujeción.

Ya que están limpios los bloques se colocan sobre los accesorios. Cabe señalar que se usaron guantes para el manejo de los bloques patrón, esfera de calibración, así como para los palpadores y el master probe (ver Fig. 5.6).

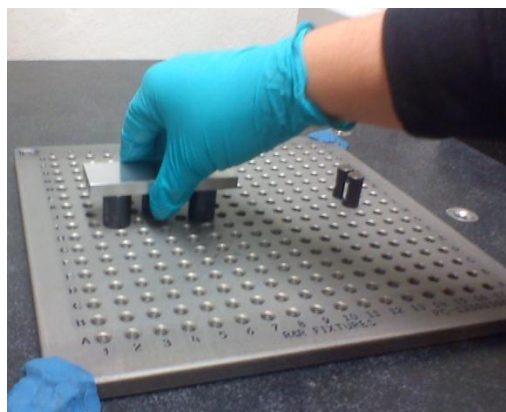


Fig. 5. 6 Colocación del bloque patrón.

Para comenzar la medición se verifica la temperatura que marca el “Data Logger” (en el anexo H se presenta su instructivo de operación de este equipo). Si en algún momento se alcanza los límites de temperatura, se interrumpirá la medición para comenzar al menos una hora después de haber entrado nuevamente al intervalo prefijado.

5.3.4 Calificación del palpador

Para la calibración del equipo en primer paso se coloca el palpador master y se acopla al cabezal de la MMC. El siguiente paso consiste en acercar el palpador master a la esfera de calibración; esta operación se realiza con el control de mando de la MMC (ver Fig. 5.7).

Posteriormente en el software Calypso se ingresa a la opción “stylus system”, aquí se selecciona master probe y se siguen una serie de rutinas que se detallan en el anexo C. El software solicita que el palpador master, toque un punto de la superficie de la esfera de calibración. El paso siguiente es con el control de la MMC, se palpa un punto en la esfera, al realizar esto el palpador master comienza a realizar una serie de mediciones automáticamente sobre la esfera de calibración, al terminar manda un informe de la calibración.

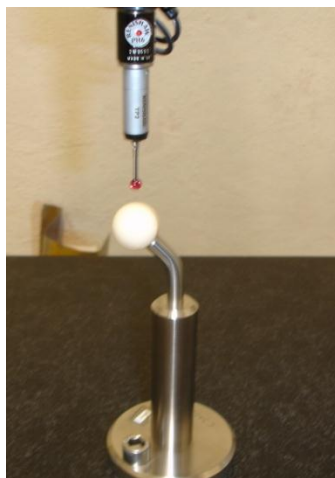


Fig. 5. 7 Calibración de la punta con la esfera de referencia.

Una vez realizada la calibración el siguiente paso es calificar el o los palpadores que se van a utilizar. El procedimiento a realizar es similar al realizado para el palpador master, el procedimiento de calificación del palpador se detalla en el anexo C.

5.3.5 Alineación con respecto a la pieza y modelo CAD

Se realiza un modelo CAD de la pieza a medir, éste puede ser realizado desde cualquier software que cuente con una extensión compatible con Calypso (como por ejemplo; la extensión igs).

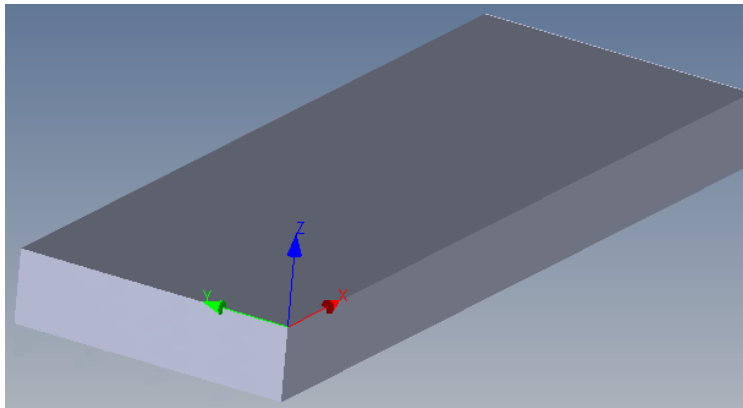


Fig. 5. 8 Modelo CAD del bloque patrón 100 mm.

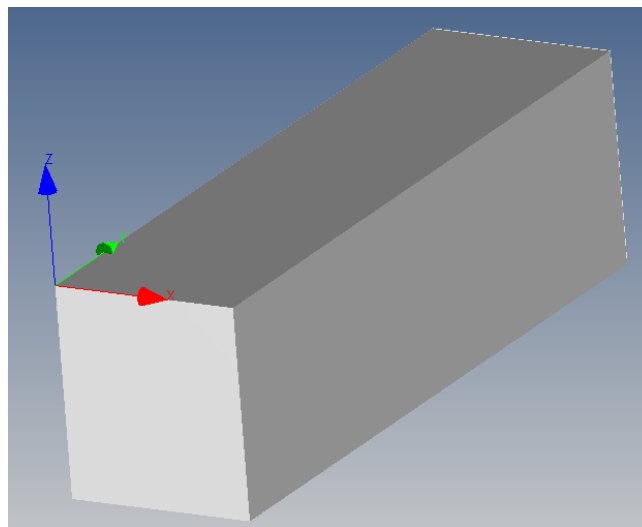


Fig. 5. 9 Modelo CAD del bloque patrón 8 mm.

Al cargar la pieza genera un origen que corresponde con el origen definido en el modelo CAD (ver Fig. 5.8 y Fig. 5.9). Lo siguiente es establecer la alineación, la cual tiene por objetivo hacer coincidir el origen del CAD con el origen la MMC con respecto a la pieza, la alineación se detalla en el anexo B.

Al concluir con la alineación se debe establecer un cubo de seguridad, este tiene como propósito establecer el espacio donde se puede mover el palpador sin colisionar con la pieza de trabajo (ver Fig. 5.10 y Fig. 5.11).

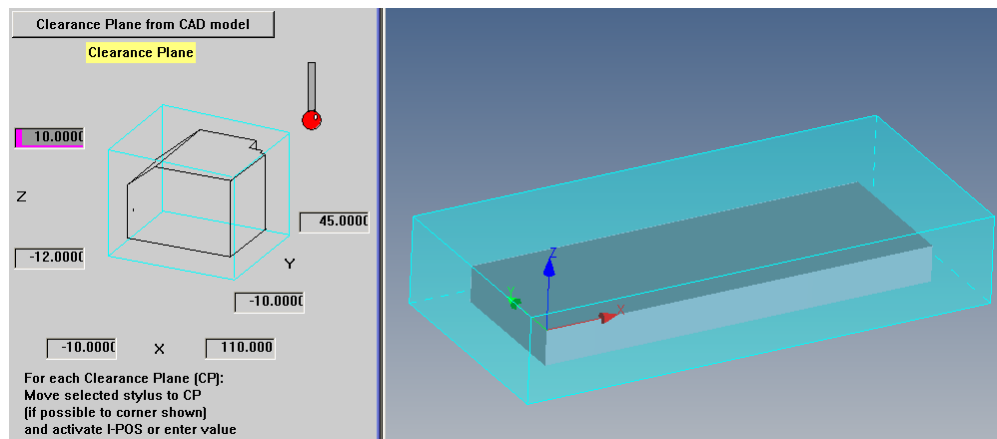


Fig. 5. 10 Construcción de cubo de seguridad bloque patrón 100 mm.

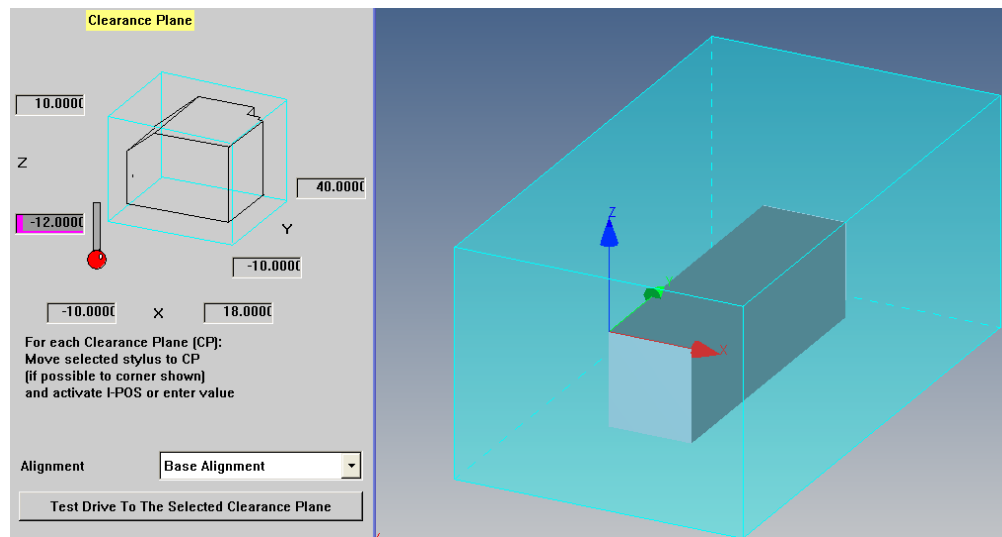


Fig. 5. 11 Construcción de cubo de seguridad bloque patrón 8 mm.

5.3.6 Generación de estrategia de medición

Conforme al tipo de medición, se establece o se programa un plan de medición, en el que se estipulan puntos, planos, líneas, etc. Ya que se definieron, el siguiente paso es definir las características a medir, en este caso son la distancia entre un punto y un plano, el diámetro de un círculo, el ángulo que existe en dos planos, la planicidad de una superficie, la concentricidad, paralelismo, perpendicularidad, etc (ver Fig. 5.12).

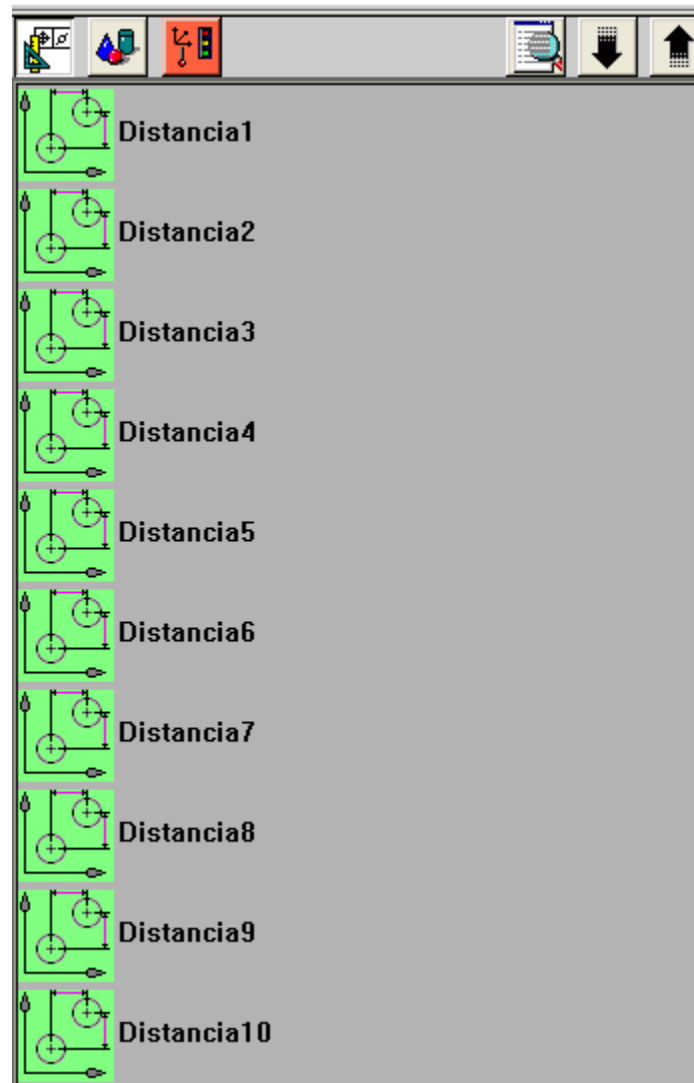


Fig. 5. 12 Lista de características por medir.

5.3.7 Realización automática de las mediciones

Al tener completo el plan de medición y previamente haber realizado la alineación, se corre automáticamente el plan establecido, la MMC realizará este programa y enviará un informe de lo realizado.

Cuando ya se cuenta con un plan de medición y se necesita verificar un número determinado de piezas idénticas, lo que se requiere hacer en estos casos es emplear el plan de medición existente y alinear la nueva pieza.

5.4 Primera fase experimental

Se planteó analizar la influencia de 4 factores en la estimación de incertidumbre, éstos son:

- Diámetro de la punta de palpado.
- Longitud de medición (ver Fig. 5.13).
- Cantidad de puntos.
- Velocidad de palpado.

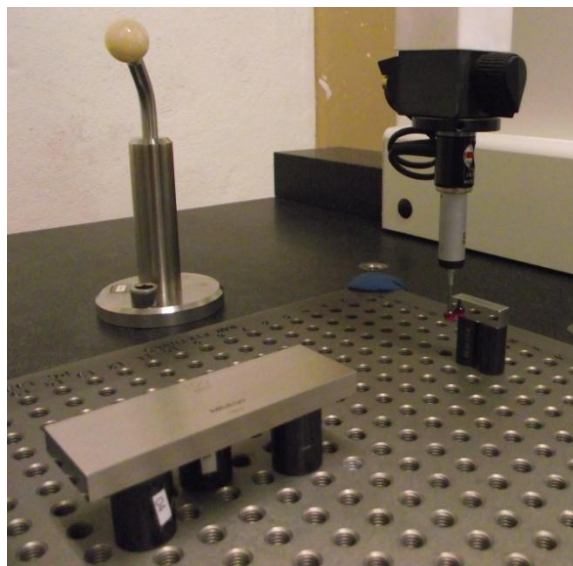


Fig. 5. 13 Medición de patrones de 8 y 100 mm.

Con base en las condiciones de trabajo con las que se cuenta, se tomó la decisión de trabajar los factores en 2 niveles cada uno (ver Tabla 5.2). Los valores asignados a cada factor están lo suficientemente separados para detectar el mayor efecto de cada uno de estos.

Factor	Nivel	
	Bajo	Alto
Diámetro	2	6
Longitud	8	100
Puntos	6	12
Velocidad	10	200

Tabla 5.2 Niveles de los factores.

Se utiliza un diseño factorial 2^4 que indica el número de niveles que son 2 y los 4 factores, el total de experimentos que se generan con este arreglo son 16 (ver Tabla 5.3). Se decide realizar un total de 10 réplicas por experimento, se aleatorizan los 16 experimentos con el fin de descartar la influencia de un factor oculto, por las condiciones del equipo se decide realizar cada experimento y sus réplicas, ya que es difícil mantener las condiciones de trabajo debido a que se tendrían que realizar constantes cambio de punta y esto podría dañar la MMC.

N°	Experimento	Diámetro (mm)	Longitud (mm)	Puntos	Velocidad mm/s
1	<i>bd</i>	2	100	6	200
2	<i>1</i>	2	8	6	10
3	<i>abd</i>	6	100	6	200
4	<i>c</i>	2	8	12	10
5	<i>cd</i>	2	8	12	200
6	<i>bcd</i>	2	100	12	200
7	<i>b</i>	2	100	6	10
8	<i>acd</i>	6	8	12	200
9	<i>abcd</i>	6	100	12	200
10	<i>ac</i>	6	8	12	10
11	<i>bc</i>	2	100	12	10
12	<i>a</i>	6	8	6	10
13	<i>abc</i>	6	100	12	10
14	<i>ab</i>	6	100	6	10
15	<i>d</i>	2	8	6	200
16	<i>ad</i>	6	8	6	200

Tabla 5.3 Matriz de diseño en orden aleatorio 2^4 .

Para la primera fase de experimentación se realizaron 10 réplicas debido a las condiciones del experimento (recursos disponibles, desviación estándar y cantidad de variabilidad presente en el material experimental). Realizar mayor cantidad de réplicas implicaría un mayor esfuerzo y costo de tiempo el cual no sería recompensado con una ganancia proporcional en confiabilidad. Un claro ejemplo de esto, es el factor de cobertura en la distribución t de student utilizada. Para un nivel de confianza del 95% y con 10 réplicas se obtiene un factor de 2.26, mientras que para 51 réplicas se obtiene un factor de 2.01.

5.5 Segunda fase experimental

Se planteó analizar la influencia de 3 factores en la estimación de incertidumbre y a diferencia de la primera fase, en este se mantiene el factor de la cantidad de puntos constante (ver Tabla 5.4). Los factores de estudio son:

- Diámetro de la punta de palpado.
- Longitud de medición.
- Velocidad de palpado.

Factor	Nivel	
	Bajo	Alto
Diámetro	2	6
Longitud	8	100
Velocidad	10	200

Tabla 5.4 Niveles de los factores.

Se utiliza un diseño factorial 2^3 , el total de experimentos que se generan con este arreglo son 8 (ver Tabla 5.5). Se decide realizar un total de 8 réplicas por experimento, se aleatorizan los 8 experimentos con el fin de descartar la influencia de un factor oculto.

Al conocerse la desviación estándar de la primera fase de experimentación, se pudo concluir que una disminución ligera en el número de réplicas

prácticamente no afectaría la confiabilidad, por lo que para la segunda fase experimentación se decidió hacer 8 réplicas.

El orden en que se llevó a cabo la experimentación se muestra en la Tabla 5.5.

N°	Experimento	Diámetro (mm)	Longitud (mm)	Velocidad mm/s
1	<i>c</i>	2	8	200
2	<i>ab</i>	6	100	10
3	<i>1</i>	2	8	10
4	<i>abc</i>	6	100	200
5	<i>a</i>	6	8	10
6	<i>ac</i>	6	8	200
7	<i>b</i>	2	100	10
8	<i>bc</i>	2	100	200

Tabla 5.5 Matriz de diseño en orden aleatorio 2^3 .

5.6 Plan de medición

Se realizaron las siguientes operaciones:

- Carga del archivo IGES.
- Alineación, haciendo coincidir el origen de la pieza con la de la MMC (ver Fig. 5.14 y Fig. 5.15).

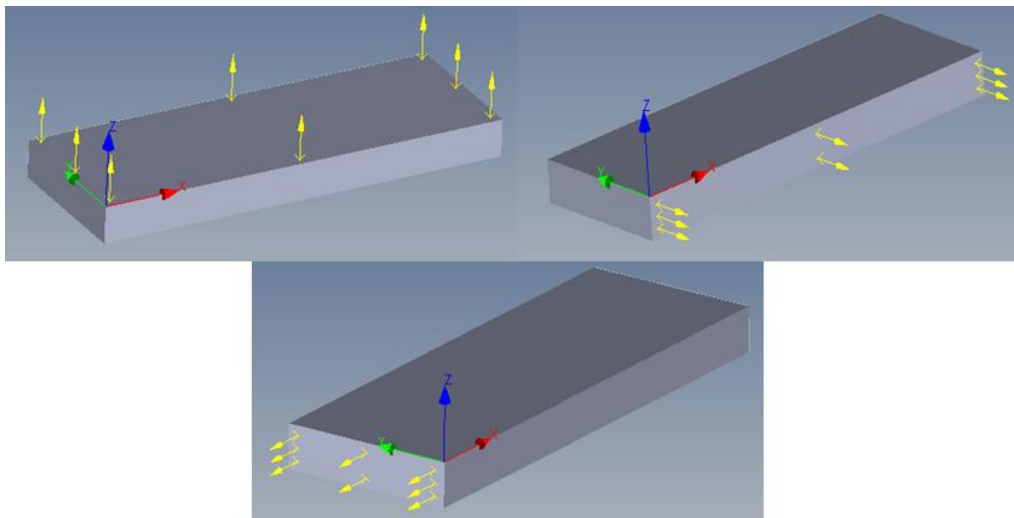


Fig. 5. 14 Puntos que conforman los planos de alineación para el bloque de 100 mm.

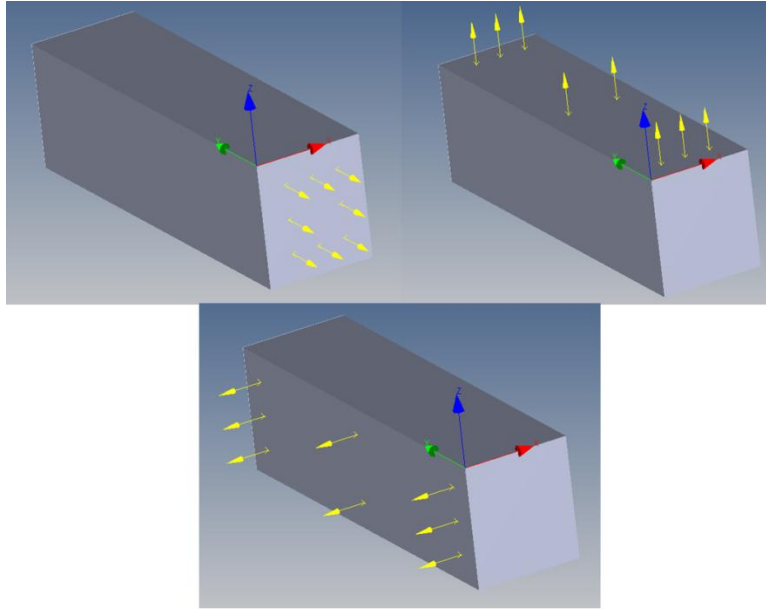


Fig. 5. 15 Puntos que conforman los planos de alineación para el bloque de 8 mm.

- Programación de los planos de 6 y 12 puntos(ver Fig. 5.16 y Fig. 5.17).

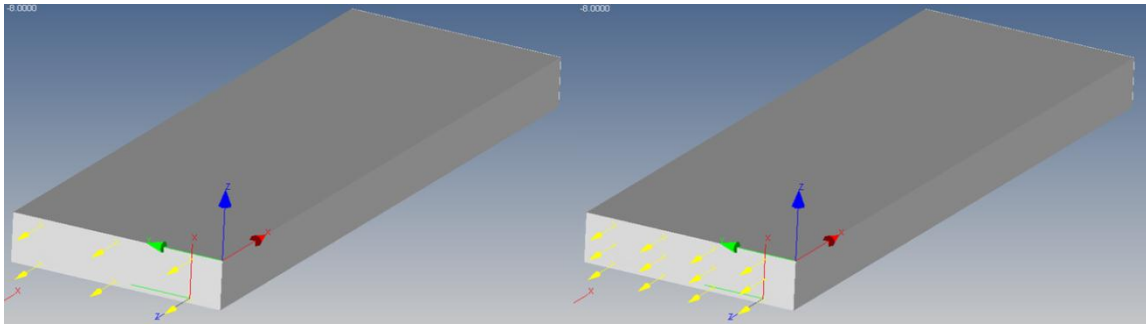


Fig. 5. 16 Medición con 6 y 12 puntos para el bloque de 100 mm.

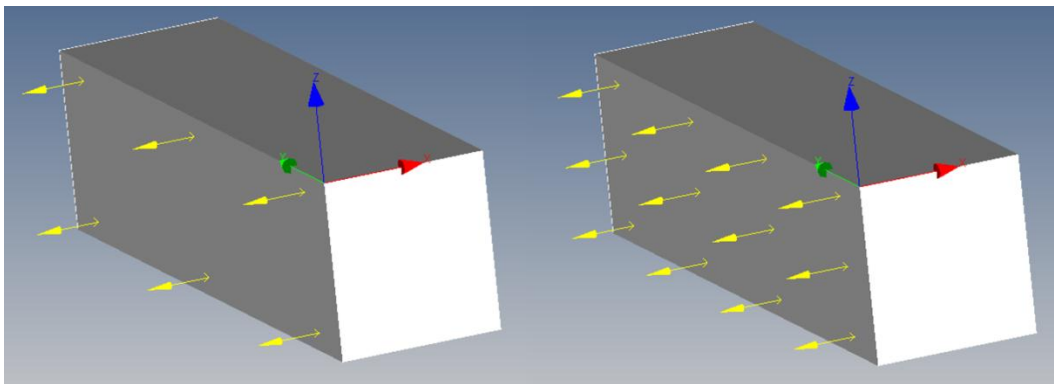


Fig. 5. 17 Medición con 6 y 12 puntos para el bloque de 8 mm.

- Programación de 10 puntos en la cara contraria del bloque (ver Fig. 5.18 y Fig. 5.19).

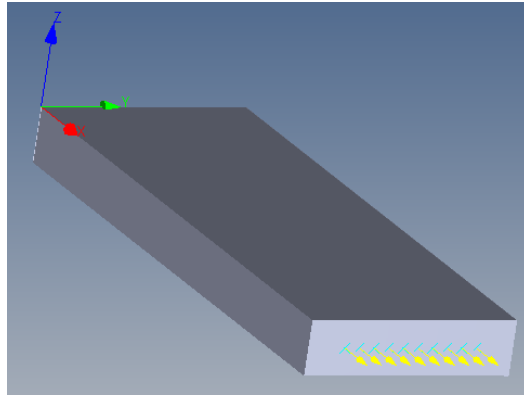


Fig. 5. 18 Puntos de medición bloque patrón 100 mm.

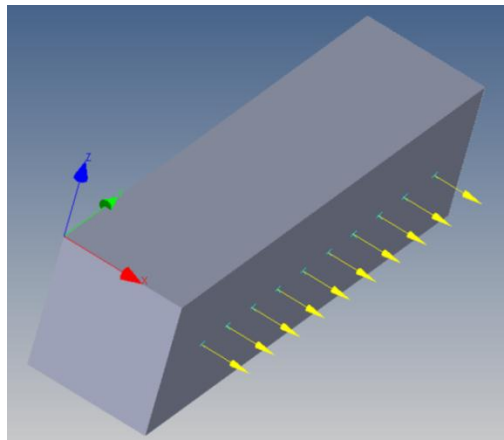


Fig. 5. 19 Puntos de medición bloque patrón 8 mm.

- Programación de las características que se quieren verificar, para este caso en particular es la longitud que existe entre el plano y puntos (ver Fig. 5.20).

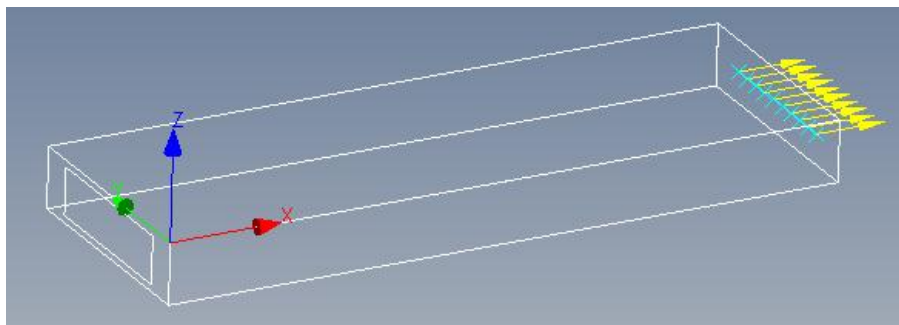


Fig. 5. 20 Plano de referencia y puntos sujetos a medición.

- Ejecución del programa automáticamente. Para esto se selecciona la velocidad a la que se medirá la pieza la cual puede ser 10 o 200 mm/s según se haya establecido en el diseño de experimento (ver Fig. 5.21). Al concluir esta operación se genera un reporte donde se muestran las características medidas.

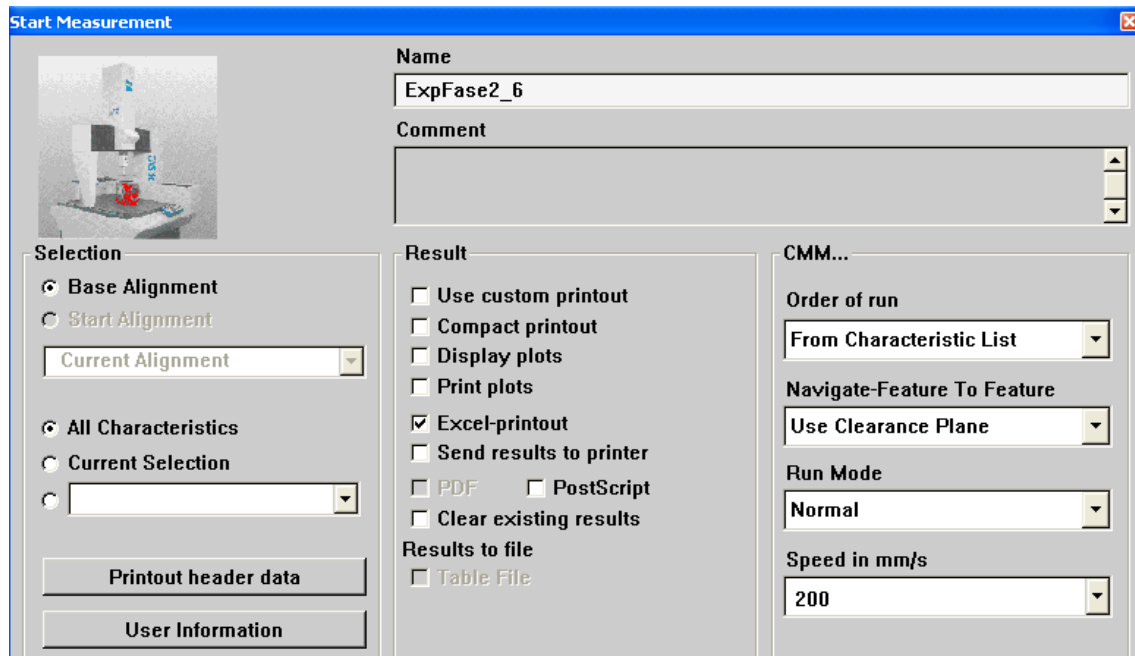


Fig. 5. 21 Configuración de la medición en modo automático.

Al concluir con los experimentos se calcularon las diferentes fuentes de incertidumbre, con los valores obtenidos se realizó el análisis experimental.

5.7 Influencia de las diferentes fuentes de incertidumbre

5.7.1 Incertidumbre de los bloques patrón

De acuerdo al certificado de calibración No. S11G00573 la incertidumbre expandida (ver ANEXO D) para el bloque patrón está dado por la siguiente expresión con un factor de cobertura de $k=2$.

$$U_p = (0.06 + 0.5L/1000) \mu m$$

$$u_{pc} = \frac{U_p}{k}$$

$$u_p = (Desv\ max + u_{pc})\ \mu m$$

Donde:

L = Longitud nominal en mm.

