



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería Mecánica

Calibración del eje vertical de una medidora tridimensional óptica

Autor:

Nieto Salinas, Mario

Tutor:

Santos Martín, Francisco Javier

**Dpto. CMeIM/EGI/ICGF/IM/IPF
Área de Ingeniería de los Procesos
de Fabricación**

Valladolid, Julio 2017.

*A mis padres, compañeros y ti, Leticia.
Que sin su apoyo incondicional yo no
estaría aquí, dedicándoles con cariño
este trabajo.*

Resumen

Hoy en día, existen numerosos instrumentos de medida que, gracias a la evolución de la metrología y el desarrollo tecnológico, son capaces de medir dimensionalmente con resoluciones del orden del tamaño atómico. Pero éstos son ineficientes si no son calibrados convenientemente, desconociendo por tanto la exactitud y precisión de las medidas que arrojan.

En la naciente Industria 4.0 y sus fábricas informatizadas, que requieren de mediciones in-situ, sin parones o desvíos de la producción, tendrán una importancia capital los sistemas por medición óptica, caracterizados por ser sin contacto, precisos y automatizables.

El presente Trabajo Fin de Grado, consiste en la calibración del eje vertical de una medidora tridimensional óptica. Se incluyen los elementos empleados, el procedimiento seguido, los datos obtenidos y los resultados extraídos mediante los cálculos convenientes, para finalmente calcular la incertidumbre de medida del equipo, y conseguir así caracterizarlo metrologicamente.

Palabras clave: *Metrología, Medidora tridimensional óptica, Trazabilidad, Calibración, Incertidumbre.*

Abstract

Nowadays, there are many measuring instruments that, thanks to the evolution of metrology and technological development, are able to measure dimensionally with resolutions of the order of atomic size. But these are inefficient if they are not calibrated properly, thus ignoring the accuracy and precision of their measures.

In the emerging Industry 4.0 and its computerized factories, which require on-site measurements, without stops or deviations from production, systems of optical measurement will have a great importance, as they are characterized by being contactless, precise and automated.

The present Bachelor Thesis, consists of the calibration of the vertical axis of a 3D optical CMM. It includes the elements used, the procedure followed, the data obtained and the results extracted by the appropriate calculations, to finally extract the equipment measurement uncertainty, and thus metrologically characterize the equipment.

Keywords: *Metrology, 3D Optical CMM, Traceability, Calibration, Uncertainty.*

Índice

Parte I. INTRODUCCIÓN	1
Introducción.....	3
Motivación	3
Objetivo	4
Estructura	4
Parte II. ESTADO DEL ARTE.....	7
1. Metrología.....	9
1.1. Definición y Generalidades	9
1.2. Antecedentes históricos.....	11
1.3. Infraestructura metrológica internacional	13
1.3.1. Institutos Nacionales de Metrología, INM	15
1.3.2. Laboratorios Acreditados.....	15
1.3.3. ILAC	16
1.3.4. Organizaciones Metrológicas Regionales, OMR	16
1.4. Infraestructura metrológica en España	17
1.5. Impacto económico y social.....	19
2. Sistemas ópticos de medición por luz proyectada	21
2.1. Introducción	21
2.2. Ventajas e inconvenientes.....	22
2.3. Aplicaciones	23
2.4. Clasificación	24
2.5. Elementos constructivos y funcionamiento básico.....	26
2.6. Situación actual: Medidora Tridimensional Óptica	28
3. Calibración de un instrumento de medida	29
3.1. Introducción y definiciones	29
3.2. Trazabilidad.....	29
3.3. Bloques Patrón Longitudinales, BPL.....	30
3.4. Plan de Calibración.....	31

3.4.1.	Carta de trazabilidad	32
3.4.2.	Diagrama de niveles.....	32
3.4.3.	Etiqueta de calibración	32
3.4.4.	Procedimiento de calibración	33
3.4.5.	Archivo de resultados.....	33
4.	Cálculo de la incertidumbre de medida	35
4.1.	Introducción y conceptos generales.....	35
4.2.	Evaluación de la Incertidumbre de medida de las estimaciones de entrada $u(x_i)$	37
4.2.1.	Evaluación Tipo A de la incertidumbre típica.....	37
4.2.2.	Evaluación Tipo B de la incertidumbre típica	38
4.3.	Cálculo de la Incertidumbre típica combinada de la estimación de salida $u(y)$	39
4.4.	Incertidumbre expandida de medida U	40
4.5.	Expresión de la Incertidumbre de medida en los certificados de calibración.....	41
4.6.	Guía para el cálculo de la incertidumbre de medida	42
4.7.	Valores atípicos. Criterio de rechazo de Chauvenet.....	43
Parte III.	EXPERIMENTAL.....	45
5.	Desarrollo del Experimental.....	47
5.1.	Introducción	47
5.2.	Instrumentos de medida utilizados	48
5.2.1.	MMC óptica del Aula de Metrología de la EII.....	48
5.2.2.	Bloques patrón longitudinales (BPL).....	50
5.3.	Operaciones preliminares	52
5.4.	Procedimiento de Calibración del eje vertical.....	53
5.4.1.	Pasos del proceso	54
5.5.	Toma y tratamiento de los datos	56
5.5.1.	Función Modelo	56
5.5.2.	Cálculo de Correcciones.....	57
5.5.3.	Cálculo de incertidumbres	58
5.5.4.	Toma de datos	61

Parte IV. RESULTADOS.....	67
6. Resultados.....	69
6.1. Calibración.....	69
6.1.1. Correcciones.....	69
6.1.2. Incertidumbres.....	71
6.1.3. Resultado final.....	76
6.2. Interpretación de los resultados.....	78
6.2.1. Comparación enfoques Manual y Automático.....	78
6.2.2. Calibración.....	80
Parte V. CONCLUSIONES.....	87
7. Conclusiones.....	89
Líneas futuras.....	90
Parte VI. ESTUDIO ECONÓMICO.....	93
8. Estudio económico.....	95
8.1. Recursos utilizados.....	95
8.2. Costes del proyecto.....	96
8.2.1. Costes Directos.....	96
8.2.2. Costes Indirectos.....	99
8.3. Coste total del proyecto.....	99
Parte VII. BIBLIOGRAFÍA.....	101
9. Bibliografía.....	103

Índice de Figuras

<i>Figura 1.1. Ejemplo de unidades de medida de tipo antropológico</i>	12
<i>Figura 1.2. Organización de la Convención del Metro</i>	14
<i>Figura 1.3. Distribución de las Organizaciones Metrológicas Regionales</i>	17
<i>Figura 1.4. Infraestructura metrológica en España</i>	18
<i>Figura 2.1. Clasificación de Instrumentos de Medida Dimensional</i>	21
<i>Figura 2.2. Sistema óptico de medida por luz proyectada de eje vertical.</i>	24
<i>Figura 2.3. Sistema óptico de medida por luz proyectada de eje horizontal</i> ..	24
<i>Figura 2.4. Proyección diascópica</i>	25
<i>Figura 2.5. Proyección episcópica</i>	25
<i>Figura 2.6. Sistema óptico de un equipo de medida por luz proyectada</i>	26
<i>Figura 2.7. Medidora tridimensional óptica (MMC óptica)</i>	28
<i>Figura 3.1. Longitud de un bloque patrón</i>	31
<i>Figura 5.1. Equipo de medida completo</i>	48
<i>Figura 5.2. MMC óptica Deltec</i>	49
<i>Figura 5.3. Mesa soporte</i>	49
<i>Figura 5.4. Sistemas de iluminación diascópica (inferior) y episcópica (superior)</i>	49
<i>Figura 5.5. Consola para el control de la iluminación y los movimientos de la mesa</i>	50
<i>Figura 5.6. Pantallas de Visualización (izquierda) y Control de Software (derecha)</i>	50
<i>Figura 5.7. Juego de bloques patrón longitudinales</i>	51
<i>Figura 5.8. Bloques patrón utilizados (de 1,0005 a 80 mm)</i>	51
<i>Figura 5.9. Colocación de bloques auxiliar y nominal</i>	54
<i>Figura 5.10. Visualización conjunta de los BPL utilizados</i>	55
<i>Figura 6.1. Comparación enfoques Manual-Automático. Corrección (μm)</i>	78
<i>Figura 6.2. Comparación enfoques Manual-Automático. Desviación Típica (μm)</i>	79
<i>Figura 6.3. Corrección (μm) en la calibración</i>	80
<i>Figura 6.4. Desviación Típica (m) en la calibración</i>	81

<i>Figura 6.5. Incertidumbre expandida con corrección de calibración nula. 40x.</i>	82
<i>Figura 6.6. Incertidumbre expandida con corrección de calibración nula. 62x.</i>	83
<i>Figura 6.7. Incertidumbre expandida con corrección de calibración nula. 97x.</i>	83
<i>Figura 6.8. Incertidumbre expandida con corrección de calibración nula. 152x.</i>	84
<i>Figura 6.9. Incertidumbre expandida con corrección de calibración nula. 239x.</i>	84
<i>Figura 6.10. Influencia de la amplificación en la U global.</i>	85
<i>Figura 7.1. Error de coseno</i>	91

Índice de Tablas

<i>Tabla 1.1. Laboratorios asociados al CEM y sus magnitudes.....</i>	<i>17</i>
<i>Tabla 4.1. Magnitudes, estimaciones, incertidumbres típicas, coef. de sensibilidad y contribución a la incertidumbre utilizados en el balance de incertidumbres.....</i>	<i>39</i>
<i>Tabla 4.2. Factores de seguridad k para diferentes grados efectivos de libertad ν_{ef}</i>	<i>41</i>
<i>Tabla 4.3. Coeficiente k(n) del criterio de Chauvenet.....</i>	<i>43</i>
<i>Tabla 5.1. Contribución a la incertidumbre expandida en la calibración del eje vertical</i>	<i>60</i>
<i>Tabla 5.2. Toma de medidas. Comparación enfoque manual (M) y automático (A).</i>	<i>62</i>
<i>Tabla 5.3. Toma de medidas 40x</i>	<i>63</i>
<i>Tabla 5.4. Toma de medidas 62x</i>	<i>63</i>
<i>Tabla 5.5. Toma de medidas 97x</i>	<i>64</i>
<i>Tabla 5.6. Toma de medidas 152x.....</i>	<i>64</i>
<i>Tabla 5.7. Toma de medidas 239x.....</i>	<i>65</i>
<i>Tabla 6.1. 40x. Corrección (μm)</i>	<i>69</i>
<i>Tabla 6.2. 62x. Corrección (μm)</i>	<i>69</i>
<i>Tabla 6.3. 97x. Corrección (μm)</i>	<i>70</i>
<i>Tabla 6.4. 152x. Corrección (μm).....</i>	<i>70</i>
<i>Tabla 6.5. 239x. Corrección (μm).....</i>	<i>70</i>
<i>Tabla 6.6. 40x. Incertidumbre (μm).</i>	<i>71</i>
<i>Tabla 6.7. 62x. Incertidumbre (μm).</i>	<i>72</i>
<i>Tabla 6.8. 97x. Incertidumbre (μm).</i>	<i>73</i>
<i>Tabla 6.9. 152x. Incertidumbre (μm).</i>	<i>74</i>
<i>Tabla 6.10. 239x. Incertidumbre (μm).....</i>	<i>75</i>
<i>Tabla 6.11. Resultado calibración 40x, 62x y 97x.....</i>	<i>76</i>
<i>Tabla 6.12. Resultado calibración 152x y 239x</i>	<i>77</i>
<i>Tabla 6.13. Resultado final de calibración</i>	<i>77</i>

<i>Tabla 8.1. Días útiles al año (2017).</i>	96
<i>Tabla 8.2. Coste trabajador de un trabajador en un año.</i>	96
<i>Tabla 8.3. Horas empleadas en la realización del proyecto.</i>	97
<i>Tabla 8.4. Costes amortizables del proyecto.</i>	98
<i>Tabla 8.5. Costes no amortizables.</i>	98
<i>Tabla 8.6. Costes directos totales.</i>	99
<i>Tabla 8.7. Costes indirectos del proyecto</i>	99
<i>Tabla 8.8. Coste Total del proyecto.</i>	99

Parte I.
INTRODUCCIÓN

Introducción

La sociedad actual se caracteriza principalmente por la globalización, el desarrollo y la competitividad en todos los ámbitos: social, político, cultural, económico, industrial, tecnológico, etc. Aspectos que tienen un denominador común, la calidad. Tan indispensable es, que hoy día sería inconcebible la vida sin la calidad en los productos y servicios que se consumen de forma cotidiana.

Siendo una de las principales razones de su consecución, la metrología es la ciencia de las medidas, cuya finalidad es la de obtener cuantitativamente cualquier propiedad medible, de un producto o elemento. A pesar de que se trata de una de las ciencias más antiguas del mundo, su desarrollo no ha sido fácil ni ha estado exento de problemas. Incluso, a día de hoy, se encuentra muy infravalorada por la gran mayoría de la sociedad, y, en ocasiones, por los propios gobiernos y sus cada vez más reducidas inversiones.

Aún con todo ello, actualmente la metrología se encuentra en un estado de desarrollo impensable no hace mucho tiempo. Se han conseguido medir propiedades de la naturaleza como la velocidad de la luz, radiaciones ionizantes o ruido de alta frecuencia con gran resolución, exactitud y precisión.

Existen además, sistemas metrológicos encargados de la consecución de la calidad de las medidas, responsables también de la extensión de ésta mediante patrones de referencia de las diferentes magnitudes. Éstos son guardados y diseminados, con el objetivo de crear una cadena ininterrumpida de comparaciones (Trazabilidad), que relacione las medidas realizadas por un instrumento determinado con los patrones de más alto nivel.

Precisamente, la calibración de un instrumento de medida es esa comparación de mediciones realizada con un patrón de referencia, sea del nivel que sea. Consiguiendo así conocer la desviación de las medidas respecto a la referencia, y pudiendo corregirla posteriormente. Todo ello con un objetivo común la consecución de la calidad, y con ella la mejora de la vida de las personas.

Motivación

De entre la gran variedad de instrumentos metrológicos existentes, es interesante destacar los sistemas de medición óptica, y más concretamente las medidoras tridimensionales ópticas. Éstas se caracterizan por la ausencia de contacto con el mensurando, por su exactitud, versatilidad y posibilidad de automatización, cualidades que los hacen muy interesantes en el sector industrial, donde priman la eficiencia, competitividad y la calidad.

Pero, al igual que cualquier instrumento de medida, su utilidad se ve anulada si no está calibrado. Pues la gran resolución que pueda presentar, no es aprovechable si se desconocen la exactitud y precisión de sus medidas.

Es ello lo que ha motivado a la realización del presente TFG, la utilización de un instrumento de medida con un brillante futuro en la Industria 4.0 que está surgiendo, y su caracterización mediante el cálculo de las correcciones e incertidumbres necesarias.

Objetivo

La finalidad de este estudio es la de calibrar el eje vertical de una medidora tridimensional óptica (MMC óptica), en todo su campo de medida, mediante la comparación con bloques patrón longitudinales convenientemente calibrados. Se conseguirá de este modo, obtener las correcciones oportunas de cada punto calibrado, así como la correspondiente incertidumbre.

Se tratará de reducir al máximo posible cualquier influencia externa, que pueda afectar al resultado final de la medida, como puedan ser las variaciones de temperatura, luminosidad e incluso el efecto operador.

Además, mediante tablas y gráficas se analizarán los resultados obtenidos, facilitando así la comprensión del estado actual de la máquina.

Estructura

El presente trabajo se organizará en siete bloques principales.

En el primero, el presente, se introduce el tema de estudio y las razones que han motivado a su realización.

Un segundo bloque abarcará el estado del arte, es decir, el contexto científico en el que se incluye el estudio. De genérico a específico, se habla sobre la metrología, su definición, antecedentes históricos y estado actual; de los sistemas ópticos de medida por luz proyectada, en qué consisten, su evolución, elementos constructivos y características. Posteriormente se hablará sobre el proceso de calibración, qué es, la razón de su necesidad y cómo ha de realizarse. Finalmente, se estudiará el cálculo de incertidumbres, objetivo principal de la calibración.

En un tercer bloque, se tratará el experimental realizado, incluyendo los elementos de medida utilizados, el procedimiento de calibración seguido y los datos obtenidos.

Posteriormente, en el bloque cuarto, se expondrán los cálculos realizados y los resultados obtenidos.

Por su parte, en el quinto bloque, se presentarán las conclusiones a las que se ha llegado tras la realización del presente trabajo.

Se completará con el estudio económico del desarrollo del proyecto, en el sexto bloque, y con la bibliografía citada y consultada, necesaria para el estudio, en el séptimo y último bloque.

Parte II.
ESTADO DEL ARTE

1. Metrología

1.1. Definición y Generalidades

La ciencia comienza donde empieza la medición. Aunque en un principio pueda parecer un tanto disparatada, esta afirmación de algunos autores refleja la importancia que la metrología tiene en todos los ámbitos de la sociedad. La razón es que la ciencia de las medidas –considerada una de las más antiguas del mundo- no es sólo asunto de científicos, sino que también es básica para el resto la ciudadanía en su continua necesidad de medir, no sólo en la industria o el comercio, sino en el día a día. Por definición, medir una cantidad de una determinada magnitud es compararla con otra cantidad conocida de esa misma magnitud, que se toma como referencia y se denomina unidad, expresando cuantas veces la cantidad desconocida contiene a la unidad. La medición es una operación que debe arrojar como resultado un valor numérico.

La función metrológica es uno de los componentes básicos del sistema de calidad sobre el que se sustenta la sociedad actual –caracterizada por una elevada competitividad, promovida a su vez por la globalización de actividades comerciales e industriales, así como por la presión social y política- que requiere cada vez de una mayor calidad en sus productos.

A pesar de su relevancia en todos los aspectos de la sociedad, no existe una definición clara y completa con la que los expertos se encuentren satisfechos. La más clásica es aquella que nombra (Rubio, 2009):

La Metrología es la ciencia de la medida, que engloba todo tipo de mediciones realizadas con niveles de incertidumbre conocidos, en cualquier campo de la actividad humana, y siendo sus principios fundamentales el resultado de la medición y la incertidumbre de medida.

Aun así existen muchas otras definiciones, destacando entre ellas por su generalidad y aceptación por parte del gremio, la propuesta por Carlos Enrique Granados, quien afirmaba que *“La metrología es la ciencia que tiene por objeto el estudio de las propiedades medibles, las escalas de medida, los sistemas de unidades, los métodos y técnicas de medición, así como su evolución, la valoración de la calidad de las medidas y su mejora constante, facilitando el progreso científico, el desarrollo tecnológico, el bienestar social y la calidad de vida”*.

Presente en todos los campos de la investigación y el desarrollo, la metrología cubre tres actividades principales:

- Definición de las unidades de medida internacionalmente aceptadas.
- Realización de unidades de medida por métodos científicos.
- Establecimiento de las cadenas de trazabilidad.

En cuanto a sus aplicaciones o áreas de estudio, la metrología puede dividirse en tres categorías, cada una de las cuales con diferentes niveles de complejidad y exactitud (Centro Español de Metrología (CEM), CENAM, INDECOPI, 2008):

- I. *Metrología Científica*. Se encarga de la organización, desarrollo, custodia, mantenimiento y trazabilidad de los patrones de medida. Supone el más alto nivel de las categorías metroológicas.
- II. *Metrología Industrial*. Su misión es la de asegurar el correcto funcionamiento de los instrumentos de medida empleados en la industria, así como de los procesos de producción y verificación, de modo que se consiga asegurar la calidad de vida de los ciudadanos y la investigación académica.
- III. *Metrología Legal*. Es responsable de todas aquellas mediciones que influyen en la transparencia de las transacciones económicas, especialmente cuando hay requisitos de verificación legal del instrumento de medida. Adicionalmente, la metrología legal se ocupa de la salud, seguridad pública y medio ambiente.

Pese a que no tiene una definición internacional –y por ello no es una categoría más-, es interesante mencionar la *Metrología Fundamental*. Ésta supone el más alto nivel de exactitud dentro de un campo dado, pudiendo por ello considerarse como el único nivel superior a la metrología científica.

El mundo de la metrología, en cualquiera de sus áreas, avanza a gran velocidad y afronta nuevos retos de un mercado que demanda soluciones y tecnologías capaces de lograr los resultados que precisa, no ya en el laboratorio con personal especializado, sino en el lugar en el que se esté produciendo y con el personal disponible. Los sistemas de control metrológico portátiles y los de visión artificial son los propulsores de ese cambio, consistente en llevar la metrología a las líneas de producción de forma automatizada. Deberán combinarse unos medios de control más inteligentes y rápidos con las garantías de fiabilidad y trazabilidad exigibles, en un entorno muy competitivo que demanda flexibilidad y economía.

1.2. Antecedentes históricos

Los sistemas de unidades más primitivos cubrían las necesidades por aquel entonces existentes, tanto en lo referente a las magnitudes a medir como en cuanto a la precisión con las que las mediciones se realizaban.

En la actualidad, los sistemas de unidades abarcan todas las magnitudes conocidas, como pueden ser la temperatura, presión, tiempo, etc. Antiguamente, las medidas se limitaban a las magnitudes básicas utilizadas para resolver las necesidades metrológicas derivadas de las operaciones comerciales. Debido a ello, la metrología no existía como ciencia y los conocimientos y técnicas relativos a las medidas se englobaban bajo la denominación general de *pesas y medidas*.

Incluso en un sistema de pesas y medidas es primordial conseguir el mayor grado de uniformidad posible, referida ésta tanto a la denominación de las unidades como al valor que representan. Fue éste el motivo por el que los primitivos sistemas de medición interpretaron las unidades de medida como cantidades de referencia, materializadas como prototipos o patrones que se conservaban en un lugar determinado, y a través de los cuales se producía la *diseminación* –a día de hoy se trata del proceso, en sucesivos escalones, cuya finalidad es la de facilitar a empresas y organismos, a partir de patrones primarios, patrones de nivel de precisión inferior- que permitiría disponer de las mismas allí donde fuera necesario.

Con una antigüedad estimada de 2575 años a.C., en el Louvre se encuentra uno de los ejemplos más antiguos de patrón de longitud que se conservan. La estatua sedente del rey-dios Gudea, también conocida como *el arquitecto de la regla*, sobre cuyas rodillas descansa una regla graduada de 26,45 cm, *el pie caldeo*, dividido en 16 partes, *dedos*, que era el patrón de medida de la ciudad de Lagash (Moro Piñeiro, 2017).

