

eman la zabal zazu



Universidad del País Vasco Euskal Herriko Unibertsitatea

BILBOKO INGENIARITZA ESKOLA ESCUELA DE INGENIERÍA DE BILBAO

INDUSTRIA INGENIARITZA TEKNIKOKO ATALA

SECCIÓN INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL

--

FDO.: FECHA:	FDO.: FECHA:
-----------------	-----------------

3.1.- Índice de la Memoria

3.1.- Índice de la Memoria	I
3.2.- Definición de términos básicos.....	11
3.3.- Descripción del problema.....	12
3.3.1.- Análisis de los objetivos.....	13
3.4.- Antecedentes	6
3.5.- Estudio de alternativas	7
3.6.- Solución Adoptada	8
3.6.1.- Marco teórico.....	8
3.6.1.1.- Introducción	8
3.6.1.1.1.- Incertidumbre.....	8
3.6.1.1.1.1.- Definición	8
3.6.1.1.1.2.- Fuentes de Incertidumbre	9
3.6.1.1.1.3.- Cálculo de la Incertidumbre	10
3.6.1.1.2.- Ingeniería Inversa.....	12
3.6.1.1.2.1.- Definición	12
3.6.1.1.2.2.- Objetivo.....	13
3.6.1.1.2.3.- Aplicaciones.....	13
3.6.1.2.- Sistemas de Medición	14
3.6.1.2.1.- Medición Con Contacto con Máquina de Medir por Coordenadas.....	15
3.6.1.2.1.1- Definición	15
3.6.1.2.1.2.- Aplicaciones.....	15
3.6.1.2.1.3.- Componentes.....	16

3.6.1.2.1.4.- Características	21
3.6.1.2.1.5.- Funcionamiento	24
3.6.1.2.1.6.- Incertidumbre en una MMC.....	29
3.6.1.2.1.6.1.- Fuentes de error	29
3.6.1.2.1.6.2.- Verificación de la MMC.....	30
3.6.1.2.2.- Medición Sin Contacto con Escáner láser	37
3.6.1.2.2.1.- Definición	37
3.6.1.2.2.2.- Aplicaciones.....	38
3.6.1.2.2.3.- Componentes.....	39
3.6.1.2.2.4.- Características	39
3.6.1.2.2.5.- Funcionamiento	41
3.6.1.2.2.6.- Incertidumbre	43
3.6.1.2.2.6.1.- Fuentes de error	43
3.6.2.- Marco metodológico	46
3.6.3.- Técnicas y métodos.....	47
3.6.3.1.- Útil de medición.....	47
3.6.3.1.1.- Definición.....	47
3.6.3.1.2.- Diseño	47
3.6.3.1.3.- Fabricación	49
3.6.3.1.4.- Puesta a punto para la medición	51
3.6.3.2.- Medición MMC	54
3.6.3.2.1.- Preparativos	54
3.6.3.2.1.1.- Determinar el VUT de la máquina	54

3.6.3.2.1.2.- Colocación y fijación de la pieza	54
3.6.3.2.1.3.- Configuración y calibración del palpador	54
3.6.3.2.1.4.- Alineación de la pieza	57
3.6.3.2.2.- Medición	58
3.6.3.2.2.1.- Estrategias de medición.....	58
3.6.3.2.2.2.- Programa de medición.....	66
3.6.3.3.- Medición Escáner Láser.....	72
3.6.3.3.1.- Calibración.....	72
3.6.3.3.2.- Pre-Modelado	73
3.6.3.3.3.- Escaneado.....	74
3.6.3.3.4.- Tratamiento de datos.....	75
3.6.3.3.4.1.- Poligonización.....	75
3.6.3.3.4.2.- Alineamiento de la malla sobre el CAD.....	75
3.6.4.- Procesamiento de datos.	78
3.6.4.1.- Elección de los puntos	78
3.6.4.2.- MMC	79
3.6.4.3.- HandySCAN.....	79
3.6.4.3.- Ingeniería Inversa	80
3.6.4.4.- Incertidumbre expandida de los equipos.....	83
3.6.4.5.- Tolerancia de los equipos	84
3.7.- Resultados y conclusiones.....	86
3.7.1.- Resultados de la medición con MMC	86
3.7.1.1.- Medias	86

3.7.1.2.- Desviaciones.....	91
3.7.2.- Resultados de la medición con HANDYSCAN	93
3.7.2.1.- Medias	93
3.7.2.2.- Desviaciones.....	99
3.7.3.- Comparación de ambos sistemas.....	100
3.7.4.- Resultado Ingeniería Inversa.....	111
3.7.5.- Resultado Incertidumbre.....	112
3.7.6.- Resultado Tolerancias	113
3.8.- Propuesta técnica	114
3.8.1.- Introducción	114
3.8.2.- Factores Influyentes	114
3.8.2.1.- Precisión y Exactitud.....	114
3.8.2.2.- Incertidumbre	114
3.8.2.3.- Tiempo de medición.....	115
3.8.2.4.- Tamaño de las piezas	115
3.8.2.5.- Portabilidad	116
3.8.2.6.- Precio.....	116
3.8.3.- Conclusiones.....	117
3.9.- Valoraciones generales y líneas futuras.....	118

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.- Posición de la pieza en el vehículo.	12
Figura 2.- Tipos de digitalización 3D.	14
Figura 3.- Componentes de la MMC.	16
Figura 4.- Joystick RENISHAW MCU1.....	19
Figura 5.- Características generales de la máquina.	21
Figura 6.- Ejes.....	22
Figura 7.- Volumen Útil de la MMC.	23
Figura 8.- Regla óptica.	25
Figura 9.- Interior de la sonda de disparo.....	26
Figura 10.-Fuerzas de contacto en el palpador.	27
Figura 11- Cabezal orientable PH10T	28
Figura 12.- Barra de bolas de calibración.....	31
Figura 13.- Escáner láser 3D HandySCAN 700.	38
Figura 14.- Dos cámaras para escanear todas las zonas.	39
Figura 15.-Principio de triangulación.	41
Figura 16.- Esquema de visión estereo simplificado.	42
Figura 17.- Útil de medición (Gestamp).....	48
Figura 18.- Informe de los RPS de la pieza.....	48
Figura 19.- Diseño del útil de medición.	49
Figura 20.-Composición y denominaciones del aluminio (Alu-Stock S.A.).	50
Figura 21.- Composición y denominaciones del acero (Ipargama).	50
Figura 22.- Útil de medición.....	51

Figura 23.- Pieza situada en el útil.	52
Figura 24.- Puesta a punto del útil.....	53
Figura 25.- Esfera de calibración.....	55
Figura 26.- Plano superior: A0 B90	55
Figura 27.- Plano frontal delantero: A30B180	56
Figura 28.- Plano lateral derecho A7.5B180.....	56
Figura 29.- Sistema Cartesiano.....	57
Figura 30.- Sistema de coordenadas situado en el Cero Pieza.....	58
Figura 31.- Ejemplo de distribución de los puntos en una línea.	61
Figura 32.- Distribución de puntos en un plano.	62
Figura 33.- Distribución de puntos en un círculo detectando lóbulos.	63
Figura 34.- Distribución de puntos en una esfera.....	64
Figura 35.- Puntos elegidos para la medición.	66
Figura 36.- Placa de calibración.	72
Figura 37.- Colocación de las pegatinas en las piezas.	73
Figura 38.- Escaneado de una pieza.....	74
Figura 39.- Pieza original y piezas escaneadas.	76
Figura 40.- Selección de la pieza.	76
Figura 41.- Mallas alineadas.	77
Figura 42.- Desviación entre la alineación de los piezas diferentes.	77
Figura 43.- Puntos seleccionados para el estudio.....	78
Figura 44.- Puntos obtenidos de diferentes mediciones.....	81
Figura 45.- Puntos unidos mediante líneas y curvas.....	82

Figura 46.- Creación de las superficies.	82
Figura 47.- Sólido tras la extrusión de las superficies.	83

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.- Factor de cobertura k en función del nivel de confianza p.	12
Tabla 2.- Especificaciones técnicas HandySCAN 700.	40
Tabla 3.- Valores nominales de los puntos elegidos.	79
Tabla 5.- Desviaciones de los alineamientos.	81
Tabla 6.- Incertidumbre de la MMC	112
Tabla 7.- Incertidumbre del HandySCAN.	113
Tabla 8.- Tolerancias en la MMC.	113
Tabla 9.- Tolerancias en el HandySCAN.....	113

3.2.- Definición de términos básicos

- **Alineamiento:** Proceso que relaciona el sistema de coordenadas de la pieza con el sistema de coordenadas del instrumento.
- **BIW:** chasis de un coche (*Body in White*).
- **CAD:** Diseño asistido por Ordenador (*Computer-aided Design*).
- **Calibración:** conjunto de operaciones que permiten establecer la incertidumbre del instrumento.
- **Datum / Isostatismo:** Es el término que se aplica cuando se hace una relación hacia alguna geometría de referencia importante, sea ésta una línea, un plano o una superficie (plana o curva).
- **DMIS:** Lenguaje de programación de la MMC (Dimensional Measuring Interface Standard).
- **Esfera Máster / de calibración:** Esfera cuyas medidas son conocidas. Se emplea para la calibración del palpador.
- **Exactitud:** capacidad de un instrumento de acercarse al valor de la magnitud real.
- **Gradiente térmico o de temperatura:** variación de temperatura por unidad de distancia.
- **Malla:** colección de triángulos y vértices que aproximan una superficie en 3D.
- **Mensurando:** magnitud particular sometida a medición.
- **MMC/CMM:** Máquina de medición por coordenadas / Coordinate Measurement Machine.
- **Nominales:** Valores de las medidas del CAD.
- **Palpador (Probe):** vástago mediante el cual se realiza el contacto con una pieza. Es un instrumento de medición.
- **Precisión:** capacidad de un instrumento de dar el mismo resultado en mediciones diferentes.
- **RPS:** sistema de referencia de de la posición en la automoción (*Reference Positioning System*).
- **SAP:** Sistema de Adquisición de Puntos.
- **Tolerancia:** expresa el intervalo de valores admisible que se está dispuesto a aceptar en alguna de las características de un objeto.
- **VUT:** Volumen Útil de Trabajo de una MMC.

3.3.- Descripción del problema

Para la fabricación y puesta a punto de troqueles de estampación en frío, se realizan pequeñas series de producción de piezas para comprobar su correcto funcionamiento. Para la homologación de los troqueles es necesario realizar un control dimensional de las piezas fabricadas para verificar si cumplen las especificaciones de diseño. Por otra parte, también se ajustan los parámetros de proceso utilizando procedimientos estadísticos.

Las piezas estampadas utilizadas en el presente trabajo están destinadas al sector automovilístico con tolerancias muy exigentes. Debido a estas exigencias, tanto los instrumentos como los métodos de medición deben de ser muy exactos y precisos.

Para la realización del estudio se cuenta con piezas del BIW (Body in White - Chasis) de un vehículo de altas prestaciones de la marca AUDI; pieza situada en la zona inferior del chasis. Realmente se trata de dos piezas (mano izquierda y mano derecha), siendo la segunda de ellas en la que se va a centrar el estudio. En la Figura 1 se puede observar donde está situada la pieza del estudio en el chasis del coche.

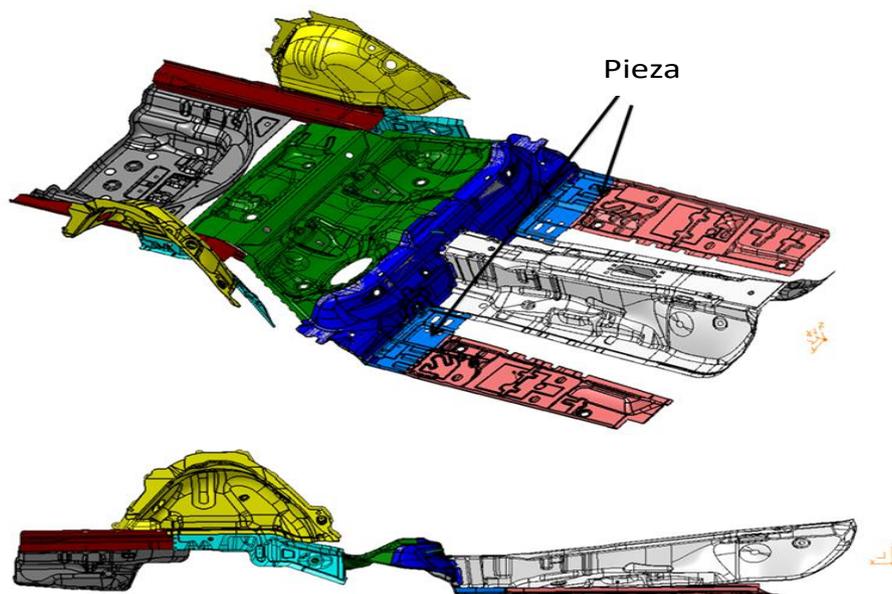


Figura 1.- Posición de la pieza en el vehículo.

Se dispone del archivo CAD original de las piezas con las medidas nominales que se utilizarán para poder comparar los valores obtenidos en las mediciones que se realicen con ambos procedimientos.