U_p = Incertidumbre expandida en μm .

u_{pc} = Incertidumbre estándar obtenida de la incertidumbre expandida. (U_p).

u_p = Incertidumbre estándar ($k=1$) del patrón en μm .

k =Factor de cobertura.

Desv. Máx = Desviación máxima del patrón (obtenida del informe de calibración).

5.7.2 Incertidumbre de la MMC

De acuerdo al certificado de calibración No. 650506-01102006 la incertidumbre expandida (ver ANEXO E) para la MMC está dado por la siguiente expresión con un factor de cobertura de $k=2$.

$$U_{MMC} = (0.1 + L/818)\ \mu m$$

$$u_{MMC} = \frac{U_{MMC}}{k}$$

U_{MMC} = Incertidumbre expandida de la MMC.

u_{MMC} = Incertidumbre estándar de la MMC.

k =Factor de cobertura.

5.7.3 Incertidumbre de esfera de calibración

De acuerdo al certificado de calibración (ver ANEXO E) el radio medio ha sido determinado con una incertidumbre de medida de $u_{esf} = \pm 0.15\ \mu m$.

5.7.4 Incertidumbre por repetibilidad

La incertidumbre por repetibilidad se evalúa con el estimador estadístico de la desviación estándar de la media a partir de mediciones repetitivas en un punto, considerando que la distribución es normal (ver ANEXO L).

$$u_{rep} = \frac{s}{\sqrt{n}}$$

Donde:

u_{rep} = Incertidumbre por repetibilidad

n = Número de mediciones realizadas en un punto.

s = Desviación estándar de las n mediciones.

5.7.5 Incertidumbre por resolución

La incertidumbre queda determinada por la mínima división del instrumento. Suponiendo una distribución rectangular (ver ANEXO L), queda de la siguiente manera:

$$u_{res} = \frac{Res}{2\sqrt{3}}$$

Donde:

u_{res} = Incertidumbre estándar por resolución de la máquina

Res = Resolución de la máquina.

5.7.6 Incertidumbre por temperatura

Suponiendo una distribución rectangular (ver ANEXO L), entonces:

$$u_{\Delta T} = \frac{L \alpha \Delta T}{\sqrt{3}}$$

Donde:

$u_{\Delta T}$ = Coeficiente de temperatura

L = Longitud de medición

α = Coeficiente de dilatación térmica

ΔT = Cambio de temperatura

El coeficiente de dilatación térmica para el acero a 20 °C es de $10.8 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$.

5.7.8 Incertidumbre de la punta de palpado

La incertidumbre de palpado se obtiene directamente del informe de calibración generado por el software de la MMC, al realizar la calibración de la punta de palpado (ver ANEXO C).

5.7.9 Incertidumbre estándar combinada

La incertidumbre estándar combinada u está dada por la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de todas las fuentes de incertidumbre.

$$u = \sqrt{(u_{rep(medición)} \text{ } \acute{o} \text{ } u_{res})^2 + u_p^2 + u_{esf}^2 + u_{punta}^2 + u_{\Delta T}^2 + u_{MMC}^2}$$

5.7.10 Incertidumbre expandida

La incertidumbre expandida U se obtiene utilizando un factor de cobertura de $k = 2$ (al que corresponde un intervalo de confianza de aproximadamente un 95 %).

$$U=2u$$

VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En éste capítulo se concentran los resultados obtenidos en las fases experimentales que se llevaron a cabo.

Es importante señalar que los experimentos fueron realizados según lo planteado en la metodología; se realizó la limpieza del laboratorio y junto con ello las piezas fueron estabilizadas, se encendió la MMC de acuerdo al procedimiento, se calibró cada una de las puntas de palpado, se verificó la temperatura (debido a que la computadora, la MMC y el operador generan calor), antes de comenzar las mediciones el operador esperaba dentro del laboratorio aproximadamente dos horas para integrarse al sistema y que su presencia no ocasionará cambios en la temperatura del laboratorio, posterior a esto se comenzaba la medición de las piezas.

Para comenzar a medir se carga la pieza, posteriormente se alinea para hacer coincidir el origen de la MMC con el de la pieza, después se realiza el cubo de seguridad, enseguida se genera el programa para indicar las características que se quieren verificar de la pieza, ya que se han realizado todos los pasos correctamente se puede medir la pieza iniciando con el control automático de la MMC y por último se crea un reporte de la medición.

6.1 Resultados de la primera fase experimental

Para la primera fase de la experimentación se realizaron 16 experimentos con 10 réplicas cada uno. Con el objetivo de conocer si los factores planteados afectan en la estimación de la incertidumbre.

Los experimentos fueron aleatorizados con el objetivo de asegurar que las diferencias provocadas por los factores no controlables, se separen homogéneamente en todos los tratamientos o experimentos, el objetivo de aleatorizar los experimentos es ayudar a cancelar los efectos de los factores que no se consideran.

El objetivo de replicar los experimentos es para distinguir mejor que parte de la variabilidad total de los datos se debe al error aleatorio y cuál se debe a los factores, al replicar aumenta la confiabilidad de las mediciones, ya que las réplicas en el mismo tratamiento se esperan parecidas, sí el proceso de medición se encuentra controlado.

Para realizar las mediciones se utilizaron dos bloques patrón, el propósito de usar un bloque patrón es que se conoce su trazabilidad (ver ANEXO D). Lo cual garantiza que la medida que estos tienen, está referenciada con respecto a patrones de mayor exactitud y pueden dar calibración a diferentes aparatos según corresponda el diagrama de niveles de cada uno de ellos.

La longitud de los bloques fue medida utilizando planos de medición creados con diferentes números de puntos en una cara del bloque, en la cara contraria de este se colocaron 10 puntos. La longitud es verificada midiendo la distancia existente entre el plano y cada uno de los puntos. El objetivo de realizar 10 mediciones con los puntos y el plano, es verificar la repetibilidad de la MMC y con ello realizar la estimación de la incertidumbre por repetibilidad del equipo.

Los experimentos se llevaron a cabo según lo planteado en la matriz de diseño en orden aleatorio de la tabla 5.3 del capítulo anterior. Los resultados de las longitudes obtenidas de cada uno de los experimentos se muestran en el anexo I.

El siguiente paso fue estimar la incertidumbre generada para cada uno de los experimentos;

- a) la incertidumbre por repetibilidad u_{rep} se obtuvo con los datos recabados en el anexo I,
- b) la incertidumbre de los patrones u_p se calculó a partir de los datos proporcionados por el fabricante,
- c) la incertidumbre de resolución u_{res} se obtiene suponiendo una distribución triangular y se calcula a partir de la resolución de la MMC,

- d) la incertidumbre de la esfera de calibración u_{esf} es un dato proporcionado por el fabricante,
- e) para la incertidumbre de la MMC u_{MMC} el fabricante proporciona una fórmula para obtenerla,
- f) la incertidumbre de la punta u_{punta} se obtiene al realizar la calibración del palpador con la esfera de calibración
- g) por último la incertidumbre estándar combinada u es obtenida de la contribución de cada una de las fuentes de incertidumbres antes mencionadas, los datos generados para ello se muestran a continuación (ver Tabla 6.1).

Experimentos											
Tratamiento	No	Rep 1	Rep 2	Rep 3	Rep 4	Rep 5	Rep 6	Rep 7	Rep 8	Rep 9	Rep 10
<i>bd</i>	1	0.8985	0.9042	0.8974	0.8983	0.8992	0.9025	0.9066	0.8983	0.9035	0.8995
<i>1</i>	2	0.6319	0.6330	0.6356	0.6310	0.6311	0.6345	0.6310	0.6358	0.6409	0.6422
<i>abd</i>	3	0.7783	0.7794	0.7803	0.7827	0.7816	0.7806	0.7774	0.7774	0.7791	0.7863
<i>c</i>	4	0.3658	0.3581	0.3671	0.3581	0.3581	0.3581	0.3581	0.3645	0.3581	0.3661
<i>cd</i>	5	0.3622	0.3581	0.3581	0.3620	0.3648	0.3668	0.3581	0.3581	0.3581	0.3599
<i>bcd</i>	6	0.7329	0.7310	0.7353	0.7399	0.7351	0.7354	0.7315	0.7311	0.7363	0.7310
<i>b</i>	7	0.7367	0.7329	0.7369	0.7326	0.7314	0.7428	0.7426	0.7310	0.7326	0.7394
<i>acd</i>	8	0.5392	0.5368	0.5368	0.5447	0.5368	0.5469	0.5397	0.5389	0.5383	0.5420
<i>abcd</i>	9	0.8424	0.8375	0.8378	0.8381	0.8339	0.8376	0.8339	0.8338	0.8343	0.8385
<i>ac</i>	10	0.5383	0.5368	0.5400	0.5368	0.5389	0.5373	0.5368	0.5394	0.5368	0.5431
<i>bc</i>	11	0.8377	0.8333	0.8343	0.8333	0.8338	0.8333	0.8333	0.8358	0.8351	0.8370
<i>a</i>	12	0.5394	0.5368	0.5368	0.5506	0.5371	0.5444	0.5368	0.5368	0.5368	0.5368
<i>abc</i>	13	0.8333	0.8333	0.8333	0.8333	0.8333	0.8333	0.8333	0.8333	0.8333	0.8333
<i>ab</i>	14	0.8333	0.8333	0.8333	0.8333	0.8344	0.8333	0.8338	0.8336	0.8333	0.8333
<i>d</i>	15	0.2797	0.2894	0.2797	0.2813	0.2884	0.2870	0.2879	0.2797	0.2797	0.2797
<i>ad</i>	16	0.7300	0.7268	0.7268	0.7268	0.7275	0.7268	0.7293	0.7273	0.7268	0.7268

Tabla 6.1 Incertidumbre estándar combinada

De la tabla 6.1 se obtienen los totales de cada uno de los tratamientos los cuales se muestran en la tabla 6.2, estos valores se utilizan para calcular los contrastes y para estimar todos los efectos, cada contraste es obtenido tomando como base la tabla 4.2.

Tratamientos	Totales
1	6.3476
a	5.3931
b	7.3600
ab	8.3353
c	3.6126
ac	5.3850
bc	8.3475
abc	8.3329
d	2.8331
ad	7.2749
bd	9.0094
abd	7.8047
cd	3.6064
acd	5.4008
bcd	7.3403
abcd	8.3687

Tabla 6. 2 Totales de réplicas observadas para incertidumbre

$$\text{Contraste } A = [a + ab + ac + abc + ad + abd + acd + abcd - 1 - b - c - bc - d - bd - cd - bcd]$$

$$\text{Contraste } A = [5.3931 + 8.3353 + 5.3850 + 8.3329 + 7.2749 + 7.8047 + 5.4008 + 8.3687 - 6.3476 - 7.3600 - 3.6126 - 8.3475 - 2.8331 - 9.0094 - 3.6064 - 7.3403] = 7.8385$$

El paso siguiente es estimar el efecto de cada factor como se muestra a continuación, los resultados obtenidos para cada efecto se presentan en la tabla 6.3.

$$\text{Efecto } A = \frac{1}{n2^{4-1}} [\text{Contraste } A] = \frac{1}{10(2)^{4-1}} (7.8385) = 0.09799$$

Con los datos obtenidos para incertidumbre estándar combinada, se realizó el análisis de diseño de experimentos 2^4 . Cabe aclarar que sólo se tomaron en cuenta efectos principales e interacciones dobles (ver Tabla 6.3). Esto considerando que el mejor ANOVA es aquel que muestra los factores que son estadísticamente significativos.

Al realizar el análisis de varianza completo, se observó que los efectos generados por las interacciones triples eran prácticamente iguales a las obtenidas por las interacciones dobles, lo cual indica que la contribución observada era generada por dos factores y no de la interacción de los tres, lo que mostraba claramente que sin importar la interacción de los tres factores, seguía mostrando el efecto de una interacción doble. Por tal motivo se decidió descartar las interacciones triples y cuádruples. Algunos autores consideran que estas interacciones generan ruido sobre el sistema [30].

Efecto	Estimado
promedio	0.654634
A:Diámetro	0.09799
B:Longitud	0.313035
C:Puntos	-0.0495225
D:Velocidad	-0.018465
AB	-0.0783525
AC	0.01652
AD	0.0535025
BC	0.04658
BD	0.0220825
CD	-0.0056

Tabla 6.3 Valores de los efectos calculados

Utilizando el software Statgraphics (versión de prueba) se obtuvo el análisis de varianza, la cual proporciona información acerca de los efectos que son significativos y deben de analizarse (ver Tabla 6.4).

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Diámetro	0.384082	1	0.384082	66.80	0.0000
B:Longitud	3.91964	1	3.91964	681.69	0.0000
C:Puntos	0.0980991	1	0.0980991	17.06	0.0001
D:Velocidad	0.0136382	1	0.0136382	2.37	0.1257
AB	0.245565	1	0.245565	42.71	0.0000
AC	0.0109164	1	0.0109164	1.90	0.1703
AD	0.114501	1	0.114501	19.91	0.0000
BC	0.0867879	1	0.0867879	15.09	0.0002
BD	0.0195055	1	0.0195055	3.39	0.0675
CD	0.0012544	1	0.0012544	0.22	0.6411
Error total	0.856735	149	0.0057499		
Total (corr.)	5.75072	159			

Tabla 6.4 Análisis de varianza

El análisis de varianza muestra que 6 de los efectos tienen valor-P menor que 0.05, indicando que son significativamente diferentes de cero con un nivel de confianza del 95 %.

A continuación se calculan los coeficientes de determinación para verificar la variabilidad del experimento.

$$R^2 = \frac{SC_T - SC_E}{SC_T} = \frac{(5.75072 - 0.856735)}{5.75072} = .851021 = 85.1021\%$$

$$R_{aj}^2 = \frac{CM_T - CM_E}{CM_T} = \frac{(5.75072/159 - 0.856735/149)}{5.75072/159} = .841023 = 84.1023\%$$

Los valores explican la variabilidad de la incertidumbre, en otras palabras, los factores estudiados, junto con sus interacciones, son responsables o explican un alto porcentaje de la variación observada en la incertidumbre. Un modelo aceptable se espera que este en un margen de 70 % a 100%.

A continuación se presenta un gráfico de probabilidad normal (ver Fig. 6.1) y un gráfico de Pareto (ver Fig. 6.2) en el cual se observa que el efecto más significativo es la longitud.

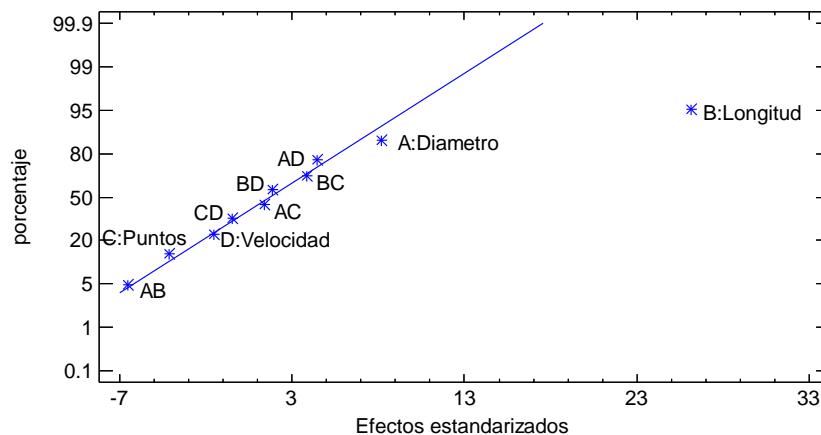


Fig. 6.1 Gráfica de probabilidad normal para incertidumbre.

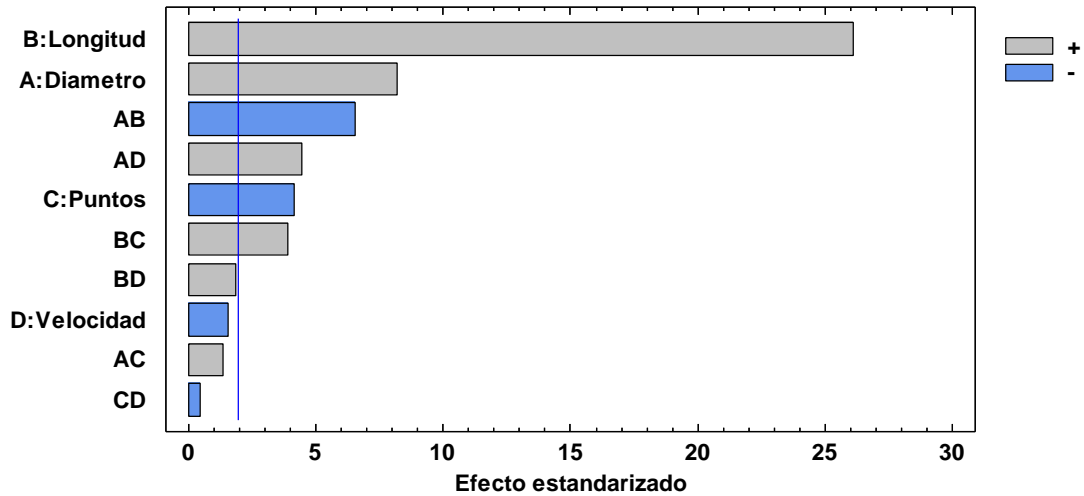


Fig. 6.2 Diagrama de Pareto estandarizado para incertidumbre.

En la Fig. 6.3 se muestra cómo se comportan los factores en relación a la incertidumbre, siendo la media global obtenida para incertidumbre de todos los experimentos de $0.6547 \mu m$. Se observa claramente que la longitud y el diámetro incrementan su valor estando en su nivel alto, en cambio para la cantidad de puntos y velocidad de muestreo, la incertidumbre disminuyó muy poco estando en los niveles altos.

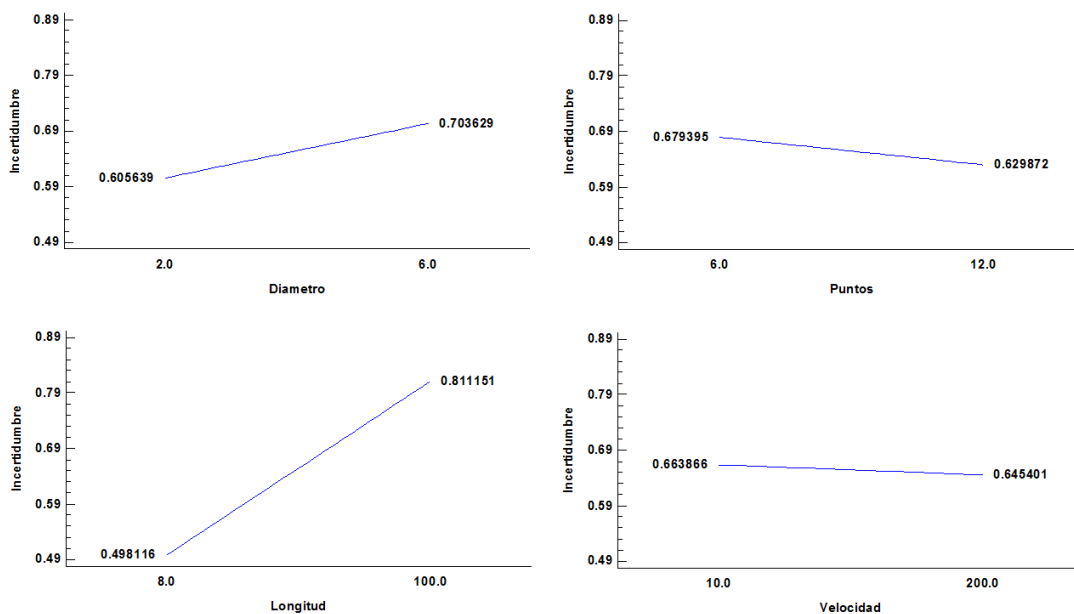


Fig. 6.3 Efectos principales.

En relación a la interacción entre de diámetro y longitud, en esta se observa que la incertidumbre aumenta conforme se incrementa el diámetro de la punta en relación con la longitud de muestreo, además se observa que cuando se trabaja con la longitud mayor el incremento es poco utilizando cualquiera de las puntas de palpado (ver Fig. 6.4).

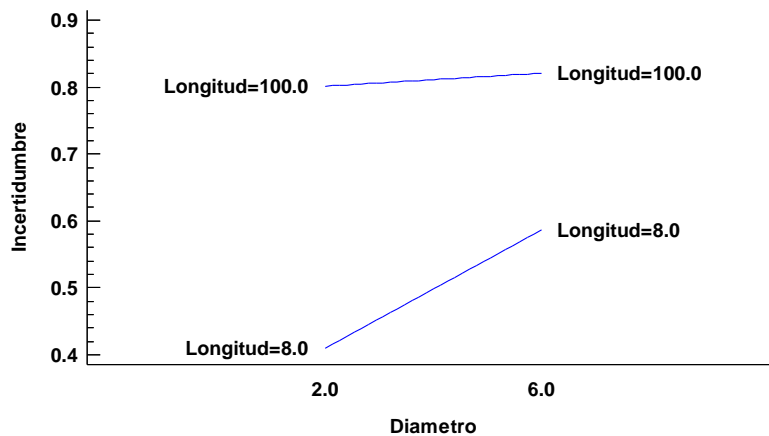


Fig. 6.4 Interacción entre diámetro y longitud.

En la interacción entre diámetro de la punta y velocidad de muestreo, se observa que a mayor velocidad y menor diámetro se consigue reducir la incertidumbre. Llevando a cabo el mismo experimento utilizando la menor punta y manteniendo la velocidad alta se incrementa la incertidumbre, a velocidad baja el aumento en la incertidumbre es menor utilizando cualquier punta (ver Fig 6.5).

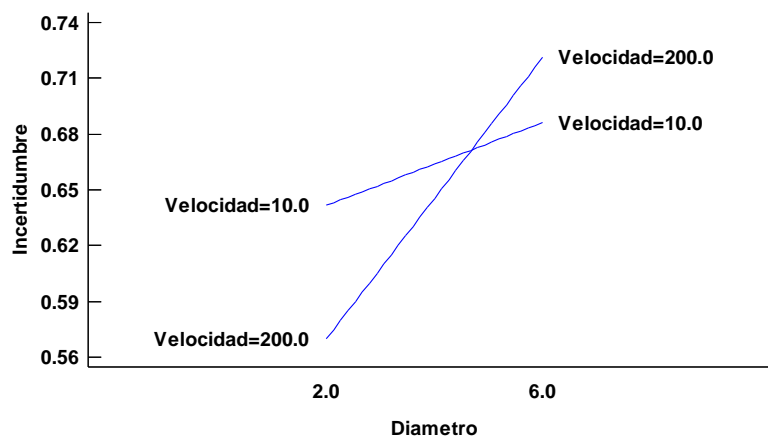


Fig. 6. 5 Interacción entre diámetro y velocidad.

En la Fig. 6.6 se observa que la incertidumbre es menor cuando se trabaja a longitudes pequeñas para los dos niveles de puntos. El caso donde se tiene mejor resultado es utilizando el plano con 12 puntos con longitud del bloque de 8 mm, caso contrario cuando se trabaja con la mayor longitud, no importando la cantidad de puntos la incertidumbre es prácticamente igual.

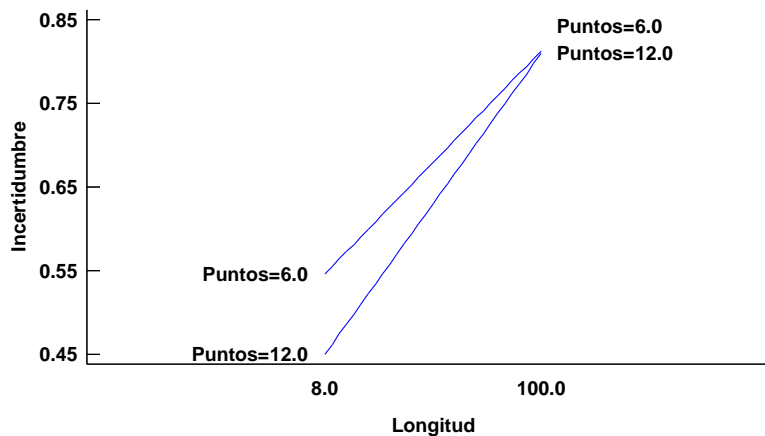


Fig. 6. 6 Interacción entre longitud y puntos

Las interacciones entre AC, BC y CD no son significativas por lo cual no se interpretan.

6.2 Conclusión de primera fase experimental

De acuerdo con el análisis realizado, se concluye que la longitud de medición es el que más contribuye a la incertidumbre. El análisis demostró que longitud de medición se ve afectada por las diferentes contribuciones a la incertidumbre combinada, siendo parte de esto la calibración del equipo, el coeficiente de expansión térmica de los bloques; que es afectado por la longitud de cada uno de los bloques y el cambio en la temperatura, además de la incertidumbre generada por el certificado de calibración.

De acuerdo con las mediciones observadas y de los datos arrojados por Statgraphics, las mejores condiciones para reducir la incertidumbre en la MMC se muestran en la Fig. 6.7.

Optimizar Respuesta

Meta: minimizar Incertidumbre

Valor óptimo = 0.303809

<i>Factor</i>	<i>Bajo</i>	<i>Alto</i>	<i>Óptimo</i>
Diámetro	2.0	6.0	2.0
Longitud	8.0	100.0	8.0
Puntos	6.0	12.0	12.0
Velocidad	10.0	200.0	200.0

Fig. 6.7 Valores óptimos de trabajo para reducir incertidumbre.

En la práctica común no siempre se puede trabajar con estos valores, sobre todo en longitud ya que mucho depende de la forma y características de la pieza que se esté analizando. En relación al diámetro de la punta del palpador, es recomendable trabajar con la punta de palpado de menor diámetro ya que esto reduce errores causados por planicidad o rugosidad, esto en el caso de que la pieza tenga un buen acabado superficial, cuando la pieza tiene un acabado muy burdo, será necesario utilizar el palpador de mayor diámetro. Con respecto a la cantidad de puntos, es recomendable tener un mayor número de puntos para determinar una forma geométrica, el problema en esto es que entre mayor sea el número de puntos se incrementan los tiempos de medición y esto afecta la productividad en la industria. Por esto, sería recomendable que se realice un estudio previo al introducir una pieza nueva para determinar cuáles son las mejores condiciones para garantizar la medición y la incertidumbre de medida.

La velocidad en esta fase no afecta de manera importante por lo cual se recomienda trabajar a máxima velocidad el equipo.

6.3 Resultados de la segunda fase experimental

De acuerdo con los resultados previos, se decide realizar una segunda fase en la cual se considera el diámetro del palpador, la longitud de muestreo y la velocidad, en este caso se decide omitir el factor de la cantidad de puntos con que se genera el plano. Por lo cual se decide generar el plano de medición con 12 puntos, ya que de acuerdo al experimento previo se observó que la velocidad tenía mayor

impactó en el ANOVA en una de las interacciones, que las relacionadas con la cantidad de puntos de muestreo; las cuales presentaban menor relevancia.

El diseño planteado es uno 2^3 que genera un total de 8 combinaciones de experimentación, el orden en que se llevó a cabo la experimentación se detalla en la tabla 5.5 del capítulo anterior, Con esto se planteó realizar 8 réplicas lo cual generara un total de 64 experimentos. Los resultados obtenidos para las mediciones se encuentran en el anexo J, en este anexo también se encuentran los datos obtenidos por las tablas donde se presentan los datos de cada contribución de incertidumbre los experimentos.

A continuación se presenta los resultados para incertidumbre estándar combinada de cada uno de los experimentos (ver Tabla 6.5).

Experimentos									
Tratamiento	No	Rep 1	Rep 2	Rep 3	Rep 4	Rep 5	Rep 6	Rep 7	Rep 8
c	1	0.7268	0.7268	0.7268	0.7276	0.7273	0.7268	0.7272	0.7268
ab	2	1.0456	1.0414	1.0427	1.0413	1.0432	1.0413	1.0426	1.0413
1	3	0.5368	0.5382	0.5368	0.5368	0.5368	0.5368	0.5368	0.5368
abc	4	1.1202	1.1200	1.1200	1.1200	1.1200	1.1200	1.1212	1.1200
a	5	0.9210	0.9210	0.9210	0.9210	0.9212	0.9210	0.9210	0.9210
ac	6	0.9210	0.9210	0.9219	0.9210	0.9210	0.9210	0.9210	0.9210
b	7	0.6986	0.6960	0.6963	0.6971	0.7007	0.6960	0.6960	0.6960
bc	8	0.6960	0.6977	0.6960	0.6960	0.6966	0.6960	0.6960	0.6960

Tabla 6. 5 Incertidumbre estándar combinada para segunda fase experimental.

Con los datos obtenidos para incertidumbre estándar combinada se realizó el análisis de diseño de experimentos 2^3 . Los efectos estimados para cada uno de los experimentos se muestran a continuación en la Tabla 6.6, posteriormente con el uso de Statgraphics se realizó el análisis de varianza, considerando el mejor ANOVA se descartó la interacción triple (ver Tabla 6.7).

Efecto	Estimado
promedio	0.832762
A:Diámetro	0.336844
B:Longitud	0.112462
C:Velocidad	0.0667687
AB	0.0477687
AC	-0.02785
BC	-0.0282937

Tabla 6.6 Valores de efectos para diseño 2^3 .

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Diámetro	1.81542	1	1.81542	1434.51	0.0000
B:Longitud	0.202365	1	0.202365	159.90	0.0000
C:Velocidad	0.0713291	1	0.0713291	56.36	0.0000
AB	0.0365097	1	0.0365097	28.85	0.0000
AC	0.01241	1	0.01241	9.81	0.0027
BC	0.0128086	1	0.0128086	10.12	0.0024
Error total	0.0721355	57	0.00126554		
Total (corr.)	2.22298	63			

Tabla 6.7 ANOVA para diseño 2^3 .

El análisis de varianza muestra que los 6 efectos tienen valor-P menor que 0,05, indicando que son significativamente diferentes de cero con un nivel de confianza del 95 %.