En su mayoría, las unidades o patrones antiguos poseían orígenes antropomórficos y estaban ligados a dimensiones o a capacidades de personas de la realeza. En el antigua Egipto (3000 años a.C.) ya empleaban un sistema de numeración decimal y utilizaban unidades autocráticas como el *Auna*, que representaba la longitud del antebrazo del faraón desde el codo hasta el extremo del dedo medio con la mano extendida, el *codo grande* (0,525 m) y el *codo pequeño* (0,450 m). En el mundo griego era empleada otra medida antropomórfica, el *estadio*, unidad equivalente a 600 pasos y basada en las dimensiones del estadio de Olimpia. Una de las aportaciones más relevantes en el aspecto metrológico de la cultura griega fue la determinación de la longitud del meridiano terrestre, por parte de Eratóstenes en el año 240 a.C. (Prieto) (Pachón Veira & Manzano Agugliaro, 2002).



Figura 1.1. Ejemplo de unidades de medida de tipo antropológico

La Edad Media supuso un periodo de parálisis metrológica, de la que Europa no se recuperaría hasta el Renacimiento. Carlomagno trató de imponer un sistema de unidades en su reino, algo que no conseguiría, de modo que las unidades locales y regionales continuaron en uso.

En Francia en 1688 surgió el uso de la *toise*, en español *toesa* (del latín *tensa*), un patrón longitudinal materializado en una barra de hierro empotrada en la fachada del Grand Chatelet de París, que sería importada a España por los Borbones en el siglo XVIII. Como unidad de masa se empleaba, desde el siglo XV, la denominada *pila de Carlomagno*, consistente en una columna formada por 13 pesas de cobre apiladas unas sobre otras.

En cuanto a las medidas agrarias, algunas de ellas se basaban en la capacidad de trabajo de los animales. Por ejemplo, las fincas o terrenos se medían utilizando como unidad *el día de bueyes*, que equivalía a la extensión que dos bueyes eran capaces de arar en una jornada de trabajo. Esta medida era utilizada en el norte de España y en Italia. Por su parte, en Castilla se medía la extensión de los campos en *fanegas*, que representaba (y aun representa) la superficie de tierra necesaria para poder sembrar la cantidad concreta de una fanega de grano (equivalente a unos 50 litros de cereal).

Los antecedentes del sistema métrico decimal fueron consecuencia del trabajo realizado por el abad Gabriel Mouton (1618-1694), en cuya obra *Observaciones de los diámetros del Sol y de la Luna* propugnó la idea de una medida universal, un sistema de base 10 que aun tardaría 120 años en hacerse realidad.

Por su parte, la Revolución Francesa, en su afán modernizador, consideraría las viejas unidades de pesas y medidas como símbolos del medievo al que deseaban dejar atrás. Con este objetivo, se lanzó con entusiasmo a implantar y difundir el sistema métrico, caracterizado por ser racional, moderno y universal.

A partir de la Revolución Industrial, y como consecuencia de los cambios producidos en los procesos de fabricación, que pasaron de ser artesanales y a pequeña escala, a organizarse en tareas separadas y a gran escala, los patrones y mediciones tuvieron que evolucionar para adaptarse a las nuevas necesidades. La emergente industria reclamaba más exactos y mejorados métodos de medida, lo que estimuló el desarrollo de la metrología y unificó los viejos sistemas de pesas y medidas hasta convertirse en auténticos sistemas de unidades.

En la actualidad, el Sistema Internacional (SI), que es utilizado por la mayor parte de las naciones, convive con el Sistema Imperial Británico, que fue expandiéndose a través del uso pero sin planificación previa. Además, la evolución científica y tecnológica ha venido imponiendo la creación de nuevas unidades para satisfacer los cada vez más exigentes requisitos de medición.

1.3. Infraestructura metrológica internacional

Promovida por la necesidad de contar con un sistema métrico decimal universal, en 1875 tuvo lugar en París una conferencia en la que diecisiete gobiernos, firmaron el tratado diplomático conocido como “*La Convención del Metro*”. En ésta, se decidió crear y financiar una institución científica de carácter permanente, el “*Bureau International de Poids et Mesures*” (BIPM) u Oficina Internacional de Pesos y Medidas (Granados).

Los representantes de los Gobiernos de los Estados miembros se reúnen cada cuatro años en la “*Conferencia General de Pesas y Medidas*” (CGPM), donde se discuten y examinan los trabajos realizados por los diferentes *Institutos Nacionales de Metrología* (INM) y el BIPM. También se emiten recomendaciones acerca de nuevas determinaciones metrológicas fundamentales, así como cuestiones importantes del propio BIPM.

A su vez, la CGPM elige hasta dieciocho representantes para el “*Comité International des Poids et Mesures*” (CIPM) o Comité Internacional de Pesos y Medidas, que se reúne anualmente. Éste supervisa al BIPM, coopera con otras organizaciones de metrología y se encarga de preparar los trabajos preliminares para las decisiones técnicas a adoptar por la CPGM. Para ello se apoya de diez comités consultivos, en los que el presidente de cada uno de ellos suele ser un miembro del CIPM, y el resto de miembros son representantes de los INM.

Para una mayor aclaración acerca de los distintos organismos, puede ser de utilidad el esquema de la Figura 1.2 (CIPM, 2003):

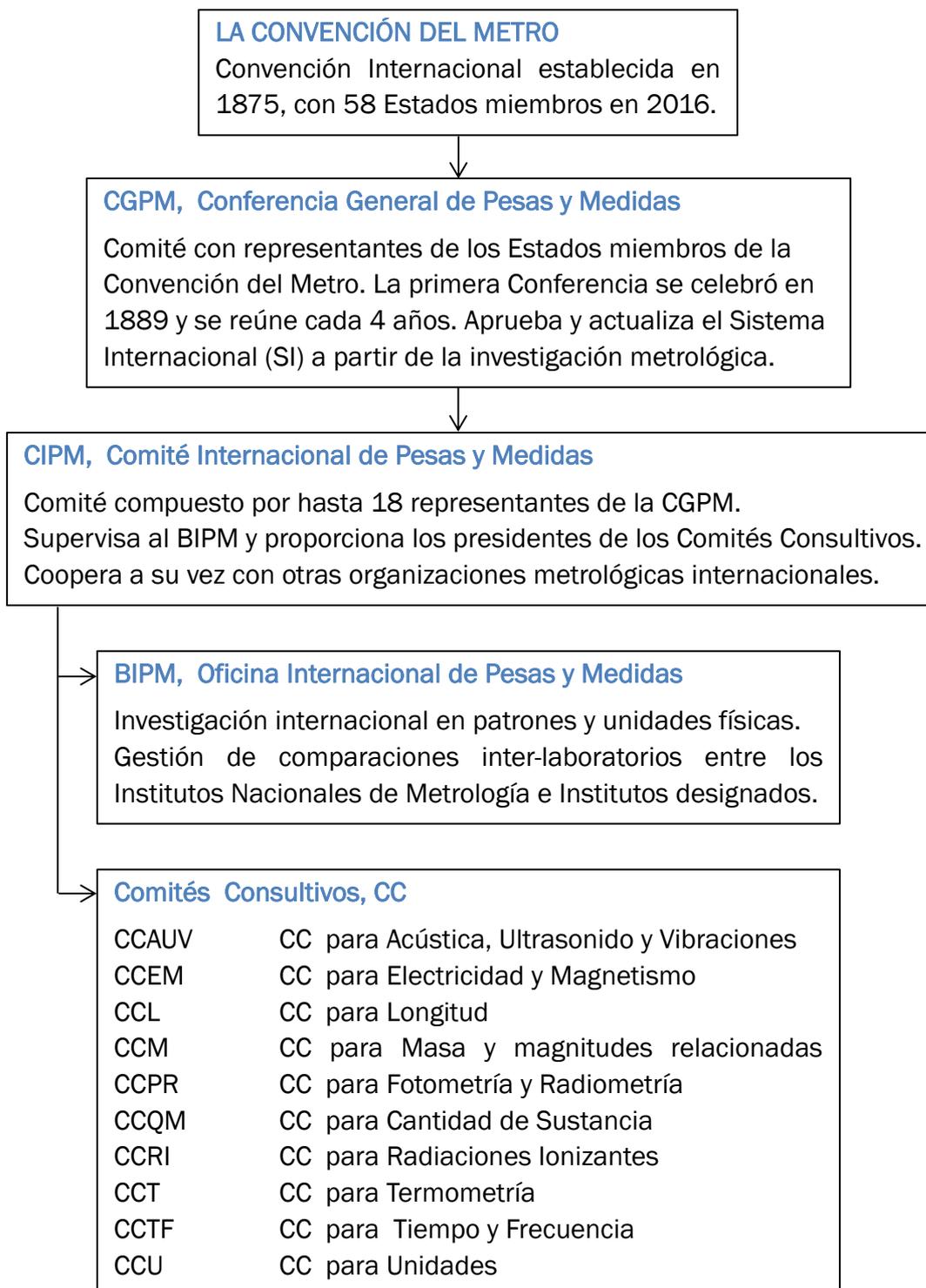


Figura 1.2. Organización de la Convención del Metro

1.3.1. Institutos Nacionales de Metrología, INM

Son designados por decisión oficial nacional para desarrollar y mantener los patrones nacionales de medida de una o más magnitudes. El INM representa internacionalmente al país frente a los institutos metroológicos nacionales de otros países, las *Organizaciones Metroológicas Regionales* (OMR) y el BIPM. Estos institutos por tanto, representan la columna vertebral de la organización metroológica internacional mostrada en la Figura 1.2.

Normalmente, los INM son responsables de:

- La diseminación de las unidades del SI a los laboratorios acreditados, los legisladores, la industria, la educación, etc.
- Investigación metroológica, desarrollo de nuevos y mejorados patrones de metrología (primarios o secundarios) y métodos de medición.
- Participación en comparaciones al más alto nivel internacional.
- Mantenimiento de una visión general de la jerarquía nacional sobre trazabilidad y/o calibración.

Así mismo, el INM del país puede nombrar "*Institutos Designados*", para que mantengan algunos patrones nacionales específicos. En la actualidad, el número de estos institutos designados está aumentando debido a la mayor importancia de la metrología en áreas no tradicionales como la química, la medicina o el análisis de alimentos. Campos de estudio que los INM de la mayor parte de los países no podrían cubrir por sí solos.

1.3.2. Laboratorios Acreditados

La acreditación de laboratorios tiene como objetivo la determinación de las competencias técnicas de éstos para efectuar tipos específicos de ensayos o calibraciones. Al conseguir la acreditación, el laboratorio obtiene un reconocimiento formal de su competencia, permitiendo así a los clientes identificar y seleccionar servicios de ensayos o calibraciones confiables y capaces de cumplir con sus necesidades (L&S CONSULTORES C.A.).

Pueden acreditarse laboratorios tanto públicos como privados. Ésta es voluntaria, aunque algunas autoridades internacionales, europeas y nacionales, con el fin de garantizar la calidad de los laboratorios de calibración y ensayo dentro de su área de competencia, exigen la acreditación de éstos por parte de un organismo de acreditación.

Se concede tras realizar una evaluación técnica del laboratorio y se mantiene mediante revisiones y visitas periódicas. La acreditación, generalmente está basada en normas regionales o internacionales, como puede ser la Norma ISO/IEC 17025 "*Requisitos generales para la competencia técnica de los laboratorios de calibración y ensayo*".

1.3.3. ILAC

La Cooperación Internacional para la Acreditación de Laboratorios, ILAC, (International Laboratory Accreditation Cooperation) es una organización dedicada a la cooperación internacional entre los diferentes esquemas de acreditación de laboratorios que operan en el mundo. De entre sus funciones, cabe destacar:

- Principal foro internacional para el desarrollo de prácticas y procedimientos para la acreditación de laboratorios.
- Promover la acreditación de laboratorios como forma de ayuda al comercio.
- Reconocimiento de capacidades de calibración y ensayo en todo el mundo.
- Ofrece asesoramiento y asistencia a países en proceso de desarrollo de sus propios sistemas de acreditación de sus laboratorios.

1.3.4. Organizaciones Metrológicas Regionales, OMR

Se trata de organizaciones que engloban a diferentes INM, en función de la región en la que se encuentren, y son las encargadas de coordinar la colaboración entre éstos. Aunque varían en función de la región a la que pertenecen, las principales actividades de las que son responsables son:

- Coordinar las comparaciones de los patrones nacionales de medida.
- Cooperar en la investigación y desarrollo de la metrología.
- Cooperar en el desarrollo de la infraestructura metrológica de los países que la conforman.
- Facilitar la trazabilidad a las realizaciones primarias de las unidades del SI.
- Compartir capacidades e instalaciones técnicas.
- Formación y asesoría conjunta.

Las OMR más representativas a nivel global son:

- EUROMET: países europeos occidentales
- COOMET: países del centro y este europeos, y algunos asiáticos
- SADC MET: países del sur de África;
- APMP: zona de Asia y Pacífico;
- SIM: continente americano, que a su vez se divide en:
 - o NORAMET, EE.UU., Canadá y México; CAMET, Centroamérica;
 - CARIMET, países del Caribe; ANDIMET, países andinos;
 - SURAMET, Suramérica.

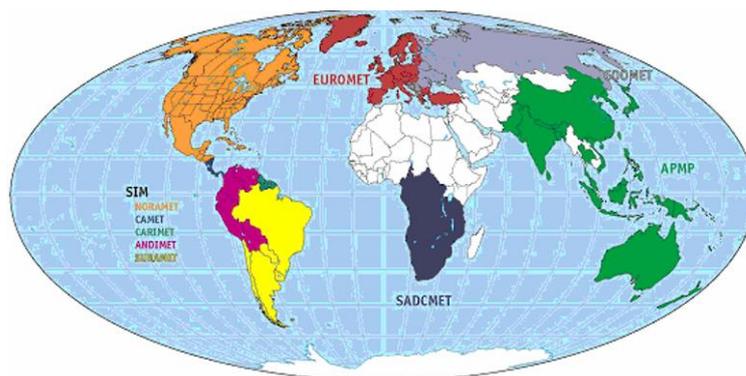


Figura 1.3. Distribución de las Organizaciones Metrológicas Regionales

1.4. Infraestructura metrológica en España

En la actualidad, la metrología en España está coordinada por el *Consejo Superior de Metrología* (CSM), considerado el órgano superior de asesoramiento y coordinación en materia de Metrología Científica, Técnica, Histórica y Legal. Creado en 1985, y adscrito a través de la Secretaría General de Industria, al Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, el CSM es el primer intento serio de dotar a nuestro país de una organización oficial, única y operativamente estructurada para la promoción de la metrología.

Por su parte, las realizaciones prácticas de las unidades de medida (patrones nacionales) y su diseminación al resto de usuarios de la metrología corresponde al *Centro Español de Metrología* (CEM) y a sus siete laboratorios asociados (Consejo Superior de Metrología, 2007):

Laboratorio	Magnitud
Real Instituto y Observatorio de la Armada (ROA)	Tiempo, Frecuencia
Instituto de Física Aplicada (IFA-CSIC)	Fonometría, Radiometría
Laboratorio de Metrología de Radiaciones Ionizantes, del Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (LMRI-CIEMAT)	Radiaciones Ionizantes
Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA)	Humedad, Potencia, Impedancia y Ruido de alta frecuencia
Taller de Precisión y Centro Electrotécnico de Artillería (TPYCEA)	Atenuación eléctrica en alta frecuencia
Laboratorio Central Oficial de Electrotécnica (LCOE)	Alta Tensión Eléctrica
Centro Nacional de Sanidad Ambiental (Instituto de Salud Carlos III)	Ozono

Tabla 1.1. Laboratorios asociados al CEM y sus magnitudes

Como así destaca el propio CEM, todos ellos conforman la cúspide de la pirámide metrológica nacional, siendo los responsables de establecer y mantener los patrones primarios de las unidades de medida correspondientes al Sistema Internacional de Unidades (Oficina Internacional de Pesas y Medidas, 2008) (Centro Español de Metrología, Septiembre 2013).

Por otra parte, la diseminación de las unidades de medidas por todo el país, manteniendo una trazabilidad demostrable a los patrones nacionales, se realiza mediante el concurso de los laboratorios de calibración, acreditados en su mayoría por la *Entidad Nacional de Acreditación* (ENAC). Ésta, es una entidad privada, independiente y sin ánimo de lucro, encargada de coordinar y dirigir en el ámbito nacional un Sistema de Acreditación conforme a criterios y normas internacionales. Acredita a organismos que realizan actividades de evaluación de la conformidad, sea cual sea su sector, tamaño, carácter o pertenencia a diferentes asociaciones o universidades:

- Laboratorios de Calibración y Ensayo.
- Entidades de Inspección/Certificación.
- Verificadores Medioambientales.
- Proveedores de Programas de Inter-comparación.

Finalmente, y para una mayor aclaración, en la Figura 1.4 (Moro Piñeiro, 2017) se muestra un pequeño esquema acerca de la pirámide que conforma la infraestructura metrológica española.



Figura 1.4. Infraestructura metrológica en España

1.5. Impacto económico y social

Dado que la definición, realización, mantenimiento y diseminación de los patrones nacionales de medida es responsabilidad de los gobiernos, nace la pregunta acerca del impacto que tienen las actividades metroológicas en la sociedad, y si merece la pena el coste que suponen.

Aunque no es fácil definir y cuantificar el impacto económico y social de la metrología, diversos estudios afirman que actualmente en Europa, las mediciones suponen un coste superior al 1% del PIB combinado, con un retorno equivalente de entre el 2 y el 7% (Consejo Superior de Metrología, 2007).

Se ha tener presente, que el alcance de la metrología en cada país es diferente en función del nivel de desarrollo del mismo, centrándose en las necesidades de su sociedad.

El impacto social de la metrología se puede percibir en el comercio de productos, responsable en muchos países de entre el 60 y el 80% de su PIB, ya que una buena práctica metroológica favorece la competitividad y fomenta la ética entre transacciones.

No menos importante es su aplicación en el campo de la salud, donde unos resultados exactos y precisos arrojados en pruebas y tratamientos médicos (análisis clínicos, detección metales pesados, radioterapia, etc.), son vitales para la supervivencia y calidad de vida de los pacientes.

En materia de seguridad vial, medidas efectuadas con los sistemas de seguridad del vehículo o para el control de la velocidad y el alcohol, han ayudado a conseguir que los medios de transporte sean mucho más seguros.

También está presente en el medio ambiente, la higiene y seguridad en los diferentes espacios habitables, y en definitiva, en cualquier aspecto del día a día de la ciudadanía.

2. Sistemas ópticos de medición por luz proyectada

2.1. Introducción

Clásicamente denominados proyectores de perfiles, los sistemas ópticos de medición por luz proyectada, son instrumentos de medida clasificados dentro de la *metrología dimensional*. Ésta es la rama metroológica que incluye la medición de todas aquellas propiedades determinadas mediante la unidad de longitud, como por ejemplo la distancia, el diámetro, la planitud, la rugosidad, etc. La longitud es una de las siete magnitudes básicas del *Sistema Internacional de Unidades (SI)*, siendo su unidad básica el metro (m). En la actualidad, el metro se define como la *longitud del trayecto recorrido por la luz en el vacío en un intervalo de tiempo de 1/299 792 458 s*. A su vez, dentro de las medidas dimensionales, pertenecen a la categoría de medidas lineales, realizadas de forma indirecta, por comparación mediante ampliación óptica.

Mediante la Figura 2.1 se apreciará más claramente la ubicación de los sistemas de medida ópticos dentro de la clasificación de instrumentos de medida dimensionales.

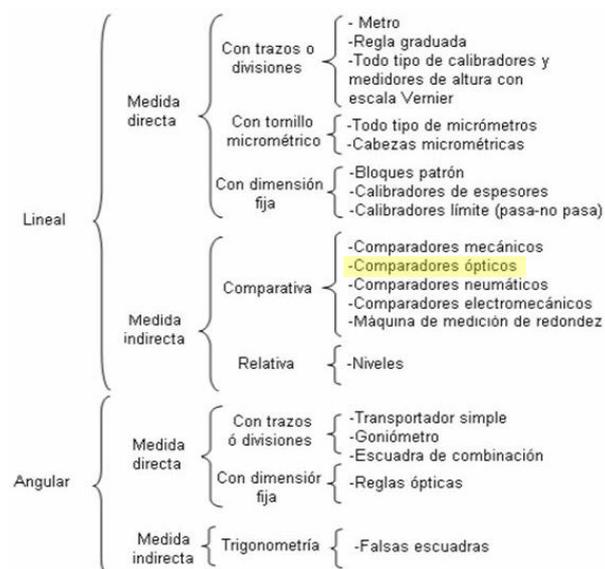


Figura 2.1. Clasificación de Instrumentos de Medida Dimensional

Un *sistema de medida óptico por luz proyectada* es un equipo capaz de medir e inspeccionar dimensiones y formas, por ampliación óptica, permitiendo la realización de medidas directas o con desplazamiento, sobre una pantalla de proyección (Centro Español de Metrología).

Los primeros sistemas se desarrollaron poco después de la I Guerra Mundial, con el objeto de comprobar la forma y perfil de los tornillos roscados de gran calidad. El principal inconveniente que tenían en sus inicios, era la necesidad de una habitación completamente oscura para poder visualizar las imágenes proyectadas. Además, la pantalla de visualización estaba muy alejada del operador y de la mesa con la pieza, lo que dificultaba enormemente la comparación de la sombra proyectada con una plantilla.

Con el trascurso del tiempo y los avances tecnológicos sucediéndose, se consiguió introducir un espejo en la trayectoria de la sombra, reflejando la imagen en la pantalla y consiguiendo así acercarla al operador. Se eliminaría también la necesidad de una habitación oscura introduciendo el sistema en una carcasa, aislando así la zona interior de la pantalla, de la luz exterior.

Con sus principales problemas ya resueltos, el antiguamente llamado proyector de perfiles se convertiría en una herramienta de inspección y verificación sencilla, rápida y versátil, postulándose rápidamente como una gran alternativa para multitud de aplicaciones más allá de la industria de las máquinas-herramientas. Hoy en día se trata de máquinas indispensables en todo laboratorio metrológico o taller de producción de alta calidad (Lasheras, 2003).