El objeto del presente trabajo es la realización de un estudio de evaluación comparativa entre dos sistemas de medición: por contacto y sin contacto. El sistema de contacto consiste en una máquina de medición por coordenadas (MMC) situada en el laboratorio de Metrotecnica de la EUITI de Bilbao. En cuanto al sistema sin contacto, se utilizará un equipo que utiliza la Técnica de Medición Óptica, escáner que funciona mediante triangulación. Se han elegido estos sistemas ya que se pretende conocer las diferencias entre ambos para establecer los ámbitos de medición para cada caso teniendo en cuenta que el potencial de los sistemas de medición óptica parecen ofrecer mejoras sustanciales en la velocidad de medición.

3.3.1.- Análisis de los objetivos

El principal objetivo de este estudio es la comparación de las incertidumbres de los sistemas de medición por contacto y triangulación para llegar a establecer cuál de los dos procedimientos es el más adecuado y con qué nivel de confianza para las diferentes aplicaciones o tipos de piezas a medir teniendo en cuenta el grado de las tolerancias requeridas.

Los objetivos que se quieren obtener en la realización de este estudio son los siguientes:

- Calcular las incertidumbres en las distintas características (método, instrumento, agentes externos, etc.) de ambos métodos de medición.
- Con los resultados obtenidos, estudiar las diferencias entre las incertidumbres.
- Establecer las relaciones comparativas y proponer ámbitos de recomendación para los diferentes sistemas de medición.

Para la realización de las mediciones es necesaria la fabricación de un útil de medición, que permita realizar las mediciones de las piezas asegurando su correcto posicionamiento y la mejor repetibilidad posible. El útil se construirá teniendo en cuenta los RPS facilitados por el cliente.

Tras la realización de éste estudio y en base a las conclusiones obtenidas, será posible determinar la incertidumbre de ambos sistemas de medición y definir cuál de esos sistemas es más apropiado según las dimensiones a medir y las condiciones requeridas para su obtención.

3.4.- Antecedentes

El objetivo principal de este estudio es la comparación de las incertidumbres de un sistema por contacto como es la MMC y un sistema sin contacto como es el sistema óptico. Los sistemas ópticos son recientes en comparación con las máquinas de medición por coordenadas, y en concreto el escáner láser portátil utilizado fue lanzado en el año 2014. Es debido a esta razón por la que no se han encontrado estudios previos.

Cuando se utiliza una MMC hay que trabajar en un entorno con condiciones especiales porque son sensibles a los cambios de temperatura, es por ello que éstas suelen estar situadas en laboratorios. Para la medición con este sistema existen procesos de medición homologados y se utilizan para realizar grandes modificaciones en los productos.

El sistema óptico tiene características diferentes, la principal es su portabilidad lo que permite al usuario realizar las mediciones en el propio puesto de trabajo. No están definidos los procesos de medición para estos equipos y se suelen utilizar para la comprobación in-situ de los productos, comprobando así que la producción está siendo correcta.

La pieza utilizada en este estudio es de estampación, en este sector es necesario realizar las modificaciones en los troqueles mientras se hacen pruebas o fabrican prototipos. Antes se utilizaban las máquinas de medición por coordenadas, lo que implicaba más tiempos de medición y el traslado de las piezas al laboratorio. Actualmente se están utilizando los sistemas ópticos, ya que te permiten medir las piezas en la línea de producción, lo que supone una reducción de los costes.

Mediante este estudio comparativo lo que se pretende es arrojar algo de luz en las diferencias entre ambos y establecer un criterio para ver en qué casos es preferible utilizar un sistema u otro.

3.5.- Estudio de alternativas

Tal como se ha comentado anteriormente, en este estudio se va a realizar la comparación entre ambos sistemas de medición: con contacto y sin contacto. Por lo tanto las alternativas de las que se disponen son la máquina de medir de coordenadas y el escáner láser portátil.

La MMC es una máquina tridimensional de puente móvil, el contacto con la superficie de la pieza se realiza con un palpador retráctil que permite obtener las coordenadas de los puntos mediante un sistema de medición de desplazamiento lineal, que luego se compara con el CAD recogido en un archivo digital. Este método es el que se ha venido utilizando en los últimos años.

Las principales desventajas de estos métodos son: largos tiempos de medición, elevado coste de los equipos, no aplicables con objetos frágiles y la dificultad de la utilización de los sistemas.

La ventaja más destacable, es la elevada precisión obtenida en las mediciones 3D de los puntos “palpados” sobre la superficie. También hay que tener en cuenta su gran flexibilidad, es capaz de medir geometrías complejas de series pequeñas y medianas.

El HandySCAN, en cambio, es un sistema móvil que proyecta un haz de láser sobre la pieza, con lo que se obtienen numerosos puntos, que se comparan con el CAD a gran velocidad. Es por esta razón que últimamente este método se utiliza cada vez con más frecuencia pero genera incertidumbre por las diferencias que se dan respecto a los sistemas de palpado.

Las ventajas del método de transmisión de estos sistemas, consiste en que es fuertemente insensible a las propiedades de reflexión de la superficie del objeto y que puede medir las cavidades internas del mismo. Sin embargo existen algunas desventajas, como el elevado precio de los sistemas, el complicado mantenimiento debido al uso de radiación de alta energía y la alta sensibilidad a las variaciones en la densidad del objeto.

3.6.- Solución Adoptada

3.6.1.- Marco teórico

3.6.1.1.- Introducción

La metrología es la ciencia de la medida, la cual permite expresar con números todas las características del Universo que tienen relación con alguna magnitud física, como pueden ser: longitud, tiempo, temperatura, velocidad...

Las cantidades y las características de un producto, son el resultado de un contrato entre el cliente (consumidor) y el proveedor (fabricante), mediante las mediciones se facilita y se asegura de que se cumpla lo establecido en el contrato.

Las mediciones son importantes en casi todos los procesos productivos e industriales, para ello, las empresas deben contar con buenos instrumentos para obtener medidas confiables y garantizar buenos resultados.

En la industria de la manufactura generalmente, es donde la metrología dimensional adquiere mayor importancia, ya que las dimensiones y la geometría de los componentes de un producto son características esenciales del mismo. Entre otras razones, en la producción los componentes deben ser dimensionalmente homogéneos, para que sean intercambiables aún siendo fabricados en diferentes máquinas, empresas o incluso países. Esta rama de la metrología, es básica para la producción en serie y la intercambiabilidad de partes.

3.6.1.1.1.- Incertidumbre

3.6.1.1.1.1.- Definición

En este estudio, se van a analizar las diferencias entre dos sistemas de medición que se utilizan actualmente en la industria para realizar el control dimensional de las piezas fabricadas. Para llevar a cabo ese análisis, se van a comparar las incertidumbres de ambos sistemas.

La Incertidumbre, tal como la define el CEM (*Centro Español de Metrología*), es una medida cuantitativa de la calidad del resultado de medición, que permite que los resultados de medida sean comparados con otros resultados, referencias, especificaciones o normas.

En todas las mediciones puede cometerse un error, por lo que el resultado de una medición no tiene por qué ser del mismo valor al mensurando. Aún así las fuentes de error de la medida pueden llegar a identificarse, y los errores de medición, cuantificarlos y corregirlos. Sin embargo, se requiere mucho tiempo y recursos para determinarlos y corregirlos completamente, y no siempre se dispone de ellos.

Existen dos tipos de errores, aleatorio y sistemático. El aleatorio, tras la repetición de una serie de mediciones, varía de manera impredecible, oscilando en torno a un valor medio. Se supone que es debido a variaciones, como pueden ser: la temperatura, la humedad, la presión, etc. Mediante el aumento en el número de mediciones, se puede reducir la dispersión en torno al valor medio, con lo que reduciremos el error. El error sistemático es el que en una serie de mediciones repetidas, permanece constante o varía de manera predecible. No es posible eliminarlo totalmente, pero se puede reducir e incluso corregir, si se identifican sus causas.

En la práctica es imposible conocer el valor exacto del mensurando, por lo que en vez de dar un valor numérico como resultado de una medida, se expresa con un intervalo:

$$y \pm U \quad (1)$$

Donde y es el resultado más probable (normalmente el valor medio de una serie de mediciones) y U es la incertidumbre de medida asociada al mismo. Cuanto menor sea la incertidumbre, más calidad tendrá el resultado de medida.

3.6.1.1.1.2.- Fuentes de Incertidumbre

La incertidumbre se calcula normalmente después del proceso de medida, teniendo en cuenta todas las posibles influencias que intervienen, que pueden ser:

- a) Definición incompleta de la medida.
- b) Realización imperfecta de la definición de la medida.
- c) Muestra no representativa de la medida.

- d) Conocimiento incompleto de los efectos de las condiciones ambientales sobre la medición, o medición imperfecta de dichas condiciones ambientales.
- e) Lectura incorrecta de instrumentos analógicos por parte del técnico.
- f) Resolución finita del instrumento.
- g) Patrones de medida o materiales de referencia incorrectamente calibrados.
- h) Aproximaciones en el método de medición.
- i) Variaciones en la repetición de las observaciones de la medida bajo condiciones aparentemente idénticas.

Estas fuentes, no tienen por qué ser independientes entre ellas, pueden contribuir entre ellas.

3.6.1.1.1.3.- Cálculo de la Incertidumbre

Las componentes de la incertidumbre se agrupan en dos categorías según su método de evaluación, "A" y "B", según recoge el CEM (Centro Español de Metrología) en la *Guía para la expresión de la incertidumbre de medida*. Son dos formas diferentes de evaluar las componentes de incertidumbre, ambos se basan en distribuciones de probabilidad y las componentes resultantes se cuantifican mediante varianzas o desviaciones típicas.

La evaluación Tipo A se calcula a partir de una serie de observaciones repetidas mientras que la evaluación Tipo B se calcula a partir de una información ya existente, como podrían ser certificados de calibración o especificaciones del fabricante. Para la realización de este estudio se han realizado repeticiones de mediciones en distintas piezas de las mismas características por lo que se va a utilizar la evaluación Tipo A de la incertidumbre.

La incertidumbre típica tipo A se obtiene a partir de una función de densidad de probabilidad derivada de una distribución de frecuencia observada. En la mayor parte de los casos, la mejor estimación posible de la esperanza matemática μ_k de una magnitud q que varía al azar, de la que se han obtenido n

observaciones independientes q_k en las mismas condiciones de medida, es la media aritmética \bar{q} de las n observaciones:

$$\bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n q_k \quad (2)$$

Los valores de las observaciones individuales q_k difieren en razón de las variaciones aleatorias de las magnitudes de influencia o efectos aleatorios. La varianza experimental de las observaciones que estima la varianza σ^2 de la distribución de probabilidad de q , viene dada por:

$$s^2(q_k) = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (q_j - \bar{q})^2 \quad (3)$$

$s(q_k)$ denominada desviación típica experimental, representa la variabilidad de los valores observados q_k , específicamente, su dispersión alrededor de su media \bar{q} .

La mejor estimación de la varianza de la media, viene dada por:

$$s^2(\bar{q}) = \frac{s^2(q_k)}{n} \quad (4)$$

$s(\bar{q})$ denominada la desviación típica de la media, determina la bondad con que \bar{q} estima la esperanza matemática μ_k de q .

Para una magnitud de entrada q determinada a partir de n observaciones repetidas e independientes, la incertidumbre típica de su estimación es $u(q)$ y se denomina incertidumbre típica de tipo A.

$$u(q) = s(\bar{q}) = \frac{s(q_k)}{\sqrt{n}} \quad (5)$$

Para satisfacer las necesidades de determinadas aplicaciones industriales y comerciales, la incertidumbre típica $u(q)$ se multiplica por un factor de cobertura k , obteniéndose la denominada incertidumbre expandida que se representa por U .

$$U = k u (q) \quad (6)$$

El propósito de ésta, es proporcionar un intervalo en torno al resultado de medida, que pueda contener una gran parte de la distribución de valores que podrían ser atribuidos al mensurando. Siempre que sea posible, debe estimarse e indicarse el nivel de confianza p asociado al intervalo definido por U .

La elección del factor k , habitualmente comprendido entre los valores 2 y 3, se fundamenta en la probabilidad o nivel de confianza requerido para el intervalo. A continuación se muestran los valores del factor de cobertura k correspondiente a un nivel de confianza p en una distribución normal.

Tabla 1.- Factor de cobertura k en función del nivel de confianza p .

Nivel de confianza p (%)	Factor de cobertura k
68,27	1
90	1,645
95	1,960
95,45	2
99	2,576
99,73	3

3.6.1.1.2.- Ingeniería Inversa

3.6.1.1.2.1.- Definición

La ingeniería inversa (en inglés, reverse engineering), es el proceso de descubrir los principios tecnológicos de un objeto, herramienta, dispositivo o sistema, mediante el razonamiento abductivo (haciendo conjeturas) de su estructura, función y operación. Dicho de otra manera, se trata de tomar algo, por ejemplo un dispositivo mecánico o electrónico, para analizar su funcionamiento en detalle, con el objetivo de crear un dispositivo que haga la misma tarea o una similar sin copiar los detalles del original.

La ingeniería inversa es un método de resolución. Aplicar ingeniería inversa a algo supone profundizar en el estudio de su funcionamiento, hasta el punto de

que podamos llegar a entender, modificar y mejorar dicho modo de funcionamiento.