A continuación se calculan los coeficientes de determinación para verificar la variabilidad del experimento.

$$R^2 = \frac{SC_T - SC_E}{SC_T} = \frac{(2.22298 - 0.0721355)}{2.22298} = 0.96775 = 96.775 \%$$

$$R_{aj}^2 = \frac{CM_T - CM_E}{CM_T} = \frac{(2.22298/159 - 0.0721355/149)}{2.22298/159} = 0.964134 = 96.4134\%$$

Los factores estudiados, junto con sus interacciones, son responsables o explican un alto porcentaje de la variación observada en la incertidumbre, el resultado es aceptable ya que el valor observado en ambos casos es de aproximadamente 96 %.

Se presenta un gráfico de probabilidad normal (ver Fig. 6.9) y un gráfico de Pareto (ver Fig. 6.10). En el cual se observa el comportamiento de los efectos considerados.

En análisis realizado mostro nuevamente que los factores que más afectan en el cálculo de la incertidumbre son la longitud y el diámetro, a diferencia de análisis realizado previamente, en este se observa una mayor contribución de la velocidad de muestreo.

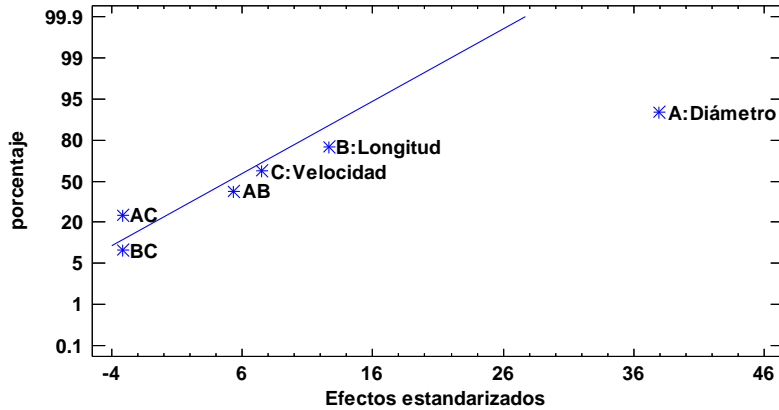


Fig. 6.8 Gráfica de probabilidad normal para incertidumbre

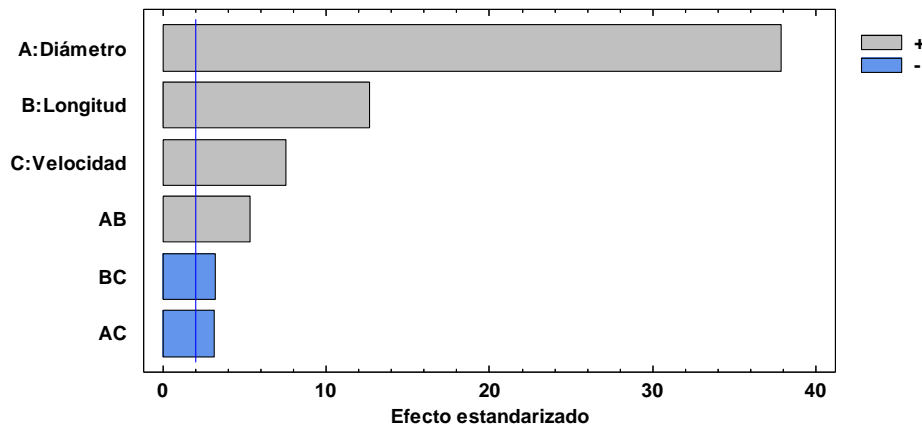


Fig. 6.9 Diagrama de Pareto estandarizado para incertidumbre del diseño 2^3 .

Analizando los datos de la segunda fase se obtuvo un incremento de $0.336839 \mu m$ en la incertidumbre al usar una punta de palpado de mayor diámetro. En cuanto a la diferencia a la longitud se dio un incremento de $0.112463 \mu m$ entre la longitud de 8 y 100 mm, en relación a la velocidad también hubo un incremento de $0.066769 \mu m$. Siendo la media observada para estos experimentos de $0.832762 \mu m$ (ver Fig. 6.10).

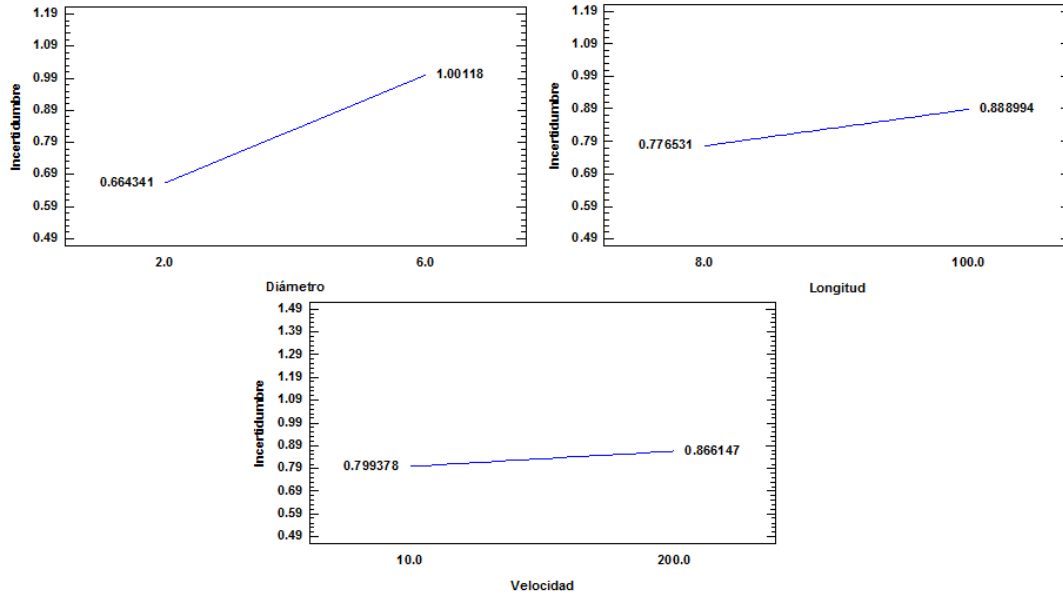


Fig. 6. 10 Estimación de efectos.

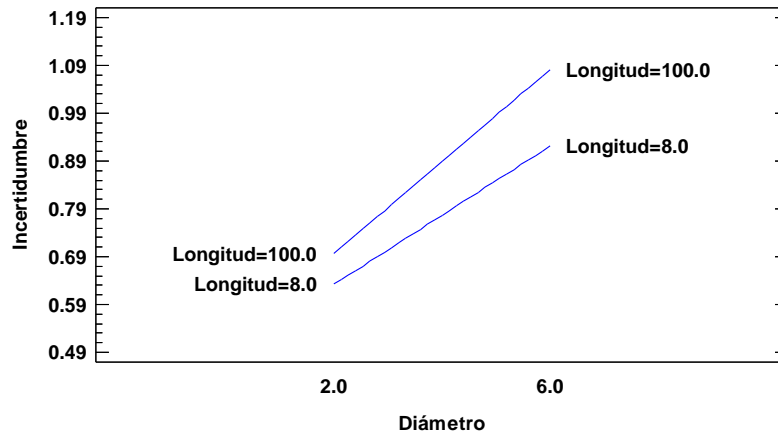


Fig. 6.11 Interacción entre diámetro y longitud

En relación a la interacción entre el diámetro y la longitud se observa como la incertidumbre aumenta conforme se tiene valores altos de longitud y diámetro, este comportamiento es similar al observado en la primera fase, la principal diferencia es que para este caso se observa un mayor incremento de la incertidumbre utilizando la longitud de 100 mm en relación con el diámetro de la punta de palpado (ver Fig. 6.11).

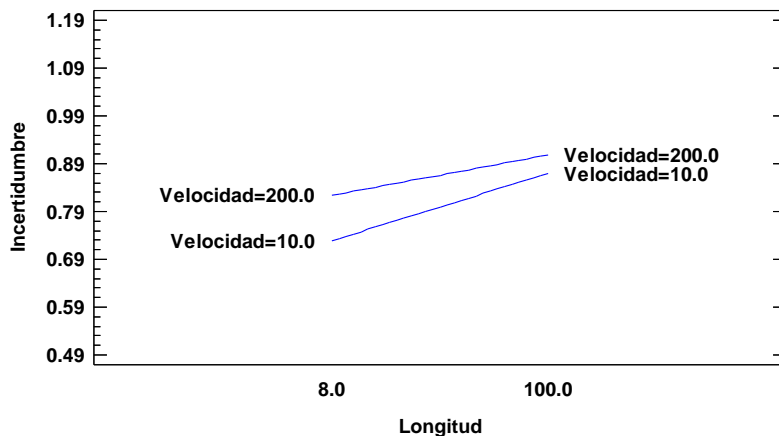


Fig. 6.12 Interacción entre longitud y velocidad.

En la Fig. 6.12 se observa que independientemente de la velocidad, la incertidumbre aumentará al incrementarse la longitud, este comportamiento es lógico debido a que por certificado de calibración los bloques patrón incrementan su incertidumbre en relación con el tamaño del bloque, además la afectación por la incertidumbre generada con coeficiente de expansión térmica es mayor en relación con la longitud.

Para la interacción entre el diámetro y velocidad (ver Fig. 6.13), se observa el mismo patrón que la interacción anterior, entre mayor sea el diámetro la incertidumbre se incrementa independientemente de la velocidad a la que se trabaje.

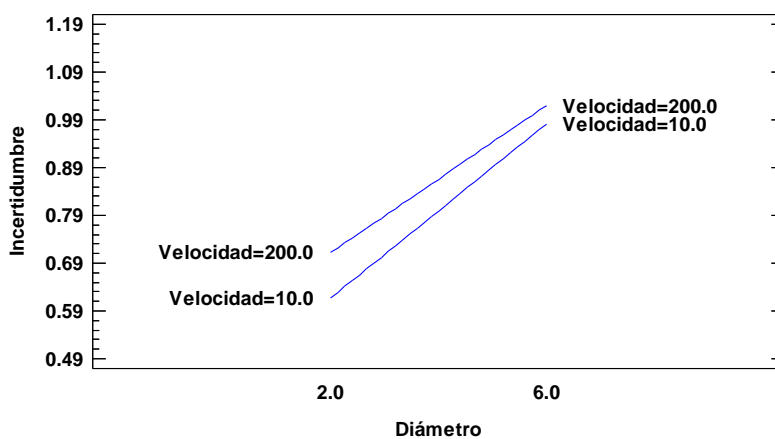


Fig. 6.13 Interacción entre diámetro y velocidad

6.4 Comparación y discusión de resultados

Chang-Xue Jack Feng [10] estudiaron el efecto de cinco parámetros en la incertidumbre, plantearon un diseño factorial fraccionado 2^{5-1} con una serie de seis repeticiones por cada combinación de factores, esto debido a que les era muy difícil mantener la misma incertidumbre una vez que cualquier factor cambiaba.

Los parámetros considerados fueron: la velocidad (%), la relación de palpado entre los diámetros de la punta del palpador y anillo patrón, la posición inicial de la punta del palpador, la longitud de la punta de palpado (mm) y los puntos de medición. Dos anillos patrón se utilizaron en el experimento.

Utilizó el análisis de varianza (ANOVA) para estudiar el efecto de cada factor y las interacciones de los factores.

En los resultados que obtuvieron en los gráficos del diseño factorial fraccionado, observaron que ninguno de los factores son estadísticamente significativas con respecto a la ubicación de un agujero. No hubo factores significativos encontrados en el experimento de detección al observar el diámetro. Sin embargo, el experimento demuestra que la interacción entre velocidad y relación de palpado es estadísticamente significativa. La gráfica de interacción resultante muestra que la incertidumbre se redujo a una velocidad más lenta cuando se utiliza una relación de palpado alta y baja, mientras que una mayor velocidad de medición proporciona una menor incertidumbre en relación con una mayor relación de palpado.

De manera general para las dos fases de experimentación se observó que la longitud de medición y el diámetro del palpador contribuyen en gran medida en el cálculo de la incertidumbre, al analizar los datos se observó que en la primera fase experimental la longitud fue la causante de la mayor variación, en cambio para la segunda fase el efecto que más contribuyó fue el diámetro, analizando los datos obtenidos en la incertidumbre de la segunda fase, en la incertidumbre causada por la calibración de la esfera se obtuvieron valores de desviación altos, por lo cual se le atribuye gran parte del resultado en el diámetro.

Para las dos fases, se observaron cambios muy pequeños al manejar distintas velocidades, esto debido a que la punta de palpado al entrar al cubo de seguridad automáticamente gobierna su velocidad.

CONCLUSIONES

Aunque la operación de la CMM diera la impresión de ser muy sencilla dado que dispone de una serie de sistemas automatizados, lo cierto es que la experiencia sigue jugando un papel fundamental. Aspectos tan rutinarios (que llamaremos factores) como la cantidad de puntos de palpado, la velocidad, el palpador y las longitudes de muestreo, etc., se transforman en condicionantes del proceso de medición, y en consecuencia se les puede asociar con cierta variabilidad en la determinación de las magnitudes que puede estar estrechamente ligada con la estimación de su incertidumbre, que es definida como: “el grado de dispersión de los valores atribuido a un mensurando”. Mientras que a criterio de un operador, alguno de los factores mencionados se tienen que tomar en cuenta, le resta objetividad el hecho de no disponer de herramientas estadísticas para comprobarlos. Por ello en las acepciones más sencillas, la contribución de cada factor resulta evidente en ciertas circunstancias, como por ejemplo; a mayor longitud mayor incertidumbre, o con diferente tipo diámetro de palpador diferente incertidumbre, sin embargo la combinación de ellos y dado que la estimación de la incertidumbre es producto de diferentes contribuciones, su resultado podría verse afectado en la composición de dos factores o más, en donde inclusive se pueda demostrar que el aumento o su disminución estadísticamente hablando no resulten significativos.

Para llevar a cabo lo descrito con anterioridad se elaboró una metodología de prueba considerando el uso de los diseños de experimentos, definiendo la cantidad de experimentos, análisis de varianza e inclusive los instructivos de operación de los equipos.

Se cuantificó el efecto de los factores que intervienen para la determinación de la incertidumbre en las máquinas de medición por coordenadas.

En una primera fase se realizó un diseño de experimentos 2^4 considerando los factores; longitud de medición, diámetro de palpador, velocidad de operación, y puntos de palpado, de los cual se desprenden los siguientes resultados.

A mayor longitud de medición es mayor la incertidumbre estándar combinada, independientemente de los demás factores (cantidad de puntos y velocidad de palpado), o en combinación con ellos. Lo mismo sucede en el caso del diámetro de la punta, al incrementarse de manera proporcional aumenta la incertidumbre.

La velocidad de operación del palpador es otro factor que en combinación con los demás no afecta su desempeño, muy probablemente por el impacto generado por el cubo de seguridad, ya que una vez entrando en el cubo de seguridad sufre una disminución de su velocidad, por cuestiones de seguridad (colisiones).

Con la segunda fase de experimentación, se sabe que los datos obtenidos resultan similares al eliminar el factor de los puntos de palpado, prevaleciendo que a mayor longitud o diámetro se incrementa la incertidumbre, independientemente de sus interacciones. Por ello se concluye que:

- a) El diámetro de la punta y la longitud de muestreo son significativamente importantes para la estimación de la incertidumbre.
- b) La cantidad de puntos por muestreo y la velocidad no son significativamente diferentes en la estimación de la incertidumbre. La velocidad está siendo influida por el cubo de seguridad.

Por lo tanto, las mejores condiciones de muestreo son:

- a) Trabajar con longitudes pequeñas (menos de 10 mm).
- b) Utilizar en la medida de lo posible diámetros pequeños en la punta del palpador (aproximadamente 2 mm).
- c) Operar con la mayor velocidad (aproximadamente 200 mm/s) .

- d) Utilizar un número razonable de puntos de muestreo para realizar las mediciones (aproximadamente 12 puntos).

Contribuciones

Derivado del presente trabajo las contribuciones más importantes son:

- 1) Identificación de los factores que en la operación de la MMC afectan la estimación de la incertidumbre.
- 2) Desarrollo de la metodología experimental para la cuantificación de los indicadores más importantes del diseño de experimentos, en la cual se evalúan los efectos de cada uno de los factores.
- 3) Se documenta la aplicación del diseño factorial para la valoración del desempeño de la MMC de manera independiente y en relación con cada factor, lo cual es importante en la medición de piezas.
- 4) Se analizaron de forma sistemática los experimentos mediante el uso de software especializado, para la interpretación de los resultados.
- 5) Garantizar la trazabilidad del equipo mediante el uso sistemático.

Como aportaciones adicionales:

- a) Elaboración de procedimientos de operación e instructivos de trabajo.
- b) Como parte de la vinculación con la industria dentro del programa de posgrado de Ingeniería Mecánica, se generó en el Laboratorio de Metrología de la UASLP el informe de medición (LM-01-2012) para la empresa Remy con el propósito de asociar el desbalanceo en el diseño de sus rotores (ver ANEXO H).
- c) Diseño de los planes de medición, alineación y generación de los modelos CAD, para la realización de los experimentos.

Trabajos posteriores

Las siguientes líneas de trabajo, son propuestas producto del desarrollo en el presente trabajo de tesis:

- a) Evaluación de la incertidumbre en la MMC, en todo su campo de medida (volumen de trabajo), así como de rendimiento volumétrico variando las condiciones ambientales.
- b) Diseño y construcción de un patrón para evaluar la mayor cantidad de parámetros disponibles por el equipo.
- c) Para el caso de piezas que se fabrican en la industria es necesario garantizar su trazabilidad porque de ello depende su confianza, y en consecuencia requerirán estudios diseñados con ese propósito.
- d) A lo largo del trabajo se detectó que una posibilidad es estudiar la relación de la incertidumbre de medición y la rugosidad de las piezas a medir, combinando factores que pueden resultar de influencia en el proceso (como puede ser el diámetro del palpador).

BIBLIOGRAFÍA

[1] Zeleny V. J. y González G. C. Metrología Dimensional, Ed. McGraw Hill, Segunda Edición, México, 1999. ISBN 970-10-2387-0.

[2] Joint Committee Guides in Metrology (JCGM) 200:2008. Vocabulario Internaciones de Metrología – Conceptos fundamentales y generales, y términos asociados (VIM). 1ª edición en Español, 2008.

[3] Fenton, N.E. y Pfleeger, S.L., Software metrics. A rigorous and practical approach, PWS Pub., 1997.

[4] Luis Fernández Sanz, Teoría de la medición <<http://www.sc.ehu.es/jiwdocoj/remis/docs/teoriamedicion.html>>. [consulta: 2 de febrero de 2012].

[5] Lotze W. Precision length measurement by computer-aided coordinate measurement. J. Phys. E: Sci. Instrum. 19 (1986). Printed in Great Britain Technical University Dresden, Mommsenstrasse 13, 8027 Dresden, GDR.

[6] Centro Nacional de Metrología, Resumen histórico <<http://www.cenam.mx/ammc/historia.aspx>>. [consulta: 31 de marzo de 2011].

[7] Martines Bueno Marco Aurélio, Revista Técnica Científica Mundo Mitutoyo, No. 150, Iztapalapa, D.F. México, septiembre 2004.

[8] Piratelli-Filho A, Di Giacomo B, CMM uncertainty analysis with factorial desing, Precision Engineering 27 (2003) 283-288.

[9] Barini E. M, Tosello G, De Chiffre L, Uncertainty analysis of point-by-point sampling complex surfaces using touch probe CMMs, DOE for complex surfaces verification with CMM, Precision Engineering 34 (2010) 16–21

[10] Chang-Xue J. F, Desing and analysis of experiments in CMM measurement uncertainty study, Precision Engineering 31 (2007) 94-101.

[11] Aquino S. J B, Hocken R J, Miller J A, Caskey G W, Ramu P, Approach for uncertainty analysis and error evaluation of four-axis co-ordinate measuring

machines, *Int J Adv Manuf Technol* (2009) 41:1130–1139, DOI 10.1007/s00170-008-1552-z.

[12] Asociación Española de Normalización y Certificación. Especificación geométrica de productos (GPS). Ensayos de aceptación y verificación periódica de máquinas de medición por coordenadas (MMC). Parte 1: Vocabulario. UNE-EN ISO 10360-1, Madrid, Diciembre 2001.

[13] The American Society of Mechanical Engineers. *Methods for Performance Evaluation of Coordinate Measuring Machines*, ASME B89.4.1, 1997.

[14] www.interempresas.net, Las arquitecturas posibles de las máquinas de medición por coordenadas <<http://www.interempresas.net/Medicion/Articulos/10325-Las-arquitecturas-posibles-de-las-maquinas-de-medicion-por-coordenadas.html>>. [consulta: 2 de febrero de 2012].

[15] Renishaw, Guía de usuario H-1000-5021-06-B, Sistemas de sonda de activación por contacto, Emitido 02-2003.

[16] Asociación Española de Normalización y Certificación. Especificación geométrica de productos (GPS). Temperatura normalizada de referencia para la especificación geométrica y verificación de productos. Norma UNE-EN ISO 1 (ISO 1:2002). Madrid, Abril 2003.

[17] Zeleny R. El proceso de medición con MMC. *Revista Mitutoyo Mexicana*. Instituto de metrología de Mitutoyo. Naucalpan, Edo. de México, 2005.

[18] Joint Committee Guides in Metrology (JCGM) 100:2008. Evaluación de datos de medición - Guía para la expresión de la incertidumbre de medida. 1ª edición en Español, 2008.


[19] González G. C. y Zeleny V. J. *Metrología*, Ed. McGraw Hill, respecto a la Primera Edición, México, 1995. ISBN 970-10-0370-5.

[20] Moroto, Alicia; Boqué, Ricard; Riu, Jordi. "Incertidumbre y Precisión". Instituto de Estudios Avanzados, Universitat Rovira, España. p. 1

- [21] W. Schmid y R. Lazos. Guía para estimar la incertidumbre de la medición. Rev 1, CENAM , Febrero 2004.
- [22] Link, Walter. “Expresión de la Incertidumbre de Medición.” En: Responsabilidad de la obra completa. “Metrología Mecánica”. Enero 2000. p. 10.
- [23] Wirandi J., Lauber A. Uncertainty and traceable calibration – how modern measurement concepts improve product quality in process industry. Measurement 39 (2006) 612-620.
- [24] Asociación Europea de Institutos Nacionales de Metrología, Metrología Abreviada, Traducción de “Metrology – in short[®]” 3ª edición, Julio 2008, 2º edición en español.
- [25] J. Carro de Vicente-Portela. Trazabilidad. Sección de Publicaciones de la ETSII-UPM, I.S.B.N.:84-7484-140-2. 152 páginas.
- [26] Norma Mexicana, Instrumentos de medición – Bloques patrón longitudinales, NMX-CH-86-1994-SCFI, 1994.
- [27] International Standard, Geometrical Product Specifications (GPS) – Length standards – Gauge blocks, ISO 3650, 1998.
- [28] Vilar J. M. Modelos Estadísticos Aplicados, Publicación de la UDC, Monografía 101, segunda edición, España, Junio 2006, ISBN 84-9749-196-3.
- [29] Montgomery D. C. Diseño y Análisis de Experimentos, Grupo editorial Iberoamérica, México, 1991, ISBN 968-7270-60-8.
- [30] Gutiérrez P. H y De la Vara S. R. Análisis y Diseño de Experimentos, McGraw Hill, México, 2004, ISBN 970-10-4017-1.
- [31] Montgomery D. C, Peck E. A. y Vining G. G, Introducción al Análisis de Regresión Lineal, CECSA, primera edición, México, 2002, ISBN 970-24-0327-8.
- [32] Renishaw, Artículo técnico: En primera línea: guía para la selección del palpador de una MMC, 2009.

- [33] Hamburg-Piekar D S, Calibração de Peças Padrão em Máquinas de Medir por Coordenadas, Universidad Federal de Santa Catarina, 2006.
- [34] Weckenmann A. Research project “European Training for Coordinate Metrology”. Chair Quality Management and Manufacturing Metrology, University Erlangen-Nuremberg.
- [35] Hocken R.J, Raja J, Uppliappan B, Sampling Issues in Coordinate Metrology. Manufacturing Review 6(4), pp.282-294, 1993.
- [36] Weckenmann A, Weber H, Eitzert, H, Garmer M. Functionality-oriented Evaluation and Sampling Strategy in Coordinate Metrology. Precision Engineering 17, Nr. 4, pp. 244-252, 1995.
- [37] Asociación Española de Normalización y Certificación. Especificación geométrica de productos (GPS). Ensayos de aceptación y verificación periódica de máquinas de medición por coordenadas (MMC). Parte 2: MMC utilizadas para la medición de tamaño. UNE-EN ISO 10360-1, Madrid, Octubre 2002.
- [38] Asociación Española de Normalización y Certificación. Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayos y calibración. Norma ISO/IEC 17025 (ISO/EC 17025:2005). Madrid, Junio 2005.

ANEXO A

 <p>FACULTAD DE INGENIERÍA UASLP</p>	<h3>INSTRUCCIONES DE OPERACIÓN</h3>
EQUIPO: <u>MÁQUINA DE MEDICIÓN POR COORDENADAS</u>	CLAVE : <u>LM-MC-01</u>

ANEXO A: Procedimiento de encendido de la MMC

Es recomendable seguir el orden propuesto a continuación, en caso de no hacerlo, el software constantemente marcará problemas en su ejecución:

1. Asegurarse de que todos los interruptores (*ver Fig. A.1*) estén encendidos.
 - Energía eléctrica del cuarto.
 - Aire acondicionado.
 - Compresor.
 - Interruptor principal.
 - Interruptores de la máquina de coordenadas.



Fig. A. 1 Interruptores.

2. Mover la palanca del aire comprimido a la posición de “abierto” (asegurarse que la presión se encuentre a 0,6 MPa (*ver Fig. A.2*))



Fig. A. 2 Sistema de aire seco.

3. Encender aire acondicionado (Preferentemente a una temperatura de 20° C) (*ver Fig. A.3*).

ANEXO A


 <p>FACULTAD DE INGENIERÍA UASLP</p>	<h3>INSTRUCCIONES DE OPERACIÓN</h3>
EQUIPO: <u>MÁQUINA DE MEDICIÓN POR COORDENADAS</u>	CLAVE : <u>LM-MC-01</u>



Fig. A. 3 Control aire acondicionado.

4. Mover la palanca de encendido principal de la Máquina de Coordenadas (ver Fig. A.4) a la posición de “ON” (Mover en sentido horario).



Fig. A. 4 Palanca de encendido principal.



5. Oprimir el botón de encendido del mando de control (Parte lateral izquierda) (ver Fig. A.5).



Fig. A. 5 Consola de mando

6. Encender la computadora.
7. Iniciar el software “Calypso”.
8. Introducir Usuario y Contraseña.

ANEXO A


 FACULTAD DE INGENIERÍA	 UASLP	INSTRUCCIONES DE OPERACIÓN
EQUIPO: <u>MÁQUINA DE MEDICIÓN POR COORDENADAS</u>		CLAVE : <u>LM-MC-01</u>

9. Cuando el software lo pida, oprimir el botón “Drives On” del mando de control (botón verde), “Aceptar” en el software.
10. “Aceptar” la posición “Home” del software ($x=30$, $y=-30$, $z=-30$) Este comando colocará el palpador en la posición inicial del equipo.

PROCEDIMIENTO DE APAGADO DE LA MMC

1. Guardar plan realizado.
2. Cerrar programa “Calypso”, el programa pedirá terminar la ejecución del mismo.
3. Oprimir el botón del mando de control a la posición “off”.
4. Mover la palanca de encendido de la máquina a “off”.
5. Cerrar válvula de aire seco.
6. Apagar aire acondicionado.
7. Poner todos los interruptores a su posición “off”.

ANEXO B

 <p>FACULTAD DE INGENIERÍA</p> <p>UASLP</p>	<h3>INSTRUCCIONES DE OPERACIÓN</h3>
EQUIPO: <u>MÁQUINA DE MEDICIÓN POR COORDENADAS</u>	CLAVE : <u>LM-MC-01</u>

ANEXO B: Procedimiento para iniciar un nuevo plan en la MMC

Para crear un nuevo plan de medición:

1. Dentro de la pestaña “File”, selecciona el menú “New”.
2. A continuación pedirá un nombre para el nuevo Plan de Medición. (De preferencia el nombre de la pieza a medir).
3. En este momento aparecerá una “Lista de Prerrequisitos” la cual deberá tener todos los iconos en color (ver Fig.B.1):
 - Verde: El plan de medición correrá sin problemas. (Todos los requisitos fueron completados).
 - Amarillo: Se podrá correr el plan de medición, pero algunas características no estarán disponibles.
 - Rojo: No se podrá correr el plan de medición ya que la lista de prerrequisitos se encuentra incompleta.

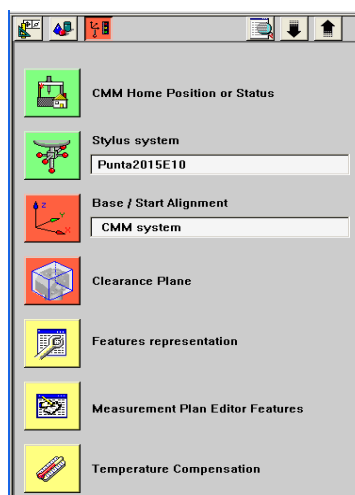



Fig. B. 1 Requisitos para el plan de medición.

ANEXO B

 <p>FACULTAD DE INGENIERÍA</p>	<h3>INSTRUCCIONES DE OPERACIÓN</h3>
EQUIPO: MÁQUINA DE MEDICIÓN POR COORDENADAS	CLAVE : LM-MC-01

4. El primer icono de la Lista de Prerrequisitos “CMM Home” indica si el palpador se encuentra en la posición correcta de inicio “Home” (ver Fig.B.2).



Fig. B. 2 Posición inicial de la máquina “Home”.

5. El segundo icono de la lista es el de “Stylus System” el cual da información acerca del palpador y la punta que se está utilizando (ver Fig.B.3).

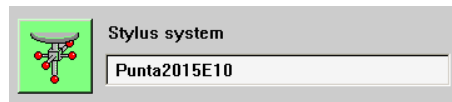
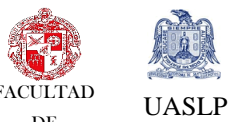


Fig. B. 3 Configuración de la punta y el palpador.