2.2. Ventajas e inconvenientes

Siendo la versatilidad la cualidad más meritoria de los sistemas de medición óptica por luz proyectada, dada la gran variedad de operaciones que son capaces de realizar, no es ni mucho menos la única, presentando muchas otras aptitudes notables:

- Realización de inspecciones en grupo, ya que la imagen proyectada en la pantalla puede ser observada por diferentes personas.
- Inspección de varias dimensiones y características de la pieza a medir (en el mismo plano de proyección).
- Inspección rápida y precisa mediante el uso de plantillas de comparación.
- Al tratarse de un sistema de medición óptico, no existe desgaste de sus elementos ni la posibilidad de dañar o marcar la pieza.
- Eliminación de los errores potenciales debidos a la sobrepresión efectuada con los sistemas de medida por contacto.
- Ahorro de costes debido a su versatilidad y rapidez, además de a su menor deterioro y desgaste.
- Posibilidad de automatizar el proceso de inspección mediante softwares informáticos.

Por otra parte, estos sistemas de medida también presentan algunas desventajas, que hay que tener en cuenta a la hora de su elección como sistema de medida:

- La fuente de luz se compone normalmente de lámparas halógenas de alta intensidad, que producen suficiente calor como para alterar los resultados, debido a la dilatación de la pieza para largos períodos de exposición.
- Debido también al calor generado, las lámparas pueden fundirse, siendo necesario un buen mantenimiento y limpieza del filtro de polvo y del sistema de refrigeración.
- Nula portabilidad debido al peso y dimensiones que generalmente les caracterizan.

2.3. Aplicaciones

Mediante la utilización de diferentes tipos de inspección – ejemplificando una vez más su gran versatilidad- los sistemas ópticos por luz proyectada pueden satisfacer diferentes aplicaciones:

- *Inspección por observación.*
 - Análisis de superficies, acabados, grietas, rebabas, etc.
 - Contornos generales: curvaturas, redondez, etc.
 - Acoplamiento de piezas en contacto.
- Inspección por comparación
 - Formas estandarizadas: radios, ángulos, roscas, engranajes, etc.
 - Control de tolerancias mediante plantillas pasa no pasa.
- Mediciones sobre la pantalla (en desuso por las mediciones por movimientos)
 - Lineales, mediante escalas graduadas translúcidas.
 - Angulares, a través del goniómetro de la pantalla.
- Mediciones sobre movimientos
 - De la mesa de trabajo a través de los ejes X e Y, mediante mesas micrométricas o encoders lineales y sistemas de visualización de cotas.

Este último sistema de medida es el más sofisticado, permitiendo reducir el tiempo y coste de la medición, así como la automatización del proceso. Es además, el sistema que tiene la medidora tridimensional óptica Deltec utilizada para la toma de medidas en el presente trabajo.

2.4. Clasificación

Pese a que todos los sistemas de medida por luz proyectada se basan en la medición por ampliación óptica, para abarcar el mayor campo posible de piezas, con características y finalidades diferentes, existe cierta diversidad de tipos o modelos. Éstos se suelen agrupar o clasificar según (Centro Español de Metrología, 2013):

I. La orientación del eje del haz luminoso

- De eje vertical

El haz luminoso de este tipo de sistemas incide verticalmente sobre el elemento objeto de medición. La pieza suele ubicarse sobre mesas de cristal, a través de las cuales se transmite el haz luminoso. Estos instrumentos presentan campos de medida pequeños, de hasta 0,2 o 0,3 metros en cada eje de medida, siendo ideales para piezas pequeñas y ligeras, y por ello los instrumentos de mayor exactitud. En ellos, los dos ejes longitudinales de medida son el X e Y, utilizándose el eje Z para el enfoque.



Figura 2.2. Sistema óptico de medida por luz proyectada de eje vertical.

- De eje horizontal

En este tipo de equipos el haz de luz incide de forma horizontal sobre el elemento a medir. Las piezas se sitúan sobre mesas de acero dotadas de ranuras y elementos de fijación, lo que unido a los mayores campos de medida de estos sistemas (de hasta 0,5 metros por cada eje), los hacen muy adecuados para piezas grandes y pesadas. Por el contrario, poseen peores exactitudes que los de eje vertical. Los ejes longitudinales de medida son, en este caso, el X y el Z, utilizándose el Y para el enfoque.



Figura 2.3. Sistema óptico de medida por luz proyectada de eje horizontal

II. El tipo de iluminación utilizada para la proyección

- Iluminación diascópica (proyección por luz transmitida)

El haz luminoso se transmite desde la base de la mesa de cristal a través de la pieza, proyectando el contorno o silueta situada en el plano focal en la pantalla de observación. Se emplea para iluminar la zona inferior de la pieza, permitiendo así trabajar en las formas externas como un proyector de perfiles.

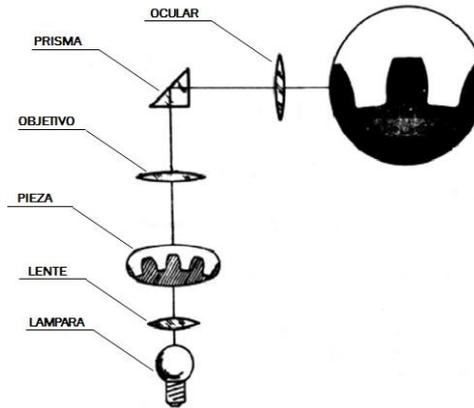


Figura 2.4. Proyección diascópica

- Iluminación episcópica (proyección por luz reflejada)

El haz luminoso incide sobre la superficie de la pieza, reflejando su imagen iluminada en la pantalla. La calidad de la reflexión depende fundamentalmente de la calidad superficial de la pieza. La utilidad de este tipo de iluminación radica en la observación de las formas no emergentes de la pieza.

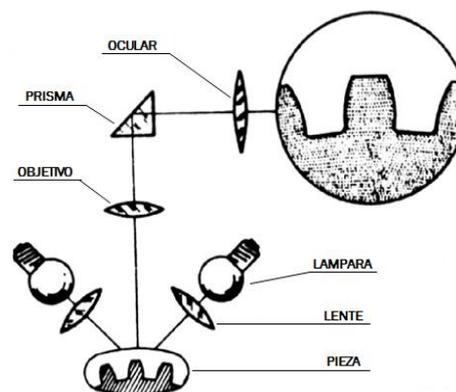


Figura 2.5. Proyección episcópica

En la actualidad, la gran mayoría de los sistemas de medida por luz proyectada presentan ambos tipos de iluminación, ampliando de forma significativa el campo de aplicación y la versatilidad de estos sistemas.

2.5. Elementos constructivos y funcionamiento básico

Con el fin de obtener imágenes amplificadas y no distorsionadas, tanto la imagen reflejada como el contorno de la pieza en la pantalla de observación, un sistema óptico de medida por luz proyectada consta de los siguientes elementos principales:

I. Fuente de luz

Con objeto de producir una buena imagen, incluso con valores de ampliación elevados, normalmente se han utilizado lámparas halógenas de alta intensidad. Éstas se calientan considerablemente, pudiendo producir dilataciones en la pieza a medir y los correspondientes errores en las mediciones. Para paliar en la medida de lo posible dichos problemas, se colocan aislamientos térmicos y sistemas de refrigeración, que requieren de una constante limpieza y mantenimiento. Por estos motivos, unido a la elevada probabilidad de que las lámparas se fundan como consecuencia del calor, en la actualidad se han sustituido por leds.

II. Sistema óptico

Permite la ampliación de la imagen para una correcta visualización, siendo por ello el elemento fundamental del equipo de medida.

Dos grupos de lentes son las que conforman el sistema óptico:

- Grupo de colimación

Su función es la de transformar el haz de luz original en uno de rayos paralelos, de intensidad prácticamente uniforme y con un diámetro tal, que sea capaz de cubrir el área de trabajo en el que se ubica el objeto. Las elevadas temperaturas existentes propiciadas por el haz de luz de alta intensidad, exigen que el material de las lentes sea resistente y no provoque distorsiones de la imagen.

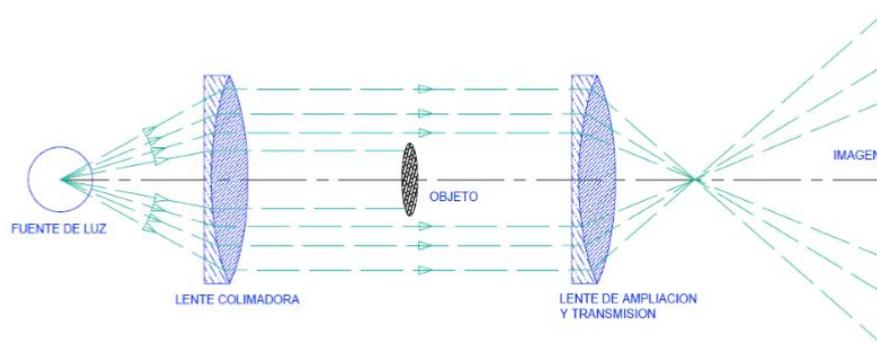


Figura 2.6. Sistema óptico de un equipo de medida por luz proyectada

- Sistema de amplificación y transmisión

Conjunto de lentes que tienen la misión de amplificar y proyectar la imagen reflejada o el contorno del mensurando, según la técnica de iluminación empleada. Dependiendo de las aplicaciones, los valores de ampliación suelen oscilar entre 10 (10x) y 200 aumentos (200x).

III. Mesa soporte

Se trata de otro de los componentes importantes del sistema por luz proyectada, ya que define –y limita- el campo de medida del instrumento. Su función es la de situar en el plano focal aquellas características del mensurando que sean objeto de inspección, con el fin de poder lograr un buen enrase de las líneas que conforman el perfil de la pieza, ya sea con las líneas del retículo de la pantalla de observación o con las líneas de las plantillas de verificación.

En el caso de los sistemas de eje vertical, la mesa soporte es de cristal, desplazándose en los tres ejes, el X e Y para el posicionamiento y el Z para el enfoque.

En cuanto a los de eje horizontal, la mesa soporte suele ser una estructura de acero en la que se amarran las piezas a medir. Los ejes X y Z son los de posicionamiento, mientras que el Y se utiliza para el enfoque.

IV. Pantalla de observación

De vidrio esmerilado –para evitar deslumbramientos y posibilitar la visualización desde diferentes ángulos-, sobre ella aparece la imagen reflejada o la silueta de la pieza objeto de medición. Su dimensión caracteriza al equipo, ya que tanto el sistema óptico como las dimensiones externas del instrumento son función del tamaño de la pantalla.

A su vez, el diámetro de la pantalla de observación determina el área de la pieza que puede visualizarse para una amplificación dada. Esto es debido a que a pesar de que frecuentemente se desplaza el objeto, observando cada vez diferentes secciones del mismo, en ocasiones se desea su observación total o una parte importante del mismo.

Hay que tener presente que el campo de visión equivale al diámetro de la pantalla dividido por la ampliación. Esto implica que, a mayor amplificación, mejor será la definición del objeto; mientras que a menor amplificación, mayor campo de visión.

2.6. Situación actual: Medidora Tridimensional Óptica

Los sistemas ópticos de medida por luz proyectada han evolucionado enormemente a lo largo de los últimos años, hasta llegar a la actual *medidora tridimensional óptica (MMC óptica)*, utilizada para el desarrollo del presente proyecto.

En éstas, es posible la medición en tres dimensiones, gracias a la suma del movimiento bidimensional (X, Y) de la mesa soporte y al desplazamiento de la óptica a lo largo del eje vertical (Z). En la Figura 2.7 se puede ver una MMC óptica, obtenida de (AYONIS, 2017).



Figura 2.7. Medidora tridimensional óptica (MMC óptica)

Además, softwares avanzados calculan y controlan todos los parámetros intervinientes en el proceso de medición, permitiendo a su vez su completa automatización.

Esto último, convertirá a estos sistemas de medida en una parte indispensable de la ya real *cuarta revolución industrial*. También llamada Industria 4.0 (de la Fuente López & Mazaeda Echevarría, 2016), consiste en la conversión de las fábricas convencionales en una versión masivamente informatizada de las mismas, en la que todos sus procesos se encuentran conectados entre sí. Éstas, caracterizadas por la eficiencia, la automatización y la conexión digital, realizarán sus controles de calidad *in situ*, sin necesidad de parar ni desviar la producción.

Es aquí, donde entrarán de forma fulminante los sistemas de medida ópticos, como la MMC óptica. Debido a que no requieren de la manipulación de los productos a medir, y a su versatilidad y posibilidad de automatización, reúnen las características perfectas para tener un papel importante en la industria del futuro.

3. Calibración de un instrumento de medida

3.1. Introducción y definiciones

La correcta elección de los instrumentos de medida no es suficiente en un laboratorio metrológico. Es necesario, además, asegurar que durante toda la vida del instrumento, su precisión y fiabilidad estén siempre dentro de las especificaciones iniciales requeridas para su utilización.

Se han mencionado dos conceptos que es conveniente aclarar, como son los de precisión y fiabilidad. Según dice *Javier Carro*, en su libro *Curso de Metrología Dimensional*, la *precisión* es la cualidad que caracteriza la aptitud de un instrumento para dar indicaciones próximas al valor verdadero de la magnitud medida, teniendo en cuenta tanto los errores sistemáticos como los aleatorios. Por su parte, la *fiabilidad* es la facultad de un elemento, servicio o proceso para realizar una función requerida bajo unas condiciones establecidas y durante un tiempo determinado. Generalmente, se expresa mediante un número que indica la probabilidad de que se cumpla esta característica (Carro).

Es por tanto, que los instrumentos de medida han de ser calibrados periódicamente con unas incertidumbres de calibración compatibles con las especificaciones y exigencias del producto medido o fabricado, y asegurar que los medios de calibración son trazables a través de una cadena ininterrumpida a los patrones nacionales.

En el vocabulario internacional de términos metrológicos, se define la *calibración* como el conjunto de operaciones que establecen, en condiciones específicas, la relación entre los valores de una magnitud indicados por un instrumento o sistema de medida, y los valores correspondientes de esa magnitud realizada por patrones. Es decir, se trata de un conjunto de operaciones que tienen por objeto determinar el valor de la incertidumbre de un patrón, instrumento o equipo de medida, procediendo a su ajuste o expresando aquella mediante tablas o curvas de corrección.

3.2. Trazabilidad

Para calibrar un instrumento de medida, es necesario otro de mayor precisión. De este modo, al aplicar sistemáticamente este principio se llega a establecer, en sentido ascendente, una cadena ininterrumpida de comparaciones, que relaciona las medidas realizadas por un instrumento determinado con los patrones de más alto nivel.

Se llama *trazabilidad* a la cualidad de la medida, por la cual dicha medida se puede relacionar o referir a los patrones nacionales o internacionales adecuados por medio de una cadena ininterrumpida de comparaciones (Sevilla Hurtado & Martín Sánchez).

Todas las normas y recomendaciones internacionales referidas a ensayos y control de calidad, exigen que las mediciones efectuadas en la práctica de ambas actividades, tengan trazabilidad a los patrones adecuados y a través de éstos a las unidades básicas del SI. De esta forma se consigue que los instrumentos de medida estén calibrados, garantizando así la bondad y trazabilidad de los resultados de las mediciones.

3.3. Bloques Patrón Longitudinales, BPL.

En el presente trabajo, en el que se realiza la calibración de una MMC óptica, se utiliza como patrón de referencia, un juego de bloques patrón longitudinales, gracias a los cuales se consigue la trazabilidad de nuestro instrumento de medida.

Los bloques patrón longitudinales –designados en (Centro Español de Metrología) como D.01.02- son bloques paralelepípedos de sección rectangular que materializan entre dos de sus caras paralelas (caras de medida) una determinada longitud. Se fabrican con aceros especiales, carburos metálicos (metal duro) o materiales cerámicos (ZrO_2) para conjugar así una adecuada estabilidad, dureza y resistencia al desgaste.

Son los patrones materializados de longitud más importantes. Son empleados como patrones de calibración de gran diversidad de instrumentos de medida en los métodos de medida diferencial, como patrones de referencia en métodos de medida indirecta y como elementos auxiliares en numerosas mediciones.

Suelen ser utilizados por juegos, existiendo tres calidades normales (0, 1, 2) y una de calibración (K), según la UNE EN-ISO 3650. Las longitudes nominales de los bloques pueden oscilar entre 0,5 mm y 1000 mm, y se escalonan según series de valores recomendados, facilitando, por adherencia de bloques, la formación de gran variedad de nominales (AENOR, 2000).

En cuanto a los bloques de calidad K, son patrones de referencia y se calibran por métodos interferométricos, con referencia a longitudes de onda patrón normalmente emitidas por láseres. Los bloques de calidades inferiores se calibran por comparación mecánica con bloques de mejor calidad, en comparadores especiales dotados de palpadores inductivos en montaje diferencial.

Hay que tener en cuenta, que el bloque no ha de estar sometido a esfuerzos que modifiquen su longitud, que las superficies de medida del

bloque y del cuerpo auxiliar (sobre el que se coloca el bloque) sean del mismo material y calidad superficial, y que las superficies en contacto por adherencia directa o de deslizamiento se encuentren limpias con medios adecuados, sin ningún otro medio que favorezca su unión. En la Figura 3.1 se puede apreciar la longitud y disposición de un bloque patrón.

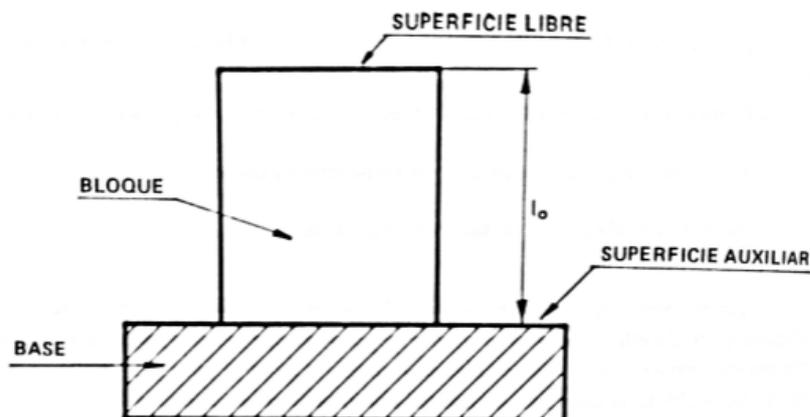


Figura 3.1. Longitud de un bloque patrón

Por *adherencia directa* se entiende el estado de contacto íntimo completo y continuo de las superficies de medida, producido después de una correcta limpieza y buena planitud, así como una alta calidad superficial de las superficies de medida, sin aplicación de presión, por adherencia espontánea, y debida a fuerzas de Van der Waals. En cuanto a la *adherencia al deslizamiento*, se trata del estado de contacto íntimo en toda la superficie de adherencia, que a consecuencia de pequeñas desigualdades en el acabado superficial, únicamente se puede lograr con una ligera presión manual.

3.4. Plan de Calibración

Es el nombre que recibe la calibración sistemática y organizada del total de los instrumentos y accesorios de un centro de medición, y supone la ordenación de todos los instrumentos de mayor a menor precisión.

La documentación necesaria para soportar el plan de calibración de un laboratorio de metrología, según (Sevilla Hurtado & Martín Sánchez) se compone de:

- Carta de trazabilidad
- Diagrama de niveles
- Etiqueta de calibración
- Procedimientos de calibración
- Archivo de resultado

3.4.1. Carta de trazabilidad

Refleja de forma gráfica la cadena de laboratorio o centros de nivel metrológico superior que enlazan los patrones de una fábrica o centro de trabajo con los del laboratorio nacional, de modo que quede asegurado el enlace final a las unidades básicas.

3.4.2. Diagrama de niveles

Es un gráfico en el que aparecen, agrupados y ordenados por niveles de precisión, todos los patrones, instrumentos y equipos de medida de un laboratorio. Pertenecerán a un mismo grupo todos aquellos patrones/instrumentos que:

- Se calibren con los mismos patrones.
- Utilicen los mismos procedimientos de calibración.
- Sus incertidumbres sean estimadas mediante las mismas ecuaciones de cálculo.

El primer nivel –denominado *Nivel de Referencia (nivel R ó 0)*– estará formado por los patrones primarios del centro, es decir, por aquellos instrumentos o elementos de máxima precisión cuyos valores son considerados como verdaderos, sin ser calibrados por parte del propio centro. Serán necesarias calibraciones periódicas en un centro de nivel superior, y sus valores e incertidumbres deben ser certificados para un cierto plazo de validez.

Los niveles posteriores, a excepción del último, se componen con los grupos de elementos que son calibrados por los niveles superiores y que calibran a los niveles inferiores.

El último nivel, generalmente el más numeroso, está formado por los grupos que, una vez calibrados, no se emplean en ninguna otra calibración del laboratorio.

Uno de los elementos más importantes en un plan de calibración, es la determinación de los intervalos de tiempo en los que se considera válida una determinada calibración de un patrón o instrumento de medida. El objetivo es prevenir la degradación de la calidad de la medida a realizar, así como asegurar la fiabilidad en el tiempo.

3.4.3. Etiqueta de calibración

Se adherirá al elemento calibrado para informar, como mínimo, del laboratorio encargado de realizar la calibración, la identificación del elemento, el número de informe de medición y la fecha de la próxima calibración.

3.4.4. Procedimiento de calibración

Debe contener toda la información necesaria para la realización del proceso de calibración por parte del metrólogo. Para ello, los principales elementos que han de ser considerados son (Grupo de Trabajo MINER-CEM, 2000):

- Campo de aplicación.
- Principio físico del método de medida utilizado.
- Definiciones, símbolos y unidades.
- Instrumentos y equipos empleados en la calibración.
- Operaciones preliminares.
- Modo operativo.
- Precauciones de manipulación de los instrumentos.
- Definición de las condiciones ambientales.
- Tratamiento de resultados.
- Cálculo de incertidumbres.
- Detalles finales de la calibración.

Para la calibración de la MMC óptica, objeto del presente trabajo, se ha seguido el *PROCEDIMIENTO DI-001 PARA LA CALIBRACIÓN DE PROYECTORES DE PERFILES*, realizado por (Centro Español de Metrología, 2013).

3.4.5. Archivo de resultados

Se trata de cualquier sistema de posibilitar el almacenamiento y fácil acceso a toda la información proporcionada por la realización del proceso de calibración. Gracias al estudio de estos resultados es posible:

- Modificar los períodos de calibración.
- Evaluar los errores y conocer la deriva o desgaste de los equipos.