3.6.1.1.2.2.- Objetivo

La ingeniería inversa persigue obtener la mayor cantidad de información técnica de un producto, del que no se tiene información técnica suficiente de su diseño, construcción y funcionamiento, de modo que se debe partir de un todo para comprender cada pieza del sistema, para lo cual se deben tomar notas muy detalladas.

3.6.1.1.2.3.- Aplicaciones

La ingeniería inversa tiene numerosas aplicaciones en varios sectores: medicina, arquitectura, ingeniería, arqueología, militar,...etc. Para este estudio se tiene en cuenta su aplicación en la ingeniería.

Debido a que el diseño por ordenador se utiliza más hoy en día, la ingeniería inversa se ha convertido en un método viable para crear un modelo 3D virtual de un objeto existente que posteriormente puede ser utilizado en CAD, CAM, CAE o otro software. El proceso de ingeniería inversa implica medir un objeto y después reconstruirlo en un modelo 3D. El objeto físico se mide utilizando tecnologías de escáner 3D como MMC, escáner laser o digitalizadores de luz estructurada. Los datos de medición se representan por medio de una nube de puntos que necesita ser procesada por medio de mallado o modelo CAD.

3.6.1.2.- Sistemas de Medición

En este apartado se introducen brevemente las principales técnicas de reconstrucción 3D que existen en la actualidad.

Las técnicas utilizadas para la digitalización 3D, se dividen en métodos sin contacto con la superficie a medir y en métodos que se basan en el contacto con la misma.



Figura 2.- Tipos de digitalización 3D.

La medición por contacto es un método mediante el cual se recogen puntos individuales relacionados entre ellos, en grandes o pequeños volúmenes. Esta información puede ser posteriormente utilizada para la evaluación o inspección o para ingeniería inversa de geometrías básicas. Son ideales para la captura de volúmenes de información pequeños o localizados, o para la digitalización o articulación de brazos.

En cambio, la digitalización en tres dimensiones de los sistemas ópticos, es un proceso mediante el cual se capturan nubes de puntos, obteniendo la geometría de objetos físicos a través de la utilización de emisores láser y cámaras. Los sistemas que utilizan esta tecnología son capaces de obtener las coordenadas 3D de pequeños y grandes objetos.

Actualmente existen numerosos sistemas de medición, en este caso los que interesan, debido a que las piezas de este proyecto pertenecen al sector automovilístico, son las máquinas de medir por coordenadas (MMC) por contacto y la técnica de medición óptica sin contacto, las cuáles son las más utilizadas en esta industria.

3.6.1.2.1.- Medición Con Contacto con Máquina de Medir por Coordenadas.

Mediante estos sistemas de medición mecánicos, se determinan las coordenadas 3D de los puntos mediante el palpado de la superficie a medir. El elemento con el que se realiza el palpado, tiene la posición definida con una elevada precisión.

3.6.1.2.1.1- Definición

Debido a la llegada de las máquinas herramientas de control numérico, aparece la necesidad de disponer de instrumentos de medida capaces de realizar la verificación dimensional de la producción a un ritmo elevado y con una flexibilidad similar a aquella con la que pueden programarse dichas máquinas herramientas, para ello se inventan las máquinas de medir por coordenadas.

Una máquina de medir por coordenadas es un instrumento de medida de absoluta de precisión capaz de determinar la dimensión, forma, posición y "actitud" (perpendicularidad, planitud,...etc.) de un objeto, midiendo la posición de distintos puntos de su propia superficie.

Las máquinas de medición por coordenadas (MMC) han evolucionado desde sus orígenes de máquinas de trazado simple y sistemas de funcionamiento manual, hasta centros de inspección automatizados de alta precisión, como es el caso de la máquina que se utiliza en este estudio, TRIMEK SPARK CNC 06.05.05.

3.6.1.2.1.2.- Aplicaciones

Uno de los aspectos que hay que tener en cuenta, es la aplicación para la que va a ser destinada la medición del objeto, y en este caso:

- Ingeniería Inversa: consiste en la creación o recreación de un objeto a partir de uno ya existente, mediante la construcción de un modelo CAD.
- Control de calidad: verificar que una pieza está dentro de las tolerancias, mediante la comparación de las diferencias entre el diseño y la pieza medida.

En este caso, primero se va a realizar un control de calidad de la pieza, que consiste en analizar la correspondencia entre la pieza estampada con las especificaciones teóricas establecidas por el cliente. Posteriormente, se obtendrá la geometría de la pieza mediante ingeniería inversa.

3.6.1.2.1.3.- Componentes

La máquina TRIMEK SPARK 06.05.05 está formada por una serie de componentes con unas características y dimensiones propias. En la imagen que se puede observar a continuación (Figura 3), se encuentran los diferentes componentes de los que consta la máquina:

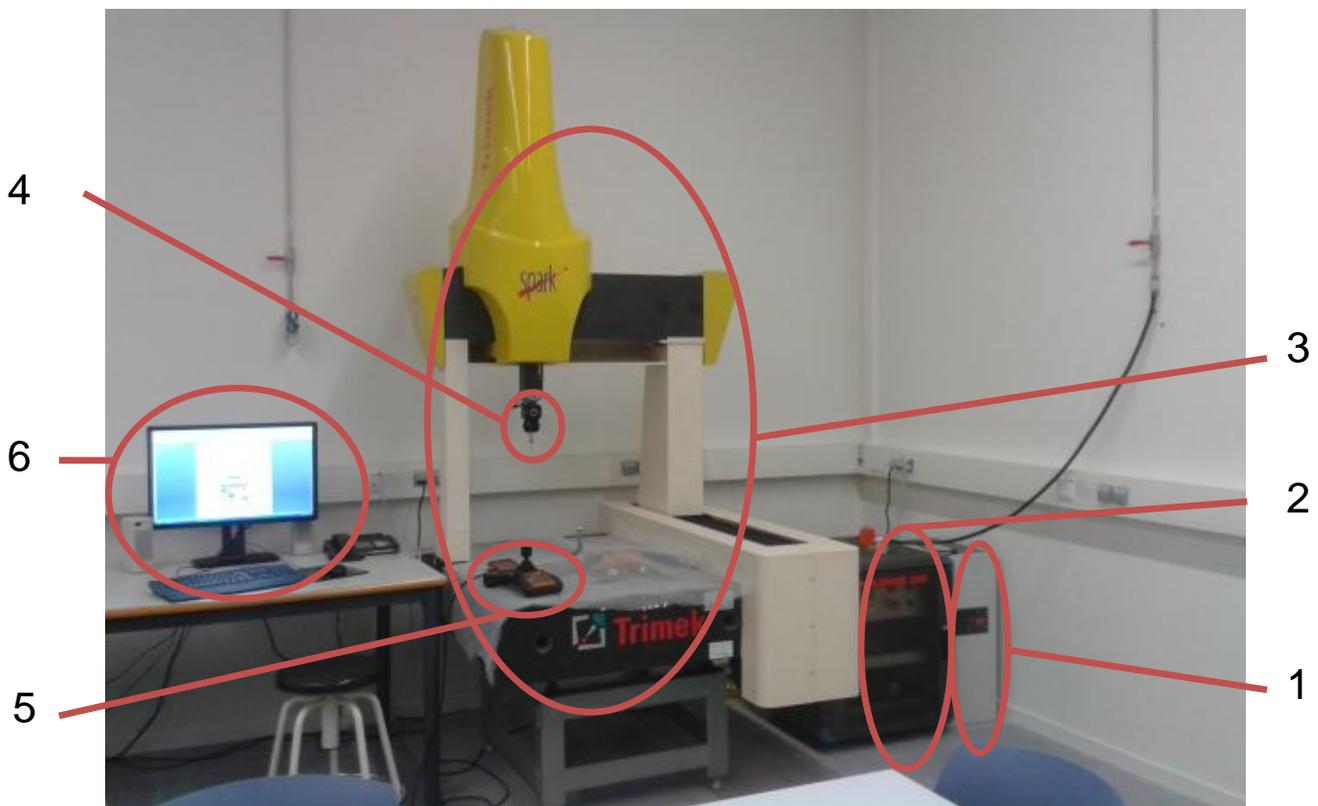


Figura 3.- Componentes de la MMC.

1. Compresor
2. Unidad de control
3. Estructura Mecánica
4. SAP
5. Joystick
6. Ordenador y Software

La máquina TRIMEK SPARK está formada por una serie de componentes con unas características y dimensiones propias:

1. Compresor: la máquina de medir por coordenadas contiene elementos neumáticos que funcionan con aire comprimido. Es necesario un compresor debido a que el aire comprimido del suministro no está a la presión de funcionamiento de la máquina.
2. Unidad de Control: puede denominarse como el "cerebro" de la MMC. Es el centro de todas las operaciones que se realizan en la máquina y de gestión de datos. Las funciones que realiza son las siguientes:
 - Control de la actividad dinámica de la máquina, es decir, gestión de la estructura mecánica en sincronismo metrológico y operacional en los 3 ejes.
 - Control del programa de medición y gestión del conjunto de instrucciones necesario para la ejecución automática del programa de medida.
 - Proceso de datos de los puntos medidos y elaboración, a partir de los puntos tomados en la superficie de la pieza, del elemento geométrico.
 - Gestión de la interacción y comunicación entre el usuario y la MMC.
 - Acceso por parte del usuario al encendido y al apagado de la máquina según le interese.
3. Estructura mecánica: es la representación física de un "Sistema de Referencia Cartesiana" en el que cada uno de los ejes representa uno de los ejes X,Y y Z del propio sistema de referencia. Esta también se puede dividir en otros componentes que contribuyen a que la precisión de la máquina sea mucho mayor.
 - Mesa: la máquina se sustenta sobre una mesa sobre la cual, se amarran los distintos sistemas como: cadenas, carcasas, motores del eje X y la regla de captación del eje X. Además sirve de base de deslizamiento de la estructura puente. En la bancada, se encuentra la guía de deslizamiento X que soporta la parte móvil de la máquina. De hecho la longitud del mármol determina el recorrido X; y la anchura, el recorrido Y.

El material de la mesa es de granito, material de gran dureza y pequeño peso específico, por lo que es idóneo para una mesa de

una MMC, también por su estabilidad térmica, rigidez, inalterabilidad y resistencia al desgaste.

Sobre la mesa de granito se colocarán las piezas de trabajo, que posteriormente serán medidas, y la esfera de calibración, la cual es roscada en la mesa de granito, gracias a unas roscas incrustadas en la mesa.

- Sistemas de Deslizamiento: El sistema de deslizamiento de los ejes está constituido por patines neumáticos que garantizan el soporte y el desplazamiento sin fricción de las partes móviles de los ejes.

El soporte de las partes móviles está asegurado por un flujo de aire comprimido que proviene de la centralita neumática. El flujo alimenta los patines formando un film de aire entre los patines mismos y las pistas de deslizamiento. Gracias a estos patines neumáticos, se evita el rozamiento por rodadura en grandes velocidades y inercias.

El movimiento de cada eje es realizado por un sistema de arrastre con correa dentada controlado por un motor de corriente continua. La parte móvil del eje está fijada por medio de un grupo de arrastre a la correa dentada sin fin ensamblada en dos poleas (una motriz y otra de cambio de dirección). La polea motora toma el movimiento del motor mediante una reducción a correa. Se utilizan las correas como elementos de transmisión del movimiento, ya que son mejores que engranajes y rodamientos.

4. Conjunto palpador (SAP): el Sistema de Adquisición de Puntos, es el centro de la máquina de medición y el resultado de las mediciones que se toman dependen en gran parte de las características metrológicas del tipo que se utilice. De hecho, el SAP es la única parte de la máquina que tiene un posible recambio y el usuario puede utilizar distintas clases de palpadores según le convengan para la realización de su trabajo. Para la realización de este, se ha utilizado un SAP de contacto analógico, formado por los siguientes elementos:

- Cabezal de sonda PH10T
- Elemento de extensión PEL2
- Sonda de activación TP2-5 vías
- Palpador M2

5. Joystick (Unidad de Control Manual Multifuncional) : el joystick RENISHAW MCU1 permite al usuario la posibilidad de efectuar movimientos de la máquina de una forma manual, y de esta forma, realizar mediciones manuales, identificar rutas de medición para futuros programas de inspección automática, etc.

El joystick está conectado a la Unidad de Control, que a su vez, está conectada a la máquina y permite el movimiento del SAP en los tres ejes X, Y y Z, posibilitando al usuario realizar el contacto con la pieza en el punto que más le interese.



Figura 4.- Joystick RENISHAW MCU1.

6. Ordenador y software: CAPPs es un software de medición de la compañía americana AAT (Applied Automation Technologies). Éste presenta un entorno de programación integrado que permite diseñar, desarrollar y simular programas de inspección en MMC.

Estos programas de medición se pueden transmitir a una máquina tridimensional, la cual da la posibilidad de ejecutar todas las posibilidades que ofrece el software de dicha máquina.

Para que los programas de medición que se realizan puedan soportar la amplia variedad de lenguajes de máquina, se utiliza el lenguaje DMIS (Dimensional Measuring Interface Standard), es el lenguaje de programación estándar de metrología. Mediante el DMIS se consigue que cada operación efectuada se pueda traducir automáticamente en unas instrucciones, y de esta forma, aunar toda la amplia gama de lenguajes de máquina en un lenguaje único de metrología.