Stylus system	Mode	Parameter
Punta2015E10	Six Points	Standard
Stylus Name / No.	Geometry	Sphere Coverage
Punta2015E10	1 Sphere	180.0000
Qualify Stylus Change stylus pos. Ref. sphere position		
Stylus Name	Date	Reference sphere
Punta2015E10	6/7/12	Sphere 1
R: 0.9974		Temp. 20.0000
S: 0.0006		SNo 3489
X: -0.0254		Date 7.6.2012
Y: -0.0234		R: 12.4980
Z: -6.1994	Type: TP20	S: 0.0024
		X: 195.1105
		Y: -227.2827
		Z: -219.9548
		Tilt: 135.0000
		Rotate: 45.0000
OK Reset		

Fig. B. 4 Selección de la punta y el palpador.

ANEXO B

 <p>FACULTAD DE INGENIERÍA</p> <p>UASLP</p>	<h3>INSTRUCCIONES DE OPERACIÓN</h3>
EQUIPO: <u>MÁQUINA DE MEDICIÓN POR COORDENADAS</u>	CLAVE : <u>LM-MC-01</u>

6. En el siguiente icono “Base/Start Alignment” se alinea con respecto a la máquina de medición por coordenadas. Existen varias formas de alineación; a continuación se explica el método estándar de alineación (ver *fig.B.5 y B.6*):

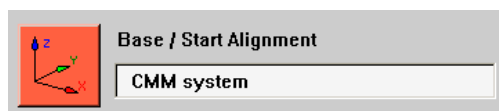


Fig. B. 5 Alineación.

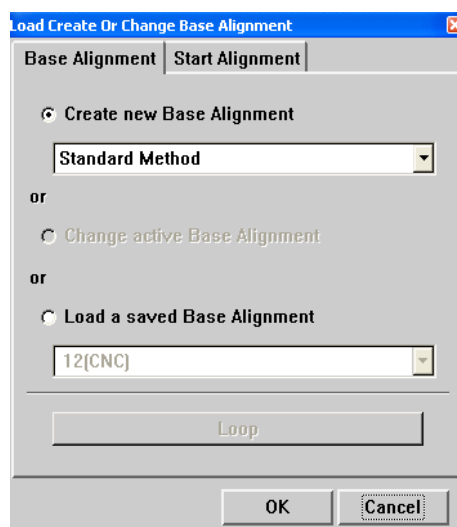



Fig. B. 6 Crear nueva base de alineación

- a) En la primera opción “SpatialRotation” limita el plano de rotación en el eje deseado. En el sistema de alineación estándar por lo regular se escoge un plano (DatumA). Al seleccionar un plano como restricción de espacio rotacional, la pieza queda alineada en el eje escogido previamente.

ANEXO B

 <p>FACULTAD DE INGENIERÍA</p> <p>UASLP</p>	<h3>INSTRUCCIONES DE OPERACIÓN</h3>
EQUIPO: MÁQUINA DE MEDICIÓN POR COORDENADAS	CLAVE : LM-MC-01

- b) En la siguiente opción “PlanarRotation” se restringe el movimiento rotacional del plano, el cual ya está definido en el paso anterior. En el sistema de alineación estándar, se elige un plano (DatumB), condicionando el movimiento a una sola dimensión.
- c) La siguiente restricción es en el origen de X y será un plano (DatumC) según el sistema de alineación estándar, este plano restringirá el movimiento de una dimensión que se haya establecido en el paso anterior (ver Fig.B.7).

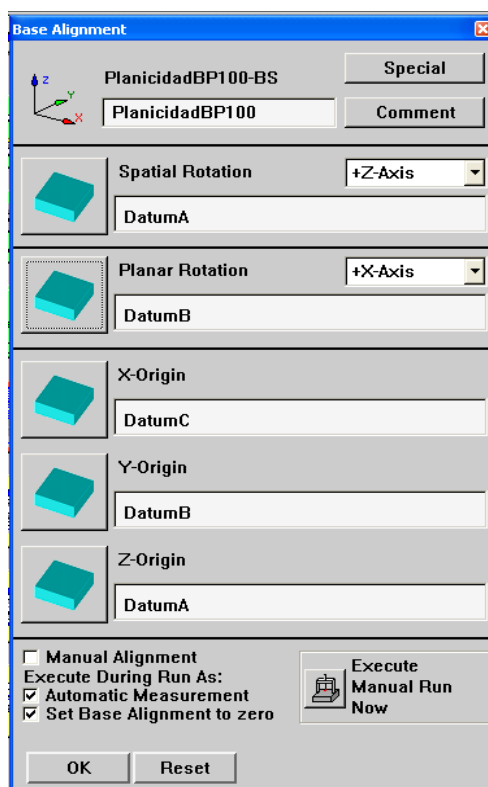



Fig. B. 7 Configuración de la alineación.

ANEXO B

 <p>FACULTAD DE INGENIERÍA</p> <p>UASLP</p>	<h3>INSTRUCCIONES DE OPERACIÓN</h3>
EQUIPO: MÁQUINA DE MEDICIÓN POR COORDENADAS	CLAVE : LM-MC-01

7. El siguiente icono “ClearancePlane” permite establecer un cubo de seguridad, el cual protegerá al palpador de posibles colisiones con la pieza que se va a medir (ver Fig.B.8).



Fig. B. 8 Cubo de seguridad.

- a) Para poder establecer el cubo de seguridad hacen falta dos aristas opuestas en la pieza (ver Fig. B.9):

Se desplaza el palpador hasta la posición de la arista superior y con el mando de control se presiona 3 veces el botón de la palanca derecha para indicar a la máquina donde se encuentra ésta.

A continuación se repite lo mismo con la arista inferior

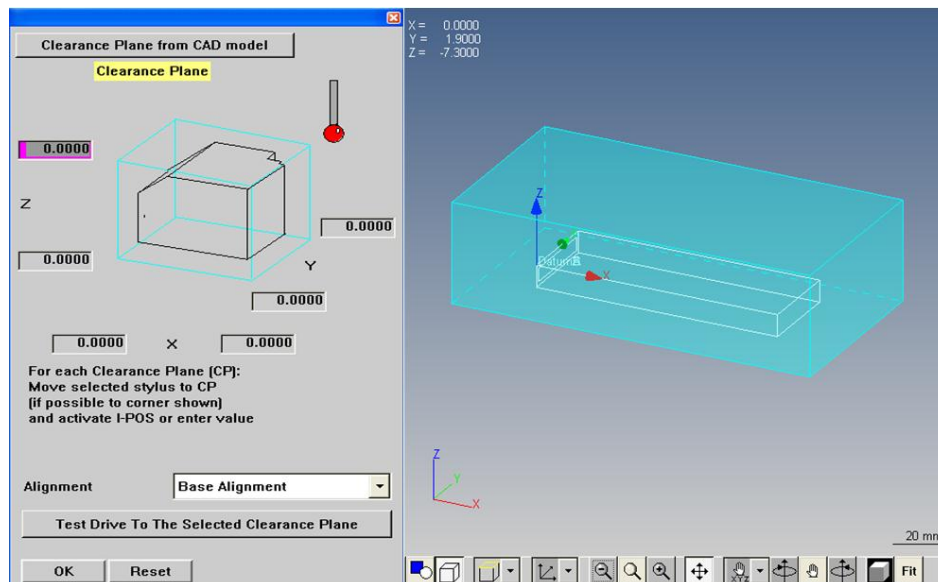
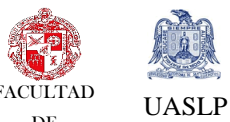


Fig. B. 9 Determinación del cubo de seguridad

ANEXO B

 <p>FACULTAD DE INGENIERÍA</p> <p>UASLP</p>	<h3>INSTRUCCIONES DE OPERACIÓN</h3>
EQUIPO: <u>MÁQUINA DE MEDICIÓN POR COORDENADAS</u>	CLAVE : <u>LM-MC-01</u>

PROCEDIMIENTO PARA CARGAR UNA BASE DE ALINEACIÓN EXISTENTE Y TRASLADAR A UN NUEVO ORIGEN

8. En la ventana “Load Create Or Change Base Alignment” seleccionar la opción “Change Active Base Alignment”, para cambiar la Base de Alineación actual.
9. En la ventana “Base Alignment” seleccionar la opción “Execute Manual Run Now”, para indicar la nueva base de Alineación (ver Fig. B.10).

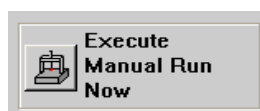


Fig. B. 10 Cargar base de alineación existente

10. A continuación se debe indicar manualmente la misma cantidad de puntos en el plano de referencia A para la nueva base de alineación (ver Fig. B.11).

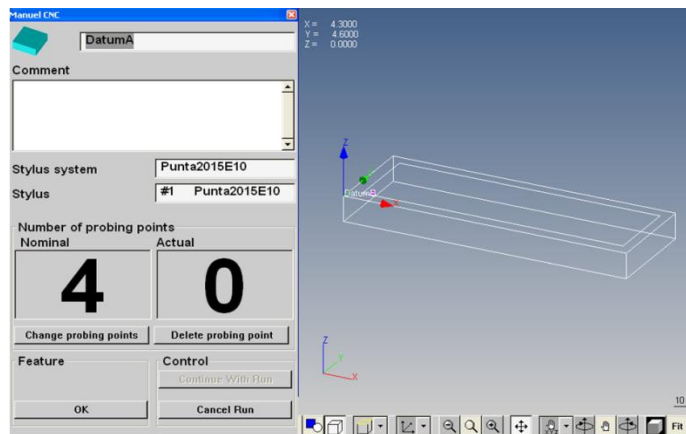
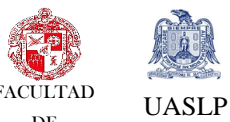


Fig. B. 11 Puntos a tomar para el plano de referencia A.

ANEXO B

 <p>FACULTAD DE INGENIERÍA</p> <p>UASLP</p>	<h3>INSTRUCCIONES DE OPERACIÓN</h3>
EQUIPO: MÁQUINA DE MEDICIÓN POR COORDENADAS	CLAVE : LM-MC-01

11. Se repite el paso anterior, pero esta vez para indicar manualmente la misma cantidad de puntos en el plano de referencia B (ver Fig. B.12).

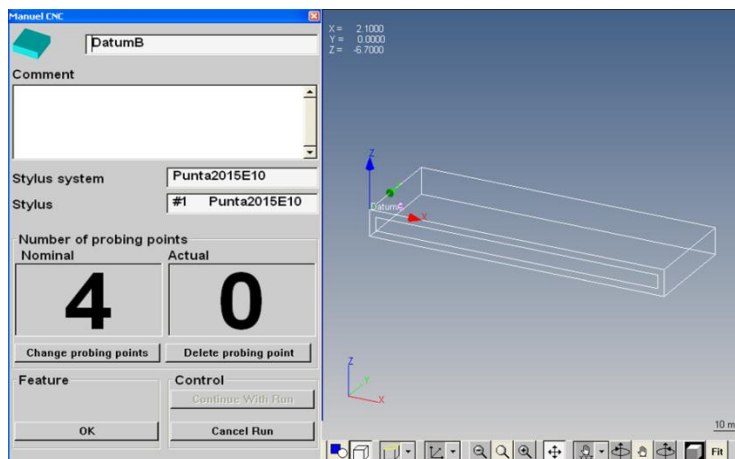


Fig. B. 12 Puntos a tomar para el plano de referencia B.

12. Se repite el paso anterior para el plano de referencia C (ver Fig. B.13).

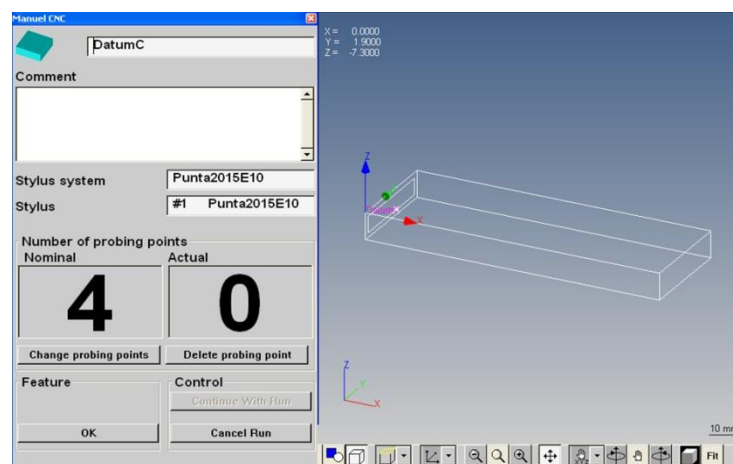



Fig. B. 13 Puntos a tomar para el plano de referencia C.

13. Cuando se tiene alineada la pieza y con el cubo de seguridad en su lugar, se puede empezar a indicarle a la máquina lo que debe medir. Por ejemplo,

ANEXO B

 <p>FACULTAD DE INGENIERÍA</p> <p>UASLP</p>	<h3>INSTRUCCIONES DE OPERACIÓN</h3>
EQUIPO: MÁQUINA DE MEDICIÓN POR COORDENADAS	CLAVE : LM-MC-01

sí se necesita medir el diámetro de un agujero en una pieza, es necesario indicarle a la máquina donde se encuentra éste, seleccionando del menú de herramientas la opción “Features” y a continuación un círculo (ver Fig.B.14).

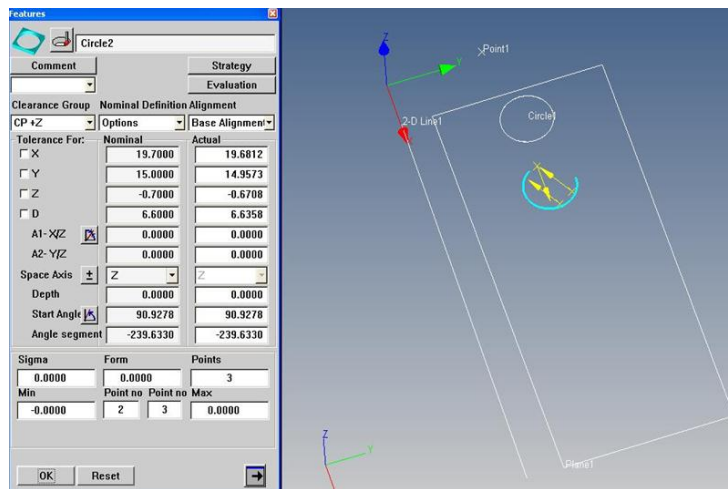


Fig. B. 14 Medición de un diámetro.

Ya establecida la posición del círculo se procede a seleccionar la medición que se requiere, en este caso el diámetro de un círculo (ver Fig B.15).

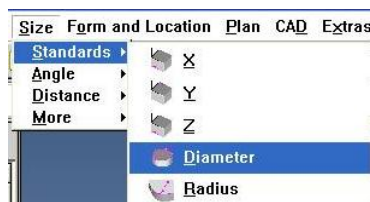



Fig. B. 15 Selección de comando de medición de un diámetro.

ANEXO B

 <p>FACULTAD DE INGENIERÍA</p> <p>UASLP</p>	<h3>INSTRUCCIONES DE OPERACIÓN</h3>
EQUIPO: <u>MÁQUINA DE MEDICIÓN POR COORDENADAS</u>	CLAVE : <u>LM-MC-01</u>

Cuando seleccionamos medir el diámetro de un círculo, la máquina nos pedirá indicarle cual círculo medirá (ver Fig.B.16).

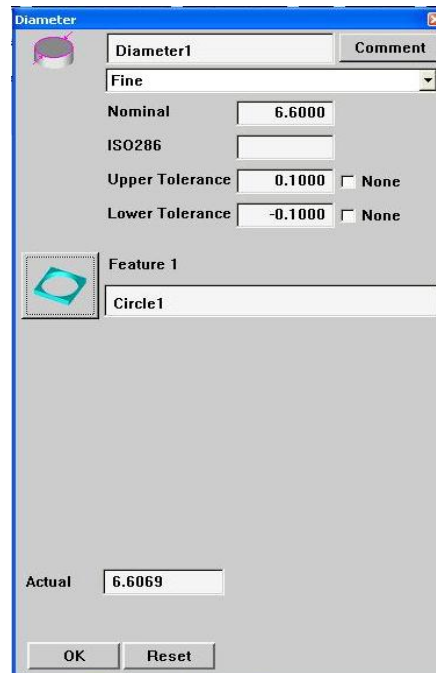



Fig. B. 16 Configuración de la medición.

ANEXO C

 <p>FACULTAD DE INGENIERÍA</p> <p>UASLP</p>	<h3>INSTRUCCIONES DE OPERACIÓN</h3>
EQUIPO: <u>MÁQUINA DE MEDICIÓN POR COORDENADAS</u>	CLAVE : <u>LM-MC-01</u>

ANEXO C: Procedimiento de calibración de la MMC

Ya que se tiene inicializado el equipo y el software, se puede llevar a cabo una calibración si se requiere, utilizando una esfera patrón. Los pasos se describen a continuación.

1. Colocar esfera patrón en la parte central de la mesa, fijarla con un tornillo en el inserto roscado con el que cuenta la mesa (esta se coloca siguiendo recomendación del fabricante).
2. Seguir procedimiento de inicializar un nuevo plan hasta el paso 5 del Anexo B.
3. Abrir icono “StylusSystem” el cual da información acerca del palpador y la punta que se está utilizando (*ver Fig. C. 1*).

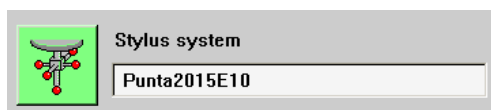


Fig. C. 1 Configuración de la punta y el palpador.

4. En la pestaña “StylusSystem” seleccionar punta o puntas de palpado a utilizar.
5. Seleccionar el palpador maestro “MasterProbe” (*ver Fig. C.2*).

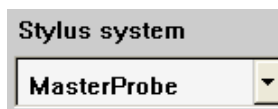



Fig. C. 2 Selección de punta de palpado “MasterProbe”.

6. En la pestaña “SphereCoverage” seleccionar el ángulo en el que se va a desplazar la punta de palpado (*ver Fig. C.3*).

ANEXO C

 <p>FACULTAD DE INGENIERÍA</p>	<p style="text-align: center;">INSTRUCCIONES DE OPERACIÓN</p>
EQUIPO: <u>MÁQUINA DE MEDICIÓN POR COORDENADAS</u>	CLAVE : <u>LM-MC-01</u>




Fig. C. 3 Selección del ángulo de desplazamiento de la punta de palpado.

7. Seleccionar “Ref. sphereposition” (ver Fig. C.4).



Fig. C. 4 Selección de la posición de la esfera patrón.

8. Seleccionar la orientación de la esfera de referencia, que es el patrón esférico (ver Fig. C.5).

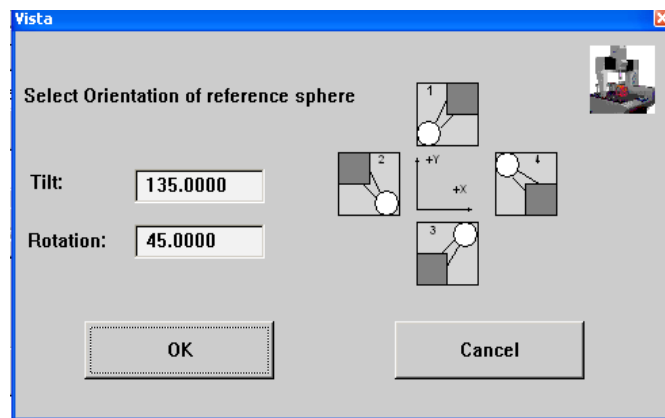



Fig. C. 5 Selección de la orientación del patrón esférico.

9. Dar click en “ok”.

NOTA: En esta opción se pueden elegir 4 posiciones de referencia para la punta de palpado, esta posición dependerá del acomodo inicial de la esfera de calibración con referencia a la mesa. Las cuales se especifican a continuación:

ANEXO C

 <p>FACULTAD DE INGENIERÍA</p> <p>UASLP</p>	<h3>INSTRUCCIONES DE OPERACIÓN</h3>
EQUIPO: MÁQUINA DE MEDICIÓN POR COORDENADAS	CLAVE : LM-MC-01

Orientación de Referencia	Inclinación	Rotación
1	135.0000	45.0000
2	135.0000	135.0000
3	135.0000	225.0000
4	135.0000	315.0000

Tabla C. 1 Orientación de la esfera de referencia.

10. “Probe in direction of the stylus shaft” para palpar en dirección del eje de la punta (ver Fig. C.6).

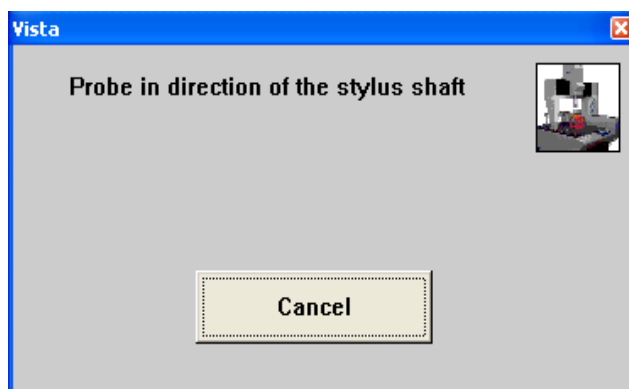



Fig. C. 6 Palpar en dirección del eje de la punta.

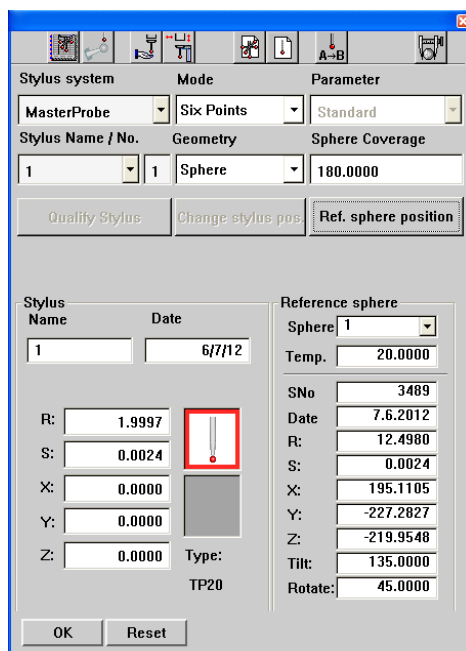
11. Palpar un punto en el centro de la esfera de calibración para posicionar el centro de la misma.

12. La máquina de forma automática buscará el centro de la esfera con referencia al punto que se palpó al inicio, tomando varios puntos para realizar la calibración.

13. Oprimir “ok” en la ventana que aparece (ver Fig. C.7).

ANEXO C

 <p>FACULTAD DE INGENIERÍA</p>	<h3>INSTRUCCIONES DE OPERACIÓN</h3>
EQUIPO: MÁQUINA DE MEDICIÓN POR COORDENADAS	CLAVE : LM-MC-01



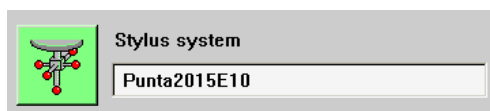
Stylus system	Mode	Parameter
MasterProbe	Six Points	Standard
Stylus Name / No.	Geometry	Sphere Coverage
1	1 Sphere	180.0000

Stylus Name	Date
1	6/7/12

Reference sphere
Sphere 1
Temp. 20.0000
SNo 3489
Date 7.6.2012
R: 12.4980
S: 0.0024
X: 195.1105
Y: -227.2827
Z: -219.9548
Tilt: 135.0000
Rotate: 45.0000

Fig. C. 7 Resultados de los valores de la calibración con “MasterProbe”.

14. Retirar punta maestra “MasterProbe”.
15. Colocar la punta que se va a utilizar para calibrarla antes de emplearla en alguna medición.
16. Seleccionar nuevamente “StylusSystem” (ver Fig. C.8).




Stylus system
Punta2015E10

Fig. C. 8 Configuración de la punta y el palpador.

17. En la pestaña de "StylusSystem" con el botón derecho dar click en “New” y nombrar la punta (ver Fig. C.9).
18. Dar click en “OK”.

ANEXO C

 <p>FACULTAD DE INGENIERÍA</p> <p>UASLP</p>	<h3>INSTRUCCIONES DE OPERACIÓN</h3>
EQUIPO: MÁQUINA DE MEDICIÓN POR COORDENADAS	CLAVE : LM-MC-01

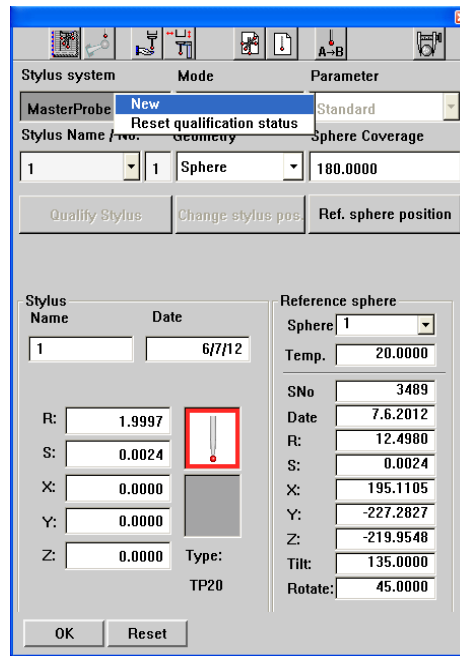


Fig. C. 9 “New” para nombrar una nueva punta.


19. Dar click sobre la pestaña “QualifyStylus” para calificar punta (ver Fig. C.10).



Fig. C. 10 “QualifyStylus” para calificar la punta.

20. “Probe direction of the stylus shaft” para palpar en dirección del eje de la punta (ver Fig. C.11).

ANEXO C

 <p>FACULTAD DE INGENIERÍA</p>	<h3>INSTRUCCIONES DE OPERACIÓN</h3>
EQUIPO: MÁQUINA DE MEDICIÓN POR COORDENADAS	CLAVE : LM-MC-01

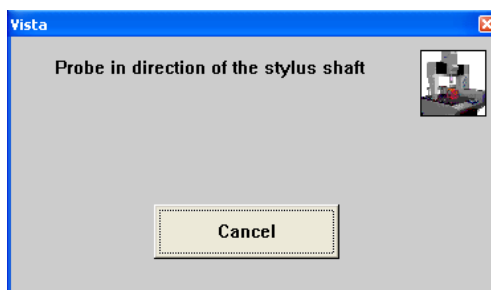
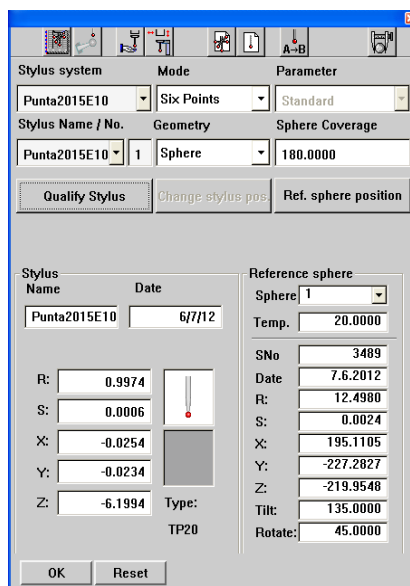


Fig. C. 11 Palpar en dirección del eje de la punta.

21. Como resultado de la calibración, se obtiene un informe donde se especifica la desviación estándar que tiene la punta que se esté calibrando (ver Fig. C.12).




Stylus system	Mode	Parameter
Punta2015E10	Six Points	Standard
Stylus Name / No.	Geometry	Sphere Coverage
Punta2015E10	1 Sphere	100.0000

Stylus	Reference sphere
Name	Sphere
Punta2015E10	1
Date: 6/7/12	Temp.: 20.0000
R: 0.9974	SNo: 3489
S: 0.0006	Date: 7.6.2012
X: -0.0254	R: 12.4900
Y: -0.0234	S: 0.0024
Z: -6.1994	X: 195.1105
Type: TP20	Y: -227.2827
	Z: -219.9548
	Tilt: 135.0000
	Rotate: 45.0000

Fig. C. 12 Resultados de los valores de la calibración.

NOTA: La calibración se puede realizar de forma individual para cada punta o en conjunto de manera automática, si se cuenta con un arreglo en forma de estrella para las puntas.

ANEXO D

 <p>FACULTAD DE INGENIERÍA</p>	<p style="text-align: center;">CERTIFICADO</p>
EQUIPO: <u>BLOQUES PATRÓN</u>	CLAVE : <u>LM-JBP-01</u>

Mitutoyo

Certificate number S11G00573
page 1 of 3

CERTIFICATE OF INSPECTION

APPLICANT: Name _____
Address _____

INSTRUMENT: (1 set of 46) Gauge Block Material: Steel
Code No. : 516-995-10 Manufacturer: Mitutoyo
Type: BM1-46-0/PD Basis of Test: ISO3650/DIN861/JIS B7506
Serial No. : 1105629
Grade: 0 (JIS)

DATE OF INSPECTION: 13th Jul. 2011

INSPECTION METHOD: The length of gauge block is determined by comparing it, using a gauge block comparator, with a reference gauge block of the same nominal length. Both gauge blocks were placed in a vertical position on the comparator with their left or unmarked measuring face down. For determining the deviation / variation of length, d_c / d_{max} / d_{min} / v is measured at the center point and the four corner points about 1.5 mm from the face edges.

ENVIRONMENT: Air temperature (20 ± 1.0) °C

RESULTS: The results apply to the reference temperature of 20°C (ITS-90). For correction of the thermal expansion, an expansion coefficient of the gauge block of $(6.0 \pm 0.3) \times 10^{-6}/F$ [$(10.8 \pm 0.5) \times 10^{-6}/K$] is used. The result of the calibration are presented on the next page.

Expanded Uncertainty: $(0.06 + 0.5L / 1000) \mu m$ (L = Nominal length) L:mm

(For Central Deviation)

(k=2)

The uncertainty presented above is based on a standard uncertainty multiplied by a coverage factor of k=2, which provides a confidence level of approximately 95%. The standard uncertainty has been determined in accordance with EAL-R2.