4. Cálculo de la incertidumbre de medida

4.1. Introducción y conceptos generales

Medir es comparar el valor de una magnitud con el valor asignado a la magnitud que se adopta como unidad de medida (SI), determinando así cuántas veces está comprendida la segunda dentro de la primera. La expresión del resultado de una medición ha de contemplar tanto el valor atribuido al mensurando como la incertidumbre de medida de dicho valor, siendo ambas variables aleatorias.

En esta definición, aparecen ciertos conceptos, que a continuación se aclararán –junto a otros relacionados– para una mayor comprensión del proceso de medición. Según el documento EA4/02 (Cooperación Europea para la Acreditación, Septiembre, 2013).

- **Mensurandos.** Se trata de las magnitudes particulares objeto de medición. Generalmente se dispone de un único mensurando o *magnitud de salida* Y , que depende de una serie de *magnitudes de entrada* X_i ($i=1, 2, \dots, N$) según indique la **función modelo** f . Ésta, representa el procedimiento de medición y el método de evaluación.

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n)$$

Según la forma en que se han calculado el valor de la magnitud y la incertidumbre asociada al mismo, las magnitudes de entrada X_i pueden ser:

- Directamente de la medición
- Otras magnitudes de influencia

Se ha de tener presente que en la medida se hace una *estimación de salida* y , utilizando las *estimaciones de entrada* x_i mediante la relación:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

Es de suponer que los valores de entrada son estimaciones óptimas, es decir, que en ellas se habrán corregido todos los efectos significativos para el modelo.

- **Incertidumbre de medida.** Es un parámetro asociado al resultado de una medición, que caracteriza la dispersión de los valores que pueden atribuirse razonablemente al mensurando. Ésta es un reflejo de la falta de un conocimiento completo del valor del mensurando, como

consecuencia de la información finita que engloba la medida. Los fenómenos que contribuyen a la incertidumbre, y que son el motivo de que el resultado de una medición no pueda ser representado por un único valor, son denominados fuentes de incertidumbre. Las principales que se pueden dar en la práctica son:

- a. Definición incompleta del mensurando.
- b. Realización imperfecta de la definición del mensurando.
- c. Muestreo no representativo.
- d. Conocimiento incompleto o medición imperfecta de las condiciones ambientales.
- e. Desviaciones en la lectura de instrumentos analógicos por parte del operador.
- f. Resolución del instrumento o límites en la discriminación.
- g. Patrones y materiales de referencia utilizados en la medición de valores inexactos.
- h. Valores inexactos de constantes y parámetros obtenidos de fuentes externas, que son empleados en el algoritmo para la obtención de datos.
- i. Hipótesis y aproximaciones utilizadas en el método y el procedimiento de medición.
- j. Variación de observaciones repetidas del mensurando realizadas en condiciones que son, a priori, idénticas.

Las citadas fuentes de incertidumbre no tienen por qué ser independientes, es más, algunas de ellas pueden contribuir a (j).

En el caso de variables aleatorias, se puede utilizar como medida de la dispersión de los valores cualquiera de los siguientes estadísticos:

- **Varianza** de su distribución.
- **Desviación típica**, o raíz positiva de la varianza.

La **incertidumbre típica de medida** asociada a la estimación de salida o al resultado de la medición y , expresada por $u(y)$, es la desviación típica del mensurando Y . Su determinación se hará a partir de los valores estimados x_i de las magnitudes de entrada X_i y sus incertidumbres típicas asociadas $u(x_i)$. Se ha de tener presente que la incertidumbre típica asociada a un estimado tiene la misma dimensión que éste.

4.2. Evaluación de la Incertidumbre de medida de las estimaciones de entrada $u(x_i)$

4.2.1. Evaluación Tipo A de la incertidumbre típica

Es el método de evaluar la incertidumbre consistente en el análisis estadístico de una serie de observaciones. Se utiliza cuando se han realizado n observaciones independientes de una de las magnitudes de entrada X_i bajo las mismas condiciones de medida.

Suponiendo que la magnitud de entrada Q , medida repetidas veces ($n > 1$), tiene un valor estimado q , entonces la **media aritmética** de todos los valores observados será:

$$\bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n q_j$$

Donde la incertidumbre de medida se evalúa mediante uno de los siguientes métodos:

- El valor estimado de la varianza de la distribución de probabilidad es la **varianza experimental**.

$$s^2(q) = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (q_j - \bar{q})^2$$

Siendo su raíz cuadrada positiva la **desviación típica experimental**.

En cuanto a la varianza de la media aritmética \bar{q} , la mejor estimación es la **varianza experimental de la media aritmética**, definida por:

$$s^2(\bar{q}) = \frac{s^2(q)}{n}$$

Su raíz cuadrada positiva, se denomina en este caso **desviación típica experimental de la media aritmética**. La incertidumbre típica $u(q)$ referida a la estimación de entrada q es la desviación típica experimental de la media:

$$u(\bar{q}) = s(\bar{q}) = \frac{s(q)}{\sqrt{n}}$$

- Para aquellos casos en los que una medición esté correctamente caracterizada y bajo control estadístico, es posible disponer de una **estimación combinada de la varianza s_p^2** que caracterice mejor la dispersión.

$$s^2(\bar{q}) = \frac{s_p^2}{n}$$

4.2.2. Evaluación Tipo B de la incertidumbre típica

Este método de evaluación está basado en el juicio científico, o lo que es lo mismo, en toda la información disponible sobre la posible variabilidad de la magnitud de entrada X_i . Todos aquellos valores pertenecientes a esta categoría pueden derivarse de:

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

La evaluación Tipo B de la incertidumbre típica de medida requiere de un juicio basado en la experiencia y en conocimientos generales. En el caso de que tenga una sólida base, puede ser tan fiable como una evaluación Tipo A. Para profundizar más, han de distinguirse los siguientes casos:

- a. Sólo se conoce un **valor único** de la magnitud X_i . Éste es el caso del valor resultante de una medición previa, un valor de referencia obtenido de la literatura o el valor de una corrección.
- b. Se puede suponer una **distribución de probabilidad** para la magnitud X_i . En este caso el valor esperado debe tomarse como el estimado x_i , mientras que la raíz cuadrada de la varianza de su distribución será la incertidumbre típica asociada $u(x_i)$.
- c. Sólo pueden estimarse unos **límites superior e inferior** a_+ y a_- para el valor de la magnitud X_i . Suponiendo que dicha magnitud es una variable aleatoria con distribución de probabilidad uniforme o rectangular -que es una descripción razonable en términos de probabilidad cuando no se tiene ninguna otra información más que sus límites de variabilidad- se obtiene, para el estimado:

$$x_i = \frac{1}{2}(a_+ + a_-)$$

Y para el cuadrado de la incertidumbre típica:

$$u^2(x_1) = \frac{1}{12}(a_+ + a_-)^2$$

Si la diferencia entre los valores límites se expresa como $2a$, se tiene:

$$u^2(x_1) = \frac{1}{3}a^2$$

4.3. Cálculo de la Incertidumbre típica combinada de la estimación de salida $u(y)$

Para el caso en el que las magnitudes de entrada no están correlacionadas, se tiene:

$$u^2(y) = \sum_{i=1}^N u_i^2(y)$$

Siendo $u_i(y)$ ($i = 1, 2, \dots, N$) la contribución a la incertidumbre típica asociada a la estimación de salida y , resultante de la incertidumbre típica asociada a la estimación de entrada x_i :

$$u_i(y) = c_i u(x_i)$$

Aquí aparece c_i , que es el **coeficiente de sensibilidad** asociado a la estimación de entrada x_i . Éste, describe el grado en el que la estimación de salida y se ve afectada por variaciones en la estimación de entrada x_i .

$$c_i = \frac{\partial f}{\partial x_i} = \frac{\partial f}{\partial X_i} \Big|_{X_1 = x_1 \dots = X_N = x_N}$$

Es importante tener presente que, aunque $u(x_i)$ es siempre positiva, la contribución $u_i(y)$ puede ser positiva o negativa, dependiendo del signo del coeficiente de sensibilidad c_i .

Si dos magnitudes de entrada X_i y X_k están *correlacionadas* en cierto grado, o dicho de otro modo, si son mutuamente dependientes de alguna forma, su **covarianza** deberá ser considerada también como una contribución a la incertidumbre.

Finalmente, para el análisis de la incertidumbre de una medición, también llamado *balance de incertidumbres*, es necesario incluir una lista con todas las fuentes de incertidumbre en forma tabulada.

<i>magnitud</i>	<i>estimación</i>	<i>incertidumbre típica</i>	<i>coef. de sensibilidad</i>	<i>contribución a la incertid. típica</i>
X_i	x_i	$u(x_i)$	c_i	$u_i(y)$
X_1	x_1	$u(x_1)$	c_1	$u_1(y)$
X_2	x_2	$u(x_2)$	c_2	$u_2(y)$
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
X_N	x	$u(x_N)$	c_N	$u_N(y)$
Y	y			$u(y)$

Tabla 4.1. Magnitudes, estimaciones, incertidumbres típicas, coef. de sensibilidad y contribución a la incertidumbre utilizados en el balance de incertidumbres.

4.4. Incertidumbre expandida de medida U

La **incertidumbre expandida de medida U** se calcula multiplicando la incertidumbre típica $u(y)$ de la estimación de salida por un **factor de cobertura k**.

$$U = k \cdot u(y)$$

En el caso en el que se pueda atribuir una distribución normal al mensurando, y a su vez la incertidumbre típica asociada a la estimación de salida es suficientemente fiable, ha de utilizarse el factor de cobertura $k = 2$. En tal caso, la incertidumbre expandida asociada corresponderá a una **probabilidad de cobertura** de aproximadamente un **95%**.

La primera de las hipótesis citadas, se trata del **criterio de normalidad**. Cuando varias componentes ($N \geq 3$) de la incertidumbre, derivados de distribuciones de probabilidad bien definidas de magnitudes independientes, realizan contribuciones comparables a la incertidumbre típica asociada a la estimación de salida, entonces se cumplen las condiciones del Teorema Central del Límite y puede suponerse que la distribución de la estimación de salida es normal.

En cuanto a la fiabilidad de la incertidumbre típica, se determina por sus grados efectivos de libertad. El **criterio de fiabilidad** se cumple siempre que todas las contribuciones a la incertidumbre Tipo A se obtengan de 10 más observaciones repetidas ($n \geq 10$). Por este motivo, en el proceso de calibración cada medida se tomará un mínimo de 10 veces.

De no cumplirse alguna de las condiciones de normalidad o fiabilidad, el factor de cobertura deberá obtenerse a través de los **grados efectivos de libertad v_{ef}** . El procedimiento para obtener el factor de cobertura k será como sigue:

- a. Obtención de la incertidumbre típica asociada a la estimación de salida, $u(y)$.
- b. Estimación de los grados efectivos de libertad v_{ef} utilizando la fórmula de Welch-Satterthwaite.

$$v_{ef} = \frac{u^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(y)}{v_i}}$$

Donde para una evaluación Tipo A de la incertidumbre típica, los grados efectivos de libertad vienen dados por $v_i = n - 1$ (siendo n el número de observaciones). En el caso de una evaluación Tipo B, por considerarse ésta suficientemente fiable, tendrá infinitos grados de libertad ($v_i \rightarrow \infty$). Debido a ello, las componentes Tipo B no influyen

en el cálculo de grados efectivos de libertad (fracción con denominador de valor infinito).

- c. Obtención del factor de cobertura k de la tabla de valores basada en una distribución T de Student, evaluada para una probabilidad de cobertura del 95,45%. Si v_{ef} , como ocurre generalmente, no es un número entero, deberá truncarse al siguiente entero más pequeño.

ϑ_{ef}	1	2	3	4	5	6	7	8	10	20	50	∞
k	13,97	4,53	3,31	2,87	2,65	2,52	2,43	2,37	2,28	2,13	2,05	2,00

Tabla 4.2. Factores de seguridad k para diferentes grados efectivos de libertad ϑ_{ef}

Es posible que se dé el caso en el que, sin cumplirse las hipótesis de normalidad y fiabilidad, y calculando el factor de cobertura mediante los grados efectivos de libertad, el valor de dicho factor de cobertura sea $k = 2$. También es posible que aun cumpliéndose los criterios de normalidad y fiabilidad, decidamos obtener k mediante los grados efectivos de libertad. En el supuesto de que el valor extraído de la tabla sea $k \neq 2$, nos encontraremos ante lo que parece una contradicción, ya que el factor de cobertura tendría dos posibles valores. No habrá mayor problema, ya que, habiendo cumplido correctamente con las hipótesis y pasos a seguir en ambos procedimientos, ambos resultados serán válidos ($k=2$ y $k>2$), pudiendo utilizar para el cálculo de la incertidumbre expandida el que se prefiera.

4.5. Expresión de la Incertidumbre de medida en los certificados de calibración

Una vez llegados a este punto, es necesario saber plasmar el trabajo realizado. El resultado completo de la medición consistirá en el estimado y del mensurando y la incertidumbre expandida asociada U , expresados de la forma:

$$y \pm U$$

“La incertidumbre expandida de medida ha sido obtenida multiplicando la incertidumbre típica de medición por el factor de cobertura $k = 2$ que, para una distribución normal, corresponde a una probabilidad de cobertura de aproximadamente el 95%. La incertidumbre típica de medida se ha determinado conforme al documento EA4/02 (Cooperación Europea para la Acreditación, Septiembre, 2013).

Sin embargo, si no se cumplen las condiciones de normalidad se deberá indicar:

“La incertidumbre expandida de medida se ha obtenido multiplicando la incertidumbre típica de medida por el factor de cobertura $k = XX$ que, para

una distribución de T de Student con $v_{ef} = YY$ grados efectivos de libertad, corresponde a una probabilidad de cobertura del 95%. Se ha de recordar que la incertidumbre típica de medida se ha determinado conforme al documento EA4/02 (Cooperación Europea para la Acreditación, Septiembre, 2013).

Finalmente, la *incertidumbre* de medida deberá expresarse, como máximo, con **dos cifras significativas**. El *valor numérico* del resultado de la medición será redondeado en su expresión final a **la menor cifra significativa** en el valor de la incertidumbre expandida asignada al resultado de medición. En el caso de que el redondeo reduzca el valor numérico de la incertidumbre de medida en más de un 5%, deberá utilizarse el valor redondeado hacia arriba.

4.6. Guía para el cálculo de la incertidumbre de medida

A continuación, se muestran de forma sintetizada los pasos a seguir para el cálculo de la incertidumbre de medida en un proceso de calibración:

- a. Expresar matemáticamente la dependencia del mensurando Y respecto de las magnitudes de entrada X_i .
- b. Identificar y aplicar todas las correcciones.
- c. Análisis de incertidumbres.
- d. Calcular la incertidumbre típica para:
 - magnitudes medidas reiteradamente $u(\bar{q})$
 - valores de corrección, de medidas previas, tomados de la literatura
 - magnitudes en las que puede suponerse una distribución de probabilidad (calcular la esperanza y la incertidumbre típica $u(x_i)$)
- e. Calcular para cada magnitud de entrada X_i , la contribución $u_i(y)$ a la incertidumbre asociada a la estimación de salida resultante de la estimación de entrada x_i .
- f. Multiplicando por el coeficiente de sensibilidad, y aplicando la propagación de varianzas (o Fourier en caso de que la función modelo sea no lineal), se obtiene la incertidumbre típica $u(y)$ del mensurando.
- g. Calcular la incertidumbre expandida U , multiplicando $u(y)$ por el factor de cobertura k .
- h. Informe del resultado de medición, indicando el estimado y del mensurando, la incertidumbre expandida U asociada, y el factor de cobertura k en el certificado de calibración.

4.7. Valores atípicos. Criterio de rechazo de Chauvenet.

En un proceso de toma de medidas los errores se producen de forma aleatoria, y es por ello que no pueden ser predichos por ningún procedimiento estadístico. En cambio, dichos errores sí que pueden ser detectados una vez se ha realizado una serie de medidas reiteradas, existiendo muchos criterios empleados para este fin (Gómez González) (Sánchez & Carro, 1996).

El más utilizado en metrología es el *Criterio* de Rechazo de Chauvenet, que dice que han de ser rechazadas todas aquellas medidas cuya probabilidad de aparición sea inferior a $\frac{1}{2n}$, siendo n el número de reiteraciones u observaciones de la medida. Esto equivale a decir que se deberán rechazar todas aquellas medidas cuya desviación a la media sea superior a un determinado valor, y por tanto sean consideradas valores atípicos (función de la desviación típica de la muestra). El criterio se puede simplificar mediante la siguiente expresión:

$$\bar{X} - k(n) \cdot s \leq x_i \leq \bar{X} + k(n) \cdot s$$

De modo que una observación x_i será aceptada siempre y cuando esté comprendida entre los límites anteriores.

Siendo $k(n)$ un coeficiente que depende del número de observaciones n , y cuyo valor se representa a continuación.

n	$k(n)$
2	1,15
3	1,38
4	1,54
5	1,65
6	1,73
7	1,80
8	1,86
9	1,92
10	1,96
15	2,13
20	2,24
25	2,33
30	2,40
40	2,48
50	2,57
100	2,81
300	3,14
500	3,29
1000	3,48

Tabla 4.3. Coeficiente $k(n)$ del criterio de Chauvenet

Para poder aplicar este criterio se han de tener en cuenta las siguientes consideraciones:

1. El Criterio de Chauvenet se aplicará de forma continuada hasta que no se rehaga ninguna medida
2. El número de rechazos admisibles son: 1 si el número de observaciones de la medida es menor o igual a 10, y 2 si se encuentra entre 10 y 20. En el caso de que hubiese más rechazos, la serie de medidas debe ser anulada y se ha de revisar el método.

Se ha de mencionar que para la toma de medidas del experimental de este trabajo, no se ha aplicado ningún criterio de rechazo, como pudiera ser el de Chauvenet. La razón es que tales criterios son empleados generalmente para dar luz acerca de la existencia de posibles malos operadores de medida, cuya influencia sea muy significativa en el resultado de la medición.

En un proceso de calibración como el presente, en el que el operador (yo mismo) conoce bien la máquina y el proceso de medición, deja como únicas variables influyentes el mensurando y el instrumento de medida. En cuanto al mensurando, los BPL, por estar calibrados y mantener controladas las condiciones ambientales, no pueden ser objeto de influencia en las variaciones de las medidas. Por su parte, la MMC óptica, puede influir en los resultados de medida, siendo precisamente esta influencia la que se intenta conocer y cuantificar mediante la calibración. Es por ello que no tendría sentido rechazar medidas, según el criterio mencionado ni con ningún otro, ya que los resultados arrojados no serían realistas y no mostrarían el estado actual del instrumento de medida.

Parte III.
EXPERIMENTAL

5. Desarrollo del Experimental

5.1. Introducción

Llegados a este punto, es el momento de adentrarse en el desarrollo experimental del presente estudio. Se tratarán los equipos e instrumentos de medida empleados en su realización, las operaciones preliminares necesarias al proceso de medida, pasando por el propio procedimiento de medida que se ha seguido, y terminando por la toma y tratamiento de los datos obtenidos.

En cuanto a los elementos de medida empleados están, por un lado, los bloques patrón longitudinales (BPL), que han sido utilizados como referencia con la que comparar las diferentes medidas realizadas. Por otro lado está la MMC óptica, que es el instrumento objeto de calibración.

Las operaciones preliminares al proceso de medida son la comprobación de las condiciones ambientales, el atemperamiento de los elementos de medida el tiempo suficiente, la manipulación de los BPL o el arranque de la medidora. Éstas son necesarias para el correcto mantenimiento de los equipos y patrones de medida, así como para la reducción de ciertas componentes de incertidumbre, como pueden ser la temperatura o la dilatación diferencial.

Por su parte, en el procedimiento de medida se indicará, punto por punto, los pasos para la toma de las mediciones, en todo el campo de medida del instrumento, necesarias para su calibración.

Finalmente los datos obtenidos se presentarán de forma tabulada, para poder ser analizados posteriormente mediante las ecuaciones de cálculo y gráficas oportunas.

5.2. Instrumentos de medida utilizados

5.2.1. MMC óptica del Aula de Metrología de la EII

A continuación se describen las características de la MMC óptica del Aula de Metrología de la EII, utilizada para el desarrollo del experimental del presente trabajo. Asimismo, se muestran una serie de fotos realizadas, de todos y cada uno de los elementos que la componen.