Además, CAPPs permite trabajar con varios tipos de ficheros CAD. Así toda la información a inspeccionar, tal como la geometría, dimensiones y las tolerancias que provienen de un modelo de CAD externo, se puede transferir a CAPPs por medio de importaciones de modelos de diferentes programas de CAD a través de un interface que lleva el programa.

Gracias a la utilización del software hay varias aplicaciones que se pueden realizar, son las siguientes:

- Definición de sistemas de coordenadas y alineamientos de piezas: permite definir distintos sistemas de coordenadas para la pieza, así como relacionar 2 sistemas de coordenadas para relacionar la pieza real que se tiene en la mesa de granito con la pieza CAD que se tiene en el software.
- Medición Manual y Automática: da la posibilidad de realizar las mediciones tanto manual como automáticamente, de todos los elementos geométricos y superficies disponibles en una pieza de trabajo, así como de crear rutas de medición de éstos.
- Extracción de Nominales: permite obtener los datos teóricos de los elementos geométricos de las piezas en soporte CAD, para poder compararlos con los datos obtenidos en las mediciones realizadas en la pieza de trabajo real.
- Construcción de elementos: mediante esta aplicación, el usuario puede construir y medir los distintos elementos geométricos que físicamente no pueden ser medidos por ninguna de las otras aplicaciones que permite el software.
- Ejecución del programa DMIS: da la posibilidad de ejecutar el programa, al que se le pueden realizar cambios según la conveniencia del usuario. Gracias a esta opción podemos repetir las mediciones en otras piezas y luego comparar las mismas.

- Estudio de tolerancias permite estudiar distintos tipos de tolerancias en las piezas de trabajo para decretar si entra dentro de las tolerancias de trabajo límites definidas por el usuario.

3.6.1.2.1.4.- Características

En el mundo industrial existen infinidad de modelos de máquinas de metrología tridimensional y cada una de ellas poseen unas particularidades propias, según sea el fabricante.

Para realización del presente estudio se tiene una máquina de medición de piezas de tipo puente que se fabrica en distintos tamaños atendiendo a las necesidades detectadas en el mercado. El modelo SPARK 06.05.05 se caracteriza como todas las máquinas TRIMEK, por una construcción robusta y sencilla, unida a la aplicación de las más avanzadas tecnologías.

La máquina está fabricada en granito natural en sus tres ejes, con lo que se consigue gran estabilidad dimensional y unos movimientos muy precisos.

El modelo SPARK, es el idóneo para la medición de piezas con gran precisión. Por ello, el mercado al que va dirigido este modelo es el de todo tipo de mecanizadores, moldistas y pequeñas piezas de estampación.



Figura 5.- Características generales de la máquina.

a) Arquitectura.

La arquitectura de las estructuras mecánicas de las máquinas de medir está ya consolidada, se pretende encontrar el mejor compromiso entre la dinámica del sistema, su precisión y su accesibilidad a la pieza a medir. Será el usuario el que decida cuál es el tipo de arquitectura que

más le conviene para la correcta medición del objeto. Entre los tipos existentes, el más extendido a lo largo de la industria, y el que se utilizará en este estudio, es una MMC de puente móvil y mesa fija.

Este tipo de MMC materializa un sistema de coordenadas cartesiano con tres ejes (X, Y, Z) rectilíneos y perpendiculares entre ellos que pueden desplazarse a lo largo de las guías paralelas a ellos y en el que el sistema de palpado está acoplado al eje que se mueve verticalmente.

Se caracterizan por tener un puente por donde se mueve el brazo de medir, no son muy grandes y para salas limitadas de espacio laterales son perfectas, ya que el brazo se desplaza verticalmente.

Estas máquinas poseen rangos intermedios de medición, su accesibilidad está limitada por el puente, poseen una alta rigidez y cuentan con muy poca incertidumbre.

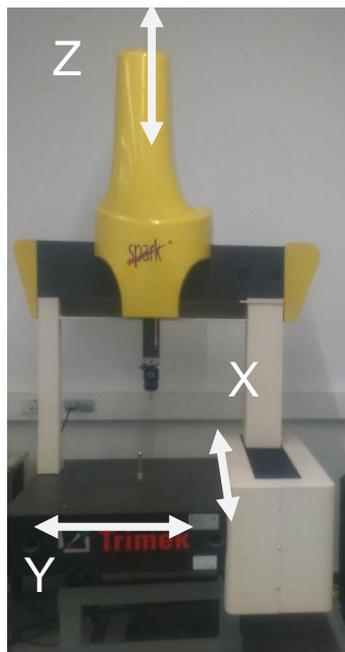


Figura 6.- Ejes.

b) Dimensiones.

En cuanto a dimensiones, se refiere a la longitud de los ejes, por lo general cartesianos, que determinan el Volumen Útil de Trabajo (VUT) de la estructura mecánica.

La máquina utilizada en este proyecto tiene un VUT, de X=600, Y=500 y Z=500, medidas en milímetros (Figura 7).



Figura 7.- Volumen Útil de la MMC.

c) Ubicación.

Hasta ahora, las MMC se instalaban en los laboratorios de metrología, pero debido al gran desarrollo de la automatización de los procesos, surge la necesidad de que la realización de las mediciones sea en la misma ubicación en la que se producen las piezas. Sin embargo, esta nueva ubicación tiene efectos negativos en las mediciones, ya que las condiciones ambientales, de humedad y temperatura, no suelen ser las idóneas para la máquina en las zonas de producción.

Esto supone que las empresas deben de construir un laboratorio de medición en el área de producción, que tengan las condiciones ambientales adecuadas, que estén aisladas de las altas temperaturas, del ruido y de las vibraciones generadas por las máquinas.

Por ejemplo, si se producen desviaciones en la temperatura de referencia de 20°C, deriva en variaciones en las longitudes de las escalas de medición y en las de la propia pieza medida, y para la correcta medición, la distribución de las temperaturas a lo largo de las escalas y en la masa de la pieza debe ser homogénea. Los gradientes térmicos en el ambiente en que se encuentra la CMM afectan, sobre todo, a la alineación de las guías y a su perpendicularidad recíproca.

d) Dinámica

Con el término dinámica, se determinan las características de aceleración y velocidad de posicionamiento de una MMC. La velocidad y la aceleración son importantes en relación con la frecuencia de muestreo que la MMC puede alcanzar, cuanto más elevados sean estos valores, mayor será el número de piezas que podrán ser medidas por unidad de tiempo. La aceleración es el parámetro más importante cuando se considera la productividad de una MMC, ya que se podrían reducir los tiempos de ciclo de medición.

3.6.1.2.1.5.- Funcionamiento

Para comprender el funcionamiento de una MMC, es necesaria la explicación del sistema de desplazamiento y transducción de la posición, y principalmente del conjunto SAP.

- Sistema de desplazamiento y transducción de la posición

El sistema de deslizamiento de los ejes está constituido por patines neumáticos que garantizan el soporte y el desplazamiento sin fricción de las partes móviles de los ejes. El soporte de las partes móviles está asegurado por un flujo de aire comprimido que proviene de la centralita neumática. El flujo alimenta los patines formando un film de aire entre los patines mismos y las pistas de deslizamiento.

Cada eje está provisto de un transductor óptico lineal, constituido por una regla óptica y por un lector de posición, que efectúa la determinación micrométrica de la posición del eje y la lectura del desplazamiento.

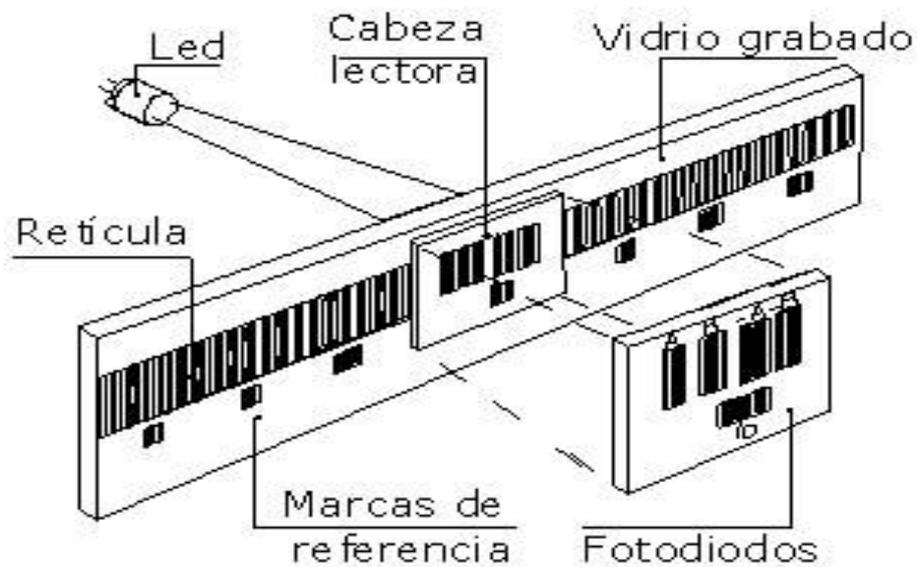


Figura 8.- Regla óptica.

Cuando un eje se mueve, el lector de posición genera impulsos eléctricos que envía al sistema de control. El sistema de control cuenta los impulsos y los convierte en el correspondiente desplazamiento del eje.

- Conjunto SAP

Las máquinas de medir por coordenadas pueden medir con diversos instrumentos. Entre estos están: sondas de disparo por contacto, sondas analógicas, escaneado continuo y sistemas sin contacto. Esta guía se centra en las sondas de disparo por contacto.

a) Diseño y principios de la sonda de disparo mecánica

La mayoría de las máquinas medidoras de coordenadas utilizan una sonda de disparo por contacto con una descripción. Es necesario tener un conocimiento básico de cómo funciona esta sonda.

El problema al que se enfrentan los diseñadores es que deben obtener mayor precisión que la que requiere el fabricante de la pieza a medir. Sólo mediante la aplicación de los principios cinemáticos puede el diseño de las sondas ser tal, que la precisión al operar no dependa totalmente de su precisión de fabricación.

La sonda de disparo por contacto utiliza elementos cinemáticos para sujetar el palpador de una forma repetitiva. Un mecanismo típico, consta de tres rodamientos cilíndricos, cada uno presionado contra dos pares de bolas. Esta acción restringe los seis grados de libertad del palpador consiguiendo que retroceda a la misma posición tras la deflexión. Un muelle sujeta el palpador con los contactos cinemáticos y devuelve el palpador a la posición inicial.



Figura 9.- Interior de la sonda de disparo.

Cada vez que el palpador deflecta en una dirección una señal de disparo se genera mediante un circuito eléctrico. En el momento en el que el palpador hace contacto, cuando la señal de disparo para la máquina y manda la información al ordenador para que guarde las coordenadas de la posición del palpador.

El sistema sensor utiliza una disposición de esferas y cilindros (varillas) para mantener la corriente eléctrica en el circuito sensor. Cuando la sonda toque la pieza, el vástago de la misma girará haciendo que una de las esferas se levante quedando el circuito interrumpido. Cuando eso ocurre, la posición de los tres ejes queda congelada y el sistema de medición lineal registra las coordenadas transfiriéndolas al ordenador.

El principal problema del diseño cinemático de las sondas de disparo por contacto radica en que la geometría de los contactos genera ligeras diferencias en las fuerzas de contacto necesarias para disparar la sonda según la dirección en la que el palpador contacta la superficie.

Esta variación conlleva diferentes grados de flexión del palpador cuando hace contacto con la pieza y cuando se genera la señal de disparo. Esta deflexión se puede compensar mediante la calibración de una esfera de referencia calibrada.

El rango de la desviación depende de la dirección de aproximación del palpador, por ello es necesario calibrar el palpador en la misma dirección en la que se va a medir. Esto implica que se tiene que realizar esa calibración para cada combinación de palpador y cuerpo de sonda a utilizar durante la medición.

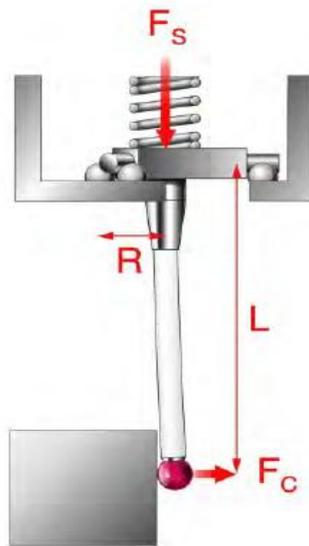


Figura 10.-Fuerzas de contacto en el palpador.

$$F_C \times L = F_S \times R \quad (7)$$

La fuerza de contacto F_C genera un momento al que se resiste la fuerza del muelle F_S . El equilibrio se alcanza cuando el momento $F_C \times L$ generado por el contacto iguala el momento $F_S \times R$ generado por el muelle y por la desviación R que varía con la dirección en la que actúa la fuerza de contacto.

b) Selección del cabezal

El cabezal es la parte del SAP que proporciona las conexiones mecánicas y eléctricas entre la sonda y el resto de dispositivos de la

máquina, El tipo de cabezal a utilizar se determina teniendo en cuenta la flexibilidad y grado de automatización requeridos en el proceso de medición.