TRACEABILITY: Traceable to NIST No. 821/276375-08
(NIST=National Institute of Standard and Technology)

Traceable to PTB via No. 4937 PTB 06
(PTB=Physikalisch-Technische Bundesanstalt)


Date 13th Jul. 2011



A. Matsuura

F-687 (8) MITUTOYO Co. HEADQUARTERS:
Postal code: 213-0012
20-1 Sakado 1-chome, Takatsu-ku, Kawasaki-shi. Japan
Tel: 044(813)8201 Fax: 044(813)8210

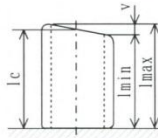
ANEXO D

 <p style="text-align: center;">FACULTAD DE INGENIERÍA</p> <p style="text-align: center;">UASLP</p>	<h2 style="margin: 0;">CERTIFICADO</h2>	
EQUIPO: <u>BLOQUES PATRÓN</u>		CLAVE : <u>LM-JBP-01</u>



Certificate number S11G00573
page 2 of 3

Result: The following table states for each gauge block the measured deviation from the nominal length at the center point and the measured deviation / variation of length.




Nominal Length	l_n	Maximum Deviation	$d_{max}=l_{max}-l_n$
Central Length	l_c	Minimum Length	l_{min}
Central Deviation	$dc=l_c-l_n$	Minimum Deviation	$d_{min}=l_{min}-l_n$
Maximum Length	l_{max}	Variation	$v=l_{max}-l_{min}$

Unit: μm

Nominal Length l_n mm	Ident. No.	Central Dev. dc	Max. Dev. d_{max}	Min. Dev. d_{min}	Var. v
1	110096	+0.04	+0.05	+0.01	0.04
1.001	110522	-0.03	0.00	-0.05	0.05
1.002	110390	+0.03	+0.05	+0.02	0.03
1.003	110040	+0.03	+0.03	0.00	0.03
1.004	110656	-0.01	0.00	-0.05	0.05
1.005	110110	+0.02	+0.03	-0.01	0.04
1.006	110996	+0.03	+0.05	-0.03	0.08
1.007	110443	+0.02	+0.04	-0.01	0.05
1.008	110601	+0.04	+0.05	+0.01	0.04
1.009	110946	-0.02	-0.01	-0.04	0.03
1.01	110949	0.00	+0.01	-0.02	0.03
1.02	110790	+0.01	+0.02	-0.01	0.03
1.03	110905	-0.01	+0.01	-0.02	0.03
1.04	110164	+0.03	+0.03	-0.01	0.04
1.05	110395	0.00	+0.01	-0.04	0.05
1.06	110091	+0.02	+0.04	-0.01	0.05
1.07	110036	-0.01	+0.02	-0.04	0.06
1.08	110148	+0.01	+0.04	-0.03	0.07
1.09	110787	-0.01	+0.01	-0.05	0.06
1.1	110970	-0.04	+0.01	-0.06	0.07
1.2	110070	-0.02	-0.01	-0.03	0.02
1.3	110716	-0.01	+0.02	-0.04	0.06
1.4	110158	-0.02	+0.01	-0.05	0.06
1.5	110077	+0.02	+0.02	-0.02	0.04
1.6	110343	+0.01	+0.02	-0.01	0.03
1.7	110430	+0.03	+0.06	0.00	0.06
1.8	110242	+0.03	+0.06	+0.01	0.05
1.9	110012	+0.01	+0.04	-0.03	0.07
2	110189	+0.01	+0.03	-0.02	0.05
3	110800	+0.03	+0.03	+0.01	0.02
4	110199	+0.02	+0.04	-0.01	0.05
5	110412	+0.02	+0.04	-0.02	0.06
6	112069	+0.01	+0.04	-0.02	0.06
7	111320	-0.02	-0.01	-0.03	0.02
8	111956	0.00	+0.02	-0.02	0.04
9	111824	0.00	+0.03	-0.01	0.04
10	113639	+0.02	+0.06	0.00	0.06
20	113256	+0.07	+0.07	-0.01	0.08
30	111536	+0.05	+0.08	+0.03	0.05

F-687(8)

ANEXO D

 <p>FACULTAD DE INGENIERÍA UASLP</p>	<h2>CERTIFICADO</h2>
EQUIPO: <u>BLOQUES PATRÓN</u>	CLAVE: <u>LM-JBP-01</u>



Certificate number S11G00573
page 3 of 3

Unit: μm

Nominal Length l_n mm	Ident. No.	Central Dev. dc	Max. Dev. dmax	Min. Dev. dmin	Var. v
40	110982	+0.11	+0.13	+0.10	0.03
50	110713	+0.08	+0.08	+0.04	0.04
60	110543	+0.11	+0.11	+0.03	0.08
70	110232	+0.16	+0.17	+0.14	0.03
80	110134	+0.08	+0.08	+0.02	0.06
90	110083	+0.08	+0.08	0.00	0.08
100	110966	+0.06	+0.06	-0.01	0.07

F-687(8)

ANEXO E

 <p>FACULTAD DE INGENIERÍA</p>	<h2 style="margin: 0;">CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN</h2>
EQUIPO: MÁQUINA DE MEDICIÓN POR COORDENADAS	CLAVE : LM-MC-01



CALIBRATION CERTIFICATE



ID Number: 690506-01102006

Date: January 10, 2006

Carl Zeiss IMT Corporation
6250 Sycamore Lane North
Maple Grove, MN 55369
Phone: 763-744-2400

Calibration Location:

Name: Carl Zeiss IMT Corp.
Address: 6250 Sycamore Lane North
City, State Zip: Minneapolis, MN 55369

Customer Info:

Name: Carl Zeiss IMT Corp.
Address: 6250 Sycamore Lane North
City, State Zip: Minneapolis, MN 55369

Calibration Method: CL1001 CMM Calibration Procedure

Model: Vista

Serial Number: 200512301379

Calibration Date: January 10, 2006

CMM Condition
New: Yes
PreOwned: No

Calibration Technician:

Name (print): Zoie Walden

Name (signature): 

Title: QA/Calibration Technician

Calibration Environment:

Temperature: 21.41 degrees Celsius

MPE E	Uncertainty of measurement:	<u>U =0.1 + L/818</u>	[microns]	L=mm
MPE P	Uncertainty of measurement:	<u>0.33</u>	[microns]	
MPE THP	Uncertainty of measurement:	<u>0.21</u>	[microns]	
RON t	Uncertainty of measurement:	<u>0.33</u>	[microns]	

Reference Standards Traceability

GCS No.	Description	Trace No.	Cal Date	Cal Due
GCS 1696	Precision Thermometer	875034479.00	3/4/2005	3/4/2006
GCS0465	Koba 300mm Step Gage	10205 DKD-K-05201 2005-10	10/12/2005	10/12/2006
na	na	na	na	na
na	na	na	na	na
GCS1678	Sphere 30mm	8695 DKD-K-05201 04-08	8/20/2004	2/20/2006
na	na	na	na	na
na	na	na	na	na
na	na	na	na	na
na	na	na	na	na

See Attachments:

Test Certificate: Yes Ring Scans: No Trumpet results: Yes
Section 1 Section 6 Sections 2 and 3

Notes:

1. This calibration is traceable to the International System of Units (SI) through standards calibrated by accredited laboratories.
2. This certificate shall not be reproduced except in full without prior written approval from Carl Zeiss IMT Corp.
3. The Uncertainty of measurement represents an expanded uncertainty expressed at approximately the 95% confidence level using a coverage factor of K=2.
The most noteworthy contributor of the uncertainty budget of a CMM is the deviation of temperature away from the standard of 20 degrees Celsius.
4. The included results relate only to the items calibrated.

ANEXO E

 <p>FACULTAD DE INGENIERÍA</p>	<p style="text-align: center;">CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN</p>	
EQUIPO: MÁQUINA DE MEDICIÓN POR COORDENADAS		CLAVE : LM-MC-01

Certificate of Conformity



Carl Zeiss IMT Corp
Minneapolis, MN 55369

Technical Process Control Group

Document No.: 301379

EC Declaration of Conformity
As defined by EC Machine Regulation 98/37/EC Appendix II A

We hereby attest that the machine described below conforms to the requirements of EC Regulation 98/37/EC as well as to the additional EC regulations cited below, based on its design and construction style and on the model placed in circulation by us.

If any modification not approved by us is made to the machine this declaration loses its validity.

Quality assurance and quality testing conform to the requirements of EN ISO 9000, QS 9000 TS and VDA 6.4. The quality management system of the Carl Zeiss Industrial Metrology Business Group was certified by the DQS Association. The registration number of the certificate is No. 15724 - 01 / 690.

Description of the machine:	Coordinate measurement device
Machine type:	Vista DCC
Serial Number:	200512301379
Part number:	601328.9955.000
Additional EC regulations:	EMC regulation (89/336/ECC) Low-voltage regulation (73/23/ECC)
Other standards used, in particular:	EN 60204-1: 1997 EN 55011: 1991, Class A EN 61010-1: 1995 EN 50082-2: 1995 EN 292-1/2: 1991/1995

Carl Zeiss IMT Corp
Technical Process Control Group
Industrial Measurement Technology
Minneapolis, MN 55369

Datum/Date
1/10/2006

ANEXO E

 <p>FACULTAD DE INGENIERÍA UASLP</p>	<h2>CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN</h2>
EQUIPO: <u>MÁQUINA DE MEDICIÓN POR COORDENADAS</u>	CLAVE : <u>LM-MC-01</u>

Test Certificate



Carl Zeiss IMT Corp
Minneapolis, MN 55369

Technical Process Control Group

Document No.: 301379

Coordinate Measuring Machine: Vista DCC
Serial Number: 200512301379

The Zeiss coordinate measuring machine was tested and documented in compliance with the Zeiss CL1001 CMM Calibration Procedure. The machine conforms to the technical drawings and meets the demands laid down in the test regulations.

Maximum permissible length-measuring error MPE E

based on ISO 10360-2 $MPE_E = A + L / K \leq B$
 $MPE_E = 2.4 + L / 300$

1. Read-out deviation for length measurement E parallel to the axes

Measuring results in X, Y and Z-axis are filed under section No. 2

3 measuring results have been determined per measuring length, referred to 20° C.

2. Read-out deviations for length measurement E in space

Measuring results in 4 space diagonals > filed under section No. 3

3 measuring results have been determined per measuring length, referred to 20° C.

ANEXO E

 <p>FACULTAD DE INGENIERÍA</p>	<h2 style="margin: 0;">CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN</h2>
<p>EQUIPO: <u>MÁQUINA DE MEDICIÓN POR COORDENADAS</u> CLAVE : <u>LM-MC-01</u></p>	

Test Certificate



Carl Zeiss IMT Corp
Minneapolis, MN 55369

Technical Process Control Group

Document No.: 301379

Coordinate Measuring Machine: Vista DCC
Serial Number: 200512301379

3.	Probing error P based on ISO 10360-2		measuring result	limit value
	measuring result P		1.7µm	2.2µm

4.	Scanning error THP Scanning test duration τ based on ISO 10360-4 Only for instruments with scanning probe		measuring result	limit value
	measuring results		measuring result	limit value
	THP		NAµm	NANAµm
	τ		NA sec	NA sec

The measuring results for the scanning error THP were obtained using stylus L = 40 mm, dia. 3 mm.

- 5. Form measurement error for roundness RONt(MZCI) based on VDI 2617 Sheet 2.2**
Definition RONt (MZCI) based on ISO 12181
Only for instruments with scanning probe

Measuring results in 3 planes > filed under record No.6

The results for the length-measuring error E, probe error P and the roundness measurements RONt(MZCI) were obtained using stylus L = 2094 mm, dia. 12 mm.

The measuring devices used for acceptance testing based on ISO 10360 are traceable to comparison standards of the Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) or the Deutscher Kalibrierdienst (DKD).

The coordinate measuring machine was released for delivery.

ANEXO E

 <p>FACULTAD DE INGENIERÍA UASLP</p>	<h2>CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN</h2>
EQUIPO: <u>MÁQUINA DE MEDICIÓN POR COORDENADAS</u>	CLAVE : <u>LM-MC-01</u>


Test Certificate



Carl Zeiss IMT Corp
Minneapolis, MN 55369


Technical Process Control Group

Document No.: 301379

Coordinate Measuring Machine:	Vista DCC
Serial Number:	200512301379
Reference sphere No.	E3489
Catalog No.	600332-9030.000
Radius	12.4980
The maximum deviation from the roundness is .035 μ m.	
The mean radius has been determined with a measuring uncertainty of \pm .15 μ m; it is stored in the determination program for the sphere.	
Carl Zeiss IMT Corp Technical Process Control Group Industrial Measurement Technology Minneapolis, MN 55369	 Datum/Date 1/10/2006

Page 1 of 1

ANEXO F

 <p>FACULTAD DE INGENIERÍA</p> <p>UASLP</p>	INSTRUCCIONES DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO
EQUIPO: <u>DATA LOGGER</u>	CLAVE: <u>LM-MDL-01</u>

ANEXO F: Manual de operación del “Data Logger”

Uso


Los “Data Loggers testo 174H” (ver Fig. F.1) sirven para memorizar y leer valores de medición individuales y series de mediciones. Los valores de medición que se miden con testo 174H, se memorizan y se transfieren a través de la interface al PC, donde se pueden leer y evaluar con ayuda del software testo ComSoft. A través del software también se pueden programar los “Data Loggers” individualmente.



Fig. F. 1 “Data Logger”.

En función del estado de funcionamiento, en el visualizador se puede mostrar diferente información (ver Fig. F.2).

ANEXO F

 <p>FACULTAD DE INGENIERÍA</p>	<p style="text-align: center;">INSTRUCCIONES DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO</p>
EQUIPO: <u>DATA LOGGER</u>	CLAVE: <u>LM-MDL-01</u>

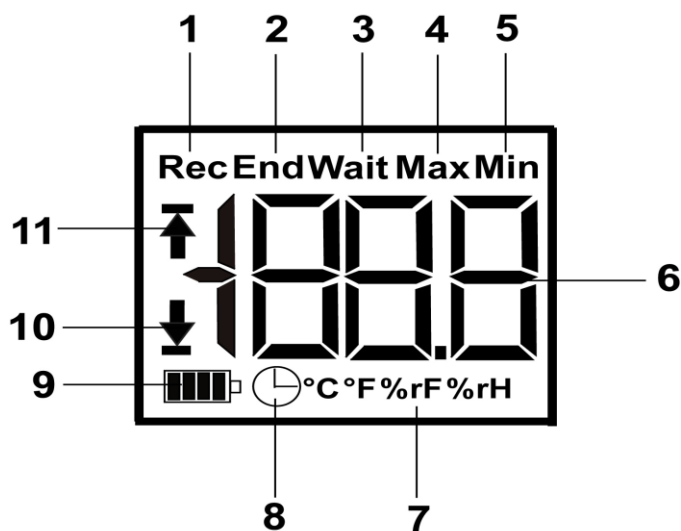


Fig. F. 2 Pantalla de visualización del "Data Logger".



- 1 Programa de medición en marcha.
- 2 Programa de medición finalizado.
- 3 Esperando el inicio del programa de medición.
- 4 Lectura más alta memorizada.
- 5 Lectura más baja memorizada.
- 6 Lectura.
- 7 Unidades.
- 8 Criterio de inicio: fecha/hora programada.
- 9 Carga de la pila.
- 10 Valor de alarma inferior:
 - parpadea: se muestra el valor de alarma programado.
 - está encendido: no se ha llegado al valor de alarma programado.
- 11 Valor de alarma superior:
 - parpadea: se muestra el valor de alarma programado.
 - está encendido: se ha sobrepasado el valor de alarma programado.

✓ Estado de funcionamiento **Wait** y criterio de inicio "inicio por tecla" programado.

> Presionar la tecla **GO** durante aprox. 3 segundos para iniciar el programa de medición.

- Se inicia el programa de medición y en el visualizador aparece **Rec**.

ANEXO F

 FACULTAD DE INGENIERÍA	 UASLP	INSTRUCCIONES DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO
EQUIPO: <u>DATA LOGGER</u>		CLAVE: <u>LM-MDL-01</u>

✓ Estado de funcionamiento **Wait**:

> Pulsar la tecla **GO** para alternar entre la visualización del valor de alarma superior, el valor de alarma inferior, la vida de la pila y la última lectura.

✓ Estado de funcionamiento **Rec** o **End**:

> Pulsar la tecla **GO** para alternar entre la visualización de la lectura más alta memorizada, la lectura más baja memorizada, el valor de alarma superior, el valor de alarma inferior, la vida de la pila y la última lectura.



1 Conectar el instrumento al PC.

1. Conectar el cable de conexión de la interface en un puerto USB disponible del PC.
2. Introducir el "Data Logger" en el soporte de la interface.
3. Seleccionar **Conectar instrumento** o el menú **Instrumento | Seleccionar instrumento**. (Los dispositivos se visualizan con la imagen en miniatura y la designación del modelo).
4. Seleccionar el instrumento y hacer clic en **[Conectar]**.

2 Configurar instrumento.

1. El instrumento no se encuentra en modo Rec. Dado el caso, hacer clic en **[Parar medición]**.
2. Seleccionar **Configurar ajustes de servicio** o el menú **Instrumento | Configurar instrumento | Ajustes de servicio**. Establecer las preferencias deseadas (específicas del instrumento).

ANEXO F


 FACULTAD DE INGENIERÍA	 UASLP	INSTRUCCIONES DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO
EQUIPO: <u>DATA LOGGER</u>		CLAVE: <u>LM-MDL-01</u>

- Criterios inicio
 - Hora de inicio: el instrumento se enciende a la hora ajustada.
 - Botón de inicio en instrumento: Mantener presionado **[Go]** durante más de 3 segundos.
 - Inicio de software: hacer clic en **[Iniciar medición]**.
 - Fórmula: Con el inicio de fórmula pueden utilizarse determinados resultados de proceso como punto inicial para la medición. Es posible guardar distintas fórmulas para cada canal de medición. El instrumento comienza la medición cuando se sobrepasa el valor límite de la fórmula especificada. La medición finaliza cuando esta se interrumpe a través del software: Hacer clic en **[Detener medición]**.

- Criterios fin
 - Memoria llena: el instrumento finaliza la medición en cuanto se llena la memoria.
 - Lista circular: Al llenarse la memoria, el instrumento sobrescribe las primeras lecturas registradas en "mediciones anteriores". La medición recién finaliza cuando ésta se interrumpe a través del software: Hacer clic en **[Parar medición]**.
 - Número de lecturas: el instrumento finaliza la medición en cuanto haya tomado el número de lecturas definido.

NOTA: El ciclo de memoria determina el ritmo en el que deben almacenarse los valores medidos. El ritmo de memoria debe ser múltiplo del intervalo de medición. El intervalo de medición establece el ritmo con el que pueden determinarse y visualizarse los valores.

ANEXO F

 <p>FACULTAD DE INGENIERÍA</p> <p>UASLP</p>	INSTRUCCIONES DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO
EQUIPO: <u>DATA LOGGER</u>	CLAVE: <u>LM-MDL-01</u>

3. Cambiar a la ficha **Configuración del instrumento** e Introducir nombre aparato y hacer clic en **[Transmitir a instrumento]**.
4. La configuración se ha completado.

3 Iniciar medición de acuerdo a la configuración del Data Logger.



4 Importar datos de medición al finalizar la medición.

1. Seleccionar **Importar datos de medición** o el menú **Análisis | Importar datos de medición | Importar datos de medición**. (Se visualizan detalles sobre los datos de medición, como nombre del instrumento, número de serie y lugar de medición).
2. Especificar la ruta en la que se deben guardar los datos de medición.
3. Hacer clic en **[Importar]** y la vista cambia a la ficha **Historial de importación**.
4. Una vez finalizada la importación de los datos de medición, la vista cambia a la pantalla **Análisis**.

5 Analizar datos de medición.

1. Ya que los datos de medición fueron importados. Seleccionar el menú **Análisis | Analizar datos de medición** y se indica el nombre del archivo abierto. (Pueden editarse varias series de datos de medición y se establecen las preferencias para el diagrama de ser necesario.)
2. Exportar los datos de medición seleccionados a un nuevo protocolo o al portapapeles.

ANEXO F

 FACULTAD DE INGENIERÍA	 UASLP	INSTRUCCIONES DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO
EQUIPO: <u>DATA LOGGER</u>		CLAVE: <u>LM-MDL-01</u>



6 Imprimir o exportar informe

1. Por medio de **[Imprimir informe]** puede configurarse el formato del informe, mediante **[Iniciar exportación]** se acepta un formato de informe estándar y el archivo se guarda directamente.
2. Si desea enviar datos de medición por correo electrónico: Hacer clic en **[Enviar e-mail]**.

Mantenimiento Preventivo

1. En caso de suciedad, limpie la caja del instrumento con un paño húmedo.
2. Preste atención a que no entre ningún líquido en el interior de la caja durante la limpieza porque hay posibilidad de dañar el sensor.
3. Instalación de pilas.
 - Poner el “Data Logger” cara abajo.
 - Abrir la tapa del compartimento para pilas de la parte posterior del “Data Logger” girándola hacia la izquierda.
 - Sacar las pilas agotadas del compartimento para pilas.
 - Colocar dos pilas nuevas (pilas de botón de 3 V, CR 2032 litio) en el instrumento, de modo que quede visible el polo positivo.
4. Colocar la tapa del compartimento para pilas en el compartimento para pilas y cerrarla girando hacia la derecha.

ANEXO F


 FACULTAD DE INGENIERÍA	 UASLP	INSTRUCCIONES DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO
EQUIPO: <u>DATA LOGGER</u>		CLAVE: <u>LM-MDL-01</u>


Datos técnicos

Características	Valores
Tipo de sonda	Sensor de temperatura NTC y sensor de humedad capacitivo interno
Rango de medición	De 0 a 100% HR (atmosfera sin condensación), de -20 a +70 °C
Exactitud de humedad	±3% HR (de 2%HR a 98%HR) ±1 dígito +0,03%HR/K
Exactitud de temperatura	±0,5 °C (de -20 a +70 °C)
Resolución	0,1%HR, 0,1 °C
Temperatura de funcionamiento	De -20 a +70 °C
Temperatura de almacenamiento	De -40 a +70 °C
Tipo de pila	2 pilas de botón de 3 V (2 CR 2032 litio)
Vida de la pila	1 año (intervalo de medición de 15 min, +25 °C)
Clase de protección	IP20
Intervalo de medición	De 1 min a 24 h (seleccionable)
Memoria	2 x 8.000 lecturas
Software	Compatible con Windows XP, Vista, Win7
Garantía	24 meses, condiciones de garantía : véase la página web www.testo.com/warranty
Directiva CE	2004/108/CE

Tabla F. 1 Datos técnicos del "Data Logger".

ANEXO G

 <p style="font-size: small;">FACULTAD DE INGENIERÍA</p>	<h2 style="margin: 0;">INFORME DE CALIBRACIÓN</h2>
<p>EQUIPO: <u>DATA LOGGER</u></p>	<p>CLAVE: <u>LM-MDL-01</u></p>



Kalibrier-Protokoll

Certificate of conformity • Protocole d'étalonnage
Protocollo di collaudo • Informe de calibración

Gerät / Module type /
Modèle / Modelo: **testo 174H**

Messbereich / Measuring range /
Etendue de mesure / Rango de medición : **Temperature: -20...70°C
Humidity: 0...100%rF% rH**

Serien-Nr. / Serial no. /
N°. de série / Número de serie: **36622883**

Segmenttest / Display test /
Test d'affichage / Test del visualizador: **OK**

Messwerte / Measured values / Valeurs mesurées / Valores medidos:		
Sollwert / Reference / Référence / Referencia:	Zulässige Toleranz / Permissible tolerance / Tolérance admise / Tolerancia permitida :	Istwert / Actual Value / Valeur réelle / Valor medido :
Temperature :		
25.0 °C	±0.5 °C	24.9 °C
Humidity:		
43.1 %rH	±3.0 %rH	43.4 %rH

J. Yeung

Prüfer / Inspector /
Responsable / Verificador

ANEXO H



Universidad Autónoma de San Luis Potosí
Facultad de Ingeniería
Área Mecánica y Eléctrica
Laboratorio de Metrología



Dirección: Av. Dr. Manuel Nava No.8, Edificio C-04, Zona Universitaria, C.P. 78290, Tel: (444) 8262330 ext.:2100

INFORME DE MEDICIÓN

Número de registro: LM-01-2012

Nombre del cliente: Remy Remanufacturing

Dirección del cliente: Circuito México No. 230 Zona Industrial de San Luis Potosí

Fecha de recepción de la pieza: 10 de Febrero del 2012

Observaciones: Rotor y Flecha

Características de la medición: Medición de Gauges Rotor y Flecha

CONDICIONES GENERALES DE LAS PRUEBAS

Medición del Rotor

Fecha: Feb 18, 2012

Operadores: Orlando Guarneros García, Pablo James Martínez Moreno, Laura Lucia Sánchez Ramos, Miguel Ángel Gámez Hernández

Medición de la Flecha

Fecha: Feb 20, 2012

Operadores: Orlando Guarneros García, Pablo James Martínez Moreno, Laura Lucia Sánchez Ramos, Miguel Ángel Gámez Hernández

Temperatura Inicial: Aprox. 20±2 °C

Descripción del equipo: CMM

Marca/modelo: VISTA

Método de medición: Palpación

Temperatura Final: Aprox. 20±2 °C

Fabricante: ZEISS

Clave: LM-CMM-01

Incertidumbre: N.A.*µm

**Se advierte que el equipo no dispone de trazabilidad comprobable, por ello el laboratorio no se responsabiliza de la carencia de dicha propiedad. De igual manera no ha sido estimada la incertidumbre de la medición para la elaboración del presente informe.*

ANEXO H



Universidad Autónoma de San Luis Potosí
Facultad de Ingeniería
Área Mecánica y Eléctrica
Laboratorio de Metrología



Dirección: Av. Dr. Manuel Nava No.8, Edificio C-04, Zona Universitaria, C.P. 78290, Tel: (444) 8262330 ext.:2100

Metodología: Medición del Rotor Lado Derecho

La medición se realizó mediante la palpación de 8 circunferencias tomadas cada 4 mm a lo largo de la altura de la pieza y tomando como referencia el centro de una de las caras de la sección transversal del rotor para realizar la alineación (ver Fig. H.1).

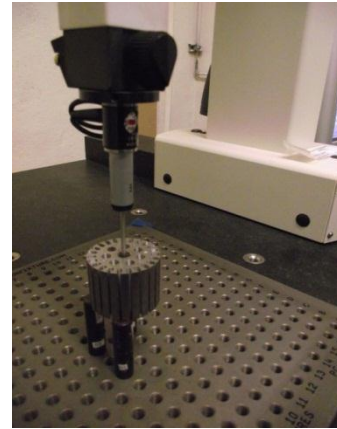


Fig. H. 1 Metodología de la medición del rotor.

Se palparon 8 circunferencias tanto internas como externas, tomando como referencia la circunferencia palpada al inicio para marcar el origen en la alineación, posteriormente se prosiguió a obtener las concentricidades de las circunferencias internas de una por una partiendo de la primera circunferencia superior; para continuar se tomaron las concentricidades de las circunferencias externas de igual manera que se realizó con las interiores (ver Fig. H.2).

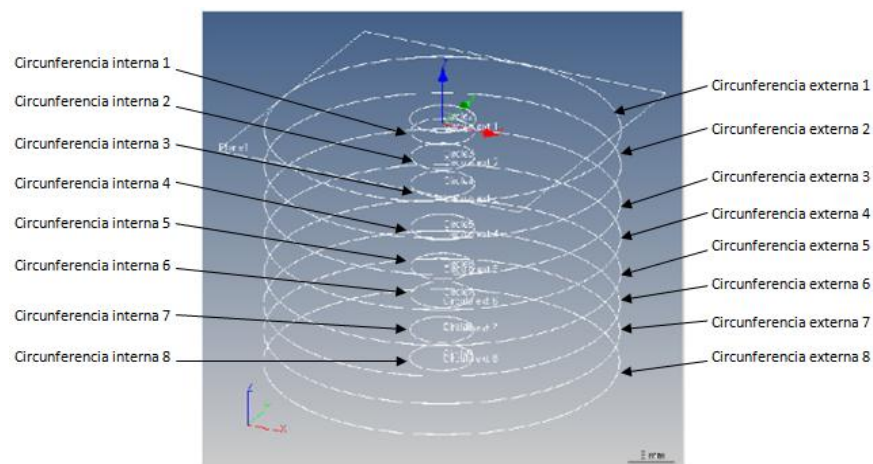


Fig. H. 2 Medición del rotor lado derecho.

ANEXO H



Universidad Autónoma de San Luis Potosí
Facultad de Ingeniería
Área Mecánica y Eléctrica
Laboratorio de Metrología



Dirección: Av. Dr. Manuel Nava No.8, Edificio C-04, Zona Universitaria, C.P. 78290, Tel: (444) 8262330 ext.:2100

INFORME DE MEDICIÓN

Los valores obtenidos para dichas concentricidades se muestran a continuación (ver Tabla H.1).















	Actual	Nominal	Upper Tol. Lower Tol.	Deviation
	Concentricity1 0.0241	0.0000	0.0000	0.0241 0.0241
	Concentricity2 0.0399	0.0000	0.0000	0.0399 0.0399
	Concentricity3 0.0585	0.0000	0.0000	0.0585 0.0585
	Concentricity4 0.0884	0.0000	0.0000	0.0884 0.0884
	Concentricity5 0.1035	0.0000	0.0000	0.1035 0.1035
	Concentricity6 0.2787	0.0000	0.0000	0.2787 0.2787
	Concentricity7 0.1465	0.0000	0.0000	0.1465 0.1465
	Concentricity8 0.1802	0.0000	0.0000	0.1802 0.1802
	Concentricity9 0.0709	0.0000	0.0000	0.0709 0.0709
	Concentricity10 0.0947	0.0000	0.0000	0.0947 0.0947
	Concentricity11 0.1095	0.0000	0.0000	0.1095 0.1095
	Concentricity12 0.1364	0.0000	0.0000	0.1364 0.1364
	Concentricity13 0.1544	0.0000	0.0000	0.1544 0.1544
	Concentricity14 0.1715	0.0000	0.0000	0.1715 0.1715

Tabla H. 1 Resultados de la medición del rotor lado derecho.