5.2.1.1 Características

- Fabricante: Deltec Vision (Actual: Ayonis (AYONIS, 2017))
- Modelo: v 410
- Tipo: Eje vertical
- Iluminación: Diascópica (luz transmitida) y Episcópica (luz reflejada)
- Campo de medida:
 - X: 300 mm
 - Y: 200 mm
 - Z: 80 mm
- Pantalla: 17"
- Aumentos: de 40x a 239x en 5 zooms
- Resolución: 0,001 mm

5.2.1.2 Componentes



Figura 5.1. Equipo de medida completo

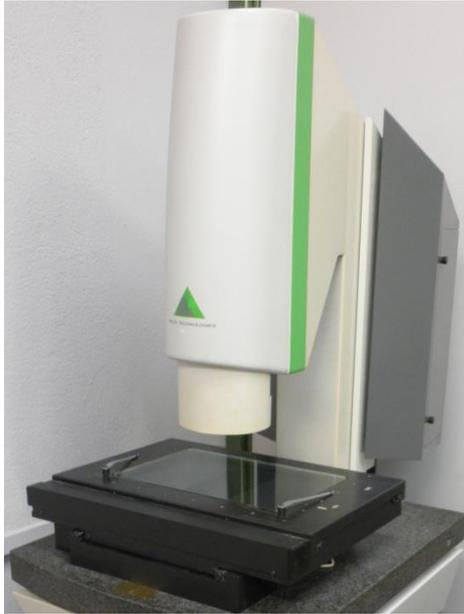


Figura 5.2. MMC óptica Deltec



Figura 5.3. Mesa soporte

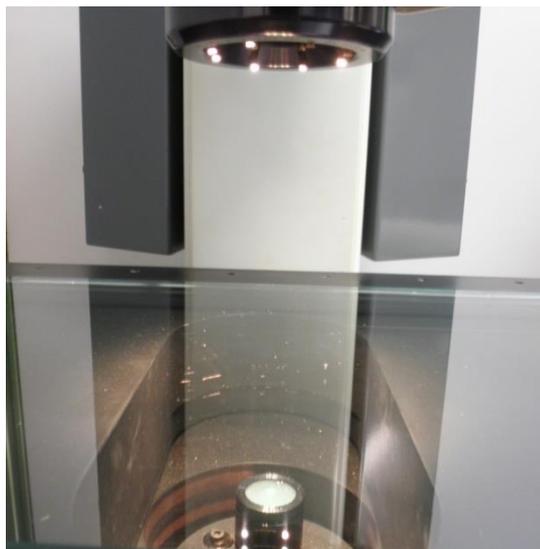


Figura 5.4. Sistemas de iluminación diascópica (inferior) y episcópica (superior)



Figura 5.5. Consola para el control de la iluminación y los movimientos de la mesa

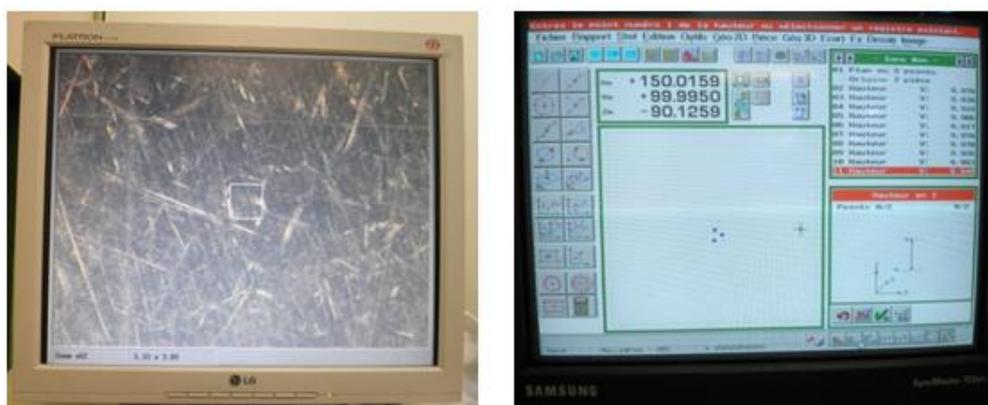


Figura 5.6. Pantallas de Visualización (izquierda) y Control de Software (derecha)

5.2.2. Bloques patrón longitudinales (BPL)

Para tomar como referencia en las diferentes medidas efectuadas, en todo el campo de medida de la MMC óptica, se ha utilizado el juego de bloques patrón del Aula de Metrología de la EII, calibrados según la Norma UNE-EN ISO 3650:2000 (AENOR, 2000) (LCD, 2015).

5.2.2.1 Características

- Objeto: Juego bloques patrón longitudinales (71 bloques)
- Marca: ALPA
- Material: Metálico
- Grado: 2
- Código interno: METRO-001
- Valores nominales: $(1,0005 \div 90)$ mm
- Estado de las caras: Rayadas

5.2.2.2 Bloques utilizados

A continuación se muestra el juego de bloques patrón longitudinales en el estado en el que debe encontrarse al inicio y fin del proceso de toma de medidas, guardados en su maletín y debidamente impregnados en vaselina (para proteger frente a la corrosión).



Figura 5.7. Juego de bloques patrón longitudinales

Además, es interesante ver los bloques patrón utilizados para cubrir todo el campo de medida del eje vertical de la MMC óptica ($0 \div 80$ mm). Para no aumentar innecesariamente la incertidumbre debida a la media de las indicaciones ($u(\bar{X}_i)$), no se ha hecho composición de bloques, y se han empleado seis bloques de 1,0005, 10, 30, 50, 70 y 80 mm para cubrir todo el campo de medida, de forma aproximadamente equidistante.



Figura 5.8. Bloques patrón utilizados (de 1,0005 a 80 mm)

5.3. Operaciones preliminares

En este mismo trabajo ya se definió la calibración como, el conjunto de operaciones que tienen por objeto la determinación del valor de la incertidumbre de un patrón, instrumento o equipo de medida, procediendo a su ajuste o expresando éste mediante tablas o curvas de corrección.

Para que las componentes de incertidumbre de los diferentes factores de influencia tengan los valores más acotados posibles, y que el resultado arrojado por el proceso de calibrado de la máquina sea veraz y se ajuste a la realidad, son necesarias una serie de medidas u operaciones preliminares, destacando, según el documento (Centro Español de Metrología, 2013):

- **Control climático del recinto.** La calibración se realizará en un recinto acondicionado, con una temperatura de $20\text{ °C} \pm \Delta T$, que para el caso del Aula de Metrología de la EII es $\pm 1\text{ °C}$. Todo alejamiento de la temperatura de referencia (20 °C), observado mediante la lectura del sensor de temperatura, implicará la aplicación de una corrección. Esta temperatura se controlará al inicio y al final de cada calibración.
- **Limpieza y manipulación de los bloques.** Se procederá a preparar el conjunto de patrones que va a ser utilizado, siendo limpiados cuidadosamente con paños y tejidos suaves, que no suelten fibras, y una mezcla de etanol absoluto (70%) y éter dietílico (30%). Siempre que se manipulen los bloques, será necesario hacerlo con guantes de goma o tejido fino, de modo que no se ensucien ni oxiden.
- **Atemperamiento de los instrumentos de medida.** Los patrones a emplear se situarán próximos a la MMC óptica, preferiblemente sobre una base metálica, dejándolos estabilizar durante al menos 3 horas. Así, por equilibrio térmico se consigue eliminar la dilatación diferencial –y con ello la corrección correspondiente-, debida a la existencia de un gradiente térmico entre el bloque patrón y el instrumento de medida.
- **Fuente de luz de la MMC óptica apagada en procesos de manipulación.** Debido a la alta potencia de la fuente de luz, si la exposición a ésta es prolongada, se puede producir un incremento de la temperatura superficial del bloque, pudiendo alterar el resultado de la medición. Por ello, deberá mantenerse apagada durante los procesos de manipulación y colocación de los patrones sobre la mesa soporte, procurando además que la toma de medidas se realice en el menor tiempo posible.

Una vez han sido realizadas y verificadas esta serie de operaciones, se puede proceder ya a la toma de medidas, según el procedimiento descrito a continuación.

5.4. Procedimiento de Calibración del eje vertical

El proceso que se desarrolla a continuación es efectuado para el eje vertical, que en MMC ópticas como la utilizada, se denomina eje Z.

La calibración será realizada mediante la utilización de bloques patrón longitudinales (BPL), de longitudes nominales tales que cubran, de forma aproximadamente equidistante, el campo de medida del eje a calibrar.

Los bloques se situarán sobre la mesa soporte, utilizando uno de tamaño suficiente a modo de base o superficie auxiliar (en el experimental se ha utilizado el bloque de 90 mm), y sobre éste, el patrón cuya longitud se desea calibrar. De esta forma, con el bloque empleado como base, el bloque de longitud nominal tendrá una superficie perfectamente plana y paralela al cristal de la mesa soporte, que además, por ser opaca, permitirá mediante la iluminación episcópica captar el punto 0 de la longitud del bloque. Esta disposición se mostró previamente en el trabajo, en la Figura 3.1.

Ya que para la presente tarea, es necesario iluminar las superficies de la superficie auxiliar y del bloque de longitud a calibrar, para posteriormente enfocar éstas y seleccionar el punto requerido, la iluminación utilizada será episcópica (luz reflejada). Para la labor requerida, la iluminación diascópica (luz transmitida) no será empleada en ningún momento, ya que la única finalidad de ésta es la proyectar los perfiles de las piezas, no siendo de utilidad para la medición de distancias o enfoques en el eje vertical.

Dado que la medidora tiene la posibilidad de enfoque automático y manual, se tomarán 10 medidas, para cada uno de los aumentos (5) del patrón de 50 mm (elegido por estar aproximadamente en el centro del campo de medida, pero se podría haber utilizado cualquier otro). El objetivo de estas medidas, es comparar ambos tipos de enfoques desde el punto de vista de exactitud (diferencia de las medidas respecto al teórico) y de precisión (desviación típica de las observaciones). Aunque en el apartado de análisis de resultados se explicará con mayor detalle, la conclusión extraída de dicha comparación es que el enfoque automático es considerablemente mejor que el manual, tanto a exactitud como a precisión se refiere. Es por ello que las medidas tomadas en el proceso de calibración han sido realizadas con el enfoque automático, eliminando así la influencia del operador, y haciendo que la variabilidad observada en las medidas sea debida única y exclusivamente al instrumento de medida, la MMC óptica en nuestro caso.

Una vez colocados los bloques, y con la iluminación que proporcione el mejor enfoque, se tomarán 10 medidas en un mismo punto para cada bloque (6) y aumento (5), de modo que se cumpla la hipótesis de fiabilidad para el cálculo de incertidumbres. Se tomarán por tanto un total de 300 medidas.

5.4.1. Pasos del proceso

Una vez se han realizado todas las operaciones preliminares (comprobación de temperatura ambiente, limpieza de los patrones, atemperamiento de los equipos de medida y encendido de la máquina) puede dar comienzo el proceso de calibración, el cual se describe paso a paso a continuación:

1. Colocación del bloque auxiliar (en este experimental se ha utilizado el bloque de 90 mm) de modo que las caras de mayor superficie estén, una en contacto con el cristal de la mesa y la otra haciendo de base para el bloque patrón de longitud a calibrar. Se situará aproximadamente en el centro de la mesa soporte, de modo que los movimientos posteriores en los ejes X e Y, no lleguen al extremo de sus respectivos campos de medida. De esta forma se disminuirá el error que pudiese provocar el movimiento errático de los husillos en estos límites del campo de medición.
2. Colocación del bloque de longitud nominal a calibrar, de modo que una de sus caras rectificadas esté en perfecto contacto con el bloque auxiliar, siendo la cara rectificada opuesta la que se enfocará con la MMC óptica. El resultado ha de ser de una especie de T invertida, como se muestra en la Figura 5.9 (aparecen el bloque auxiliar, de 90 mm, y el de longitud nominal de 50 mm).

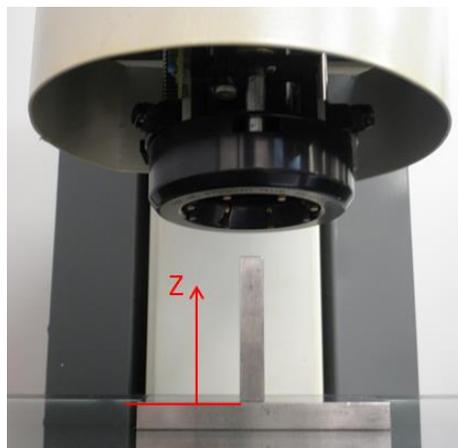


Figura 5.9. Colocación de bloques auxiliar y nominal

3. Toma de medida. Para ello se elige el comando Altura (en el que hay que tomar dos puntos) y, con la iluminación (episcópica) adecuada, se procede a la toma del primer punto, con el enfoque automático, que corresponderá a la superficie de referencia del bloque auxiliar. Del mismo modo, tomamos el segundo punto en la superficie libre del bloque nominal. Una vez elegido el segundo punto, el software de la

medidora arrojará el valor de la medida, con una resolución de 0,001 mm. Los puntos escogidos serán los mismos para cada bloque y aumento, reduciendo así, en la medida de lo posible, las pequeñas irregularidades que pudieran tener las superficies de los bloques. Hay que tener en cuenta, que aunque el enfoque sea automático, es necesario enfocar mínimamente cada superficie de forma manual. De este modo, se evitan errores en el autoenfoco y se reduce el tiempo que el software emplea para ello.

4. Se repite el proceso, sin mover los bloques en ningún momento, hasta tomar 10 medidas para cada uno de los 5 aumentos (todas ellas en los mismos puntos). Es decir, para cada punto de calibración se necesitan 50 medidas, entre las cuales los patrones han de permanecer inmóviles.
5. A continuación, se pasará al siguiente bloque de los seleccionados, repitiendo de nuevo los pasos anteriores. Durante el proceso de cambio ha de apagarse el sistema de iluminación, para que no se incremente la temperatura superficial de los bloques.
6. Los bloques ya utilizados, y en el caso de que no vuelvan a ser necesarios, se limpiarán y recubrirán convenientemente con vaselina, para posteriormente guardarlos en el maletín.

Para el proceso de comparación de los enfoques manual y automático, en el patrón de 50 mm, se sigue exactamente el mismo proceso. Se realizan las 10 medidas para cada una de las 5 ampliaciones (en el mismo punto), con cada uno de los modos de enfoque. Nuevamente, mencionar que los bloques no se moverán durante todo el proceso.

Finalmente, puede resultar interesante la visualización conjunta de los diferentes bloques patrón utilizados para abarcar, por completo, el campo de medida del eje vertical de la MMC óptica. Recordar nuevamente, que las longitudes nominales empleadas son 1,0005, 10, 30, 50, 70 y 80 mm.

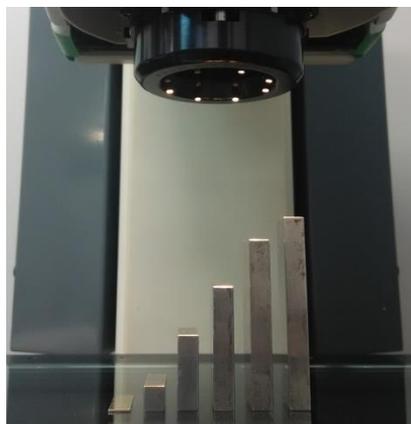


Figura 5.10. Visualización conjunta de los BPL utilizados

5.5. Toma y tratamiento de los datos

5.5.1. Función Modelo

Denominando:

l_{ji} a la medida *i*-ésima en el punto de calibración *j*-ésimo, en el eje que se está calibrando, Z.

n al número de repeticiones en cada punto de calibración (para todos los casos, $n=10$).

l_{pj} al valor verdadero del patrón considerado en el punto de calibración *j*. Este valor es el que aparece en el Certificado de Calibración de los BPL.

C_{cj} a la corrección por calibración en el punto *j* de calibración.

Se calcularán los siguientes parámetros, utilizando las expresiones:

1. \bar{l}_j = valor medio de calibración en el punto *j*:

$$\bar{l}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n l_{ji}$$

2. $D_{\bar{l}_j}$ = desviación respecto al valor corregido del patrón, en el punto *j*:

$$D_{\bar{l}_j} = \bar{l}_j - l_{pj}$$

3. Desviación típica de repetibilidad:

$$s_j = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (l_{ji} - \bar{l}_j)^2}$$

La *función modelo* o ecuación que expresa la magnitud de salida en función de las magnitudes de entrada $Y = f(X_i)$ resulta:

$$C_{cj} = l_{pj} - \bar{l}_j + \sum \text{Correcciones}$$

Que desarrollando términos, equivale a:

$$C_{cj} = l_{pj} - \bar{l}_j + C_E + C_{T^a} + C_{\text{deriva BPL}} + C_{\text{dilatación diferencial}}$$

Dado que los elementos de medida se encuentran en equilibrio térmico, por haberlos atemperado térmicamente en las operaciones preliminares al proceso de calibración, la dilatación diferencial (y la corrección correspondiente) de los mismos se puede suponer despreciable.

Finalmente, la función modelo para la calibración, es:

$$C_{cj} = l_{pj} - \bar{l}_j + C_E + C_{T^a} + C_{deriva\ BPL}$$

Siendo:

- l_{pj} al valor convencional del patrón considerado en el punto de calibración j . Este valor es el que aparece en el Certificado de Calibración de los BPL.
- \bar{l}_j valor medio de la indicación del equipo en el punto j .
- C_E la corrección de redondeo por escala o resolución.
- C_{T^a} la corrección por temperatura.
- $C_{deriva\ BPL}$ la corrección por deriva de los BPL.

5.5.2. Cálculo de Correcciones

Se va a forzar a que todas las correcciones sean cero, ya que así se evita el tener que corregir todas y cada una de las medidas, lo que es muy poco práctico.

Aplicando la esperanza matemática a cada uno de los términos de la función modelo:

- $E(l_{pj})$ = Valor convencional del patrón (obtenido del Certificado de Calibración de los BPL).
- $E(\bar{l}_j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n l_{j_i}$
- $E(C_E) = 0$

Ya que la corrección por escala es una variable aleatoria que sigue una distribución uniforme o rectangular en el intervalo $\left[\frac{-E}{2}, \frac{E}{2}\right]$ mm, siendo su esperanza matemática igual a cero.

- $E(C_{T^a}) = 0$

Considerando que la variación de temperatura es una variable aleatoria que sigue una distribución uniforme o rectangular, en el intervalo $[19, 21]$ °C, la esperanza matemática es igual a 20 °C, es

decir, igual al valor de referencia y por tanto, no hay que hacer ninguna corrección por temperatura.

- $E(C_{\text{deriva BPL}}) = 0$

La deriva de los BPL es una variable aleatoria de distribución uniforme o rectangular en el intervalo $[-0,5, 0,5] \mu m$, definido como criterio de aceptación-rechazo del Aula de Metrología de la EII. Por ello, la esperanza matemática de la deriva de los BPL es igual a cero.

5.5.3. Cálculo de incertidumbres

Aunque las correcciones por escala, temperatura y deriva de los BPL sean cero (se ha forzado a que lo sean), sus incertidumbres no van a serlo, y por ello, han de ser correctamente declaradas en la función modelo.

El cálculo de incertidumbres de medida se hará de acuerdo a la referencia (Cooperación Europea para la Acreditación, Septiembre, 2013), siendo las contribuciones a la incertidumbre final:

- Debida al patrón utilizado l_{pj} :

$$u(l_{pj}) = \frac{U_{\text{certificado}}}{k} = \frac{[0,16 + 0,0015 \cdot L_{\text{nominal}}]}{k}$$
$$c_i = 1$$

Dónde:

- $U_{\text{certificado}}$ se obtiene del Certificado de Calibración de los BPL y se expresa en μm .
 - L_{nominal} es la longitud nominal del bloque utilizado en la calibración, expresado en mm .
 - $k = 2$
 - c_i es el coeficiente de sensibilidad asociado a la magnitud de entrada, en este caso el bloque patrón.
- Debida a la desviación típica experimental de la media aritmética \bar{l}_j :

$$u(\bar{l}_j) = \frac{s_j}{\sqrt{n}}$$
$$c_i = -1$$

Dónde:

- n el número de repeticiones u observaciones de la medida, que en el caso de este experimental es siempre $n = 10$.

- Debida a la resolución (o redondeo por escala) del instrumento de medida C_E :

$$u(C_E) = \frac{\frac{E}{2} - \left(\frac{-E}{2}\right)}{\sqrt{12}} = \frac{E}{\sqrt{12}} = \frac{0,001}{\sqrt{12}} \text{ mm}$$

$$c_i = 1$$

- Debida a la variación de temperatura C_{T^a} :

$$u(C_{T^a}) = L_{nominal} \cdot \alpha \cdot \frac{\Delta T}{\sqrt{3}}$$

$$c_i = 1$$

Siendo:

- α el coeficiente de dilatación lineal del patrón considerado, que para el caso del acero es $\alpha = 11,5 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}$.
 - ΔT es la variación de temperatura del bloque patrón durante el proceso de calibración. Por ser la temperatura del Aula de Metrología de la EII de $20 \text{ } ^\circ\text{C} \pm 1 \text{ } ^\circ\text{C}$, y por estar los elementos de medida en equilibrio térmico con ésta, la variación de temperatura de los bloques patrón longitudinales será también de $\Delta T = \pm 1 \text{ } ^\circ\text{C}$.
- Debida a la deriva que el BPL ha podido sufrir desde su última calibración $C_{deriva \text{ BPL}}$, que según el criterio de aceptación-rechazo del Aula de Metrología es de $\pm 0,5 \text{ } \mu\text{m}$:

$$u(C_{deriva \text{ BPL}}) = \frac{0,5 - (-0,5)}{\sqrt{12}} \mu\text{m} = \frac{1}{\sqrt{12}} \mu\text{m} = \frac{0,001}{\sqrt{12}} \text{ mm}$$

$$c_i = 1$$

Una vez analizadas las componentes de incertidumbre típica asociada a las magnitudes de entrada, se calcula, según el documento EA2/04, la incertidumbre típica combinada:

$$u(y)_j = \sqrt{\sum_{i=1}^n u_i^2(y)} = \sqrt{\sum_{i=1}^n [c_i \cdot u(x_i)]^2}$$

Siendo:

- $u(y)_j$ la incertidumbre típica combinada para cada punto de calibración j (y nivel de aumento).

Expresión que desarrollando, resulta:

$$u(y)_j = \sqrt{\left(1 \cdot \frac{[0,16+0,0015 \cdot L_{nominal}]}{k}\right)^2 + \left(-1 \cdot \frac{S_j}{\sqrt{n}}\right)^2 + \left(1 \cdot \frac{E}{\sqrt{12}}\right)^2 + \left(1 \cdot L_{nominal} \cdot \alpha \cdot \frac{\Delta T}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(1 \cdot \frac{0,001}{\sqrt{12}} \text{ mm}\right)^2}$$

Finalmente, para la incertidumbre expandida de cada punto de calibración, tenemos:

$$U_j = k \cdot u(y)_j$$

Donde el factor de cobertura es $k = 2$, por cumplirse, según el EA4/02:

- La *hipótesis de fiabilidad*, ya que la muestra medida, correspondiente a una evaluación Tipo A de incertidumbre, se basa en $n = 10$ repeticiones.
- La *hipótesis de normalidad*. Puesto que hay al menos 3 componentes de incertidumbre de Tipo B, se cumplen las condiciones del Teorema Central del Límite y puede suponerse que la estimación de salida sigue una distribución normal.