En el mercado hay disponibles desde cabezales totalmente manuales hasta cabezales motorizados orientables que permiten el cambio automático de sonda, convirtiendo una MMC de 3 ejes en una MMC con capacidad de medición en 5 ejes.

Las principales funciones de los cabezales de sonda son:

- Permitir sostener de una forma rígida la sonda de activación por contacto.
- Proporcionar a la Unidad de Control las conexiones mecánicas y eléctricas para una buena aplicación.
- Servir como nexo de unión entre el brazo recorrido del eje Z y el elemento de extensión y sonda de activación.

El modelo utilizado para el palpador en este caso es el PH10T de RENISHAW (Figura 11), uno de los modelos estándar y más utilizados para este tipo de máquinas.

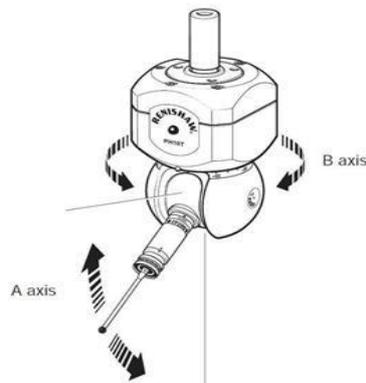


Figura 11- Cabezal orientable PH10T

En la parte inferior del cabezal de sonda se encuentra la articulación que permite movimientos angulares en los dos ejes mostrados en la figura anterior:

- Eje A: que gira desde 0° (posición vertical) hasta los 105° .
- Eje B: con posibilidad de movimiento en los 360° .

El cabezal posee un LED de color rojo que indica el estado en el que está la sonda:

- LED encendido: la sonda está asentada y lista para su utilización.
- LED apagado: la sonda se encuentra inactiva, debido a que la máquina se encuentra apagada o no existe sonda incorporada.

3.6.1.2.1.6.- Incertidumbre en una MMC

Al referirnos a máquinas de medir por coordenadas, la primera idea que aparece es precisamente la precisión. En realidad, el término precisión es inexacto, los valores que declaran los fabricantes indican precisamente lo contrario. El parámetro significativo que juzga la precisión de una MMC es la incertidumbre de medición.

La incertidumbre de medición es el error máximo que puede cometer una MMC durante la medición de una longitud conocida y de la manera establecida por un estándar internacional.

La incertidumbre es el parámetro más significativo, resulta del efecto conjunto de los errores de cada componente individual de la máquina: errores geométricos de la estructura mecánica, errores de los sensores,...etc.

3.6.1.2.1.6.1.- Fuentes de error

Las diferentes fuentes de errores de medida en una MMC, pueden ser las siguientes:

- Sistema físico de medición de errores geométricos: holguras, perpendicularidad entre ejes, rectitud de la trayectoria...
- Elemento a medir: acabado superficial, dureza, defectos de forma...
- Sistema de palpado: histéresis, repetibilidad, características mecánicas, forma...
- Adquisición y procesamiento: muestreo, error de digitalización, algoritmo, interpolación.
- Condiciones ambientales: variación de la temperatura, gradientes térmicos, vibraciones...

La zona de incertidumbre, no tiene por qué ser esférica, ya que puede haber errores mayores (o no), asociados a un determinado eje. Los valores de la incertidumbre obtenidos en los ensayos, no pueden superar el valor definido por el fabricante.

3.6.1.2.1.6.2.- Verificación de la MMC

La verificación de la máquina se efectuó empleando el procedimiento de Verificación de UNIMETRIK/TRIMEK 330-038 para medidoras de tres coordenadas, basado en la Norma ISO 10360-2. Mediante la verificación se comprueba que la máquina funciona correctamente.

Para la verificación se realiza el procedimiento de calibración que consiste en un conjunto de operaciones que permiten establecer bajo determinadas condiciones la incertidumbre asociada a las mediciones. Fundamentalmente compara las distancias medidas por la máquina con las medidas de los patrones utilizados en las líneas de medición. Así se conocerá como funcionará la máquina en similares mediciones longitudinales.

El informe elaborado por TRIMEK en el 2014 establece que las condiciones ambientales durante la calibración eran de 18°C de temperatura y con una humedad relativa menor del 70%.

Por lo general, la incertidumbre, el MPE_E (Máximo error permitido de medición de la longitud, en μm) se obtiene según la siguiente fórmula:

$$a + b \times L/1000 (\mu\text{m}) \quad (8)$$

a (μm) es la constante de error declarada por el fabricante para una MMC determinada.

b (μm) es la variable de error en función de la longitud del bloque patrón declarada por el fabricante para una MMC determinada

L (mm) es la longitud del bloque patrón.

El MPE_E definido por el fabricante de esta máquina es el siguiente:

$$MPE_E = 5.00 + 5 \times L(m) \quad (9)$$

Este término indica la precisión de medición longitudinal de la MMC. Se define como el valor extremo del error de indicación de una MMC para la medición de una medida.

Las mediciones se deben realizar utilizando los tres ejes de la máquina y las expresiones aplicadas para cualquier posición y orientación del material estándar dentro del ámbito de trabajo de la MMC.

Para la calibración se ha utilizado una barra de bolas calibradas, de las que se conoce el diámetro y las distancias entre ellas.



Figura 12.- Barra de bolas de calibración.

Para la realización del test de aceptación se debe medir la barra de bolas en siete combinaciones diferentes de posición y orientación, midiendo tres veces cinco longitudes. Las configuraciones son las siguientes:

- a) Las cuatro diagonales que forman el volumen de trabajo de la máquina.
- b) Las tres diagonales de los tres ejes en la mitad de su posición.

Al terminar todas las mediciones en las 7 configuraciones, tenemos un total de 105 mediciones. Hay que calcular el MPE_E de cada medición realizada. Las longitudes medidas son: 100, 200, 300, 401 y 501, todas ellas en milímetros. Para cada valor hay que calcular el MPE_E asociado a cada una mediante la Ecuación 8.

$$MPE_E = 5,00 + 5 \times 0,1(m) = 5,5 \quad (10)$$

$$MPE_E = 5,00 + 5 \times 0,2(m) = 6 \quad (11)$$

$$MPE_E = 5,00 + 5 \times 0,3(m) = 6,5 \quad (12)$$

$$MPE_E = 5,00 + 5 \times 0,401(m) = 7,005 \quad (13)$$

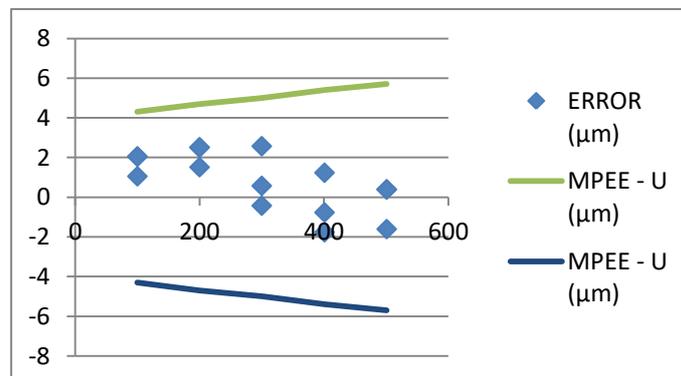
$$MPE_E = 5,00 + 5 \times 0,501(m) = 7,505 \quad (14)$$

Para establecer los límites falta obtener el valor de la U, incertidumbre expandida, sabiendo que el valor del factor de cobertura k es igual a 2 para conseguir un nivel de confianza de aproximadamente el 95 %. Mediante la Ecuación 5 se obtiene el valor de u y con la Ecuación 6 finalmente el valor de U.

Una vez calculados los valores de MPE_E y de U, se pueden representar mediante gráficas y así poder evaluar si los errores encontrados durante las mediciones son significativos. Los resultados obtenidos se pueden observar en las siguientes gráficas:

EJE X

X_i	-450	X_f	50
Y_i	150	Y_f	150
Z_i	-315	Z_f	-315

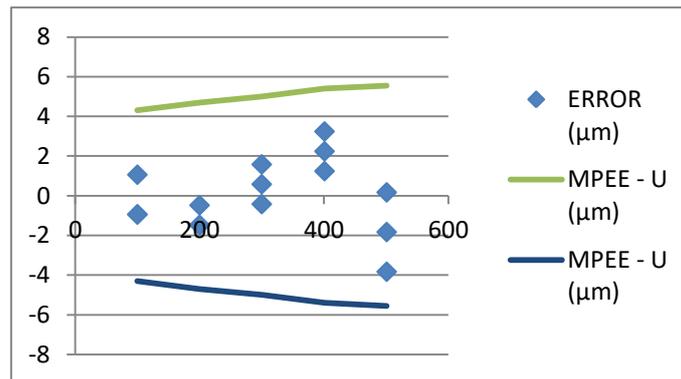


Gráfica 1.- Errores en la medición del Eje X.

La Gráfica 1 corresponde a la medición del eje X ya que las coordenadas de Y y Z se mantienen constantes. El máximo error es aproximadamente de 2 micras en valor absoluto.

EJE Y

X_i	-150	X_f	-150
Y_i	400	Y_f	-50
Z_i	-315	Z_f	-315

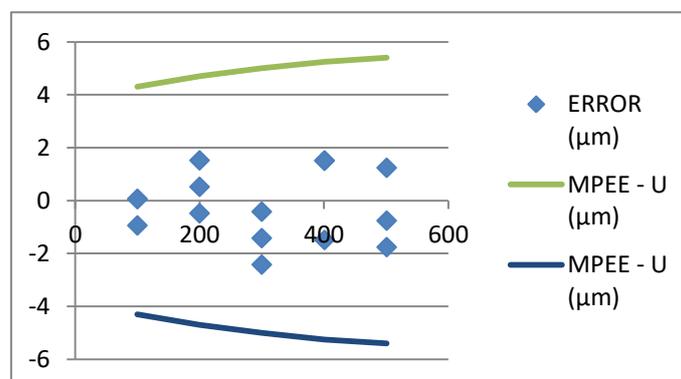


Gráfica 2.- Errores en la medición del Eje Y.

En la Gráfica 2 se observan los resultados de los errores obtenidos en la medición del Eje Y, es el único eje que varía sus coordenadas. En este caso, el máximo error es de 4 micras, el doble que en la medición del eje X.

EJE Z

X_i	-115	X_f	-115
Y_i	170	Y_f	170
Z_i	-350	Z_f	50



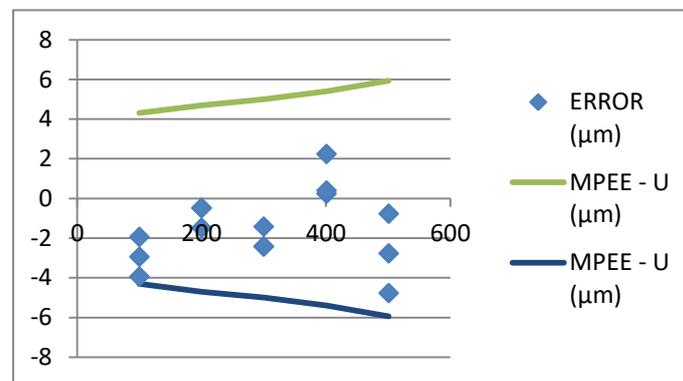
Gráfica 3.- Errores en la medición del Eje Z.

La Gráfica 3 muestra los errores obtenidos en la medición de Eje Z, ya que es el eje cuyas coordenadas no se mantienen constantes. Al igual que el eje X, el máximo error encontrado en el Eje Z es de aproximadamente 2 micras.

Tras observar los tres resultados obtenidos, todos los errores se encuentran dentro de los límites establecidos. Sin embargo, en el Eje Y el error máximo es prácticamente el doble de los errores máximos obtenidos en los otros dos ejes. A continuación se muestran los errores encontrados en las cuatro diagonales del volumen útil de la MMC:

DIAGONAL 1

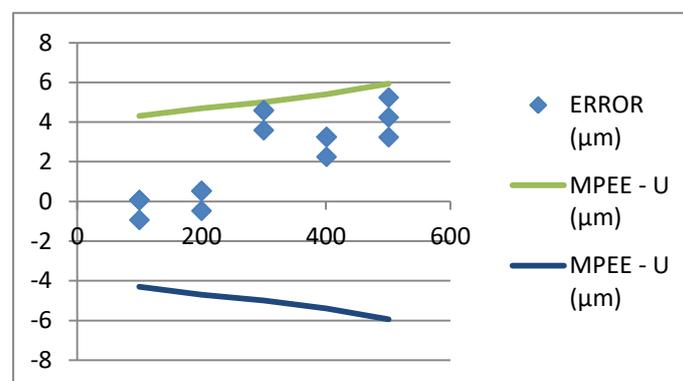
X_i	-425	X_f	25
Y_i	287	Y_f	63
Z_i	-312	Z_f	-88



Gráfica 4.- Errores en la Diagonal 1.