ANEXO H



Universidad Autónoma de San Luis Potosí
Facultad de Ingeniería
Área Mecánica y Eléctrica
Laboratorio de Metrología



Dirección: Av. Dr. Manuel Nava No.8, Edificio C-04, Zona Universitaria, C.P. 78290, Tel: (444) 8262330 ext.:2100

Los 8 primeros valores de la Tabla H.1 corresponden a las mediciones de las circunferencias internas que se ilustran en la Fig. H.2, los siguientes valores corresponden a las circunferencias externas; los cuales fueron tomados de la parte superior a la parte inferior consecutivamente, en ambos casos.

A continuación se muestran las gráficas (ver Fig. H.3 y Fig. H.4) que ilustran el comportamiento de los valores obtenidos.

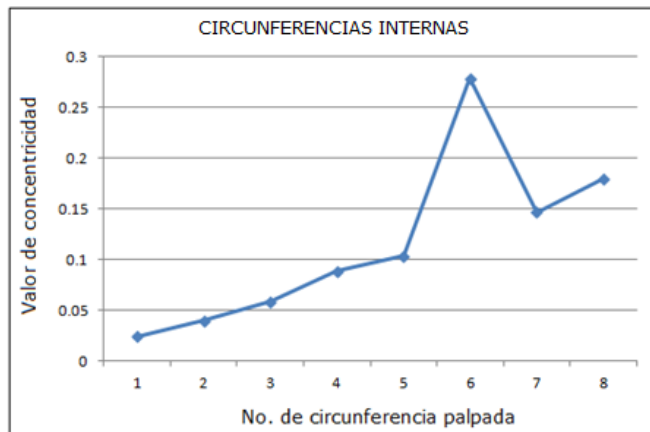


Fig. H. 3 Concentricidades internas del rotor lado derecho.

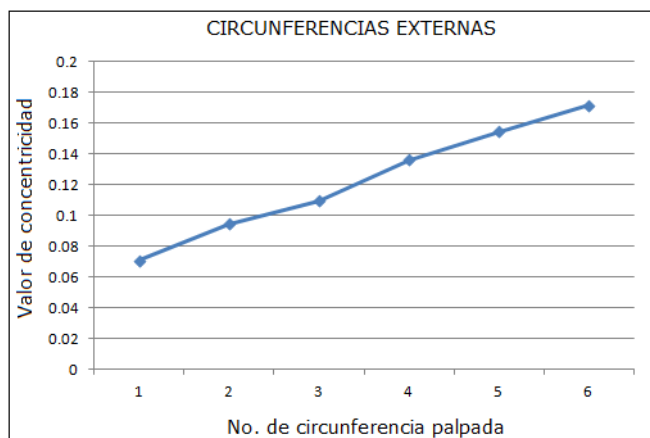


Fig. H. 4 Concentricidades externas del rotor lado derecho.

ANEXO H



INFORME DE MEDICIÓN

Metodología: Medición del Rotor Lado Opuesto

Para realizar la medición se dio la vuelta a la pieza para comparar los valores obtenidos anteriormente y se prosiguió siguiendo la misma metodología que la medición anterior.

Se palparon 6 circunferencias tanto internas como externas a cada 8 mm de altura (ver Fig. H.5).

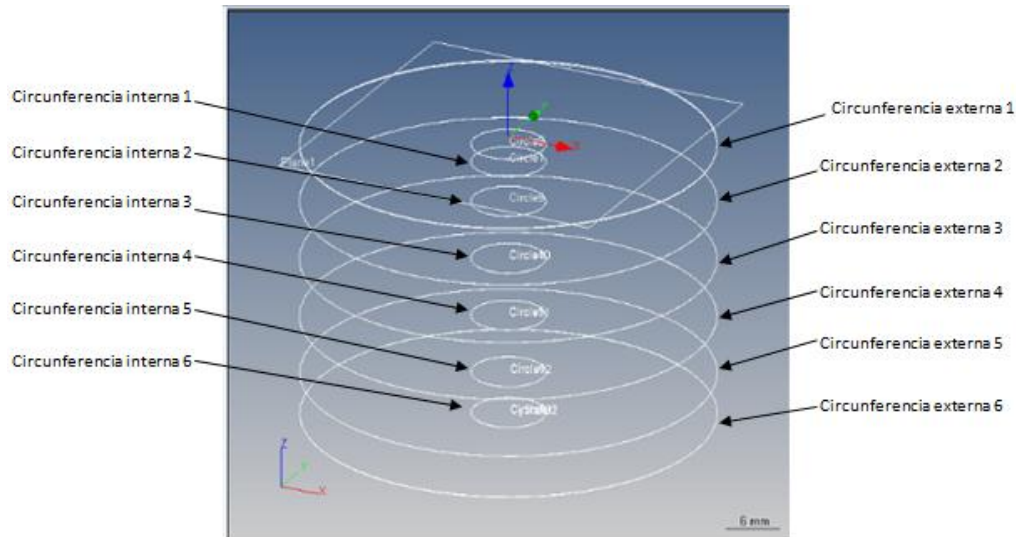


Fig. H. 5 Medición del rotor lado opuesto.

Las siguientes gráficas (ver Fig. H.6 y Fig. H.7) ilustran el comportamiento de los valores obtenidos.

ANEXO H



Universidad Autónoma de San Luis Potosí
Facultad de Ingeniería
Área Mecánica y Eléctrica
Laboratorio de Metrología



Dirección: Av. Dr. Manuel Nava No.8, Edificio C-04, Zona Universitaria, C.P. 78290, Tel: (444) 8262330 ext.:2100

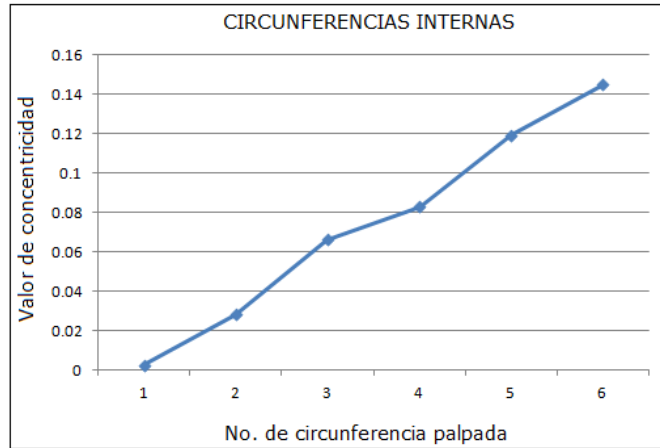


Fig. H. 6 Concentricidades internas del rotor lado opuesto.

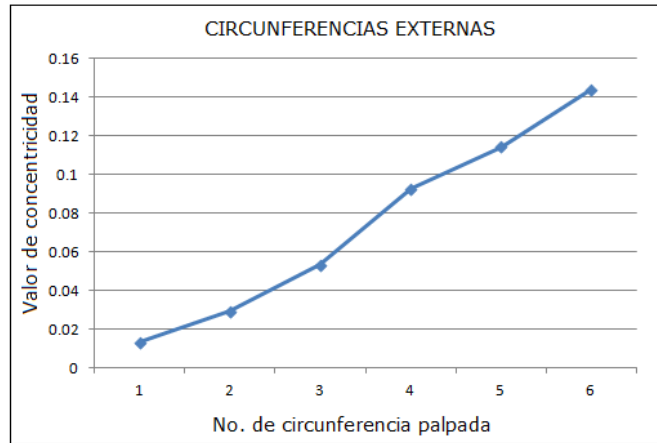


Fig. H. 7 Concentricidades externas del rotor lado opuesto.

ANEXO H



Universidad Autónoma de San Luis Potosí
Facultad de Ingeniería
Área Mecánica y Eléctrica
Laboratorio de Metrología



Dirección: Av. Dr. Manuel Nava No.8, Edificio C-04, Zona Universitaria, C.P. 78290, Tel: (444) 8262330 ext.:2100

INFORME DE MEDICIÓN















	Actual	Nominal	Upper Tol.	Lower Tol.	Deviation
	Perpendicularity1 0.0796	0.0000	0.0000		0.0796
	Perpendicularity2 0.0711	0.0000	0.0000		0.0711
	Concentricity1 0.0025	0.0000	0.0000		0.0025
	Concentricity2 0.0281	0.0000	0.0000		0.0281
	Concentricity3 0.0663	0.0000	0.0000		0.0663
	Concentricity4 0.0830	0.0000	0.0000		0.0830
	Concentricity5 0.1195	0.0000	0.0000		0.1195
	Concentricity6 0.1450	0.0000	0.0000		0.1450
	Concentricity7 0.0132	0.0000	0.0000		0.0132
	Concentricity8 0.0293	0.0000	0.0000		0.0293
	Concentricity9 0.0532	0.0000	0.0000		0.0532
	Concentricity10 0.0926	0.0000	0.0000		0.0926
	Concentricity11 0.1144	0.0000	0.0000		0.1144
	Concentricity12 0.1440	0.0000	0.0000		0.1440

Tabla H. 2 Resultados de la medición del rotor lado opuesto.

Los 6 primeros valores de la Tabla H.2 corresponden a las mediciones de las circunferencias internas que se ilustran en la Fig. H.5, los siguientes valores corresponden

ANEXO H



Universidad Autónoma de San Luis Potosí
Facultad de Ingeniería
Área Mecánica y Eléctrica
Laboratorio de Metrología



Dirección: Av. Dr. Manuel Nava No.8, Edificio C-04, Zona Universitaria, C.P. 78290, Tel: (444) 8262330 ext.:2100

a las circunferencias externas; los cuales fueron tomados de la parte superior a la parte inferior consecutivamente, en ambos casos.

Metodología: Medición de la Flecha

La medición se realizó colocando horizontalmente la pieza (ver Fig. H.8) y prosiguiéndose a realizar el palpado de 2 cilindros en los extremos de la flecha (ver Fig. H.9), para obtener los valores de coaxialidad, paralelismo y cilindricidad (ver Tabla H.3).

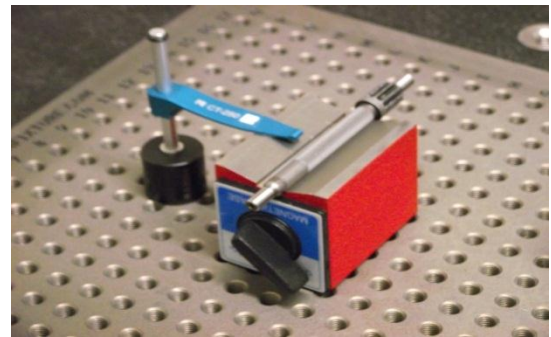


Fig. H. 8 Metodología de medición de la flecha.

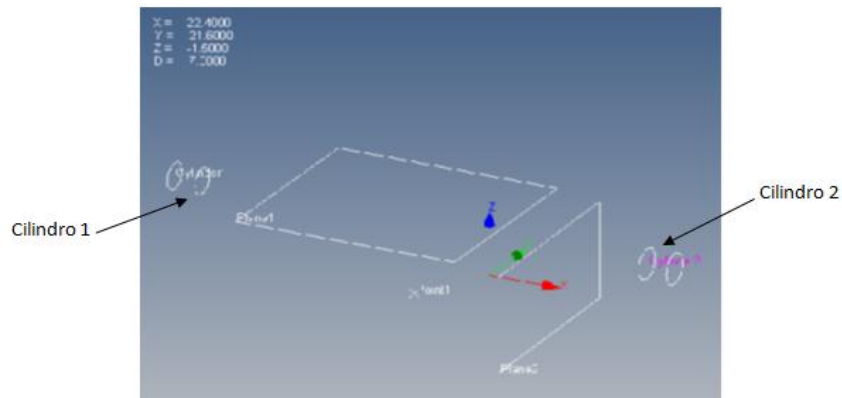


Fig. H. 9 Medición de la flecha.

ANEXO H



Universidad Autónoma de San Luis Potosí
Facultad de Ingeniería
Área de Mecánica y Eléctrica
Laboratorio de Metrología



Dirección: Dr. Manuel Nava No.8, C.P. 78290, Edificio C-04, Tel: (444) 8262330 ext.:2100

INFORME DE MEDICIÓN

	Actual	Nominal	Upper Tol.	Lower Tol.	Deviation
	Coaxiality1				0.0465
	0.0465	0.0000	0.0000		0.0465
	Angle between Features1				0.0168
	0.0168	0.0000	0.0000		0.0168
	Parallelism1				0.0017
	0.0017	0.0000	0.0000		0.0017
	Cylindricity1				0.0010
	0.0010	0.0000	0.0000		0.0010
	Cylindricity2				0.0016
	0.0016	0.0000	0.0000		0.0016

Tabla H. 3 Resultados de medición de la flecha.

Conclusiones

Mediante el análisis de los resultados mostrados anteriormente y de los valores obtenidos en la presente medición; de los cuales corresponden a la **flecha** los siguientes valores: coaxialidad de 0,0465; ángulo de 0,0168 y paralelismo de 0,0017. A partir de estos valores obtenidos se llegó a la conclusión de que dichos valores fueron relativamente bajos y por lo tanto la flecha se encuentra en óptimas condiciones de funcionamiento.

Los valores de concentricidades correspondientes al **rotor** muestran un comportamiento de descentralización con lo cual se llegó a la conclusión de que ésta condición puede formar parte de las causas que ocasionan el problema de desbalanceo en dicho componente.

ANEXO I

TABLAS DE RESULTADOS

1° FASE DE EXPERIMENTACIÓN

Experimento bd	Exp 1.1	Exp 1.2	Exp 1.3	Exp 1.4	Exp 1.5	Exp 1.6	Exp 1.7	Exp 1.8	Exp 1.9	Exp 1.10
p1	99.9996	99.9999	99.9993	99.9997	99.9996	100.0000	100.0002	99.9997	99.9996	99.9995
p2	99.9995	99.9990	99.9995	99.9994	99.9988	99.9992	99.9999	99.9993	99.9992	99.9992
p3	99.9990	99.9987	99.9991	99.9990	99.9990	99.9994	99.9995	99.9989	99.9994	99.9989
p4	99.9991	99.9989	99.9988	99.9992	99.9986	99.9990	99.9992	99.9991	99.9990	99.9990
p5	99.9988	99.9986	99.9990	99.9989	99.9988	99.9987	99.9993	99.9992	99.9992	99.9992
p6	99.9990	99.9987	99.9992	99.9991	99.9995	99.9994	99.9995	99.9994	99.9988	99.9994
p7	99.9987	99.9984	99.9988	99.9992	99.9987	99.9991	99.9991	99.9990	99.9985	99.9991
p8	99.9988	99.9986	99.9985	99.9989	99.9988	99.9987	99.9988	99.9992	99.9986	99.9987
p9	99.9990	99.9983	99.9987	99.9986	99.9990	99.9989	99.9989	99.9989	99.9983	99.9984
p10	99.9987	99.9984	99.9989	99.9988	99.9987	99.9986	99.9986	99.9985	99.9984	99.9986
Media	99.9990	99.9987	99.9990	99.9991	99.9989	99.9991	99.9993	99.9991	99.9989	99.9990
Desv Est	0.0003	0.0005	0.0003	0.0003	0.0003	0.0004	0.0005	0.0003	0.0004	0.0003
urep	0.1022	0.1440	0.0916	0.1005	0.1082	0.1329	0.1582	0.1007	0.1394	0.1105

Experimento 1	Exp 2.1	Exp 2.2	Exp 2.3	Exp 2.4	Exp 2.5	Exp 2.6	Exp 2.7	Exp 2.8	Exp 2.9	Exp 2.10
p1	8.0003	8.0001	8.0000	7.9998	8.0002	8.0002	8.0000	7.9996	8.0007	8.0004
p2	7.9997	7.9995	7.9994	7.9997	8.0001	7.9996	7.9994	7.9995	8.0000	8.0002
p3	7.9995	7.9994	7.9993	7.9996	8.0000	7.9995	7.9993	8.0000	7.9998	8.0001
p4	7.9994	7.9993	7.9997	7.9995	7.9994	7.9993	7.9992	7.9999	7.9996	7.9994
p5	8.0000	7.9993	7.9987	7.9996	8.0000	7.9999	7.9992	7.9996	7.9995	7.9995
p6	7.9997	7.9990	7.9994	7.9998	7.9997	7.9991	7.9994	7.9998	7.9992	8.0001
p7	8.0000	7.9994	7.9998	7.9997	7.9996	7.9995	7.9993	7.9998	7.9995	7.9995
p8	7.9994	7.9993	7.9992	7.9991	7.9995	7.9993	7.9992	8.0002	7.9993	7.9993
p9	7.9995	7.9998	7.9992	7.9992	8.0001	7.9994	7.9992	8.0004	7.9992	7.9994
p10	7.9997	7.9995	7.9994	7.9994	7.9998	7.9991	7.9994	8.0006	7.9994	7.9990
Media	7.9997	7.9994	7.9994	7.9995	7.9998	7.9995	7.9994	7.9999	7.9996	7.9997
Desv Est	0.0003	0.0003	0.0004	0.0002	0.0003	0.0003	0.0003	0.0004	0.0004	0.0005
urep	0.0929	0.0997	0.1154	0.0771	0.0870	0.1090	0.0814	0.1166	0.1414	0.1473

Experimento c	Exp 4.1	Exp 4.2	Exp 4.3	Exp 4.4	Exp 4.5	Exp 4.6	Exp 4.7	Exp 4.8	Exp 4.9	Exp 4.10
p1	7.9999	7.9998	8.0001	7.9998	8.0002	8.0000	8.0001	8.0001	8.0001	8.0002
p2	7.9993	7.9997	8.0000	7.9997	7.9996	7.9994	7.9995	7.9994	7.9996	8.0001
p3	7.9992	7.9996	7.9994	7.9996	8.0000	7.9994	7.9994	7.9993	7.9995	8.0000
p4	7.9991	7.9995	7.9993	7.9995	7.9994	7.9993	7.9993	7.9992	7.9994	7.9994
p5	7.9991	7.9995	7.9994	7.9996	8.0000	7.9999	7.9999	7.9992	8.0000	7.9994
p6	7.9989	7.9997	7.9996	7.9993	7.9997	7.9996	7.9996	7.9994	7.9998	7.9997
p7	7.9988	7.9991	7.9990	7.9997	7.9996	7.9996	7.9995	7.9993	7.9997	7.9996
p8	7.9987	7.9995	7.9994	7.9995	8.0000	8.0000	7.9999	7.9992	7.9996	7.9995
p9	7.9988	7.9996	7.9990	7.9996	8.0001	7.9996	8.0000	7.9987	7.9997	7.9990
p10	7.9995	7.9998	7.9992	7.9993	7.9998	7.9998	7.9997	7.9989	8.0000	7.9993
Media	7.9991	7.9996	7.9994	7.9996	7.9998	7.9997	7.9997	7.9993	7.9997	7.9996
Desv Est	0.0004	0.0002	0.0004	0.0002	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0002	0.0004
urep	0.1146	0.0624	0.1187	0.0552	0.0807	0.0821	0.0857	0.1101	0.0753	0.1153

Experimento abd	Exp 3.1	Exp 3.2	Exp 3.3	Exp 3.4	Exp 3.5	Exp 3.6	Exp 3.7	Exp 3.8	Exp 3.9	Exp 3.10
p1	99.9992	99.9989	99.9995	99.9994	99.9994	99.9992	99.9987	99.9989	99.9987	99.9997
p2	99.9988	99.9986	99.9991	99.9991	99.9991	99.9989	99.9989	99.9991	99.9989	99.9993
p3	99.9985	99.9983	99.9993	99.9988	99.9993	99.9985	99.9986	99.9989	99.9985	99.9995
p4	99.9987	99.9985	99.9989	99.9995	99.9985	99.9987	99.9989	99.9986	99.9982	99.9991
p5	99.9984	99.9986	99.9986	99.9991	99.9991	99.9984	99.9991	99.9984	99.9984	99.9988
p6	99.9986	99.9978	99.9987	99.9988	99.9988	99.9981	99.9988	99.9986	99.9981	99.9984
p7	99.9982	99.9985	99.9984	99.9985	99.9990	99.9987	99.9985	99.9989	99.9982	99.9986
p8	99.9989	99.9982	99.9985	99.9992	99.9992	99.9984	99.9993	99.9992	99.9984	99.9987
p9	99.9986	99.9983	99.9987	99.9983	99.9983	99.9981	99.9990	99.9989	99.9986	99.9984
p10	99.9983	99.9980	99.9988	99.9985	99.9985	99.9983	99.9987	99.9992	99.9978	99.9985
Media	99.9986	99.9984	99.9989	99.9989	99.9989	99.9985	99.9989	99.9989	99.9984	99.9989
Desv Est	0.0003	0.0003	0.0003	0.0004	0.0004	0.0004	0.0002	0.0002	0.0003	0.0005
urep	0.0946	0.1031	0.1098	0.1252	0.1185	0.1119	0.0698	0.0785	0.1004	0.1461

ANEXO I

TABLAS DE RESULTADOS

1° FASE DE EXPERIMENTACIÓN

Experimento cd	Exp 5.1	Exp 5.2	Exp 5.3	Exp 5.4	Exp 5.5	Exp 5.6	Exp 5.7	Exp 5.8	Exp 5.9	Exp 5.10
p1	8.0005	8.0000	8.0002	8.0002	8.0006	8.0003	7.9998	8.0000	8.0000	8.0002
p2	7.9999	7.9999	7.9996	7.9996	8.0004	7.9997	7.9997	7.9999	7.9999	7.9996
p3	7.9998	7.9998	7.9995	7.9995	7.9998	7.9996	7.9996	8.0002	7.9993	7.9995
p4	7.9997	7.9998	7.9995	7.9999	7.9996	7.9994	7.9996	7.9995	7.9992	7.9993
p5	7.9997	7.9999	7.9996	7.9995	7.9996	7.9995	7.9997	7.9996	7.9993	7.9999
p6	7.9999	7.9996	7.9998	7.9998	7.9998	7.9997	7.9999	7.9997	7.9996	8.0001
p7	7.9998	8.0000	7.9997	7.9992	7.9997	7.9995	7.9998	7.9996	7.9995	7.9995
p8	7.9997	7.9994	7.9997	7.9996	7.9995	7.9994	7.9997	7.9994	7.9994	7.9999
p9	7.9993	8.0000	7.9993	7.9992	7.9996	7.9989	7.9998	7.9994	7.9995	7.9994
p10	7.9995	8.0003	8.0000	7.9994	7.9998	7.9991	8.0001	7.9996	7.9997	7.9997
Media	7.9998	7.9999	7.9997	7.9996	7.9998	7.9995	7.9998	7.9997	7.9995	7.9997
Desv Est	0.0003	0.0002	0.0003	0.0003	0.0004	0.0004	0.0001	0.0003	0.0003	0.0003
urep	0.1025	0.0752	0.0848	0.1017	0.1112	0.1176	0.0443	0.0800	0.0806	0.0938

Experimento bcd	Exp 6.1	Exp 6.2	Exp 6.3	Exp 6.4	Exp 6.5	Exp 6.6	Exp 6.7	Exp 6.8	Exp 6.9	Exp 6.10
p1	100.0001	99.9999	100.0001	100.0003	100.0001	100.0000	99.9997	100.0000	100.0002	99.9998
p2	99.9993	99.9996	99.9997	99.9999	99.9993	99.9992	99.9994	99.9997	99.9994	99.9994
p3	99.9995	99.9993	99.9994	99.9996	99.9990	99.9994	99.9991	99.9995	99.9996	99.9991
p4	99.9992	99.9990	99.9991	99.9992	99.9996	99.9991	99.9993	99.9992	99.9992	99.9993
p5	99.9995	99.9993	99.9993	99.9994	99.9998	99.9992	99.9989	99.9994	99.9994	99.9995
p6	99.9997	99.9995	99.9995	99.9995	99.9996	99.9989	99.9991	99.9996	99.9991	99.9991
p7	99.9989	99.9992	99.9996	99.9992	99.9993	99.9991	99.9988	99.9994	99.9993	99.9993
p8	99.9992	99.9994	99.9988	99.9988	99.9990	99.9993	99.9990	99.9991	99.9989	99.9990
p9	99.9994	99.9996	99.9990	99.9989	99.9992	99.9989	99.9987	99.9993	99.9991	99.9991
p10	99.9991	99.9993	99.9992	99.9991	99.9994	99.9986	99.9989	99.9995	99.9988	99.9988
Media	99.9994	99.9994	99.9994	99.9994	99.9994	99.9992	99.9991	99.9995	99.9993	99.9993
Desv Est	0.0003	0.0002	0.0004	0.0005	0.0004	0.0004	0.0003	0.0003	0.0004	0.0003
urep	0.1013	0.0790	0.1172	0.1433	0.1164	0.1179	0.0904	0.0877	0.1236	0.0862

Experimento b	Exp 7.1	Exp 7.2	Exp 7.3	Exp 7.4	Exp 7.5	Exp 7.6	Exp 7.7	Exp 7.8	Exp 7.9	Exp 7.10
p1	99.9997	100.0000	100.0004	99.9999	99.9998	100.0004	100.0006	100.0001	99.9998	100.0001
p2	99.9998	99.9992	100.0000	100.0000	99.9995	99.9995	99.9998	99.9998	99.9990	99.9997
p3	99.9990	99.9994	99.9997	99.9997	99.9997	99.9997	99.9995	100.0000	99.9992	99.9994
p4	99.9992	99.9991	99.9994	99.9994	99.9994	99.9993	99.9996	99.9997	99.9989	99.9995
p5	99.9989	99.9993	99.9996	99.9996	99.9991	99.9995	99.9993	99.9999	99.9991	99.9992
p6	99.9991	99.9995	99.9997	99.9997	99.9993	99.9996	99.9995	100.0001	99.9993	99.9993
p7	99.9988	99.9997	99.9999	99.9994	99.9995	99.9993	99.9992	99.9998	99.9990	99.9990
p8	99.9985	99.9989	99.9996	99.9996	99.9992	99.9994	99.9988	100.0000	99.9992	99.9986
p9	99.9987	99.9991	99.9993	99.9993	99.9999	99.9986	99.9990	99.9992	99.9989	99.9988
p10	99.9990	99.9993	99.9989	99.9989	99.9991	99.9987	99.9992	99.9999	99.9986	99.9989
Media	99.9991	99.9993	99.9996	99.9995	99.9995	99.9994	99.9994	99.9998	99.9991	99.9992
Desv Est	0.0004	0.0003	0.0004	0.0003	0.0003	0.0005	0.0005	0.0003	0.0003	0.0004
urep	0.1260	0.1015	0.1273	0.0994	0.0898	0.1578	0.1570	0.0830	0.0995	0.1408

Experimento acd	Exp 8.1	Exp 8.2	Exp 8.3	Exp 8.4	Exp 8.5	Exp 8.6	Exp 8.7	Exp 8.8	Exp 8.9	Exp 8.10
p1	7.9997	8.0000	8.0000	8.0004	8.0004	8.0003	8.0002	8.0005	8.0001	8.0002
p2	7.9991	7.9999	7.9999	8.0003	7.9998	7.9996	7.9996	7.9999	7.9995	8.0001
p3	7.9996	7.9998	7.9997	7.9997	7.9996	7.9995	7.9994	7.9998	7.9994	7.9995
p4	7.9990	7.9997	7.9996	7.9995	8.0000	7.9994	7.9993	7.9997	7.9992	7.9994
p5	7.9996	7.9998	7.9997	8.0001	7.9996	7.9994	7.9994	7.9998	7.9993	7.9994
p6	7.9998	8.0000	7.9994	7.9998	7.9998	7.9996	7.9996	7.9995	7.9995	7.9996
p7	7.9997	7.9999	7.9993	7.9992	7.9997	7.9989	7.9995	7.9994	7.9989	7.9995
p8	7.9996	7.9998	7.9996	7.9996	7.9996	7.9993	7.9994	7.9998	7.9993	7.9989
p9	7.9992	7.9999	7.9997	7.9996	7.9997	7.9988	7.9989	7.9994	7.9993	7.9995
p10	8.0000	7.9996	7.9999	7.9993	7.9999	7.9990	7.9991	7.9997	7.9996	7.9997
Media	7.9995	7.9998	7.9997	7.9997	7.9998	7.9994	7.9994	7.9998	7.9994	7.9996
Desv Est	0.0003	0.0001	0.0002	0.0004	0.0002	0.0004	0.0003	0.0003	0.0003	0.0004
urep	0.1003	0.0400	0.0705	0.1263	0.0755	0.1354	0.1027	0.0987	0.0954	0.1141

ANEXO I
TABLAS DE RESULTADOS
1º FASE DE EXPERIMENTACIÓN

Experimento abcd	Exp 9.1	Exp 9.2	Exp 9.3	Exp 9.4	Exp 9.5	Exp 9.6	Exp 9.7	Exp 9.8	Exp 9.9	Exp 9.10
p1	100.0000	100.0002	100.0003	100.0004	99.9998	99.9998	99.9994	99.9998	99.9998	100.0000
p2	99.9998	99.9995	99.9996	99.9997	99.9996	99.9991	99.9993	99.9996	99.9996	99.9993
p3	99.9991	99.9994	99.9994	99.9995	99.9994	99.9989	99.9996	99.9994	99.9989	99.9991
p4	99.9994	99.9997	99.9992	99.9997	99.9992	99.9997	99.9999	99.9997	99.9992	99.9990
p5	99.9993	99.9991	99.9995	99.9995	99.9995	99.9990	99.9993	99.9995	99.9995	99.9993
p6	99.9986	99.9989	99.9993	99.9993	99.9993	99.9988	99.9991	99.9993	99.9993	99.9991
p7	99.9989	99.9993	99.9995	99.9991	99.9991	99.9990	99.9994	99.9991	99.9991	99.9990
p8	99.9992	99.9991	99.9988	99.9994	99.9989	99.9988	99.9992	99.9989	99.9989	99.9988
p9	99.9985	99.9990	99.9991	99.9992	99.9992	99.9986	99.9991	99.9992	99.9992	99.9991
p10	99.9989	99.9993	99.9994	99.9990	99.9990	99.9989	99.9989	99.9990	99.9990	99.9999
Media	99.9992	99.9993	99.9994	99.9995	99.9993	99.9991	99.9993	99.9993	99.9993	99.9993
Desv Est	0.0005	0.0004	0.0004	0.0004	0.0003	0.0004	0.0003	0.0003	0.0003	0.0004
urep	0.1508	0.1204	0.1224	0.1246	0.0922	0.1215	0.0920	0.0914	0.0956	0.1276