Una vez comentadas todas las contribuciones a la incertidumbre expandida en la calibración del eje vertical de la MMC óptica, puede ser de utilidad reunir las todas en una tabla, facilitando así su comprensión:

Magnitud de entrada X_i	incertidumbre típica $u(x_i)$	Tipo	distribución de probabilidad	Grados de libertad $(n - 1)$	coef. de sensibilidad c_i	contribución a la incertidumbre $u_i(y) = c_i u(x_i)$
\bar{l}_j	$\frac{S_j}{\sqrt{n}}$	A	normal	9	-1	$-\frac{S_j}{\sqrt{n}}$
l_{pj}	$\frac{U_{certificado}}{k}$	B	normal	∞	1	$\frac{U_{certificado}}{k}$
C_E	$\frac{E}{\sqrt{12}}$	B	rectangular	∞	1	$\frac{E}{\sqrt{12}}$
C_{T^a}	$L_{nominal} \cdot \alpha \cdot \frac{\Delta T}{\sqrt{3}}$	B	rectangular	∞	1	$L_{nominal} \cdot \alpha \cdot \frac{\Delta T}{\sqrt{3}}$
$C_{deriva BPL}$	$\frac{2 \cdot deriva}{\sqrt{12}}$	B	rectangular	∞	1	$\frac{2 \cdot deriva}{\sqrt{12}}$
Incertidumbre combinada $u(y)_j$					$u(y)_j = \sqrt{\sum_{i=1}^n [c_i \cdot u(x_i)]^2}$	
Incertidumbre expandida U					$U_j = k \cdot u(y)_j$	

Tabla 5.1. Contribución a la incertidumbre expandida en la calibración del eje vertical

5.5.4. Toma de datos

A continuación se muestran, de forma tabulada, las medidas que han sido tomadas durante el experimental, todas ellas siguiendo el proceso de calibración descrito anteriormente.

En la primera tabla, aparecen recogidos los datos obtenidos de la comparación de los enfoques manual (M) y automático (A), para el bloque patrón de 50 mm. En las siguientes, se encuentran las medidas de calibración, agrupadas según el número de aumentos empleados.

Bloque patrón: 50 mm											
Aumentos		40x		62x		97x		152x		239x	
Enfoque		A	M	A	M	A	M	A	M	A	M
l_{j_i}	1	49,987	50,361	50,003	49,846	49,988	49,872	50,000	49,988	49,998	49,999
	2	49,970	50,330	50,032	50,241	50,001	50,001	50,009	50,060	49,999	50,007
	3	49,980	49,870	50,024	49,952	50,029	50,024	49,994	49,931	50,003	50,014
	4	50,030	49,812	50,010	50,140	49,984	49,956	49,989	49,995	50,003	50,009
	5	50,016	49,647	50,043	50,126	50,003	50,076	49,991	50,025	50,004	50,040
	6	49,965	50,297	50,027	50,192	49,991	50,006	49,985	49,945	50,003	50,021
	7	50,108	50,216	50,065	50,082	49,982	49,942	50,007	50,059	50,005	49,971
	8	49,971	49,805	50,016	49,950	49,981	50,034	50,005	50,042	50,005	50,035
	9	50,037	49,989	50,034	50,099	49,991	49,949	49,979	50,029	50,005	50,021
	10	49,973	49,846	50,015	50,110	49,982	49,973	50,017	50,063	50,003	50,003
Media \bar{l}_j (mm)		50,0037	50,0173	50,0269	50,0738	49,9932	49,9833	49,9976	50,0137	50,0028	50,0120
Desv. Típica s_j (mm)		0,0451	0,2603	0,0180	0,1216	0,0148	0,0575	0,0120	0,0476	0,0024	0,0196

Tabla 5.2. Toma de medidas. Comparación enfoque manual (M) y automático (A).

40x							
$L_{nominal}$ (mm)		1,0005	10	30	50	70	80
l_{j_i}	1	0,908	9,976	29,992	49,810	70,038	80,091
	2	0,946	9,938	30,074	49,768	70,042	80,098
	3	0,929	9,918	30,016	49,788	69,997	80,094
	4	0,909	9,906	29,954	49,760	69,906	80,123
	5	0,898	9,917	30,015	49,724	69,988	80,095
	6	0,894	9,970	29,953	49,738	69,966	80,113
	7	0,901	9,970	29,993	49,679	69,913	80,112
	8	0,960	9,926	29,992	49,845	69,926	80,109
	9	0,956	9,983	29,949	49,731	69,903	80,074
	10	0,891	9,940	29,998	49,769	69,930	80,082
Media \bar{l}_j (mm)		0,9192	9,9444	29,9936	49,7612	69,9609	80,0991
Desv. Típica s_j (mm)		0,0264	0,0281	0,0375	0,0469	0,0531	0,0151

Tabla 5.3. Toma de medidas 40x

62x							
$L_{nominal}$ (mm)		1,0005	10	30	50	70	80
l_{j_i}	1	0,941	9,988	29,957	49,848	69,945	80,015
	2	0,948	10,001	30,037	49,866	69,946	79,996
	3	0,990	10,015	30,078	49,855	69,943	80,000
	4	0,966	10,017	30,028	49,870	69,952	80,041
	5	0,938	10,013	29,985	49,862	69,980	79,995
	6	0,969	9,978	29,966	49,863	69,965	80,052
	7	0,957	9,949	29,981	49,834	69,974	80,008
	8	0,995	10,017	29,954	49,864	69,968	80,011
	9	0,961	9,983	29,959	49,858	69,984	80,013
	10	0,948	10,003	29,948	49,860	70,001	80,002
Media \bar{l}_j (mm)		0,9613	9,9964	29,9893	49,858	69,9658	80,0133
Desv. Típica s_j (mm)		0,0193	0,0220	0,0437	0,0104	0,0194	0,0190

Tabla 5.4. Toma de medidas 62x

97x							
$L_{nominal}$ (mm)		1,0005	10	30	50	70	80
l_{j_i}	1	0,961	9,991	29,999	49,926	70,004	80,042
	2	0,969	10,016	29,999	49,913	70,023	80,043
	3	0,978	10,004	29,999	49,912	70,000	80,060
	4	0,953	10,000	29,992	49,907	69,993	80,059
	5	0,969	10,002	30,009	49,904	70,007	80,058
	6	0,947	9,994	30,006	49,910	70,014	80,053
	7	0,964	10,008	30,006	49,905	70,017	80,054
	8	0,971	9,989	30,009	49,915	70,006	80,057
	9	0,960	9,998	30,010	49,898	70,009	80,056
	10	0,957	10,007	30,002	49,922	70,011	80,060
Media \bar{l}_j (mm)		0,9629	10,0009	30,0031	49,9112	70,0084	80,0542
Desv. Típica s_j (mm)		0,0092	0,0083	0,0059	0,0084	0,0086	0,0066

Tabla 5.5. Toma de medidas 97x

152x							
$L_{nominal}$ (mm)		1,0005	10	30	50	70	80
l_{j_i}	1	1,000	9,996	30,028	49,975	69,996	80,033
	2	0,984	9,993	30,016	49,976	69,992	80,043
	3	0,996	9,999	30,013	49,957	69,999	80,039
	4	1,014	9,995	30,012	49,968	70,001	80,025
	5	0,998	10,000	30,018	49,972	69,994	80,042
	6	0,994	10,009	30,033	49,975	69,994	80,035
	7	0,991	9,997	30,024	49,954	69,988	80,034
	8	0,996	9,998	30,020	49,969	69,987	80,047
	9	1,002	10,004	30,030	49,975	70,001	80,043
	10	0,992	9,993	30,016	49,953	69,996	80,026
Media \bar{l}_j (mm)		0,9967	9,9984	30,0210	49,9674	69,9948	80,0367
Desv. Típica s_j (mm)		0,0079	0,0050	0,0074	0,0092	0,0049	0,0074

Tabla 5.6. Toma de medidas 152x

239x							
$L_{nominal}$ (mm)		1,0005	10	30	50	70	80
l_{j_i}	1	0,996	9,990	30,014	49,997	70,013	80,020
	2	0,996	9,990	30,020	49,991	70,014	80,021
	3	0,989	9,993	30,024	49,992	70,008	80,025
	4	0,992	9,999	30,029	49,996	70,005	80,037
	5	0,997	9,995	30,028	49,996	70,001	80,032
	6	0,992	9,993	30,028	49,999	70,003	80,030
	7	0,993	9,991	30,036	49,997	70,009	80,032
	8	0,993	9,997	30,026	49,985	70,000	80,026
	9	0,996	9,996	30,025	49,987	70,010	80,033
	10	0,993	9,997	30,030	49,992	70,001	80,020
Media \bar{l}_j (mm)		0,9937	9,9941	30,0260	49,9932	70,0064	80,0276
Desv. Típica s_j (mm)		0,0025	0,0032	0,0059	0,0046	0,0051	0,0061

Tabla 5.7. Toma de medidas 239x

Parte IV. RESULTADOS

6. Resultados

6.1. Calibración

Llegados a este punto, es el momento de indicar los resultados obtenidos en el proceso de calibración, todos ellos calculados como se ha indicado en el apartado 5.5.

Se muestran de forma tabulada, y para cada nivel de amplificación, el cálculo de correcciones, de incertidumbres y el resultado de medición final, respectivamente.

6.1.1. Correcciones

40x			
$L_{nominal}$ (mm)	$L_{calibrada}$ (mm)	Media (mm)	Corrección (μm)
1,0005	1,00052	0,9192	81,32
10	10,00002	9,9444	55,62
30	30,00004	29,9936	6,44
50	50,00024	49,7612	239,04
70	70,00012	69,9609	39,22
80	80,00025	80,0991	-98,85

Tabla 6.1. 40x. Corrección (μm)

62x			
$L_{nominal}$ (mm)	$L_{calibrada}$ (mm)	Media (mm)	Corrección (μm)
1,0005	1,00052	0,9613	39,22
10	10,00002	9,9964	3,62
30	30,00004	29,9893	10,74
50	50,00024	49,8580	142,24
70	70,00012	69,9658	34,32
80	80,00025	80,0133	-13,05

Tabla 6.2. 62x. Corrección (μm)

97x			
<i>L_{nominal}</i> (mm)	<i>L_{calibrada}</i> (mm)	<i>Media</i> (mm)	<i>Corrección</i> (μm)
1,0005	1,00052	0,9629	37,62
10	10,00002	10,0009	-0,88
30	30,00004	30,0031	-3,06
50	50,00024	49,9112	89,04
70	70,00012	70,0084	-8,28
80	80,00025	80,0542	-53,95

Tabla 6.3. 97x. Corrección (μm)

152x			
<i>L_{nominal}</i> (mm)	<i>L_{calibrada}</i> (mm)	<i>Media</i> (mm)	<i>Corrección</i> (μm)
1,0005	1,00052	0,9967	3,82
10	10,00002	9,9984	1,62
30	30,00004	30,0210	-20,96
50	50,00024	49,9674	32,84
70	70,00012	69,9948	5,32
80	80,00025	80,0367	-36,45

Tabla 6.4. 152x. Corrección (μm)

239x			
<i>L_{nominal}</i> (mm)	<i>L_{calibrada}</i> (mm)	<i>Media</i> (mm)	<i>Corrección</i> (μm)
1,0005	1,00052	0,9937	6,82
10	10,00002	9,9941	5,92
30	30,00004	30,0260	-25,96
50	50,00024	49,9932	7,04
70	70,00012	70,0064	-6,28
80	80,00025	80,0276	-27,35

Tabla 6.5. 239x. Corrección (μm)

6.1.2. Incertidumbres

40x								
$L_{nominal}$ (mm)	Desviación Típica (μm)	$u(x_i)$ (μm)					$u(y)_j$ (μm)	U_j (μm)
		\bar{l}_j	l_{pj}	C_E	C_{T^a}	$C_{deriva\ BPL}$		
1,0005	26,4020	8,3491	0,0808	0,2887	0,0066	0,2887	8,36	16,72
10	28,1275	8,8947	0,0875	0,2887	0,0664	0,2887	8,90	17,81
30	37,4973	11,8577	0,1025	0,2887	0,1992	0,2887	11,87	23,73
50	46,9297	14,8405	0,1175	0,2887	0,3320	0,2887	14,85	29,70
70	53,1444	16,8057	0,1325	0,2887	0,4648	0,2887	16,82	33,64
80	15,1324	4,7853	0,1400	0,2887	0,5312	0,2887	4,83	9,67
		$\frac{s_j}{\sqrt{n}}$	$\frac{U_{BPL}}{k}$	$\frac{E}{\sqrt{12}}$	$L_{nominal} \cdot \alpha \cdot \frac{\Delta T}{\sqrt{3}}$	$\frac{2 \cdot deriva}{\sqrt{12}}$		
		$c_i = -1$	$c_i = 1$	$c_i = 1$	$c_i = 1$	$c_i = 1$		

Tabla 6.6. 40x. Incertidumbre (μm).

62x								
$L_{nominal} (mm)$	<i>Desviación Típica</i> (μm)	$u(x_i) (\mu m)$					$u(y)_j (\mu m)$	$U_j (\mu m)$
		\bar{l}_j	l_{pj}	C_E	C_{T^a}	$C_{deriva BPL}$		
1,0005	19,3451	6,1175	0,0808	0,2887	0,0066	0,2887	6,13	12,26
10	22,0363	6,9685	0,0875	0,2887	0,0664	0,2887	6,98	13,96
30	43,6960	13,8179	0,1025	0,2887	0,1992	0,2887	13,83	27,65
50	10,4030	3,2897	0,1175	0,2887	0,3320	0,2887	3,33	6,67
70	19,3781	6,1279	0,1325	0,2887	0,4648	0,2887	6,16	12,32
80	18,9740	6,0001	0,1400	0,2887	0,5312	0,2887	6,04	12,08
		$\frac{s_j}{\sqrt{n}}$	$\frac{U_{BPL}}{k}$	$\frac{E}{\sqrt{12}}$	$L_{nominal} \cdot \alpha \cdot \frac{\Delta T}{\sqrt{3}}$	$\frac{2 \cdot deriva}{\sqrt{12}}$		
		$c_i = -1$	$c_i = 1$	$c_i = 1$	$c_i = 1$	$c_i = 1$		

Tabla 6.7. 62x. Incertidumbre (μm).

97x								
$L_{nominal} (mm)$	<i>Desviación Típica</i> (μm)	$u(x_i) (\mu m)$					$u(y)_j (\mu m)$	$U_j (\mu m)$
		\bar{l}_j	l_{pj}	C_E	C_{T^a}	$C_{deriva BPL}$		
1,0005	9,2310	2,9191	0,0808	0,2887	0,0066	0,2887	2,95	5,90
10	8,3193	2,6308	0,0875	0,2887	0,0664	0,2887	2,66	5,33
30	5,8585	1,8526	0,1025	0,2887	0,1992	0,2887	1,91	3,82
50	8,4169	2,6617	0,1175	0,2887	0,3320	0,2887	2,72	5,43
70	8,5661	2,7088	0,1325	0,2887	0,4648	0,2887	2,78	5,56
80	6,5963	2,0859	0,1400	0,2887	0,5312	0,2887	2,20	4,39
		$\frac{s_j}{\sqrt{n}}$	$\frac{U_{BPL}}{k}$	$\frac{E}{\sqrt{12}}$	$L_{nominal} \cdot \alpha \cdot \frac{\Delta T}{\sqrt{3}}$	$\frac{2 \cdot deriva}{\sqrt{12}}$		
		$c_i = -1$	$c_i = 1$	$c_i = 1$	$c_i = 1$	$c_i = 1$		

Tabla 6.8. 97x. Incertidumbre (μm).

152x								
$L_{nominal} (mm)$	$Desviación Típica (\mu m)$	$u(x_i) (\mu m)$					$u(y)_j (\mu m)$	$U_j (\mu m)$
		\bar{l}_j	l_{pj}	C_E	C_{T^a}	$C_{deriva BPL}$		
1,0005	7,9169	2,5036	0,0808	0,2887	0,0066	0,2887	2,54	5,08
10	4,9933	1,5790	0,0875	0,2887	0,0664	0,2887	1,63	3,27
30	7,3636	2,3286	0,1025	0,2887	0,1992	0,2887	2,37	4,75
50	9,2280	2,9181	0,1175	0,2887	0,3320	0,2887	2,97	5,94
70	4,8717	1,5406	0,1325	0,2887	0,4648	0,2887	1,67	3,33
80	7,4095	2,3431	0,1400	0,2887	0,5312	0,2887	2,44	4,88
		$\frac{s_j}{\sqrt{n}}$	$\frac{U_{BPL}}{k}$	$\frac{E}{\sqrt{12}}$	$L_{nominal} \cdot \alpha \cdot \frac{\Delta T}{\sqrt{3}}$	$\frac{2 \cdot deriva}{\sqrt{12}}$		
		$c_i = -1$	$c_i = 1$	$c_i = 1$	$c_i = 1$	$c_i = 1$		

Tabla 6.9. 152x. Incertidumbre (μm).

239x								
$L_{nominal} (mm)$	$Desviación Típica (\mu m)$	$u(x_i) (\mu m)$					$u(y)_j (\mu m)$	$U_j (\mu m)$
		\bar{l}_j	l_{pj}	C_E	C_{T^a}	$C_{deriva BPL}$		
1,0005	2,4967	0,7895	0,0808	0,2887	0,0066	0,2887	0,89	1,79
10	3,1780	1,0050	0,0875	0,2887	0,0664	0,2887	1,09	2,18
30	5,9442	1,8797	0,1025	0,2887	0,1992	0,2887	1,94	3,87
50	4,6140	1,4591	0,1175	0,2887	0,3320	0,2887	1,56	3,11
70	5,1251	1,6207	0,1325	0,2887	0,4648	0,2887	1,74	3,48
80	6,0590	1,9160	0,1400	0,2887	0,5312	0,2887	2,03	4,07
		$\frac{s_j}{\sqrt{n}}$	$\frac{U_{BPL}}{k}$	$\frac{E}{\sqrt{12}}$	$L_{nominal} \cdot \alpha \cdot \frac{\Delta T}{\sqrt{3}}$	$\frac{2 \cdot deriva}{\sqrt{12}}$		
		$c_i = -1$	$c_i = 1$	$c_i = 1$	$c_i = 1$	$c_i = 1$		

Tabla 6.10. 239x. Incertidumbre (μm).

6.1.3. Resultado final

Puesto que en el trabajo rutinario con la medidora, corregir todas las medidas obtenidas puede resultar tedioso e ineficiente, se va a optar por tomar una *Incertidumbre expandida con corrección de calibración nula*. De este modo, la incertidumbre englobará la máxima corrección encontrada en la calibración (para cada nivel de aumento), en valor absoluto.

En definitiva, se elimina la necesidad de corregir todas las medidas a costa de aumentar la incertidumbre, cuyo valor será:

$$U_{global[C_{cj}=0]} = \max[|C_{cj}| + U(C_{cj})]$$

<i>Aumentos</i>	<i>Punto de calibración (mm)</i>	C_{cj} (μm)	U_j (μm)	$ C_{cj} + U(C_{cj})$ (μm)
40x	1,0005	81,32	16,72	98,04
	10	55,62	17,81	73,43
	30	6,44	23,73	30,17
	50	239,04	29,70	268,74
	70	39,22	33,64	72,86
	80	-98,85	9,67	108,52
62x	1,0005	39,22	12,26	51,48
	10	3,62	13,96	17,58
	30	10,74	27,65	38,39
	50	142,24	6,67	148,91
	70	34,32	12,32	46,64
	80	-13,05	12,08	25,13
97x	1,0005	37,62	5,90	43,52
	10	-0,88	5,33	6,21
	30	-3,06	3,82	6,88
	50	89,04	5,43	94,47
	70	-8,28	5,56	13,84
	80	-53,95	4,39	58,34

Tabla 6.11. Resultado calibración 40x, 62x y 97x

<i>Aumentos</i>	<i>Punto de calibración (mm)</i>	C_{cj} (μm)	U_j (μm)	$ C_{cj} + U(C_{cj})$ (μm)
152x	1,0005	3,82	5,08	8,90
	10	1,62	3,27	4,89
	30	-20,96	4,75	25,71
	50	32,84	5,94	38,78
	70	5,32	3,33	8,65
	80	-36,45	4,88	41,33
239x	1,0005	6,82	1,79	8,61
	10	5,92	2,18	8,10
	30	-25,96	3,87	29,83
	50	7,04	3,11	10,15
	70	-6,28	3,48	9,76
	80	-27,35	4,07	31,42

Tabla 6.12. Resultado calibración 152x y 239x

Y en definitiva, los resultados obtenidos de la calibración del eje vertical de la MMC óptica son:

<i>Aumentos</i>	C_{cj} (μm)	U_j (μm)	$ C_{cj} + U(C_{cj})$ (μm)
40x	239,04	29,70	268,74
62x	142,24	6,67	148,91
97x	89,04	5,43	94,47
152x	-36,45	4,88	41,33
239x	-27,35	4,07	31,42

Tabla 6.13. Resultado final de calibración

Para un factor de cobertura $k = 2$ en todos los casos.

6.2. Interpretación de los resultados

6.2.1. Comparación enfoques Manual y Automático

Este análisis se ha hecho con el objetivo de comprobar la influencia que tiene el operador en la toma de medidas, mediante la comparación del enfoque manual (el operador interviene) y el enfoque automático (el operador desaparece).

Puesto que no pertenece a la calibración de la medidora, no se han calculado las correcciones ni incertidumbres, puesto que éstas son, precisamente, la finalidad del proceso de calibrado de un instrumento de medida. En su lugar, se han graficado los resultados obtenidos –recordando una vez más, para el bloque de 50 mm- (Tabla 5.2), para apreciar con mayor claridad la influencia del modo de enfoque empleado.

En la primera gráfica, se muestra, para el bloque patrón de 50 mm y para cada tipo de enfoque, la relación entre el número de aumentos utilizados (eje de abscisas) y la corrección (eje de ordenadas). En este caso se ha de entender por corrección el opuesto a la desviación, es decir, aquí la corrección representa la diferencia entre la longitud calibrada del bloque patrón de 50 mm (obtenida del Certificado de Calibración de los BPL) y la media de las medidas realizadas, para cada nivel de amplificación.