DIAGONAL 2

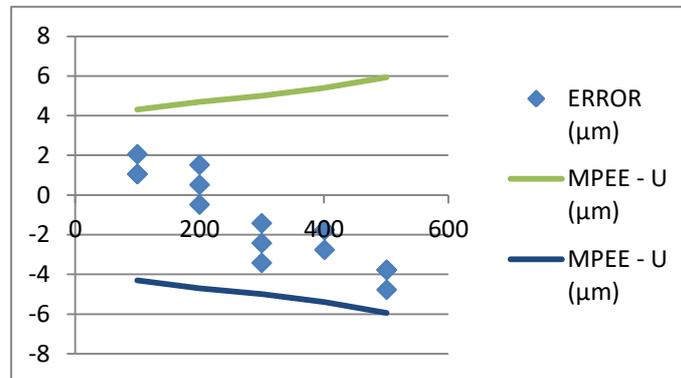
X_i	-425	X_f	25
Y_i	63	Y_f	287
Z_i	-312	Z_f	-88



Gráfica 5.- Errores en la Diagonal 2.

DIAGONAL 3

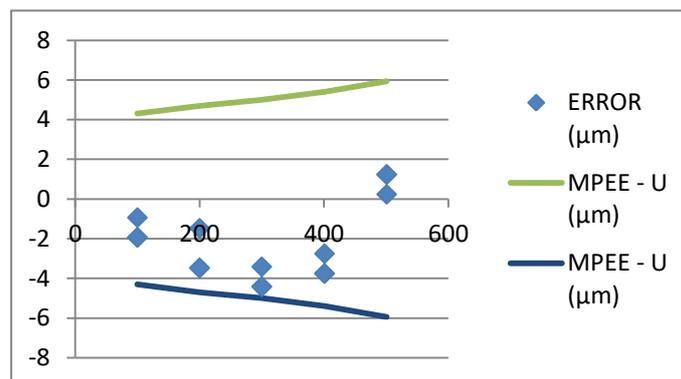
X_i	25	X_f	-425
Y_i	63	Y_f	287
Z_i	-312	Z_f	-88



Gráfica 6.- Errores en la Diagonal 3.

DIAGONAL 4

X_i	25	X_f	-425
Y_i	87	Y_f	63
Z_i	-312	Z_f	-88



Gráfica 7.- Errores en la Diagonal 4.

En cuanto a los errores obtenidos en las distintas diagonales, comentar que todos se encuentran dentro de los límites. Hay valores que están muy cerca de los límites, debido a esto, se debe tener en cuenta que con el paso del tiempo

si no se realiza el mantenimiento correspondiente, esto puede suponer un aumento de estos errores, con lo que la máquina no estaría funcionando óptimamente.

El envejecimiento de los componentes, los cambios de temperatura y el estrés mecánico que soportan los equipos deteriora poco a poco sus funciones. Cuando esto sucede, los ensayos y las medidas comienzan a perder confianza. Mediante la calibración se proporciona la seguridad de que las mediciones que se realizan reúnen las especificaciones requeridas.

3.6.1.2.2.- Medición Sin Contacto con Escáner láser

El propósito de un escáner 3D es, generalmente, el de crear una nube de puntos a partir de muestras geométricas en la superficie del objeto.

Los escáneres 3D son distintos a las cámaras. Al igual que éstas, tienen un campo de visión en forma de cono, pero mientras una cámara reúne información de color acerca de las superficies dentro de su campo de visión, los escáneres 3D reúnen información acerca de su geometría. El modelo obtenido por un escáner 3D describe la posición en el espacio tridimensional de cada punto analizado.

3.6.1.2.2.1.- Definición

Las técnicas de medición de no contacto, son las que el instrumento de medición no entra en contacto con el objeto a medir. Las técnicas sin contacto se dividen en dos, activas o pasivas, dependiendo de si interactúan proyectando energía sobre el objeto o no.

Los escáneres activos emiten alguna clase de señal y analizan su retorno para capturar la geometría de un objeto o una escena. Se utilizan radiaciones electromagnéticas (desde ondas de radio hasta rayos X) o ultrasonidos.

Estos escáneres láser se basan en la triangulación de posición de un objeto. Se utiliza un punto, una línea o un patrón láser dirigido hacia el objeto a digitalizar. Más adelante, un sensor se encarga de recoger la luz del láser que es reflejada desde el objeto y, gracias a los cálculos de triangulación trigonométrica que el escáner 3D realiza internamente, se calcula la distancia del objeto al escáner. De esta forma se consigue una compleja y densa nube de puntos, que posteriormente con la ayuda de un software se realiza un mallado de esa nube, y finalmente se obtiene un modelo de CAD.

El instrumento utilizado en este caso para la digitalización con láser ha sido el HANDYSCAN 700, es un escáner láser portátil diseñado para aplicaciones de metrología.



Figura 13.- Escáner láser 3D HandySCAN 700.

3.6.1.2.2.2.- Aplicaciones

Hace un tiempo, crear los diseños de los nuevos productos, tomar mediciones de objetos de complejas geometrías o automatizar el flujo de trabajo en las fábricas, procesos que suponían días o semanas de trabajo. Ahora por medio de la digitalización, las aplicaciones mencionadas anteriormente se pueden completar en unos minutos o algunas horas.

La medición y los procesos de inspección pueden ser automatizados con estos escáneres, para los controles de calidad y el montaje de las series de producción de las chapas metálica. Por ejemplo, estos escáneres pueden capturar una pequeña pieza mecánica como una turbina, con una sorprendente precisión.

El escáner láser ha encontrado una aplicación insustituible en el control dimensional de fabricación de componentes que requieren tolerancias muy estrictas. Las piezas se escanean y la nube de puntos se compara con el modelo teórico, permitiendo un control muy minucioso sobre la producción.

Las mediciones sin contacto en metrología tienen la ventaja de que esta elimina la posibilidad de que se dañe la pieza (deformada, rayada o contaminada) a través del contacto con la herramienta de medición.

3.6.1.2.2.3.- Componentes

Un equipo láser escáner consta de dos componentes básicos: un dispositivo de medida de distancias y un mecanismo de barrido. El mecanismo de barrido que sería en este caso el láser, es la fuente de luz que se proyecta sobre el objeto a medir, siendo capaz de medir 480.000 puntos por segundo. Las cámaras son los dispositivos de medida que captarán en este caso las líneas, estas son capaces de captar 60 fotografías por segundo.

Usando un sistema de triangulación basado en una cámara y un láser puede generar sombras que pueden suprimirse usando una segunda cámara en la orientación inversa.

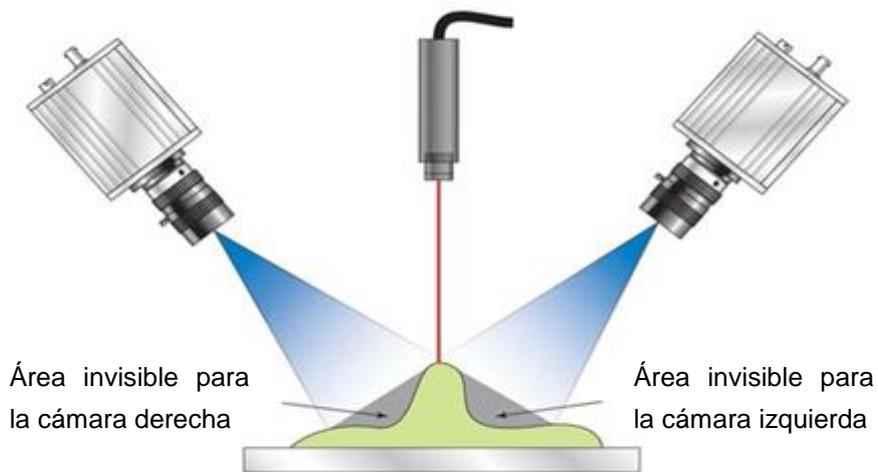


Figura 14.- Dos cámaras para escanear todas las zonas.

3.6.1.2.2.4.- Características

Este dispositivo no requiere ningún sistema de posicionamiento externo y tiene la posibilidad de meterlo en un estuche y llevarlo a donde se quiera. . Es

esta característica, la portabilidad, la que lo diferencia de otros productos del mercado.

No requiere una instalación fija, se emplean reflectores ópticos para crear un sistema de referencia "fijado" a la pieza en sí, de manera que el usuario pueda mover el objeto en cualquier dirección durante una sesión de digitalización. Es un sistema de adquisición de datos que, al mismo tiempo, incorpora su propio sistema de posicionamiento. Utiliza la triangulación para determinar en tiempo real su posición relativa en función del objeto.

El escáner se puede calibrar tan a menudo como sea necesario (cada día o antes de una nueva sesión de digitalización). La calibración tarda unos 2 minutos y garantiza un funcionamiento óptimo.

Tabla 2.- Especificaciones técnicas HandySCAN 700.

Especificaciones técnicas HandySCAN 700	
Peso	0,85 kg
Dimensiones (LxWxH)	77x122x294
Rango de medición	480.000 mediciones/s
Área de escaneado	275x250 mm
Fuente de luz	7 líneas cruzadas (+1 línea extra)
Tipo de luz	II (segura para los ojos)
Resolución	0,050 mm
Precisión	Hasta 0,030 mm
Precisión volumétrica	0,020 mm + 0,080 mm/m
Rango de temperatura	5-40 °C
Humedad relativa	10-90 %

Respecto a las características de las cámaras comentar que:

- Ambas cámaras tienen la misma distancia focal.
- Las cámaras son paralelas respectivamente.
- Los ejes X de las dos cámaras intersectan y están alineadas con respecto a la línea base que une ambas cámaras.

3.6.1.2.2.5.- Funcionamiento

El escáner láser de triangulación 3D es también un escáner activo que usa la luz del láser para examinar el entorno. El haz de luz láser incide en el objeto y se usan las cámaras para buscar la ubicación del láser. Dependiendo de la distancia a la que el láser golpee una superficie, las líneas del láser se reflejan en lugares diferentes. Los sensores están situados a una distancia conocida de la fuente del láser.

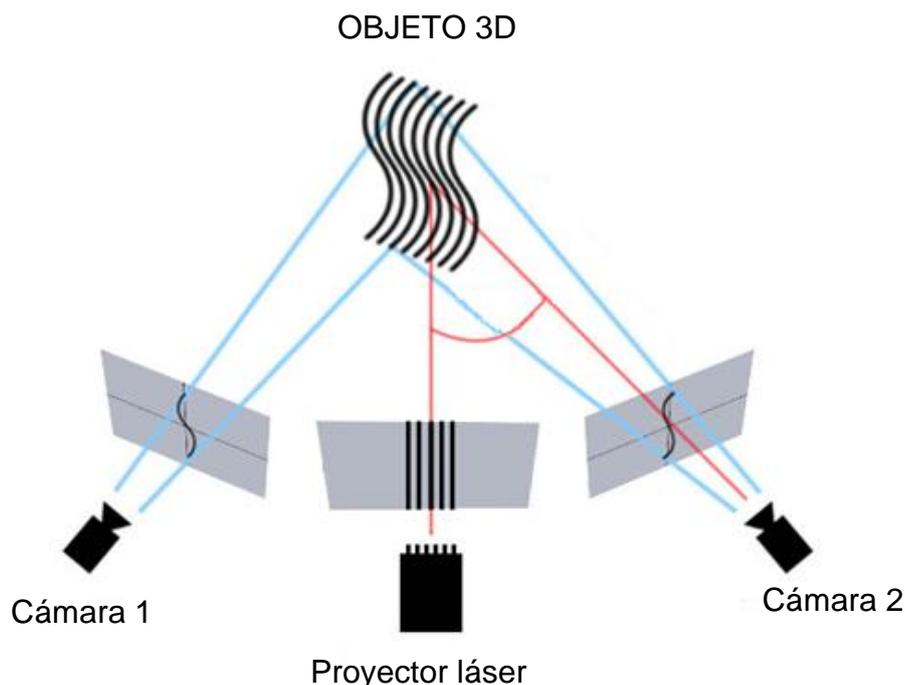


Figura 15.-Principio de triangulación.

Esta técnica se llama triangulación porque el punto de láser, la cámara y el emisor del láser forman un triángulo. La longitud de un lado del triángulo definido por la cámara y el emisor del láser es conocida. El ángulo del vértice del emisor de láser se sabe también. El ángulo del vértice de la cámara puede ser determinado mirando la ubicación del punto del láser en la cámara. Estos

tres valores permiten determinar el resto de las dimensiones del triángulo, y por tanto, la posición de cada punto en el espacio.

Es un enfoque totalmente diferente, incluye herramientas que utilizan la visión estéreo para obtener información de profundidad de manera similar al ojo humano. Mediante la utilización de las dos cámaras el sistema es capaz de que el algoritmo correlacione primero las dos imágenes (identificando los píxeles correspondientes en ambas imágenes de la cámara). Utilizando la coherencia geométrica, se extrae la información de profundidad.