Experimento ac	Exp 10.1	Exp 10.2	Exp 10.3	Exp 10.4	Exp 10.5	Exp 10.6	Exp 10.7	Exp 10.8	Exp 10.9	Exp 10.10
p1	8.0001	7.9999	8.0001	7.9997	7.9997	7.9996	7.9999	7.9998	7.9997	8.0003
p2	7.9999	7.9997	8.0000	7.9996	8.0000	7.9994	7.9998	7.9996	7.9996	7.9996
p3	7.9997	7.9995	7.9993	7.9994	7.9993	7.9992	7.9991	7.9994	7.9994	7.9994
p4	7.9994	7.9993	7.9996	7.9998	7.9991	7.9991	7.9995	7.9993	7.9992	7.9997
p5	7.9995	7.9994	7.9997	7.9999	7.9991	7.9997	7.9996	7.9993	7.9993	7.9997
p6	7.9995	7.9994	7.9997	7.9995	7.9991	7.9987	7.9992	7.9994	7.9994	7.9993
p7	7.9993	7.9992	7.9990	7.9993	7.9994	7.9991	7.9995	7.9992	7.9997	7.9996
p8	7.9991	7.9995	7.9999	7.9992	7.9992	7.9994	7.9994	7.9995	7.9996	7.9994
p9	7.9992	7.9996	7.9994	7.9993	7.9992	7.9990	7.9995	7.9991	7.9997	7.9990
p10	7.9992	7.9991	7.9995	7.9994	7.9992	7.9991	7.9996	7.9987	7.9993	7.9990
Media	7.9995	7.9995	7.9996	7.9995	7.9993	7.9992	7.9995	7.9993	7.9995	7.9995
Desv Est	0.0003	0.0002	0.0003	0.0002	0.0003	0.0003	0.0002	0.0003	0.0002	0.0004
urep	0.0952	0.0742	0.1042	0.0729	0.0984	0.0896	0.0783	0.1010	0.0607	0.1194

Experimento bc	Exp 11.1	Exp 11.2	Exp 11.3	Exp 11.4	Exp 11.5	Exp 11.6	Exp 11.7	Exp 11.8	Exp 11.9	Exp 11.10
p1	100.0000	99.9995	99.9996	99.9996	99.9994	100.0000	99.9994	99.9997	99.9998	99.9998
p2	99.9993	99.9993	99.9985	99.9990	99.9992	99.9994	99.9992	99.9995	99.9996	99.9997
p3	99.9991	99.9992	99.9988	99.9993	99.9986	99.9993	99.9990	99.9989	99.9995	99.9990
p4	99.9995	99.9995	99.9987	99.9992	99.9990	99.9992	99.9988	99.9987	99.9998	99.9993
p5	99.9993	99.9993	99.9991	99.9995	99.9988	99.9995	99.9992	99.9996	99.9996	99.9991
p6	99.9991	99.9992	99.9990	99.9994	99.9992	99.9994	99.9990	99.9994	99.9994	99.9989
p7	99.9989	99.9990	99.9989	99.9997	99.9985	99.9993	99.9988	99.9993	99.9992	99.9988
p8	99.9992	99.9994	99.9988	99.9996	99.9989	99.9992	99.9991	99.9991	99.9990	99.9991
p9	99.9986	99.9992	99.9987	99.9989	99.9988	99.9996	99.9990	99.9990	99.9988	99.9989
p10	99.9989	99.9990	99.9991	99.9993	99.9986	99.9995	99.9988	99.9988	99.9992	99.9987
Media	99.9992	99.9993	99.9989	99.9993	99.9989	99.9994	99.9990	99.9992	99.9994	99.9991
Desv Est	0.0004	0.0002	0.0003	0.0003	0.0003	0.0002	0.0002	0.0003	0.0003	0.0004
urep	0.1217	0.0530	0.0954	0.0854	0.0915	0.0760	0.0592	0.1083	0.1027	0.1171

Experimento a	Exp 12.1	Exp 12.2	Exp 12.3	Exp 12.4	Exp 12.5	Exp 12.6	Exp 12.7	Exp 12.8	Exp 12.9	Exp 12.10
p1	7.9999	7.9992	7.9996	7.9999	7.9999	7.9998	7.9996	7.9996	7.9997	7.9999
p2	7.9997	7.9990	7.9995	7.9997	7.9997	7.9996	7.9995	7.9995	7.9991	7.9992
p3	7.9995	7.9989	7.9993	7.9990	7.9995	7.9995	7.9993	7.9993	7.9989	7.9995
p4	7.9998	7.9987	7.9996	7.9992	7.9993	7.9988	7.9991	7.9996	7.9993	7.9994
p5	7.9994	7.9988	7.9992	7.9993	7.9994	7.9994	7.9991	7.9992	7.9994	7.9994
p6	7.9994	7.9988	7.9993	7.9993	7.9989	7.9989	7.9992	7.9993	7.9990	7.9995
p7	7.9992	7.9987	7.9991	7.9986	7.9992	7.9993	7.9990	7.9991	7.9993	7.9993
p8	7.9990	7.9990	7.9994	7.9988	7.9995	7.9991	7.9993	7.9989	7.9997	7.9997
p9	7.9991	7.9986	7.9990	7.9989	7.9996	7.9987	7.9988	7.9990	7.9993	7.9992
p10	7.9991	7.9986	7.9991	7.9984	7.9996	7.9987	7.9989	7.9991	7.9994	7.9993
Media	7.9994	7.9988	7.9993	7.9991	7.9995	7.9992	7.9992	7.9993	7.9993	7.9995
Desv Est	0.0003	0.0002	0.0002	0.0005	0.0003	0.0004	0.0003	0.0003	0.0003	0.0002
urep	0.1010	0.0643	0.0713	0.1498	0.0881	0.1251	0.0830	0.0796	0.0838	0.0655

ANEXO I

TABLAS DE RESULTADOS

1º FASE DE EXPERIMENTACIÓN

Experimento abc	Exp 13.1	Exp 13.2	Exp 13.3	Exp 13.4	Exp 13.5	Exp 13.6	Exp 13.7	Exp 13.8	Exp 13.9	Exp 13.10
p1	99.9995	99.9992	99.9994	99.9992	99.9995	99.9996	99.9994	99.9994	99.9997	99.9992
p2	99.9992	99.9989	99.9991	99.9990	99.9992	99.9993	99.9992	99.9992	99.9990	99.9994
p3	99.9990	99.9992	99.9994	99.9992	99.9994	99.9995	99.9994	99.9990	99.9987	99.9992
p4	99.9992	99.9990	99.9991	99.9995	99.9991	99.9993	99.9991	99.9992	99.9990	99.9989
p5	99.9989	99.9993	99.9994	99.9992	99.9993	99.9990	99.9989	99.9989	99.9992	99.9991
p6	99.9992	99.9991	99.9992	99.9990	99.9990	99.9987	99.9991	99.9992	99.9990	99.9994
p7	99.9989	99.9994	99.9994	99.9993	99.9992	99.9990	99.9989	99.9994	99.9992	99.9991
p8	99.9991	99.9996	99.9992	99.9990	99.9994	99.9992	99.9991	99.9992	99.9990	99.9988
p9	99.9989	99.9994	99.9994	99.9993	99.9991	99.9989	99.9988	99.9989	99.9992	99.9991
p10	99.9986	99.9992	99.9992	99.9990	99.9988	99.9992	99.9991	99.9992	99.9989	99.9993
Media	99.9990	99.9992	99.9993	99.9992	99.9992	99.9992	99.9991	99.9992	99.9991	99.9992
Desv Est	0.0002	0.0002	0.0001	0.0002	0.0002	0.0003	0.0002	0.0002	0.0003	0.0002
urep	0.0780	0.0668	0.0410	0.0522	0.0672	0.0831	0.0645	0.0582	0.0855	0.0609

Experimento ab	Exp 14.1	Exp 14.2	Exp 14.3	Exp 14.4	Exp 14.5	Exp 14.6	Exp 14.7	Exp 14.8	Exp 14.9	Exp 14.10
p1	99.9989	99.9992	99.9990	99.9990	99.9992	99.9992	99.9993	99.9996	99.9993	99.9990
p2	99.9991	99.9989	99.9987	99.9988	99.9989	99.9989	99.9985	99.9988	99.9991	99.9988
p3	99.9988	99.9991	99.9984	99.9985	99.9987	99.9992	99.9988	99.9990	99.9988	99.9991
p4	99.9986	99.9988	99.9986	99.9988	99.9984	99.9989	99.9985	99.9992	99.9991	99.9989
p5	99.9988	99.9990	99.9984	99.9985	99.9986	99.9992	99.9983	99.9990	99.9993	99.9986
p6	99.9985	99.9987	99.9986	99.9988	99.9983	99.9989	99.9985	99.9987	99.9986	99.9984
p7	99.9987	99.9989	99.9988	99.9985	99.9986	99.9992	99.9988	99.9989	99.9988	99.9987
p8	99.9990	99.9991	99.9985	99.9988	99.9983	99.9989	99.9990	99.9991	99.9991	99.9990
p9	99.9987	99.9988	99.9983	99.9985	99.9985	99.9992	99.9988	99.9989	99.9988	99.9987
p10	99.9984	99.9985	99.9985	99.9983	99.9982	99.9994	99.9985	99.9986	99.9991	99.9985
Media	99.9988	99.9989	99.9986	99.9986	99.9986	99.9991	99.9987	99.9990	99.9990	99.9988
Desv Est	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0003	0.0002	0.0003	0.0003	0.0002	0.0002
urep	0.0679	0.0677	0.0667	0.0675	0.0967	0.0534	0.0914	0.0896	0.0748	0.0703

Experimento d	Exp 15.1	Exp 15.2	Exp 15.3	Exp 15.4	Exp 15.5	Exp 15.6	Exp 15.7	Exp 15.8	Exp 15.9	Exp 15.10
p1	7.9997	8.0000	8.0000	7.9996	8.0000	8.0003	8.0004	7.9997	8.0000	7.9998
p2	7.9999	7.9996	7.9996	7.9998	8.0001	8.0000	8.0000	7.9994	7.9997	7.9995
p3	7.9996	7.9997	7.9998	7.9995	7.9993	8.0002	8.0002	7.9995	7.9995	7.9996
p4	7.9993	7.9994	8.0000	7.9991	7.9995	7.9999	7.9998	7.9997	7.9997	7.9993
p5	7.9990	7.9995	7.9996	7.9993	7.9991	8.0001	8.0000	7.9993	7.9994	7.9995
p6	7.9998	7.9996	7.9993	7.9995	7.9993	7.9993	7.9996	7.9995	7.9996	7.9992
p7	7.9995	7.9992	7.9995	7.9992	7.9995	8.0000	7.9993	7.9996	7.9998	7.9994
p8	7.9997	7.9989	7.9992	7.9988	7.9992	7.9997	7.9994	7.9993	7.9996	7.9990
p9	7.9995	7.9990	7.9993	7.9990	7.9993	7.9994	7.9996	7.9989	7.9998	7.9992
p10	7.9997	7.9991	7.9995	7.9992	7.9990	7.9996	7.9997	7.9991	8.0000	7.9994
Media	7.9996	7.9994	7.9996	7.9993	7.9994	7.9998	7.9998	7.9994	7.9997	7.9994
Desv Est	0.0002	0.0004	0.0003	0.0003	0.0004	0.0003	0.0003	0.0003	0.0002	0.0002
urep	0.0779	0.1141	0.0863	0.0919	0.1117	0.1080	0.1103	0.0839	0.0683	0.0736

Experimento ad	Exp 16.1	Exp 16.2	Exp 16.3	Exp 16.4	Exp 16.5	Exp 16.6	Exp 16.7	Exp 16.8	Exp 16.9	Exp 16.10
p1	8.0004	8.0002	8.0000	8.0000	8.0001	8.0001	7.9999	8.0001	7.9997	8.0003
p2	7.9999	8.0002	8.0000	7.9995	8.0001	8.0001	7.9994	8.0001	7.9997	8.0004
p3	7.9999	7.9997	7.9996	7.9996	7.9996	7.9996	7.9999	7.9996	7.9993	7.9999
p4	7.9999	7.9997	7.9996	7.9996	7.9996	7.9997	7.9994	7.9995	7.9993	7.9999
p5	7.9997	7.9996	7.9995	7.9995	7.9995	7.9996	7.9993	7.9994	7.9992	7.9998
p6	7.9994	7.9997	7.9996	7.9996	7.9996	7.9997	7.9994	7.9995	7.9994	8.0000
p7	7.9994	7.9997	7.9997	7.9997	7.9996	7.9997	7.9994	7.9995	7.9995	8.0005
p8	7.9999	8.0002	7.9997	7.9997	7.9996	7.9998	7.9999	7.9994	7.9995	8.0005
p9	7.9992	7.9996	7.9996	7.9996	7.9995	7.9997	7.9998	7.9993	7.9994	8.0004
p10	7.9994	7.9997	7.9997	7.9992	7.9991	7.9998	7.9989	7.9994	7.9991	8.0001
Media	7.9997	7.9998	7.9997	7.9996	7.9996	7.9998	7.9996	7.9996	7.9994	8.0002
Desv Est	0.0003	0.0003	0.0002	0.0002	0.0003	0.0002	0.0003	0.0003	0.0002	0.0003
urep	0.1103	0.0831	0.0582	0.0607	0.0925	0.0581	0.1055	0.0908	0.0594	0.0863

ANEXO I

TABLAS DE RESULTADOS

1º FASE DE EXPERIMENTACIÓN

Experimento bd	Exp 1.1	Exp 1.2	Exp 1.3	Exp 1.4	Exp 1.5	Exp 1.6	Exp 1.7	Exp 1.8	Exp 1.9	Exp 1.10
<i>urep</i>	0.1022	0.1440	0.0916	0.1005	0.1082	0.1329	0.1582	0.1007	0.1394	0.1105
<i>up</i>	0.1150	0.1150	0.1150	0.1150	0.1150	0.1150	0.1150	0.1150	0.1150	0.1150
<i>ures</i>	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866
<i>uesf</i>	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500
<i>upunta</i>	0.6000	0.6000	0.6000	0.6000	0.6000	0.6000	0.6000	0.6000	0.6000	0.6000
<i>uΔT</i>	0.6235	0.6235	0.6235	0.6235	0.6235	0.6235	0.6235	0.6235	0.6235	0.6235
<i>uMMC</i>	0.1111	0.1111	0.1111	0.1111	0.1111	0.1111	0.1111	0.1111	0.1111	0.1111
<i>u</i>	0.8985	0.9042	0.8974	0.8983	0.8992	0.9025	0.9066	0.8983	0.9035	0.8995

Experimento 1	Exp 2.1	Exp 2.2	Exp 2.3	Exp 2.4	Exp 2.5	Exp 2.6	Exp 2.7	Exp 2.8	Exp 2.9	Exp 2.10
<i>urep</i>	0.0929	0.0997	0.1154	0.0771	0.0870	0.1090	0.0814	0.1166	0.1414	0.1473
<i>up</i>	0.0520	0.0520	0.0520	0.0520	0.0520	0.0520	0.0520	0.0520	0.0520	0.0520
<i>ures</i>	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866
<i>uesf</i>	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500
<i>upunta</i>	0.6000	0.6000	0.6000	0.6000	0.6000	0.6000	0.6000	0.6000	0.6000	0.6000
<i>uΔT</i>	0.0499	0.0499	0.0499	0.0499	0.0499	0.0499	0.0499	0.0499	0.0499	0.0499
<i>uMMC</i>	0.0549	0.0549	0.0549	0.0549	0.0549	0.0549	0.0549	0.0549	0.0549	0.0549
<i>u</i>	0.6319	0.6330	0.6356	0.6310	0.6311	0.6345	0.6310	0.6358	0.6409	0.6422

Experimento abd	Exp 3.1	Exp 3.2	Exp 3.3	Exp 3.4	Exp 3.5	Exp 3.6	Exp 3.7	Exp 3.8	Exp 3.9	Exp 3.10
<i>urep</i>	0.0946	0.1031	0.1098	0.1252	0.1185	0.1119	0.0698	0.0785	0.1004	0.1461
<i>up</i>	0.1150	0.1150	0.1150	0.1150	0.1150	0.1150	0.1150	0.1150	0.1150	0.1150
<i>ures</i>	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866
<i>uesf</i>	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500
<i>upunta</i>	0.4000	0.4000	0.4000	0.4000	0.4000	0.4000	0.4000	0.4000	0.4000	0.4000
<i>uΔT</i>	0.6235	0.6235	0.6235	0.6235	0.6235	0.6235	0.6235	0.6235	0.6235	0.6235
<i>uMMC</i>	0.1111	0.1111	0.1111	0.1111	0.1111	0.1111	0.1111	0.1111	0.1111	0.1111
<i>u</i>	0.7783	0.7794	0.7803	0.7827	0.7816	0.7806	0.7774	0.7774	0.7791	0.7863

Experimento c	Exp 4.1	Exp 4.2	Exp 4.3	Exp 4.4	Exp 4.5	Exp 4.6	Exp 4.7	Exp 4.8	Exp 4.9	Exp 4.10
<i>urep</i>	0.1146	0.0624	0.1187	0.0552	0.0807	0.0821	0.0857	0.1101	0.0753	0.1153
<i>up</i>	0.0520	0.0520	0.0520	0.0520	0.0520	0.0520	0.0520	0.0520	0.0520	0.0520
<i>ures</i>	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866
<i>uesf</i>	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500
<i>upunta</i>	0.3000	0.3000	0.3000	0.3000	0.3000	0.3000	0.3000	0.3000	0.3000	0.3000
<i>uΔT</i>	0.0499	0.0499	0.0499	0.0499	0.0499	0.0499	0.0499	0.0499	0.0499	0.0499
<i>uMMC</i>	0.0549	0.0549	0.0549	0.0549	0.0549	0.0549	0.0549	0.0549	0.0549	0.0549
<i>u</i>	0.3658	0.3581	0.3671	0.3581	0.3581	0.3581	0.3581	0.3645	0.3581	0.3661

Experimento cd	Exp 5.1	Exp 5.2	Exp 5.3	Exp 5.4	Exp 5.5	Exp 5.6	Exp 5.7	Exp 5.8	Exp 5.9	Exp 5.10
<i>urep</i>	0.1025	0.0752	0.0848	0.1017	0.1112	0.1176	0.0443	0.0800	0.0806	0.0938
<i>up</i>	0.0520	0.0520	0.0520	0.0520	0.0520	0.0520	0.0520	0.0520	0.0520	0.0520
<i>ures</i>	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866
<i>uesf</i>	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500
<i>upunta</i>	0.3000	0.3000	0.3000	0.3000	0.3000	0.3000	0.3000	0.3000	0.3000	0.3000
<i>uΔT</i>	0.0499	0.0499	0.0499	0.0499	0.0499	0.0499	0.0499	0.0499	0.0499	0.0499
<i>uMMC</i>	0.0549	0.0549	0.0549	0.0549	0.0549	0.0549	0.0549	0.0549	0.0549	0.0549
<i>u</i>	0.3622	0.3581	0.3581	0.3620	0.3648	0.3668	0.3581	0.3581	0.3581	0.3599

ANEXO I

TABLAS DE RESULTADOS

1° FASE DE EXPERIMENTACIÓN

Experimento bcd	Exp 6.1	Exp 6.2	Exp 6.3	Exp 6.4	Exp 6.5	Exp 6.6	Exp 6.7	Exp 6.8	Exp 6.9	Exp 6.10
<i>urep</i>	0.1013	0.0790	0.1172	0.1433	0.1164	0.1179	0.0904	0.0877	0.1236	0.0862
<i>up</i>	0.1150	0.1150	0.1150	0.1150	0.1150	0.1150	0.1150	0.1150	0.1150	0.1150
<i>ures</i>	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866
<i>uesf</i>	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500
<i>upunta</i>	0.3000	0.3000	0.3000	0.3000	0.3000	0.3000	0.3000	0.3000	0.3000	0.3000
<i>uΔT</i>	0.6235	0.6235	0.6235	0.6235	0.6235	0.6235	0.6235	0.6235	0.6235	0.6235
<i>uMMC</i>	0.1111	0.1111	0.1111	0.1111	0.1111	0.1111	0.1111	0.1111	0.1111	0.1111
<i>u</i>	0.7329	0.7310	0.7353	0.7399	0.7351	0.7354	0.7315	0.7311	0.7363	0.7310

Experimento b	Exp 7.1	Exp 7.2	Exp 7.3	Exp 7.4	Exp 7.5	Exp 7.6	Exp 7.7	Exp 7.8	Exp 7.9	Exp 7.10
<i>urep</i>	0.1260	0.1015	0.1273	0.0994	0.0898	0.1578	0.1570	0.0830	0.0995	0.1408
<i>up</i>	0.1150	0.1150	0.1150	0.1150	0.1150	0.1150	0.1150	0.1150	0.1150	0.1150
<i>ures</i>	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866
<i>uesf</i>	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500
<i>upunta</i>	0.3000	0.3000	0.3000	0.3000	0.3000	0.3000	0.3000	0.3000	0.3000	0.3000
<i>uΔT</i>	0.6235	0.6235	0.6235	0.6235	0.6235	0.6235	0.6235	0.6235	0.6235	0.6235
<i>uMMC</i>	0.1111	0.1111	0.1111	0.1111	0.1111	0.1111	0.1111	0.1111	0.1111	0.1111
<i>u</i>	0.7367	0.7329	0.7369	0.7326	0.7314	0.7428	0.7426	0.7310	0.7326	0.7394

Experimento acd	Exp 8.1	Exp 8.2	Exp 8.3	Exp 8.4	Exp 8.5	Exp 8.6	Exp 8.7	Exp 8.8	Exp 8.9	Exp 8.10
<i>urep</i>	0.1003	0.0400	0.0705	0.1263	0.0755	0.1354	0.1027	0.0987	0.0954	0.1141
<i>up</i>	0.0520	0.0520	0.0520	0.0520	0.0520	0.0520	0.0520	0.0520	0.0520	0.0520
<i>ures</i>	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866
<i>uesf</i>	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500
<i>upunta</i>	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000
<i>uΔT</i>	0.0499	0.0499	0.0499	0.0499	0.0499	0.0499	0.0499	0.0499	0.0499	0.0499
<i>uMMC</i>	0.0549	0.0549	0.0549	0.0549	0.0549	0.0549	0.0549	0.0549	0.0549	0.0549
<i>u</i>	0.5392	0.5368	0.5368	0.5447	0.5368	0.5469	0.5397	0.5389	0.5383	0.5420

Experimento abcd	Exp 9.1	Exp 9.2	Exp 9.3	Exp 9.4	Exp 9.5	Exp 9.6	Exp 9.7	Exp 9.8	Exp 9.9	Exp 9.10
<i>urep</i>	0.1508	0.1204	0.1224	0.1246	0.0922	0.1215	0.0920	0.0914	0.0956	0.1276
<i>up</i>	0.1150	0.1150	0.1150	0.1150	0.1150	0.1150	0.1150	0.1150	0.1150	0.1150
<i>ures</i>	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866
<i>uesf</i>	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500
<i>upunta</i>	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000
<i>uΔT</i>	0.6235	0.6235	0.6235	0.6235	0.6235	0.6235	0.6235	0.6235	0.6235	0.6235
<i>uMMC</i>	0.1111	0.1111	0.1111	0.1111	0.1111	0.1111	0.1111	0.1111	0.1111	0.1111
<i>u</i>	0.8424	0.8375	0.8378	0.8381	0.8339	0.8376	0.8339	0.8338	0.8343	0.8385

Experimento ac	Exp 10.1	Exp 10.2	Exp 10.3	Exp 10.4	Exp 10.5	Exp 10.6	Exp 10.7	Exp 10.8	Exp 10.9	Exp 10.10
<i>urep</i>	0.0952	0.0742	0.1042	0.0729	0.0984	0.0896	0.0783	0.1010	0.0607	0.1194
<i>up</i>	0.0520	0.0520	0.0520	0.0520	0.0520	0.0520	0.0520	0.0520	0.0520	0.0520
<i>ures</i>	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866
<i>uesf</i>	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500
<i>upunta</i>	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000
<i>uΔT</i>	0.0499	0.0499	0.0499	0.0499	0.0499	0.0499	0.0499	0.0499	0.0499	0.0499
<i>uMMC</i>	0.0549	0.0549	0.0549	0.0549	0.0549	0.0549	0.0549	0.0549	0.0549	0.0549
<i>u</i>	0.5383	0.5368	0.5400	0.5368	0.5389	0.5373	0.5368	0.5394	0.5368	0.5431

ANEXO I

TABLAS DE RESULTADOS

1° FASE DE EXPERIMENTACIÓN

Experimento bc	Exp 11.1	Exp 11.2	Exp 11.3	Exp 11.4	Exp 11.5	Exp 11.6	Exp 11.7	Exp 11.8	Exp 11.9	Exp 11.10
<i>urep</i>	0.1217	0.0530	0.0954	0.0854	0.0915	0.0760	0.0592	0.1083	0.1027	0.1171
<i>up</i>	0.1150	0.1150	0.1150	0.1150	0.1150	0.1150	0.1150	0.1150	0.1150	0.1150
<i>ures</i>	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866
<i>uesf</i>	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500
<i>upunta</i>	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000
<i>uΔT</i>	0.6235	0.6235	0.6235	0.6235	0.6235	0.6235	0.6235	0.6235	0.6235	0.6235
<i>uMMC</i>	0.1111	0.1111	0.1111	0.1111	0.1111	0.1111	0.1111	0.1111	0.1111	0.1111
<i>u</i>	0.8377	0.8333	0.8343	0.8333	0.8338	0.8333	0.8333	0.8358	0.8351	0.8370

Experimento a	Exp 12.1	Exp 12.2	Exp 12.3	Exp 12.4	Exp 12.5	Exp 12.6	Exp 12.7	Exp 12.8	Exp 12.9	Exp 12.10
<i>urep</i>	0.1010	0.0643	0.0713	0.1498	0.0881	0.1251	0.0830	0.0796	0.0838	0.0655
<i>up</i>	0.0520	0.0520	0.0520	0.0520	0.0520	0.0520	0.0520	0.0520	0.0520	0.0520
<i>ures</i>	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866
<i>uesf</i>	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500
<i>upunta</i>	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000
<i>uΔT</i>	0.0499	0.0499	0.0499	0.0499	0.0499	0.0499	0.0499	0.0499	0.0499	0.0499
<i>uMMC</i>	0.0549	0.0549	0.0549	0.0549	0.0549	0.0549	0.0549	0.0549	0.0549	0.0549
<i>u</i>	0.5394	0.5368	0.5368	0.5506	0.5371	0.5444	0.5368	0.5368	0.5368	0.5368

Experimento abc	Exp 13.1	Exp 13.2	Exp 13.3	Exp 13.4	Exp 13.5	Exp 13.6	Exp 13.7	Exp 13.8	Exp 13.9	Exp 13.10
<i>urep</i>	0.0780	0.0668	0.0410	0.0522	0.0672	0.0831	0.0645	0.0582	0.0855	0.0609
<i>up</i>	0.1150	0.1150	0.1150	0.1150	0.1150	0.1150	0.1150	0.1150	0.1150	0.1150
<i>ures</i>	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866
<i>uesf</i>	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500
<i>upunta</i>	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000
<i>uΔT</i>	0.6235	0.6235	0.6235	0.6235	0.6235	0.6235	0.6235	0.6235	0.6235	0.6235
<i>uMMC</i>	0.1111	0.1111	0.1111	0.1111	0.1111	0.1111	0.1111	0.1111	0.1111	0.1111
<i>u</i>	0.8333	0.8333	0.8333	0.8333	0.8333	0.8333	0.8333	0.8333	0.8333	0.8333

Experimento ab	Exp 14.1	Exp 14.2	Exp 14.3	Exp 14.4	Exp 14.5	Exp 14.6	Exp 14.7	Exp 14.8	Exp 14.9	Exp 14.10
<i>urep</i>	0.0679	0.0677	0.0667	0.0675	0.0967	0.0534	0.0914	0.0896	0.0748	0.0703
<i>up</i>	0.1150	0.1150	0.1150	0.1150	0.1150	0.1150	0.1150	0.1150	0.1150	0.1150
<i>ures</i>	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866
<i>uesf</i>	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500
<i>upunta</i>	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000
<i>uΔT</i>	0.6235	0.6235	0.6235	0.6235	0.6235	0.6235	0.6235	0.6235	0.6235	0.6235
<i>uMMC</i>	0.1111	0.1111	0.1111	0.1111	0.1111	0.1111	0.1111	0.1111	0.1111	0.1111
<i>u</i>	0.8333	0.8333	0.8333	0.8333	0.8344	0.8333	0.8338	0.8336	0.8333	0.8333

Experimento d	Exp 15.1	Exp 15.2	Exp 15.3	Exp 15.4	Exp 15.5	Exp 15.6	Exp 15.7	Exp 15.8	Exp 15.9	Exp 15.10
<i>urep</i>	0.0779	0.1141	0.0863	0.0919	0.1117	0.1080	0.1103	0.0839	0.0683	0.0736
<i>up</i>	0.0520	0.0520	0.0520	0.0520	0.0520	0.0520	0.0520	0.0520	0.0520	0.0520
<i>ures</i>	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866
<i>uesf</i>	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500
<i>upunta</i>	0.2000	0.2000	0.2000	0.2000	0.2000	0.2000	0.2000	0.2000	0.2000	0.2000
<i>uΔT</i>	0.0499	0.0499	0.0499	0.0499	0.0499	0.0499	0.0499	0.0499	0.0499	0.0499
<i>uMMC</i>	0.0549	0.0549	0.0549	0.0549	0.0549	0.0549	0.0549	0.0549	0.0549	0.0549
<i>u</i>	0.2797	0.2894	0.2797	0.2813	0.2884	0.2870	0.2879	0.2797	0.2797	0.2797