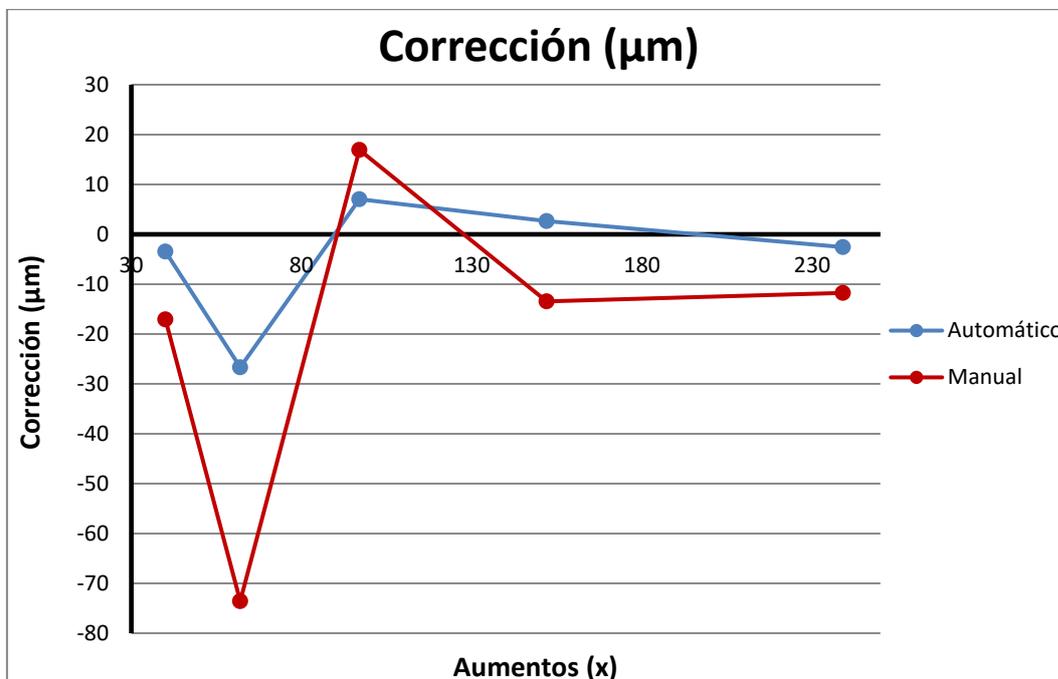


Figura 6.1. Comparación enfoques Manual-Automático. Corrección (µm).

En esta segunda gráfica, se puede apreciar la tendencia de la variabilidad de las medidas, representada mediante la desviación típica de éstas, en función del tipo de enfoque utilizado y para cada nivel de aumento.

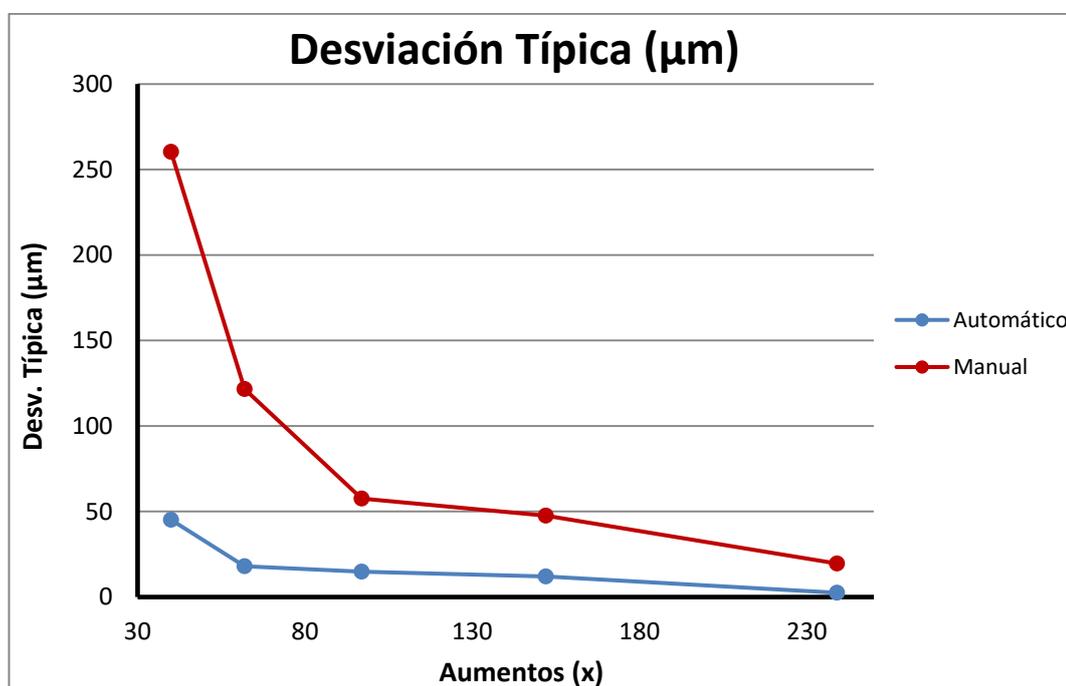


Figura 6.2. Comparación enfoques Manual-Automático. Desviación Típica (μm).

Del análisis de ambas gráficas se pueden extraer varias ideas generales acerca de la influencia del efecto operador en el resultado final de la medida.

- En cuanto a la **corrección** (μm):
 - La curva del enfoque automático es más plana, estando además sus puntos más cerca del cero que la de enfoque manual. Se puede extraer por ello que la utilización del enfoque automático genera medidas más *exactas* (sus correcciones son menores), ya que el valor de éstas es más cercano al valor verdadero de los bloques patrón.
 - Por otra parte se puede ver cómo, esta vez para ambos tipos de enfoque, la corrección disminuye, y por tanto aumenta la exactitud de las medidas a medida que se aumenta el nivel de amplificación.
- En cuanto a la **desviación típica** (μm):
 - Para ambos tipos de aumentos, la variabilidad de las medidas, representada ésta mediante la desviación típica, disminuye a

medida que se incrementa el número de aumentos. Es por ello que la *precisión* de las medidas aumenta con el nivel de amplificación, especialmente con el uso del enfoque manual.

- También en este aspecto, el empleo del enfoque automático es preferible, ya que la variabilidad de las medidas tomadas con éste es considerablemente menor que la de aquellas obtenidas manualmente. Dicho de otro modo, las medidas obtenidas de forma automática son más precisas (menos dispersas) que aquellas en las que interviene el operador.

6.2.2. Calibración

A continuación, se adjuntan las gráficas de corrección (exactitud) y desviación típica (precisión) de las medidas obtenidas del proceso de calibración.

En ellas se muestra, el punto calibrado en μm (eje de abscisas) frente a la característica correspondiente, corrección o desviación típica, ambas en μm (eje de ordenadas), para cada nivel de amplificación.

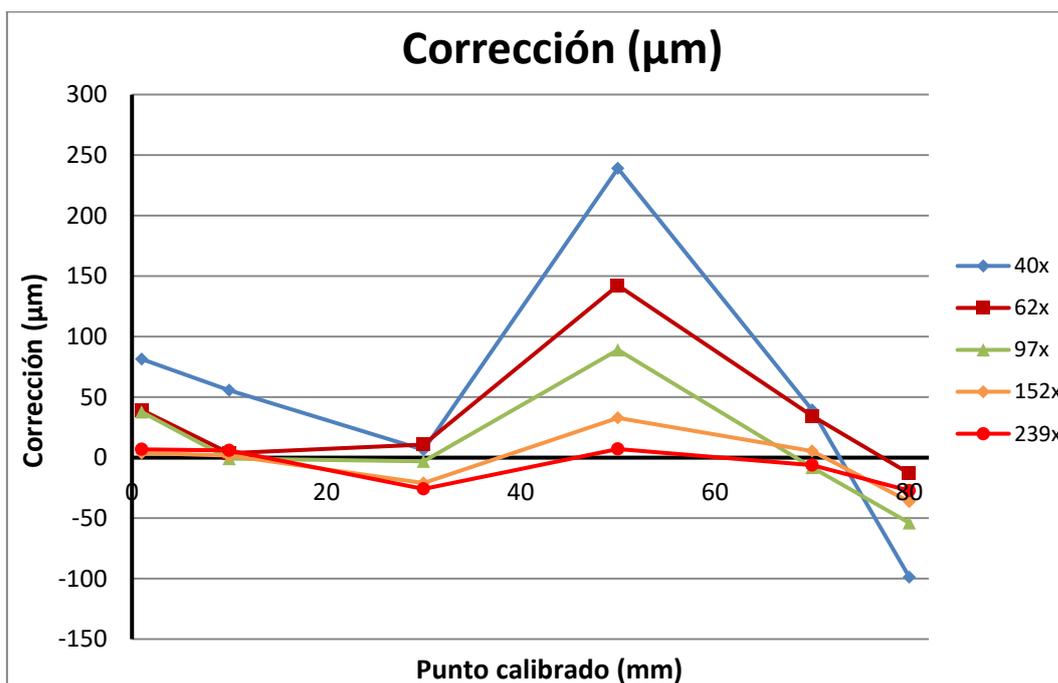


Figura 6.3. Corrección (μm) en la calibración

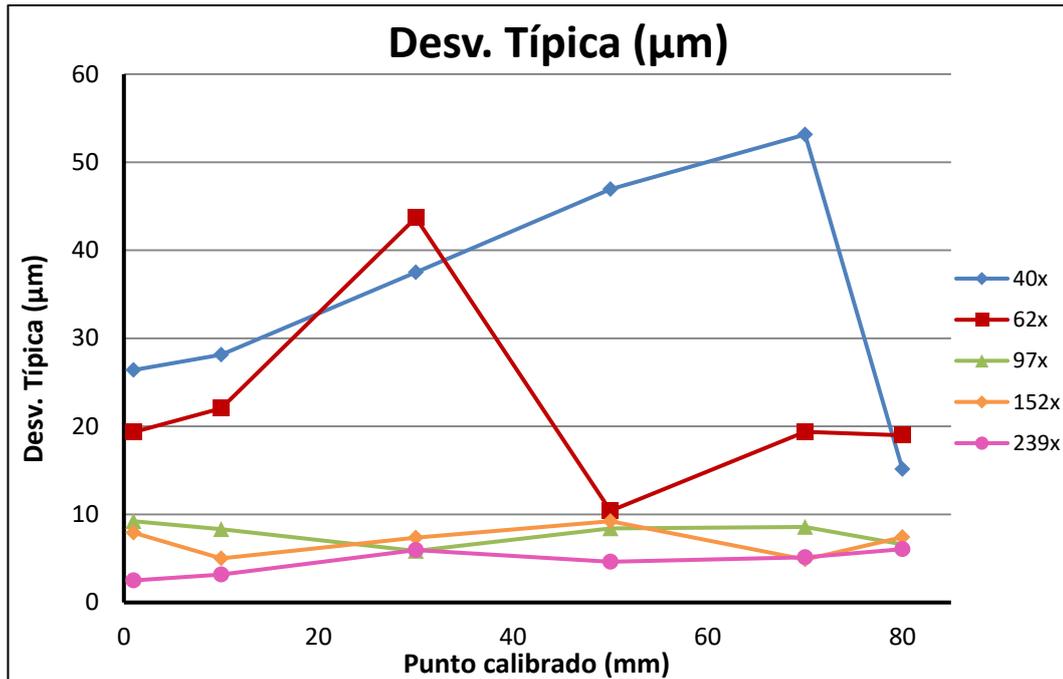


Figura 6.4. Desviación Típica (m) en la calibración

- Las correcciones:
 - En cada punto calibrado disminuyen al incrementarse el número de aumentos. Donde, la curva para el mínimo nivel de amplificación (40x) es la más irregular y con mayor valor de las correcciones, mientras que la de mayor amplificación (239x) es la más plana y con las menores correcciones.
 - De entre todos los puntos calibrados destaca el de 50mm, por ser el de mayores correcciones, o lo que es lo mismo, por ser el que genera unas medidas menos exactas.
- Las desviaciones típicas:
 - Para cada punto calibrado, disminuyen al incrementarse el número de aumentos. Es decir, las medidas tomadas con el mayor nivel de amplificación son las más precisas.
 - Es destacable la diferencia entre el grupo de aumentos de 40x y 62x, frente al de 97x, 152x y 239x, ya que los segundos presentan una variabilidad de las medidas considerablemente menor y más constante.

Es interesante remarcar, que según se aprecia en la Tabla 6.13 y las Figuras 6.3 y 6.4, la principal contribución a la incertidumbre global es la proveniente de la corrección. Se podría afirmar entonces que las medidas tomadas por la MMC óptica, en su eje vertical, son más precisas que exactas.

Para terminar, se presentan las gráficas en la que se muestran, para cada nivel de aumento, la corrección de calibración de cada punto (azul), la incertidumbre expandida con corrección de calibración nula (rojo) y los límites que representan la incertidumbre global y su opuesto (verde).

Por lo tanto, para no tener que corregir cada medida realizada con la medidora, se engloba la corrección dentro de la incertidumbre en cada punto. De modo que, en cada gráfica se puede ver la incertidumbre de calibración (verde) de cada nivel de amplificación.

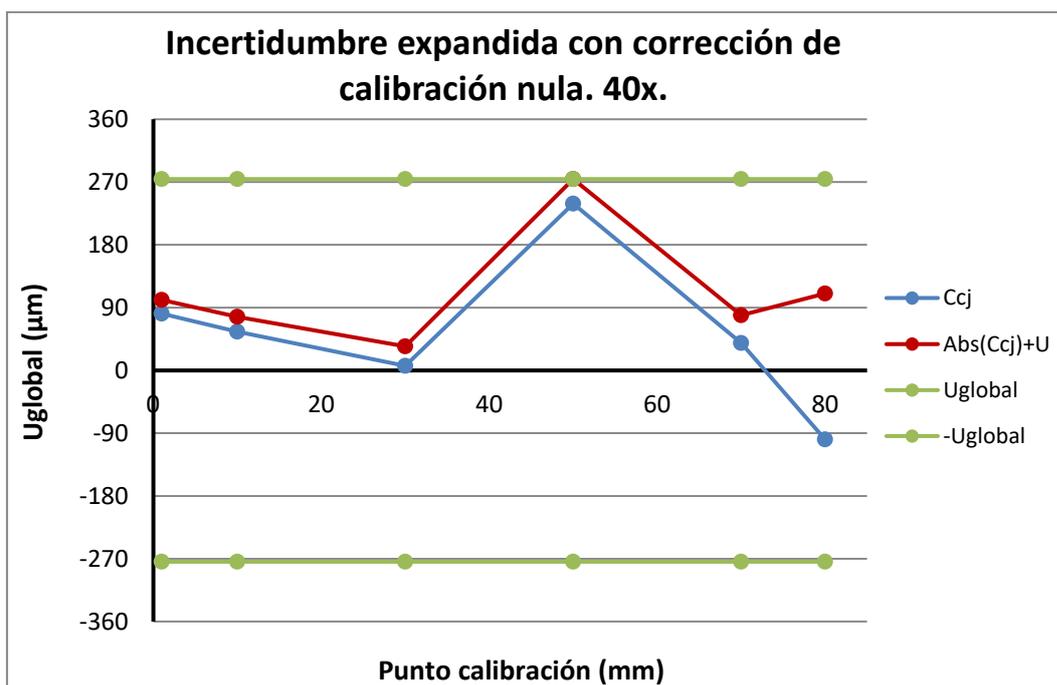


Figura 6.5. Incertidumbre expandida con corrección de calibración nula. 40x.

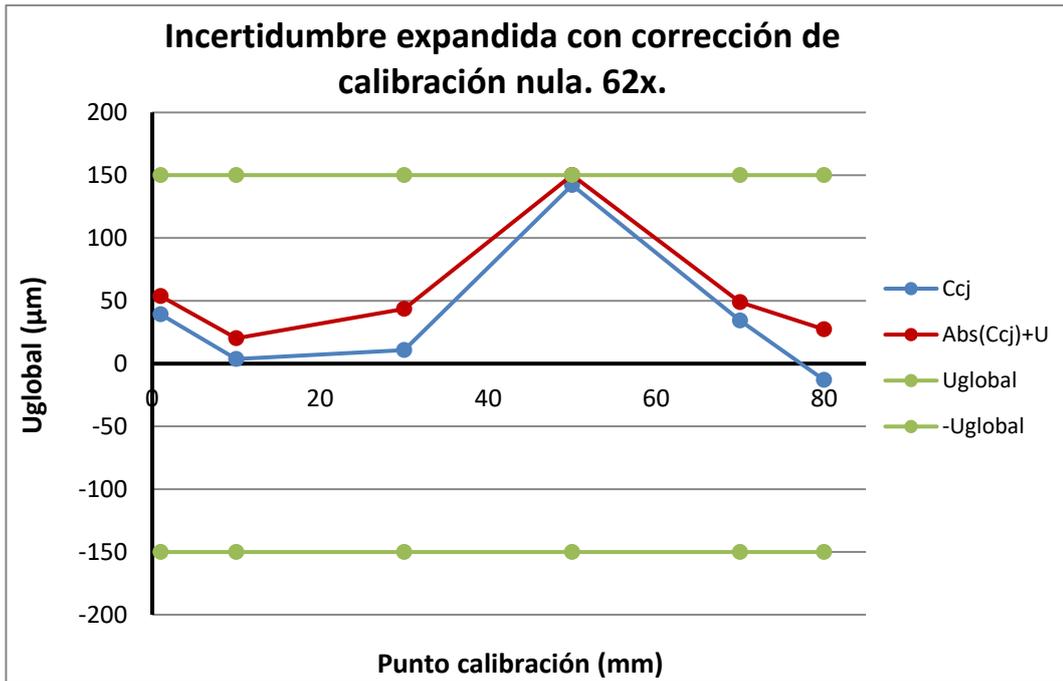


Figura 6.6. Incertidumbre expandida con corrección de calibración nula. 62x.

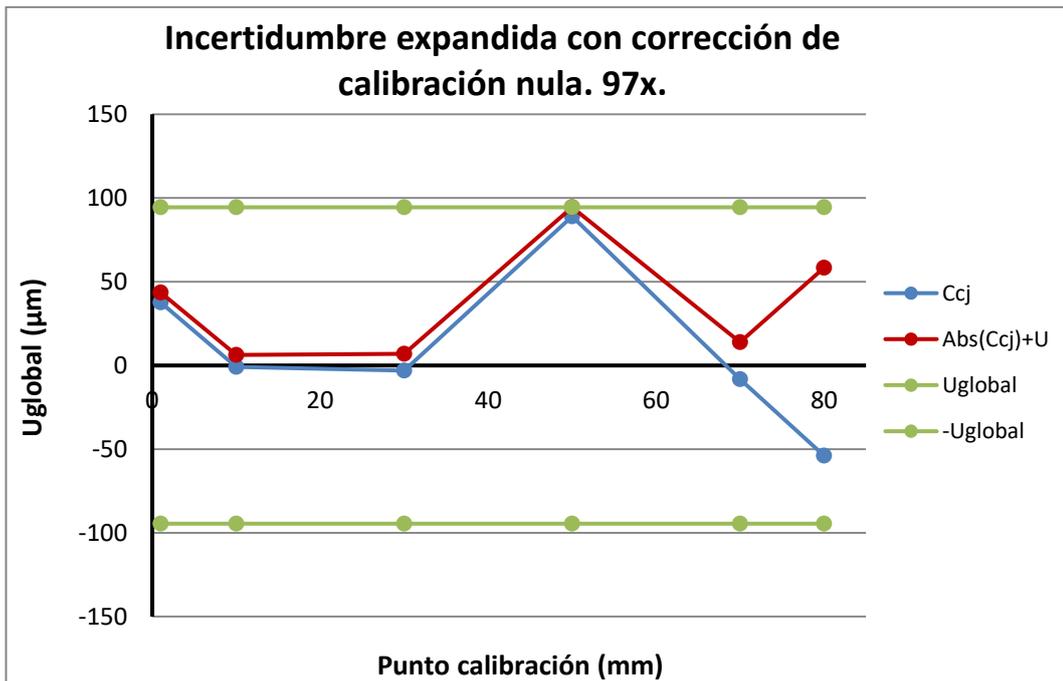


Figura 6.7. Incertidumbre expandida con corrección de calibración nula. 97x.

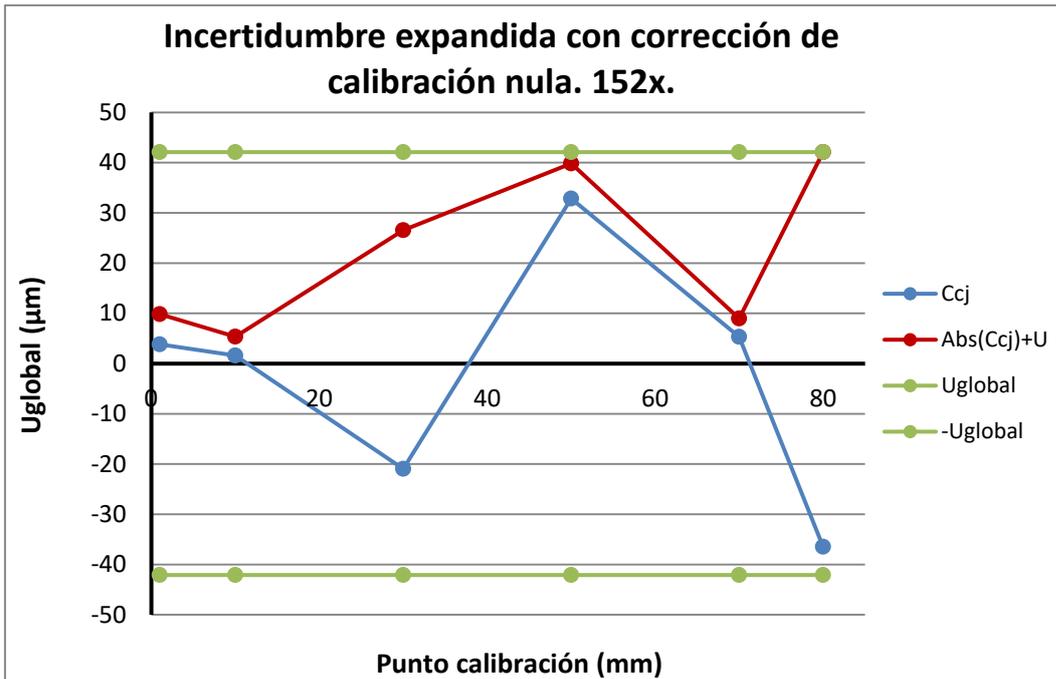


Figura 6.8. Incertidumbre expandida con corrección de calibración nula. 152x.