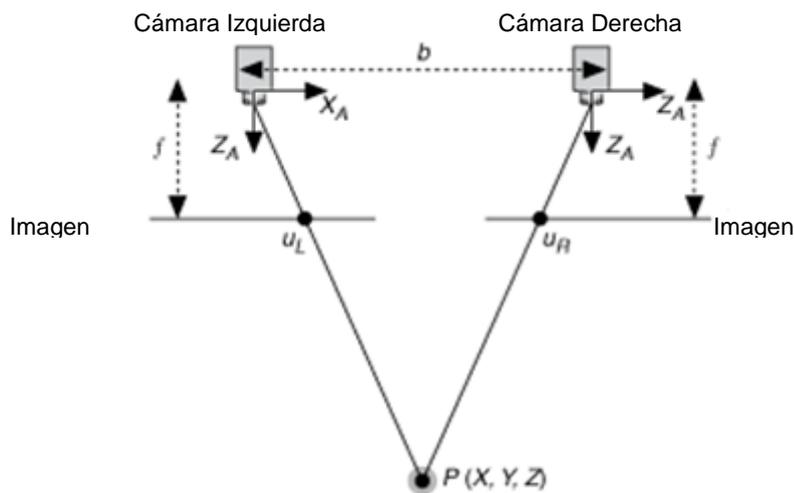


Figura 16.- Esquema de visión estereo simplificado.

El principio de la triangulación siempre viene acompañado por el llamado problema de la correspondencia. La situación típica en la que se aplica este principio se muestra en la Figura 16 donde un punto P en el espacio 3D es visto por dos cámaras diferentes, las variables son:

b es la base o distancia entre las dos cámaras

f es la longitud de foco de una cámara

X_A es el eje X de una cámara

Z_A es el eje óptico de una cámara

P es un punto real definido por las coordenadas X , Y y Z

u_l es la proyección del punto P real en una imagen adquirida por la cámara izquierda

u_L es la proyección del punto P real en una imagen adquirida por la cámara derecha

Ya que las dos cámaras están separadas por la distancia b , ambas cámaras visualizan el mismo punto P real en una ubicación diferente en las 2 imágenes dimensionales adquiridas. Las coordenadas X de los puntos u_I y u_D son dados por:

$$u_I = f * \frac{X}{Z} \quad (15)$$

$$u_D = f * \frac{(X - b)}{Z} \quad (16)$$

La distancia entre esos dos puntos proyectados es conocida como “desigualdad” y podemos usar el valor de desigualdad para calcular la información de profundidad.

$$d = u_I - u_D = f * \frac{b}{Z} \quad (17)$$

$$Z = f * \frac{b}{d} \quad (18)$$

Incluso las mejores cámaras y lentes introducirán un cierto nivel de distorsión de la imagen adquirida y para compensar, un sistema típico requiere de una calibración. El proceso de calibración implica el uso de una cuadrícula de calibración, adquirida en diferentes ángulos para calcular la distorsión de la imagen, así como la relación espacial exacta entre las dos cámaras.

3.6.1.2.2.6.- Incertidumbre

3.6.1.2.2.6.1.- Fuentes de error

Las fuentes de error en un escaneado láser se dividen en cuatro:

- Errores instrumentales

- Propagación del haz láser.

La divergencia del haz es la anchura que alcanza el haz con la distancia recorrida, que tiene una influencia en la resolución de la nube y en la ambigüedad posicional del punto medio.

- Borde partido

Cuando un haz láser choca contra un borde de un objeto, el haz se divide en dos. Una parte se refleja en la primera parte del salto del borde y la otra parte va más lejos hasta alcanzar otra superficie. En estos casos la información que recibe el receptor de un pulso láser llega desde dos puntos diferentes. Las coordenadas de este punto se calculan tomando la media de todas las señales recibidas para un mismo pulso y como consecuencia las coordenadas que se obtendrán de ese punto del objeto serán erróneas.

- Errores en los objetos medidos

Los escáneres miden la reflexión del haz láser sobre una superficie. El haz láser está afectado por la absorción de la señal que viaja por el aire, la reflexión del material sobre el que se mide y el ángulo de incidencia entre el haz láser y la superficie medida.

Dependiendo de la reflectividad de la superficie a medir, las mediciones serán más o menos fiables, es decir, cuando trabajamos sobre una superficie oscura la precisión del punto será menor debido a que la señal reflejada será muy débil y cuando trabajamos sobre una superficie con alta reflectividad) las mediciones obtenidas serán más fiables. Sin embargo, si la reflectividad del objeto es demasiado alta (en superficies metálicas) el haz láser se desviará totalmente, incidiendo en otra superficie o propagándose por el aire libre.

- Condiciones Ambientales

- Temperatura

La temperatura dentro del escáner puede ser bastante más alta que la temperatura de la atmósfera de alrededor del equipo. Esto se debe al calor interno del escáner o al calor proporcionado por una radiación externa. Esta fuente de radiación externa puede calentar un lado del escáner dilatándolo y como resultado distorsionando los datos tomados por el escáner.

A parte de la temperatura del escáner, también hay que tener en cuenta la temperatura de la superficie a escanear, ya que si escaneamos una superficie que está a alta temperatura, en un entorno industrial por ejemplo, puede causar que se reduzca la señal ruido y como consecuencia que empeoren las precisiones de las mediciones.

- Atmósfera

Los escáneres láser solo funcionan adecuadamente cuando se utilizan dentro de un rango de temperatura, e incluso dentro de este rango se pueden observar desviaciones en las distancias.

Estas desviaciones en las distancias se dan como consecuencia de variaciones atmosféricas de temperatura, presión y humedad, lo que afecta al índice de refracción y modifica la longitud de la onda electromagnética. Esto significa que la velocidad de la luz del láser depende en gran medida de la densidad del aire. Una diferencia de temperatura de unos 10°C produce un error en la distancia de 1 mm cada 100 m.

- Errores metodológicos

Este tipo de errores se deben al método elegido o a la experiencia que tienen los usuarios con esta tecnología. También pueden darse este tipo de errores si se toma una incorrecta elección del escáner a utilizar y este no es acorde al tamaño de la pieza que se quiere medir.

3.6.2.- Marco metodológico

3.6.2.1.- Procedimiento

A continuación se van a explicar los pasos que han sido necesarios realizar para la elaboración del estudio.

- a) Diseño del útil de medición: es necesario realizar el útil para poder sujetar la pieza correctamente y que esta no se mueva al realizar la medición. Lo primero es diseñarlo para que cumpla con las funciones requeridas.
- b) Fabricación del útil de medición: una vez obtenido el diseño del útil se procede a su fabricación con a compra de los materiales que sean necesarios.
- c) Medición en Automático de la pieza con la MMC: se procede a la medición de todas las superficies de la pieza para posteriormente realizar la ingeniería inversa.
- d) Obtención del CAD de la pieza mediante Ingeniería Inversa: después de la medición de los puntos necesarios con el programa NX 10 se construye en modelo CAD de la pieza.
- e) Medición en Automático de los puntos seleccionados: se miden los puntos elegidos en todas las piezas con la MMC, para ello, se crea un programa de medición que medirá las piezas automáticamente.
- f) Determinación de la Incertidumbre de las mediciones de la MMC: tras la obtención de las coordenadas de los puntos se realizan los cálculos necesarios para poder obtener el valor de la incertidumbre de la máquina.
- g) Medición con el HandySCAN : se realizan las mediciones de las piezas con el escáner láser y luego se obtienen las coordenadas de los puntos necesarios para realizar el estudio.
- h) Determinación de la Incertidumbre de las mediciones realizadas con el HandySCAN: ya se tienen los puntos, y por último, se calculan las variables necesarias para poder obtener el valor de la incertidumbre.
- i) Valoración de los resultados: se estudian las diferencias encontradas en la medición de ambos sistemas.

3.6.3.- Técnicas y métodos

3.6.3.1.- Útil de medición

3.6.3.1.1.- Definición

Para la pieza utilizada en este estudio, ha sido necesario utilizar un útil de medición, ya que aunque sea una pieza ligera, su forma irregular ha supuesto la necesidad de este para asegurar su correcta sujeción.

También llamado útil de control, es un conjunto mecánico que se utiliza para la verificación dimensional de las piezas fabricadas en serie con el objetivo que realice los mismos controles repetitivos sobre conjuntos de piezas que han sido alineadas exactamente del mismo modo, independientemente de la persona que realice la medición.

Mediante el útil, se asegura que la pieza no experimenta ninguna distorsión en su forma original y se garantiza el acceso a todas las zonas a medir. Idealmente, con un único punto de sujeción se minimizaría cualquier distorsión pero la pieza podría rotar durante la medición, es por eso que en este caso hay varios. El uso de materiales como corcho o goma entre las fijaciones mecánicas y la pieza a medir, ayudan a minimizar las distorsiones y evitan daños.

3.6.3.1.2.- Diseño

Para el diseño del utillaje se ha tomado como ejemplo el utilizado por la empresa para medir la pieza (las dimensiones de este eran demasiado grandes), y a partir de él, se ha diseñado uno acorde con las características de la MMC que se va a utilizar.

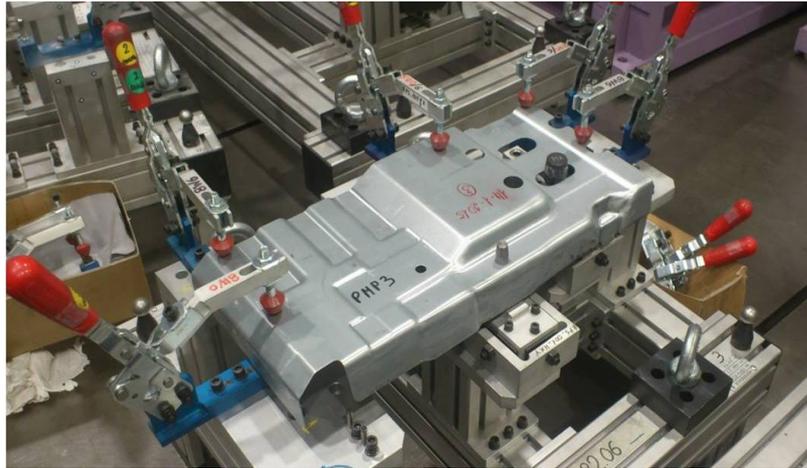


Figura 17.- Útil de medición (Gestamp).

El cliente ha facilitado a la empresa un informe con los RPS; es decir los puntos de referencia respecto a los que se realizarán las mediciones. Se trata de un Sistema de Puntos de Referencia, es decir, un conjunto de 6 puntos que sirven para definir la ubicación de una geometría en el espacio. Gracias a estos, los 6 grados de libertad de la pieza quedan perfectamente fijados, en base a éstos se desarrolla el diseño y fabricación del útil de medición. En este informe están establecidas las tolerancias, hay de dos tipos: volumen ($\pm 0.5\text{mm}$) que implica las superficies generadas por estampación, y corte ($\pm 0.2\text{mm}$) zonas de la pieza que han sido cortadas, bien por troquelado o mediante láser.

Las garras de amarre o clampings deben de estar situados con exactitud en los RPS ya que son claves para la correcta sujeción de la pieza.

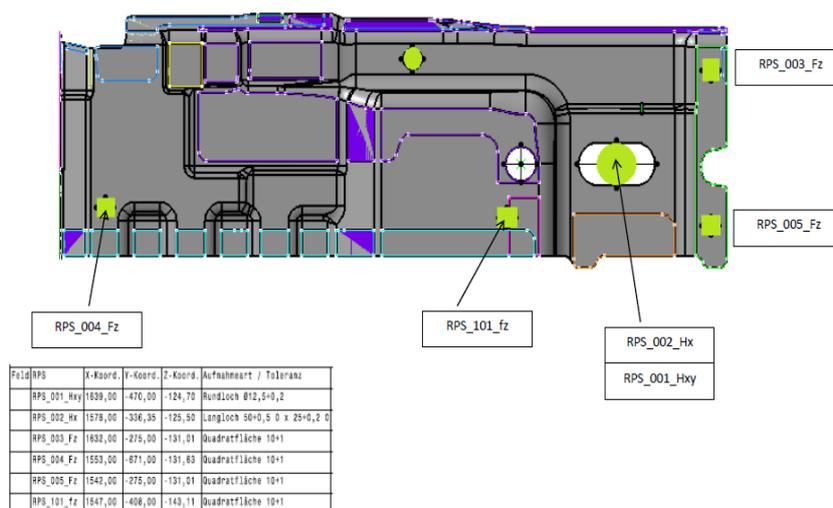


Figura 18.- Informe de los RPS de la pieza.

Hay que tener en cuenta las dimensiones de la placa base para que quepa en el VUT de la MMC, tanto de largo y de ancho, como de espesor para que tenga suficiente estabilidad el útil y no genere errores en la medición.

Para asegurar una mayor fijación del útil en la mesa de la MMC, se le han realizado unos agujeros para poder amarrarlo a la mesa. También se ha tenido que realizar otro agujero en la base del útil para poder colocar la esfera de calibración más cerca de la pieza.

Por último, ha sido necesario añadir un amarre más en el útil ya que una de las zonas de la pieza no estaba suficientemente fijada, lo que generaría errores en la posterior medición.