ANEXO I
TABLAS DE RESULTADOS
1° FASE DE EXPERIMENTACIÓN

<i>Experimento ad</i>	<i>Exp 16.1</i>	<i>Exp 16.2</i>	<i>Exp 16.3</i>	<i>Exp 16.4</i>	<i>Exp 16.5</i>	<i>Exp 16.6</i>	<i>Exp 16.7</i>	<i>Exp 16.8</i>	<i>Exp 16.9</i>	<i>Exp 16.10</i>
<i>urep</i>	0.1103	0.0831	0.0582	0.0607	0.0925	0.0581	0.1055	0.0908	0.0594	0.0863
<i>up</i>	0.0520	0.0520	0.0520	0.0520	0.0520	0.0520	0.0520	0.0520	0.0520	0.0520
<i>ures</i>	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866
<i>uesf</i>	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500
<i>upunta</i>	0.7000	0.7000	0.7000	0.7000	0.7000	0.7000	0.7000	0.7000	0.7000	0.7000
<i>uΔT</i>	0.0499	0.0499	0.0499	0.0499	0.0499	0.0499	0.0499	0.0499	0.0499	0.0499
<i>uMMC</i>	0.0549	0.0549	0.0549	0.0549	0.0549	0.0549	0.0549	0.0549	0.0549	0.0549
<i>u</i>	0.7300	0.7268	0.7268	0.7268	0.7275	0.7268	0.7293	0.7273	0.7268	0.7268

ANEXO J
TABLAS DE RESULTADOS
2° FASE DE EXPERIMENTACIÓN

Experimento c	Exp 1.1	Exp 1.2	Exp 1.3	Exp 1.4	Exp 1.5	Exp 1.6	Exp 1.7	Exp 1.8
p1	8.0004	8.0002	7.9998	8.0005	8.0005	8.0000	8.0005	8.0002
p2	8.0001	8.0004	7.9995	7.9997	7.9997	8.0003	8.0002	7.9999
p3	7.9999	8.0002	7.9998	8.0000	8.0000	7.9995	7.9995	7.9997
p4	7.9997	8.0005	7.9996	8.0003	8.0003	8.0003	7.9998	7.9995
p5	7.9995	7.9998	7.9994	7.9996	8.0000	8.0001	8.0000	7.9998
p6	7.9998	8.0005	7.9997	8.0004	7.9998	7.9999	7.9998	7.9996
p7	8.0001	7.9998	8.0000	8.0001	8.0006	7.9997	8.0001	7.9998
p8	7.9998	8.0001	7.9997	8.0004	7.9999	8.0000	7.9999	8.0001
p9	8.0001	8.0004	8.0000	8.0002	8.0002	8.0002	8.0002	7.9999
p10	8.0001	8.0004	8.0001	8.0002	8.0002	8.0003	7.9997	7.9999
Media	7.9999	8.0002	7.9998	8.0001	8.0001	8.0000	8.0000	7.9998
Desv Est	0.000265	0.000273	0.000212	0.000294	0.000287	0.000269	0.000285	0.000219
urep	0.08	0.09	0.07	0.09	0.09	0.09	0.09	0.07

Experimento ab	Exp 2.1	Exp 2.2	Exp 2.3	Exp 2.4	Exp 2.5	Exp 2.6	Exp 2.7	Exp 2.8
p1	100.0006	100.0003	100.0002	100.0003	100.0006	100.0003	100.0003	100.0000
p2	100.0001	99.9998	100.0002	100.0003	99.9996	99.9998	99.9998	100.0001
p3	100.0001	99.9999	99.9997	99.9998	99.9997	99.9998	99.9999	99.9996
p4	100.0002	100.0004	100.0002	100.0003	100.0002	100.0003	100.0004	100.0001
p5	100.0002	99.9994	99.9997	99.9998	99.9997	99.9998	99.9999	100.0001
p6	99.9997	99.9999	99.9998	99.9998	99.9997	99.9998	99.9999	100.0001
p7	99.9997	99.9999	100.0003	99.9999	100.0002	99.9998	99.9999	100.0001
p8	99.9992	99.9999	99.9998	99.9999	99.9997	99.9998	99.9994	99.9996
p9	99.9997	99.9999	99.9993	99.9999	99.9997	99.9998	99.9994	99.9996
p10	99.9997	99.9999	99.9998	99.9999	99.9997	99.9998	99.9999	100.0001
Media	99.9999	99.9999	99.9999	100.0000	99.9999	99.9999	99.9999	99.9999
Desv Est	0.000404	0.000276	0.000323	0.000224	0.000339	0.000199	0.000317	0.000236
urep	0.13	0.09	0.10	0.07	0.11	0.06	0.10	0.07

Experimento 1	Exp 3.1	Exp 3.2	Exp 3.3	Exp 3.4	Exp 3.5	Exp 3.6	Exp 3.7	Exp 3.8
p1	8.0005	8.0004	8.0003	8.0005	8.0005	8.0005	8.0003	8.0001
p2	8.0002	8.0006	8.0001	8.0002	8.0002	8.0002	8.0000	8.0003
p3	8.0000	7.9998	8.0003	8.0000	8.0000	8.0005	8.0003	8.0001
p4	8.0002	8.0001	8.0001	7.9997	8.0003	8.0002	8.0001	7.9999
p5	8.0000	8.0004	8.0004	8.0005	8.0005	8.0005	7.9998	8.0001
p6	8.0003	7.9996	7.9996	8.0003	8.0003	8.0003	8.0001	7.9999
p7	8.0005	7.9999	8.0004	8.0005	8.0006	8.0005	7.9999	8.0002
p8	8.0003	8.0002	8.0002	8.0003	8.0003	8.0008	8.0001	8.0004
p9	8.0006	8.0004	7.9999	8.0001	8.0001	8.0006	8.0004	8.0002
p10	8.0006	8.0000	8.0004	8.0001	8.0001	8.0006	8.0004	8.0002
Media	8.0003	8.0001	8.0002	8.0002	8.0003	8.0005	8.0001	8.0001
Desv Est	0.000220	0.000300	0.000256	0.000252	0.000191	0.000182	0.000206	0.000170
urep	0.07	0.09	0.08	0.08	0.06	0.06	0.07	0.05

Experimento abc	Exp 4.1	Exp 4.2	Exp 4.3	Exp 4.4	Exp 4.5	Exp 4.6	Exp 4.7	Exp 4.8
p1	100.0001	100.0002	100.0001	100.0003	100.0004	100.0007	100.0005	100.0006
p2	100.0002	99.9997	100.0002	99.9998	100.0000	100.0002	99.9995	100.0001
p3	99.9997	99.9998	100.0002	99.9999	100.0000	99.9998	99.9996	100.0002
p4	99.9998	100.0004	100.0003	99.9999	100.0001	100.0004	99.9997	99.9997
p5	99.9993	99.9999	99.9998	100.0000	99.9997	99.9999	100.0002	99.9998
p6	99.9999	100.0000	99.9999	99.9996	99.9997	100.0000	99.9998	99.9999
p7	100.0000	100.0000	100.0000	100.0001	100.0003	100.0000	100.0003	99.9999
p8	99.9995	100.0001	100.0000	99.9997	99.9999	100.0001	99.9999	100.0000
p9	99.9996	100.0002	100.0001	99.9998	99.9999	100.0002	100.0000	100.0000
p10	100.0001	100.0002	99.9996	99.9998	100.0000	100.0002	100.0000	100.0001
Media	99.9998	100.0001	100.0000	99.9999	100.0000	100.0002	99.9999	100.0000
Desv Est	0.000281	0.000196	0.000189	0.000208	0.000234	0.000249	0.000321	0.000234
urep	0.09	0.06	0.06	0.07	0.07	0.08	0.10	0.07

ANEXO J
TABLAS DE RESULTADOS
2° FASE DE EXPERIMENTACIÓN

<i>Experimento a</i>	Exp 5.1	Exp 5.2	Exp 5.3	Exp 5.4	Exp 5.5	Exp 5.6	Exp 5.7	Exp 5.8
<i>p1</i>	8.0003	8.0002	8.0003	7.9997	7.9997	8.0004	8.0003	8.0003
<i>p2</i>	8.0001	7.9999	7.9995	8.0000	7.9999	8.0002	8.0000	8.0001
<i>p3</i>	8.0003	7.9997	7.9998	7.9997	7.9997	7.9999	8.0003	8.0003
<i>p4</i>	8.0001	7.9999	8.0000	8.0000	7.9999	8.0002	8.0000	8.0001
<i>p5</i>	8.0004	7.9997	7.9998	7.9998	7.9997	8.0000	8.0003	8.0004
<i>p6</i>	8.0001	7.9995	8.0001	7.9995	8.0000	7.9998	8.0000	8.0001
<i>p7</i>	8.0004	7.9998	8.0003	8.0003	8.0002	8.0005	7.9998	8.0004
<i>p8</i>	8.0002	7.9995	7.9996	7.9996	7.9995	8.0003	8.0001	8.0002
<i>p9</i>	8.0004	7.9998	7.9999	7.9999	8.0003	8.0001	7.9999	8.0005
<i>p10</i>	8.0000	7.9998	7.9999	7.9999	8.0003	8.0001	8.0004	8.0000
<i>Media</i>	8.0002	7.9998	7.9999	7.9998	7.9999	8.0001	8.0001	8.0002
<i>Desv Est</i>	0.000161	0.000202	0.000266	0.000224	0.000280	0.000228	0.000188	0.000166
<i>urep</i>	0.05	0.06	0.08	0.07	0.09	0.07	0.06	0.05

<i>Experimento ac</i>	Exp 6.1	Exp 6.2	Exp 6.3	Exp 6.4	Exp 6.5	Exp 6.6	Exp 6.7	Exp 6.8
<i>p1</i>	7.9999	8.0000	8.0001	8.0000	8.0000	8.0000	8.0000	8.0004
<i>p2</i>	8.0001	7.9997	8.0003	7.9998	8.0003	7.9998	7.9998	8.0001
<i>p3</i>	7.9999	8.0000	8.0001	8.0000	8.0000	8.0001	8.0000	7.9999
<i>p4</i>	8.0002	8.0003	7.9999	7.9998	8.0003	7.9999	7.9998	8.0002
<i>p5</i>	7.9995	8.0001	8.0002	8.0001	8.0001	8.0001	7.9996	8.0000
<i>p6</i>	7.9998	7.9999	8.0005	7.9999	7.9999	7.9999	7.9999	7.9997
<i>p7</i>	8.0000	8.0002	7.9998	7.9997	8.0002	8.0002	8.0001	8.0000
<i>p8</i>	7.9998	8.0000	8.0001	7.9994	8.0000	8.0000	7.9999	8.0003
<i>p9</i>	8.0001	8.0002	8.0008	7.9997	8.0003	8.0003	8.0002	8.0006
<i>p10</i>	8.0002	8.0003	8.0004	7.9998	8.0003	7.9998	8.0003	8.0002
<i>Media</i>	7.9999	8.0001	8.0002	7.9998	8.0001	8.0000	8.0000	8.0001
<i>Desv Est</i>	0.000224	0.000182	0.000303	0.000190	0.000154	0.000165	0.000215	0.000246
<i>urep</i>	0.07	0.06	0.10	0.06	0.05	0.05	0.07	0.08

<i>Experimento b</i>	Exp 7.1	Exp 7.2	Exp 7.3	Exp 7.4	Exp 7.5	Exp 7.6	Exp 7.7	Exp 7.8
<i>p1</i>	99.9997	100.0000	100.0000	100.0001	100.0004	99.9998	99.9999	99.9998
<i>p2</i>	99.9993	99.9995	99.9990	99.9996	99.9994	99.9993	99.9994	99.9999
<i>p3</i>	99.9993	99.9996	99.9996	99.9997	100.0000	99.9999	99.9995	99.9999
<i>p4</i>	99.9994	100.0001	99.9996	99.9992	100.0000	99.9994	100.0000	99.9995
<i>p5</i>	99.9989	99.9997	99.9992	99.9998	99.9996	99.9995	99.9996	99.9995
<i>p6</i>	99.9995	99.9997	99.9997	99.9993	100.0001	99.9995	99.9996	99.9996
<i>p7</i>	100.0000	99.9998	99.9993	99.9994	99.9997	100.0001	99.9997	99.9996
<i>p8</i>	99.9990	99.9993	99.9993	99.9994	99.9992	99.9996	99.9997	99.9997
<i>p9</i>	99.9991	99.9993	99.9994	99.9995	99.9998	99.9997	99.9998	99.9997
<i>p10</i>	99.9996	99.9994	99.9994	99.9990	99.9993	99.9997	99.9998	99.9998
<i>Media</i>	99.9994	99.9996	99.9995	99.9995	99.9997	99.9997	99.9997	99.9997
<i>Desv Est</i>	0.000335	0.000262	0.000282	0.000302	0.000376	0.000224	0.000184	0.000152
<i>urep</i>	0.11	0.08	0.09	0.10	0.12	0.07	0.06	0.05

<i>Experimento bc</i>	Exp 8.1	Exp 8.2	Exp 8.3	Exp 8.4	Exp 8.5	Exp 8.6	Exp 8.7	Exp 8.8
<i>p1</i>	100.0001	99.9999	100.0001	100.0000	100.0003	100.0004	100.0002	100.0000
<i>p2</i>	99.9996	99.9994	99.9997	99.9996	99.9993	99.9999	99.9998	99.9996
<i>p3</i>	99.9997	100.0000	99.9997	99.9996	99.9998	99.9999	99.9998	99.9996
<i>p4</i>	99.9997	100.0000	99.9997	99.9996	99.9999	100.0000	99.9998	99.9996
<i>p5</i>	99.9992	99.9995	99.9998	99.9997	99.9999	100.0000	99.9994	99.9997
<i>p6</i>	99.9998	99.9991	99.9998	99.9992	99.9994	99.9995	99.9999	99.9997
<i>p7</i>	99.9998	99.9996	99.9999	99.9992	99.9995	100.0001	99.9999	99.9997
<i>p8</i>	99.9993	99.9996	99.9999	99.9993	99.9995	100.0001	99.9995	99.9993
<i>p9</i>	99.9994	99.9992	99.9999	99.9993	99.9995	100.0001	100.0000	99.9998
<i>p10</i>	99.9994	99.9997	99.9995	99.9993	99.9996	99.9997	100.0000	99.9993
<i>Media</i>	99.9996	99.9996	99.9998	99.9995	99.9997	100.0000	99.9998	99.9996
<i>Desv Est</i>	0.000264	0.000315	0.000179	0.000261	0.000291	0.000235	0.000258	0.000218
<i>urep</i>	0.0834	0.0995	0.0567	0.0824	0.0919	0.0744	0.0817	0.0689

ANEXO J

TABLAS DE RESULTADOS

2° FASE DE EXPERIMENTACIÓN

Experimento c	Exp 1.1	Exp 1.2	Exp 1.3	Exp 1.4	Exp 1.5	Exp 1.6	Exp 1.7	Exp 1.8
<i>urep</i>	0.0839	0.0863	0.0671	0.0930	0.0908	0.0851	0.0901	0.0692
<i>up</i>	0.0520	0.0520	0.0520	0.0520	0.0520	0.0520	0.0520	0.0520
<i>ures</i>	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866
<i>uesf</i>	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500
<i>upunta</i>	0.7000	0.7000	0.7000	0.7000	0.7000	0.7000	0.7000	0.7000
<i>uΔT</i>	0.0499	0.0499	0.0499	0.0499	0.0499	0.0499	0.0499	0.0499
<i>uMMC</i>	0.0549	0.0549	0.0549	0.0549	0.0549	0.0549	0.0549	0.0549
<i>u</i>	0.7268	0.7268	0.7268	0.7276	0.7273	0.7268	0.7272	0.7268

Experimento ab	Exp 2.1	Exp 2.2	Exp 2.3	Exp 2.4	Exp 2.5	Exp 2.6	Exp 2.7	Exp 2.8
<i>urep</i>	0.1278	0.0873	0.1020	0.0710	0.1072	0.0630	0.1003	0.0747
<i>up</i>	0.1150	0.1150	0.1150	0.1150	0.1150	0.1150	0.1150	0.1150
<i>ures</i>	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866
<i>uesf</i>	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500
<i>upunta</i>	0.8000	0.8000	0.8000	0.8000	0.8000	0.8000	0.8000	0.8000
<i>uΔT</i>	0.6235	0.6235	0.6235	0.6235	0.6235	0.6235	0.6235	0.6235
<i>uMMC</i>	0.1111	0.1111	0.1111	0.1111	0.1111	0.1111	0.1111	0.1111
<i>u</i>	1.0456	1.0414	1.0427	1.0413	1.0432	1.0413	1.0426	1.0413

Experimento 1	Exp 3.1	Exp 3.2	Exp 3.3	Exp 3.4	Exp 3.5	Exp 3.6	Exp 3.7	Exp 3.8
<i>urep</i>	0.0696	0.0947	0.0808	0.0796	0.0604	0.0577	0.0651	0.0538
<i>up</i>	0.0520	0.0520	0.0520	0.0520	0.0520	0.0520	0.0520	0.0520
<i>ures</i>	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866
<i>uesf</i>	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500
<i>upunta</i>	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000
<i>uΔT</i>	0.0499	0.0499	0.0499	0.0499	0.0499	0.0499	0.0499	0.0499
<i>uMMC</i>	0.0549	0.0549	0.0549	0.0549	0.0549	0.0549	0.0549	0.0549
<i>u</i>	0.5368	0.5382	0.5368	0.5368	0.5368	0.5368	0.5368	0.5368

Experimento abc	Exp 4.1	Exp 4.2	Exp 4.3	Exp 4.4	Exp 4.5	Exp 4.6	Exp 4.7	Exp 4.8
<i>urep</i>	0.0888	0.0618	0.0599	0.0657	0.0740	0.0786	0.1014	0.0741
<i>up</i>	0.1150	0.1150	0.1150	0.1150	0.1150	0.1150	0.1150	0.1150
<i>ures</i>	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866
<i>uesf</i>	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500
<i>upunta</i>	0.9000	0.9000	0.9000	0.9000	0.9000	0.9000	0.9000	0.9000
<i>uΔT</i>	0.6235	0.6235	0.6235	0.6235	0.6235	0.6235	0.6235	0.6235
<i>uMMC</i>	0.1111	0.1111	0.1111	0.1111	0.1111	0.1111	0.1111	0.1111
<i>u</i>	1.1202	1.1200	1.1200	1.1200	1.1200	1.1200	1.1212	1.1200

Experimento a	Exp 5.1	Exp 5.2	Exp 5.3	Exp 5.4	Exp 5.5	Exp 5.6	Exp 5.7	Exp 5.8
<i>urep</i>	0.0509	0.0639	0.0840	0.0708	0.0884	0.0721	0.0596	0.0524
<i>up</i>	0.0520	0.0520	0.0520	0.0520	0.0520	0.0520	0.0520	0.0520
<i>ures</i>	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866
<i>uesf</i>	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500
<i>upunta</i>	0.9000	0.9000	0.9000	0.9000	0.9000	0.9000	0.9000	0.9000
<i>uΔT</i>	0.0499	0.0499	0.0499	0.0499	0.0499	0.0499	0.0499	0.0499
<i>uMMC</i>	0.0549	0.0549	0.0549	0.0549	0.0549	0.0549	0.0549	0.0549
<i>u</i>	0.9210	0.9210	0.9210	0.9210	0.9212	0.9210	0.9210	0.9210


ANEXO J
TABLAS DE RESULTADOS
2° FASE DE EXPERIMENTACIÓN

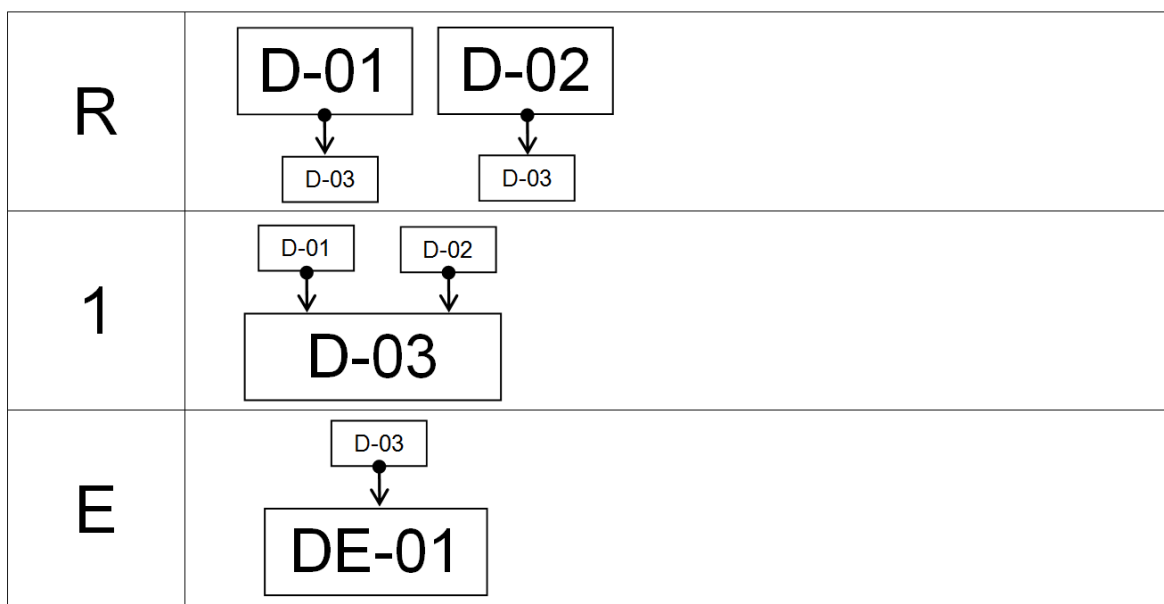
Experimento ac	Exp 6.1	Exp 6.2	Exp 6.3	Exp 6.4	Exp 6.5	Exp 6.6	Exp 6.7	Exp 6.8
urep	0.0708	0.0577	0.0958	0.0602	0.0486	0.0523	0.0681	0.0779
up	0.0520	0.0520	0.0520	0.0520	0.0520	0.0520	0.0520	0.0520
ures	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866
uesf	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500
upunta	0.9000	0.9000	0.9000	0.9000	0.9000	0.9000	0.9000	0.9000
uΔT	0.0499	0.0499	0.0499	0.0499	0.0499	0.0499	0.0499	0.0499
uMMC	0.0549	0.0549	0.0549	0.0549	0.0549	0.0549	0.0549	0.0549
u	0.9210	0.9210	0.9219	0.9210	0.9210	0.9210	0.9210	0.9210

Experimento b	Exp 7.1	Exp 7.2	Exp 7.3	Exp 7.4	Exp 7.5	Exp 7.6	Exp 7.7	Exp 7.8
urep	0.1058	0.0828	0.0891	0.0956	0.1189	0.0710	0.0582	0.0482
up	0.1150	0.1150	0.1150	0.1150	0.1150	0.1150	0.1150	0.1150
ures	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866
uesf	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500
upunta	0.2000	0.2000	0.2000	0.2000	0.2000	0.2000	0.2000	0.2000
uΔT	0.6235	0.6235	0.6235	0.6235	0.6235	0.6235	0.6235	0.6235
uMMC	0.1111	0.1111	0.1111	0.1111	0.1111	0.1111	0.1111	0.1111
u	0.6986	0.6960	0.6963	0.6971	0.7007	0.6960	0.6960	0.6960

Experimento bc	Exp 8.1	Exp 8.2	Exp 8.3	Exp 8.4	Exp 8.5	Exp 8.6	Exp 8.7	Exp 8.8
urep	0.0834	0.0995	0.0567	0.0824	0.0919	0.0744	0.0817	0.0689
up	0.1150	0.1150	0.1150	0.1150	0.1150	0.1150	0.1150	0.1150
ures	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866
uesf	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500
upunta	0.2000	0.2000	0.2000	0.2000	0.2000	0.2000	0.2000	0.2000
uΔT	0.6235	0.6235	0.6235	0.6235	0.6235	0.6235	0.6235	0.6235
uMMC	0.1111	0.1111	0.1111	0.1111	0.1111	0.1111	0.1111	0.1111
u	0.6960	0.6977	0.6960	0.6960	0.6966	0.6960	0.6960	0.6960

ANEXO K



 <p style="font-size: small;">FACULTAD DE INGENIERÍA</p> <p style="font-size: small;">UASLP</p>	<h3 style="margin: 0;">DIAGRAMAS DE NIVEL</h3>
LABORATORIO DE METROLOGÍA	REVISIÓN: 00



NIVEL DE REFERENCIA

Grupo de calibración	Código del equipo	Denominación
D-01	LM-JBP-01	Juego de bloques patrón de 8 y 100 mm
D-02	LM-MDL-01	Data Logger 174H. La Humedad Relativa a medir es del 0 al 100% con una resolución en la pantalla del 0,1%. De igual manera la Temperatura se mide de -20 a 70°C con una resolución de 0,1°C.
D-03	LM-MMC-01	Máquina de medición por coordenadas

ANEXO K

 FACULTAD DE INGENIERÍA	 UASLP	DIAGRAMAS DE NIVEL
LABORATORIO DE METROLOGÍA		REVISIÓN: 00

NIVEL UNO

Grupo de calibración	Código del equipo	Denominación
D-03	LM-MMC-01	Máquina de medición por coordenadas

NIVEL EXTERNO

Grupo de calibración	Código del equipo	Denominación
DE-01	LM-MMC-01	Dimensiones lineales en MMC

ANEXO L: Tipos de distribuciones de probabilidad

Distribución normal

Los resultados de una medición repetida afectada por una o más magnitudes de influencia que varían aleatoriamente, generalmente siguen en buena aproximación una distribución normal. También la incertidumbre indicada en certificados de calibración se refiere generalmente a una distribución normal (ver Fig. L.1).

$$\bar{X} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n}$$

La esperanza matemática de \bar{X} . Si llamamos $E(X)=\mu$.

$$E[\bar{X}] = E\left(\frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n}\right) = \left(\frac{E(x_1) + E(x_2) + \dots + E(x_n)}{n}\right) = \frac{n\mu}{n} = \mu$$

La varianza de X para la dispersión de los distintos valores de medias muestrales, alrededor de μ :

$$Var(\bar{X}) = Var\left(\frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n}\right)$$

$$Var(\bar{X}) = \left(\frac{Var(x_1) + Var(x_2) + \dots + Var(x_n)}{n^2}\right) = \frac{n\sigma^2}{n^2} = \frac{\sigma^2}{n}$$

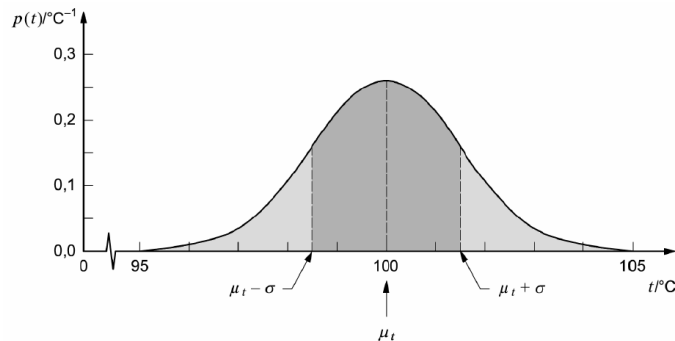


Fig. L. 1 Distribución normal

ANEXO L

Distribución rectangular

La función de densidad uniforme se define como

$$f(x) = \frac{1}{\beta - \alpha} \quad \alpha \leq x \leq \beta$$

$$f(x) = 0 \quad \text{en otros caso}$$

Donde α y β son constates reales con $\alpha < \beta$

Una variable aleatoria distribuida uniformemente representa la analogía continua con los resultados igualmente probables en el sentido de que para cualquier subintervalo $[a, b]$, donde $\alpha \leq a < b \leq \beta$, la $P(a \leq X \leq b)$ es la misma para todos los subintervalos de la misma longitud (ver Fig. L.2).

$$P(a \leq X \leq b) = \int_a^b \frac{dx}{\beta - \alpha} = \frac{(b - a)}{(\beta - \alpha)}$$

Si se elige un punto al azar en $[\alpha, \beta]$ significa que el valor elegido, digamos Y , está distribuido de manera uniforme en $[\alpha, \beta]$.

Entonces la media de la distribución rectangular es

$$E(X) = \int_{-\infty}^{\infty} xf(x)dx = \int_{\alpha}^{\beta} \frac{xdx}{\beta - \alpha} = \frac{1}{2(\beta - \alpha)} x^2 \Big|_{\alpha}^{\beta} = \frac{(\beta - \alpha)}{2}$$

y la varianza

$$Var(X) = \int_{\alpha}^{\beta} \frac{x^2 dx}{\beta - \alpha} = \left[\frac{(\beta - \alpha)}{2} \right]^2$$

$$Var(X) = \frac{(\beta - \alpha)^2}{12}$$

Ejemplos de fuentes de incertidumbre con este tipo de distribución son; la diferencia en la temperatura, la resolución del instrumento, etc.

ANEXO L

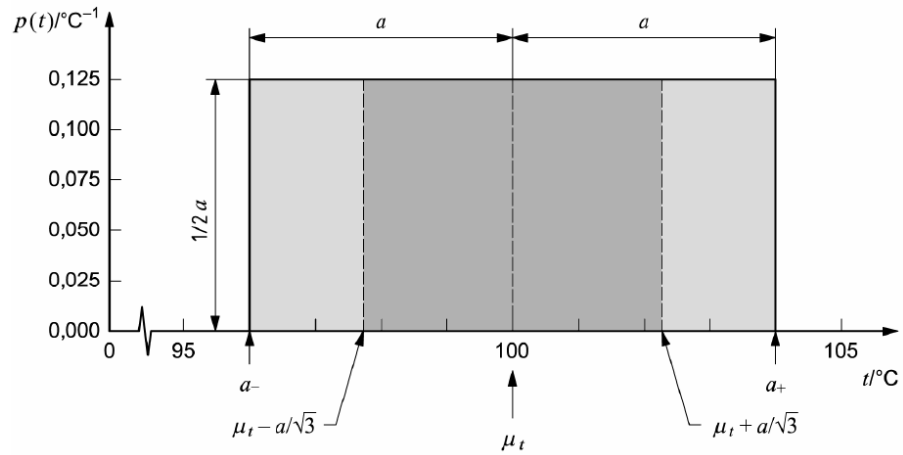


Fig. L. 2 Distribución rectangular

Otros tipos de distribución

Entre otros tipos de distribución podemos citar la distribución triangular, trapezoidal, exponencial, gamma entre otras.