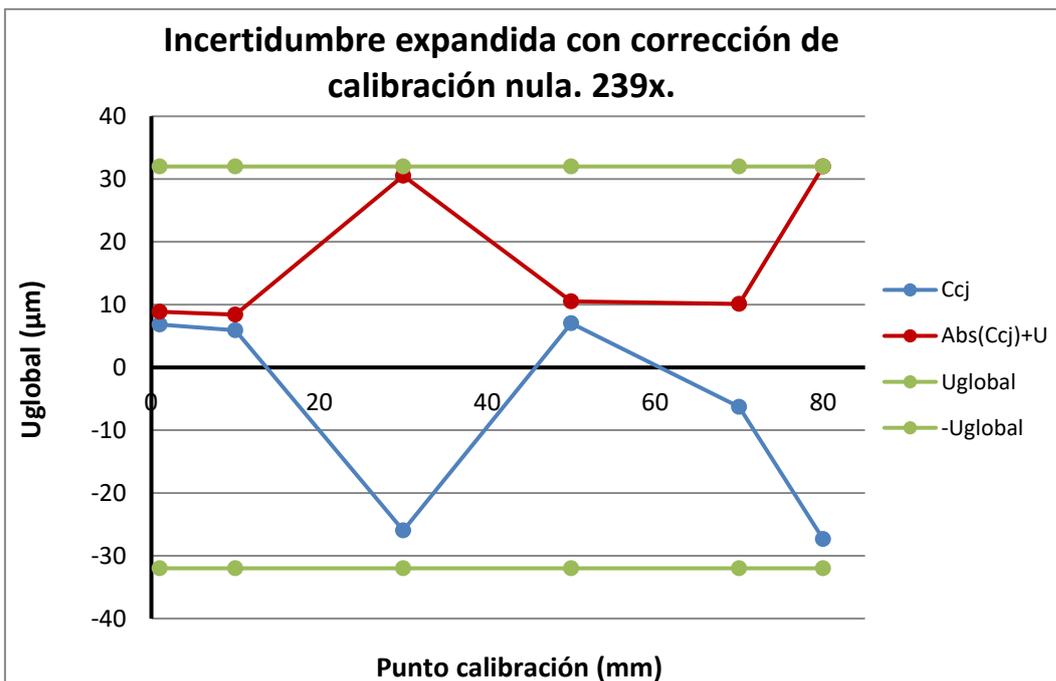


Figura 6.9. Incertidumbre expandida con corrección de calibración nula. 239x.

Aunque ya se indicaron en la Tabla 6.13, se vuelven a resumir a continuación los resultados finales de medición, apreciando mejor la información mostrada en las gráficas.

Las incertidumbres globales de calibración, para cada nivel de aumento, son:

- 40x $\rightarrow U_{global} = 268,74 \mu\text{m}$
- 62x $\rightarrow U_{global} = 148,91 \mu\text{m}$
- 97x $\rightarrow U_{global} = 94,47 \mu\text{m}$
- 152x $\rightarrow U_{global} = 41,33 \mu\text{m}$
- 239x $\rightarrow U_{global} = 31,42 \mu\text{m}$

Que gráficamente, equivale a:

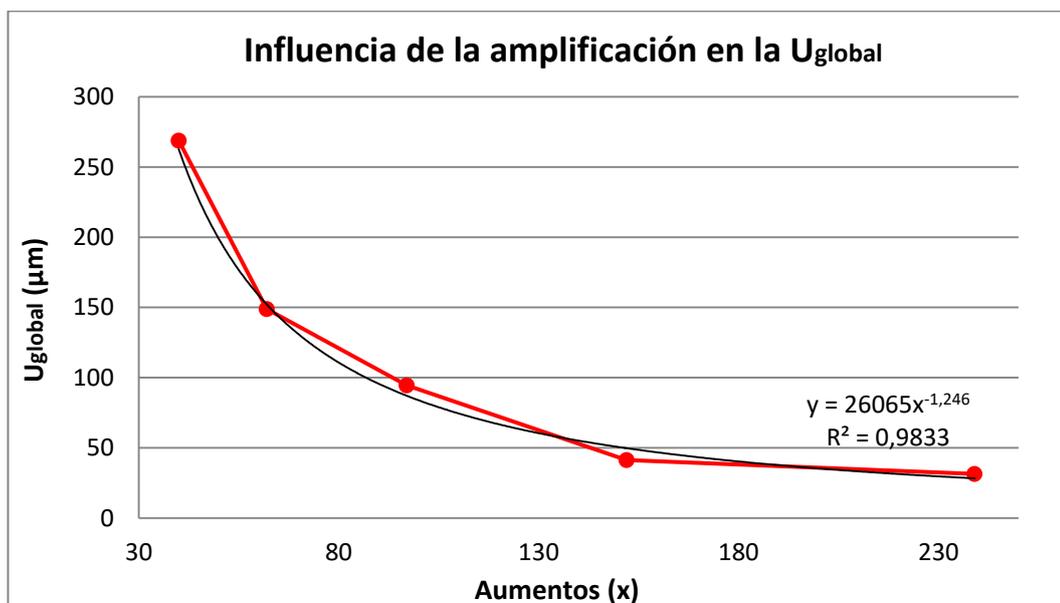


Figura 6.10. Influencia de la amplificación en la U_{global}

Ante estos resultados, se pueden extraer dos ideas principales:

- La incertidumbre global de calibración disminuye cuando aumenta el nivel de amplificación.
- Esta disminución se asemeja a una función potencial, y que según muestra el R cuadrado de la gráfica, lo hace de forma considerable.

Parte V.
CONCLUSIONES

7. Conclusiones

En un principio, con la realización de este estudio, se pretendía determinar el valor de la incertidumbre de medida del eje vertical de la MMC óptica Deltec, del Aula de Metrología de la EII. Con el objetivo de minimizar las componentes de influencia, que contribuyeran a la variación del resultado de medida final, se han controlado factores tales como la temperatura ambiente, el atemperamiento de los elementos de medida, su correcta limpieza y colocación, eliminación del efecto operador, etc. De este modo, se ha intentado conseguir que los resultados arrojados tuvieran como única fuente de influencia la debida al propio instrumento de medida.

Estando ya acotados los factores de influencia, se ha comprobado cómo afectan los diferentes parámetros de la medidora al resultado de la medida, como pueden ser: el tipo de enfoque (manual o automático), el grado de iluminación o el nivel de amplificación de la lente.

Una vez finalizado, es conveniente remarcar las diferentes conclusiones a las que se ha llegado con la realización del presente trabajo:

- De la comparación de los tipos de enfoque, se ha observado que el enfoque automático mejora tanto en exactitud como en precisión al enfoque manual. Se puede achacar al operador por tanto, un aumento de las correcciones e incertidumbres en el resultado final de medida.
- En un principio, y como opinión personal, se esperaba que para un mismo nivel de aumento, la corrección aplicada en el mensurando, así como su incertidumbre combinada, aumentarían directamente con la longitud del punto calibrado. Es decir, que para el punto de calibración de 80 mm, la corrección e incertidumbre fuesen mayores que para el punto de calibración 1,0005 mm. Una vez analizado, no se ha encontrado ningún patrón de este tipo, por lo que no se puede confirmar dicha afirmación. Ello puede ser debido a que, por tratarse de un instrumento de medida por ampliación óptica, influye de gran manera el estado superficial de los bloques patrón longitudinales utilizados. Y dado que el estado de éstos no es el ideal, encontrándose todas las superficies rayadas, no se puede obtener una conclusión clara respecto a la influencia del punto a calibrar.
- Una de las conclusiones principales que se han podido extraer, es la influencia del nivel de amplificación en la calidad final de la medida. Como se puede ver claramente en la Tabla 6.13, al incrementar el nivel de aumentos de la lente, disminuye la incertidumbre global del resultado de medida final.

- Se ha confirmado que la MMC óptica es un instrumento de medida muy polivalente, no sólo en cuanto a las diferentes funciones que se pueden realizar con ésta (medir longitudes, proyectar perfiles, estudio de estados superficiales, etc.), sino además debido a que se puede trabajar con diferentes niveles de resolución. Es decir, si se trabaja con piezas de baja responsabilidad, que requieran resoluciones de tan sólo 0,5 ó 1 mm, será suficiente con utilizar el mínimo nivel de aumento (40x). Por su parte, si se requieren medidas con una mayor resolución, basta con incrementar el nivel de amplificación, llegando hasta las 32 μm . Por ello, se pueden utilizar gráficas como la mostrada en la Figura 6.10, para, conociendo el nivel de resolución requerido, trabajar con los aumentos necesarios.

Para terminar, y a modo de evaluación personal, creo haber cumplido los objetivos planteados al comienzo de este trabajo. Se ha comprendido y manipulado un instrumento de medida muy utilizado en la actualidad, y que será de vital importancia en la industria del futuro, confirmando las múltiples virtudes que se le atribuyen. Ha sido posible su caracterización metrológica, obteniendo el valor de la incertidumbre en todo el campo de medida del eje vertical. Y finalmente, se ha comprobado la influencia de los diferentes factores que pudieran afectar al objeto de nuestro estudio, el resultado de la medida.

Líneas futuras

La finalidad de un proceso de calibración, es cubrir el mayor número posible de factores intervinientes en el proceso de medida, para poder conocer las correcciones e incertidumbres del equipo que mejor se ajustan a la realidad.

Es por ello, que de cara a posibles ampliaciones futuras del presente estudio, sería interesante incluir otros factores que puedan contribuir a la incertidumbre de medida. Tal es el caso del error de coseno.

La causa de este error es el imperfecto paralelismo entre las caras del patrón tomadas como referencia para la medida (altura en este caso), y la dirección del movimiento del husillo del eje a calibrar. La existencia de este error provoca, que la medida realmente tomada no sea la distancia a calibrar, sino una proyección de ésta en el plano del movimiento del husillo, como se muestra en la Figura 7.1.

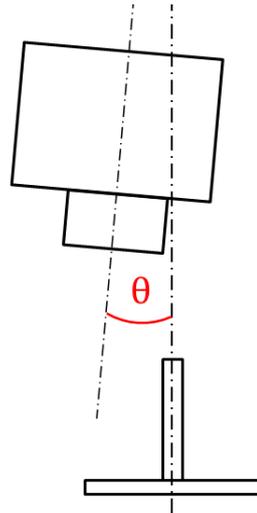


Figura 7.1. Error de coseno

Este error no ha sido incluido en el presente trabajo por no disponer de datos acerca de él. Generalmente en el manual del fabricante se dan las instrucciones sobre cómo corregirlo, pero no se dispone del manual de la medidora Deltec utilizada. Buscando en diversa bibliografía, así como en catálogos de varios fabricantes, tampoco se ha podido encontrar ningún valor máximo permitido para el error de coseno, gracias al cual se podría acotar su contribución.

Por estos motivos, no ha sido incluido en la función modelo, y sería interesante, en el caso de ser posible, considerarlo en estudios futuros.

Parte VI.
ESTUDIO
ECONÓMICO

8. Estudio económico

En este apartado, se realiza el análisis económico que supone el desarrollo del presente Trabajo Fin de Grado. Aquí se engloban aspectos como los materiales empleados, la planificación de tareas, el estudio y la documentación, el desarrollo del experimental y la realización de la memoria, necesarios para la consecución del proyecto.

A continuación, se muestra de forma detallada el citado estudio económico.

8.1. Recursos utilizados

Los recursos utilizados han sido principalmente instrumentos de medida, equipos informáticos y periféricos de éstos.

Los recursos hardware son:

- Ordenador Portátil HP Intel® Core™ i5 con 4Gb de RAM.
- Medidora tridimensional óptica (MMC óptica) Deltec.
- Juego de bloques patrón longitudinales ALPA. Grado 2.

Los recursos software son:

- Sistema Operativo Windows 10.
- Aplicaciones ofimáticas: Microsoft Office 2010.
- Software Deltec Vision v410.

Los recursos clasificados como material de oficina:

- Papel DIN A4 80 g/m².
- Suministros de impresora.

8.2. Costes del proyecto

8.2.1. Costes Directos

8.2.1.1 Coste de personal

En este apartado se considerarán las horas trabajadas necesarias para la realización del trabajo, pudiendo así obtener los costes totales de personal.

La primera consideración a tener en cuenta es el tiempo que trabaja una persona a lo largo de un año.

Concepto	Días/Año
Días anules totales	365
Sábados y Domingos	-104
Días efectivos de vacaciones	-20
Días festivos (Valladolid)	-14
Días de petición/enfermedad	-15
Total días hábiles	212

Tabla 8.1. Días útiles al año (2017).

Donde, a los 365 días del año, se restan los días que no se trabajan: sábados y domingos, vacaciones, enfermedad, etc.

Finalmente, a los días hábiles de trabajo se multiplica por 8 horas/día, consiguiendo así el número de horas que se trabaja a lo largo de todo un año: **1696 h/año**.

La persona encargada de la realización de este proyecto, será un Ingeniero Industrial. En la siguiente tabla se recoge su coste anual:

Concepto	€/Año
Sueldo neto e incentivos	25000
Prestaciones a la Seguridad Social	8750
Coste Total	33750

Tabla 8.2. Coste trabajador de un trabajador en un año.

Con las horas de trabajo totales y el coste de éstas, se puede calcular el coste por hora del trabajador. Para el caso de un Ingeniero, dividiendo el coste total entre el número de horas trabajadas, se obtiene un coste total por hora de **19,90 €/hora**.

Para terminar, se ha de obtener el número de horas totales que han sido necesarias para el desarrollo del proyecto.

Concepto	Horas
Planificación de tareas	20
Estudio y documentación	100
Estudio de la MMC óptica	50
Trabajo experimental	100
Realización de la memoria	150
Horas Totales Proyecto	420

Tabla 8.3. Horas empleadas en la realización del proyecto.

El coste total de personal se obtendrá multiplicando las horas totales que se han empleado en el proyecto, por el coste de las horas de trabajo. De este modo, el coste correspondiente al personal asciende a **8358 €**.

8.2.1.2 Coste de material amortizable

Se entiende por material amortizable los equipos informáticos y software. Debido a que estos equipos suelen quedarse obsoletos aproximadamente en el mismo tiempo en el que se produce su amortización, no se considerará valor residual.

Para el coste del material amortizable, se tomará un coste actual y la amortización lineal del mismo, donde el número de años de amortización dependerá del material en cuestión. Se tendrá en cuenta además, el número de horas trabajadas con cada uno de los equipos.

Por haber sido utilizados en la ejecución del proyecto, también se tendrán en cuenta en el precio de los ordenadores, las licencias del sistema operativo (Windows 10) y el paquete ofimático (Microsoft Office 2010).

El equipo utilizado ha sido un ordenador portátil para la realización de los cálculos y el análisis de resultados, así como para la realización de la memoria.

Se tendrá también en cuenta la MMC óptica, así como la licencia utilizada del programa Deltec Vision v410.

Concepto	€	Años	Días	Horas	Coste Final
Ordenador Portátil HP Intel® Core™ i5 con 4Gb de RAM	500	5	212	300	17,69
MMC óptica Deltec	30000	20	212	150	132,67
Microsoft Windows 10	200	5	212	300	7,08
Microsoft Office 2010	500	5	212	200	11,79
Licencia Deltec Vision v410	5000	20	212	150	22,11
Total					191,34

Tabla 8.4. Costes amortizables del proyecto.

El coste final se obtendrá como el producto del precio de cada hora del equipo o licencia por el número de horas utilizado. Para el precio de cada hora, se divide el precio total del producto entre, los años de amortización por el número de días laborables de cada año y por el número de horas laborables de cada día. Por ejemplo, el coste final del ordenador portátil sería:

$$\text{Coste Final} = \frac{500 \text{ €}}{5 \text{ años} \cdot \frac{212 \text{ días}}{\text{año}} \cdot \frac{8 \text{ horas}}{\text{día}}} \cdot 300 \text{ horas} = 17,69 \text{ €}$$

Por tanto, el coste de amortización asciende a **191,34 €**.

8.2.1.3 Coste de material no amortizable

El material no amortizable es aquel necesario para el desarrollo del proyecto, y que no se amortizan a lo largo del tiempo. Aparecen reflejados en la siguiente tabla:

Concepto	€
Papel DIN A4 80 g/m ²	25
Suministros de impresora	50
Productos limpieza BPL	10
Otros	25
Total sin IVA	110
IVA 21%	23,1
Total IVA incluido	133,10

Tabla 8.5. Costes no amortizables.

De modo que el coste de material no amortizable asciende a **133,10 €**.

Finalmente, los costes directos totales ascienden a:

Concepto	€
Coste de personal	8358
Coste de material amortizable	191,34
Coste de material no amortizable	133,10
Total	8682,44

Tabla 8.6. Costes directos totales.

8.2.2. Costes Indirectos

Este tipo de costes engloban aquellos gastos que son imprescindibles para la realización del proyecto, pero que no pueden ser englobados en ninguno de los apartados anteriores. Ejemplos de costes indirectos serían: calefacción/climatización, iluminación, consumo de electricidad de los equipos, etc.

Concepto	€
Consumo eléctrico de los equipos	150
Calefacción/Climatización	100
Iluminación	50
Otros	50
Total	350

Tabla 8.7. Costes indirectos del proyecto

Por lo tanto, los costes indirectos para este proyecto han sido de **350 €**.

8.3. Coste total del proyecto

El coste total del proyecto se obtiene como la suma de los costes directos e indirectos calculados anteriormente. A continuación se muestra Un resumen de los costes, así como el coste final del proyecto:

Concepto	€
Costes directos totales	8682,44
Costes indirectos totales	350
Coste Total del proyecto	9032,44

Tabla 8.8. Coste Total del proyecto.

Siendo el coste total del proyecto realizado de **9032,44 €**.

Parte VII.
BIBLIOGRAFÍA

9. Bibliografía

Referencias Bibliográficas

- AENOR. (2000). *Norma UNE EN-ISO 3650:2000. Especificación geométrica de productos (GPS). Patrones de longitud. Bloques patrón. (ISO 3650:1998).*
- Carro, J. (s.f.). *Curso de Metrología Dimensional.* Sección de publicaciones de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Madrid.
- Centro Español de Metrología (CEM), CENAM, INDECOPI. (2008). *Metrology - in short (3ª ed.).* Madrid.
- Centro Español de Metrología. (2009). *Evaluación de datos de medición. Guía para la expresión de la incertidumbre de medida. (3ª ed. en español (traducción de 1ª ed.2008 en inglés) ed.).*
- Centro Español de Metrología. (2013). *PROCEDIMIENTO DI-001 PARA LA CALIBRACIÓN DE PROYECTORES DE PERFILES.* Madrid.
- Centro Español de Metrología. (s.f.). *Clasificación de Instrumentos de Metrología Dimensional (1ª ed.).* Madrid.
- Centro Español de Metrología. (Septiembre 2013). *RECOMENDACIONES DEL CENTRO ESPAÑOL DE METROLOGÍA PARA LA ENSEÑANZA Y UTILIZACIÓN DEL SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES DE MEDIDA.*
- CIPM. (2003). *Evolving Needs for Metrology in Trade, Industry and Society and the Role of the BIPM.*
- Consejo Superior de Metrología. (2007). *La metrología científica en España y en su entorno europeo.* Madrid.
- Cooperación Europea para la Acreditación. (Septiembre, 2013). *EA4/02. Evaluación de la incertidumbre de medida en las calibraciones.*
- de la Fuente López, E., & Mazaeda Echevarría, R. (2016). *Industria 4.0.* Clases, Escuela de Ingenierías Industriales. Universidad de Valladolid., Valladolid.
- Gómez González, S. (s.f.). *Control de Calidad en Fabricación mecánica.* Ediciones CEY-SA.
- Granados, C. (s.f.). *Introducción a la historia de la Metrología.* Madrid.

- Grupo de Trabajo MINER-CEM. (2000). *Procedimiento para la elaboración de procedimientos de calibración*. (2 ed.). Tres Cantos, Madrid.
- Guía CEA-ENAC-LC/02. (2008). *Expresión de la incertidumbre de medida en las calibraciones* (Rev.1 ed.).
- L&S CONSULTORES C.A. (s.f.). *La acreditación de Laboratorios un Reconocimiento de Competencia Técnica*.
- Lasheras, J. (2003). *Tecnología mecánica y metrotecnica* (Vol. 2).
- LCD. (2015). *Certificado de Calibración BPL*. Valladolid.
- Moro Piñeiro, M. (2017). *Fundamentos de Metrología Dimensional*. MARCOMBO, S.S.
- Oficina Internacional de Pesas y Medidas. (2008). *El S.I. de Unidades* (2ª en español del Centro Español de Metrología ed.).
- Pachón Veira, R., & Manzano Agugliaro. (2002). *Metrología en las civilizaciones de Mesopotamia, Egipto, Fenicia, Israel, Grecia, Cartago, Roma y otras culturas de la antigüedad*. Santander, España.
- Prieto, E. (s.f.). CEM. Obtenido de Breve historia de la Metrología: www.cem.es/sites/default/files/historia.pdf
- Rubio, M. C. (2009). Metrología. La ciencia de las medidas. *Técnica Industrial*, 25.
- Sánchez, A., & Carro, J. (1996). *Elementos de Metrología*. E.T.S. Ingenieros Industriales de la UPM.
- Sevilla Hurtado, L., & Martín Sánchez, M. (s.f.). *Metrología Dimensional*. Málaga.

Referencias Web (última consulta: 04/07/2017)

- Centro Español de Metrología: www.cem.es
- Ente Nacional de Acreditación: www.enac.es
- Oficina Internacional de Pesas y Medidas: www.bipm.org
- Acreditación en Europa: www.european-accreditation.org/
- Real Instituto y Observatorio de la Armada: www.roa.es
- Instituto de Física Aplicada: www.ifa.csic.es
- Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas: www.ciemat.es
- Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial: www.inta.es
- Taller de Precisión y Centro Electrotécnico de Artillería: www.mde.es/dgam/centrostecnologicos.htm
- Laboratorio Central Oficial de Electrotécnica: www.ffii.es/f2i2/lcoe/lcoe_portada.asp
- Centro Nacional de Sanidad Ambiental del Instituto de Salud Carlos III: www.isciii.es/htdocs/centros/sanidadambiental/sanidadambiental_presentacion.jsp
- Proyectores de Perfiles Mitutoyo: <http://www.mitutoyo.com.mx/Descargas/Boletines/BOLETIN%20DICIE%20MBRE%202009.pdf>
- Medidora tridimensional óptica: www.ayonis.com
- AYONIS. (03 de 07 de 2017). www.ayonis.com. Obtenido de https://www.ayonis.com/wp-content/uploads/2017/06/DELTEC_TEOS_300_400_EN_17_58.pdf
- AYONIS. (04 de 07 de 2017). www.ayonis.com. Obtenido de <https://www.ayonis.com/en/deltec-teos-300-400-3d-multisensors-metrology-system/>
- Centro Español de Metrología. (s.f.). www.cem.es. Obtenido de http://www.cem.es/cem/metrologia/sistema_metrologico_espanol