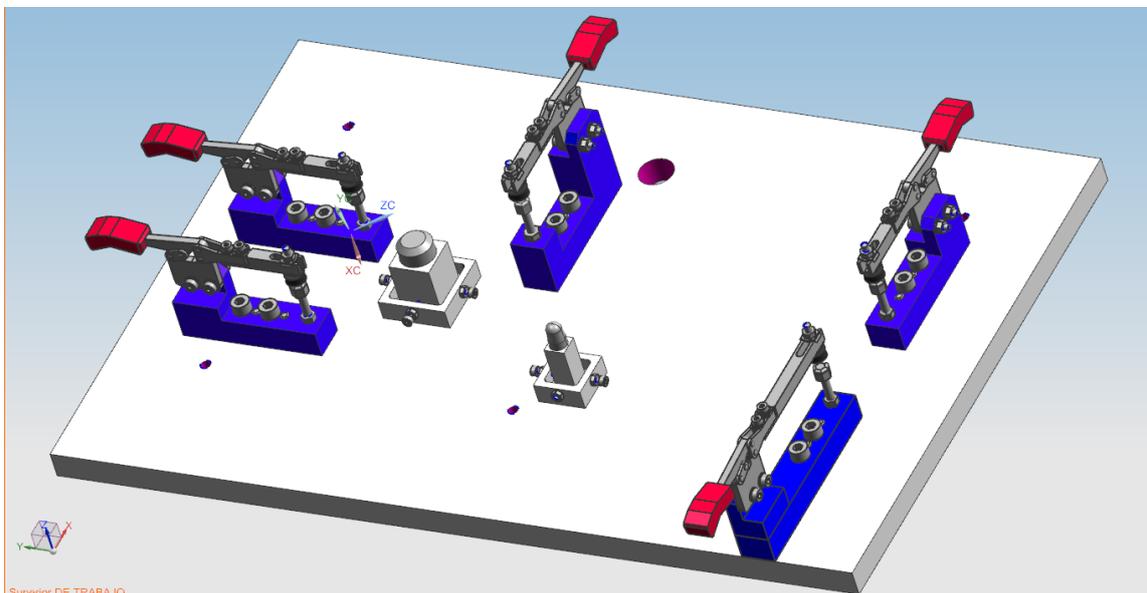


Figura 19.- Diseño del útil de medición.

El diseño del útil de medición se ha realizado mediante el programa NX Unigraphics 10.

3.6.3.1.3.- Fabricación

El material elegido para la fabricación del utillaje es un aluminio Magnealtok 45 (Figura 20). Este material se ha utilizado para la base del útil y también para las cajas y alojamientos donde van situados los bulones.

ALEACIÓN EN AW 5083											
MAGNEALOK 45											
COMPOSICIÓN											
Según norma EN 573-3											
%	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Otros	Al
Mínimo				0,40	4,00	0,05					
Máximo	0,40	0,40	0,10	1,00	4,90	0,25		0,25	0,15	0,15	Resto
DENOMINACIONES EQUIVALENTES											
											
Internacional Norma ISO	Europa Norma EN	España Norma UNE	Alu-Stock Comercial	Alemania Norma DIN	Francia Norma AFNOR*	Reino Unido Norma BS*	EEUU Norma AA				
Al Mg4,5Mn0,7	EN AW 5083	L-3321	Magnealok 45	AlMg4,5Mn	A-G4,5MC	N8	5083				

Figura 20.-Composición y denominaciones del aluminio (Alu-Stock S.A.).

Estas cajas se han realizado para tener la posibilidad de mover los bulones, ya que los amarres son fijos en cuanto a la posición X e Y, y así poder situar correctamente la pieza.

El material utilizado para la fabricación de los bulones es un acero F-1140, es un acero al carbono, ideal para piezas de resistencia media, que se mecanizan pero que posteriormente no van a estar sometidas a esfuerzos directos.

F-1140										ACERO DE CONSTRUCCIÓN AL CARBONO			
EQUIVALENCIA ENTRE DISTINTAS DESIGNACIONES													
Designación		Otras designaciones											
Según EN 10083-1:1997		Alemania DIN 17200		Reino Unido BS 970		España UNE 36011		Francia NF A35-552-86		Italia UNI 7846	ISO 683-1:1987	AISI SAE ASTM	
Simbólica	Númerica	Designación	Número	Designación	Número	Designación	Número	Designación	Número	Designación	Número	Designación	
C45E	1.1191	CK 45	1.1191	(080M46)	C45K	F1140		XC 45		C45		(C 45 E 4)	1042
La composición química de los aceros entre paréntesis difiere ligeramente de la definida en la norma EN 10083.													
COMPOSICIÓN QUÍMICA													
Análisis sobre colada (%)													
C	Si _{máx.}	Mn	P _{máx.}	S _{máx.}	Cr _{máx.}	Mo _{máx.}	Ni _{máx.}	Cr+Mo+Ni _{máx.}					
0,42-0,50	0,40	0,50-0,80	0,035	0,035	0,40	0,10	0,40	0,63					

Figura 21.- Composición y denominaciones del acero (Ipargama).

El proceso de la fabricación del útil de medición es el siguiente:

- Compra de los materiales.
- Alineación de la placa base en la fresadora.

- c) Punteado de los agujeros que se realizarán posteriormente, para facilitar la mecanización.
- d) Fresado de los agujeros de 8, los de amarre a la MMC.
- e) Fresado de los agujeros de 6, pasadores para fijación de los clampings
- f) Fresado de los agujeros de 8, tornillos para fijación de los clampings.
- g) Mecanización del posicionador 1 en el torno.
- h) Mecanización del posicionador 2 en el torno.
- i) Realización de las cajas para situar ambos bulones.

Una vez realizados todos los procesos de mecanizado, se puede proceder al montaje del útil, la colocación de las cajas y alojamientos, los bulones y, por último, los amarres.

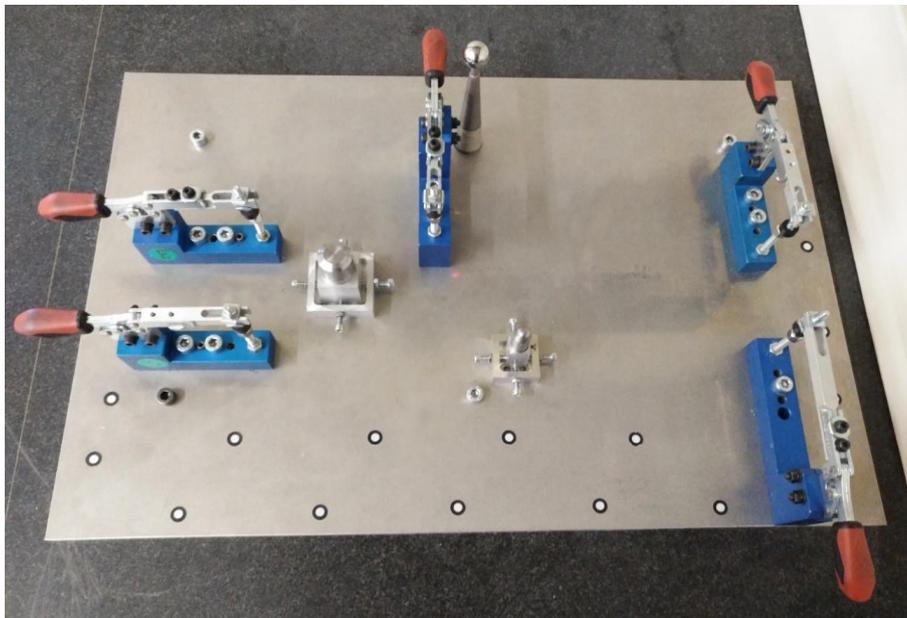


Figura 22.- Útil de medición.

En la Figura 22 se puede observar el útil de medición situado en la mesa de la MMC.

3.6.3.1.4.- Puesta a punto para la medición

Tras el montaje de todos los componentes del útil es necesario verificar que estos están colocados correctamente. Para ello, primero se atornilla el útil a la mesa de la MMC para asegurar una mayor fiabilidad en las mediciones que se realizarán posteriormente y luego se coloca la pieza.

El orden en el que se bajan los amarres es indiferente, sin embargo, lo primero hay que situar los agujeros de la pieza en los bulones posicionadores. Están bien ajustados pero no se recomienda hacer mucha presión, la pieza tiene un espesor pequeño y podría deformarse.

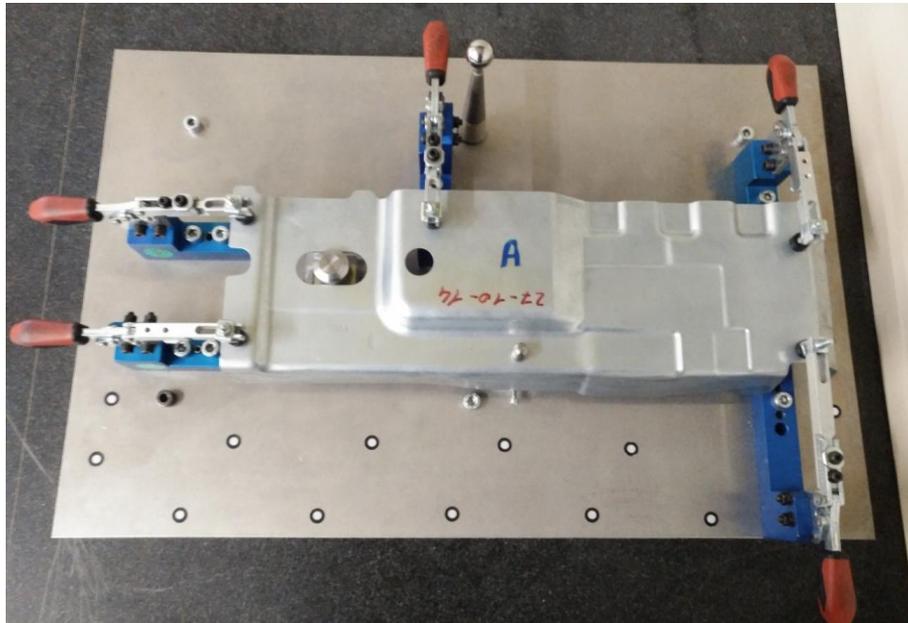


Figura 23.- Pieza situada en el útil.

A continuación, se comprueba el posicionamiento de los RPS con la medición con la MMC de la posición tanto de las garras de amarre como de los bulones.

Tal como se puede observar en la Figura 24, se comprueba la posición de los bulones con la medición de los diámetros de estos. Al medir el diámetro obtenemos también la posición de su vector normal, siendo este el centro del círculo y sus coordenadas, las del RPS que quiere verificar.

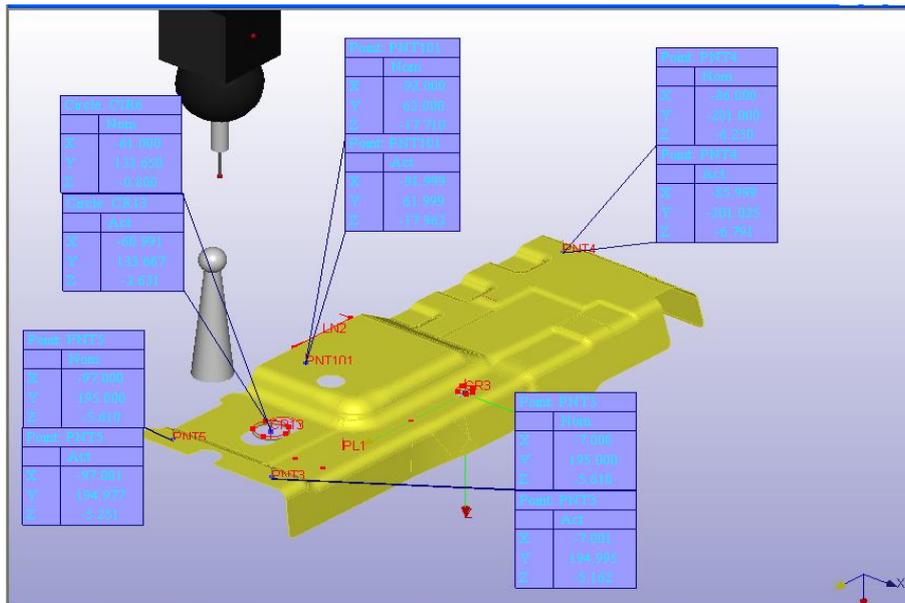


Figura 24.- Puesta a punto del útil.

Para la comprobación de la posición de los amarres, se miden puntos o planos próximos a los RPS, obteniendo la altura a la que se encuentran observando la coordenada Z. En este caso no se pueden comprobar las coordenadas X e Y porque tenemos la grapa, por lo que se desplaza el punto de medición a un punto próximo, pero que asegure que no haya colisión del palpador con los amarres.

3.6.3.2.- Medición MMC

3.6.3.2.1.- Preparativos

Antes de comenzar la medición se requieren unos pasos iniciales tras el encendido de la máquina y del software. Para el seguimiento de estos pasos se ha utilizado el *Tutorial básico* de la MMC.

3.6.3.2.1.1.- Determinar el VUT de la máquina

Lo primero que se debe establecer es cuál es el volumen en el que se puede mover el conjunto SAP de la máquina. Como el propio nombre de la máquina lo indica TRIMEK SPARK 06.05.05, sabemos que las medidas son de 600 mm en el eje X, 500 mm en el eje Y, y por último 500 mm en el eje Z.

3.6.3.2.1.2.- Colocación y fijación de la pieza

Se comienza posicionando el útil de medición y atornillándolo a la mesa. Este tiene un agujero para poder atornillar la esfera de calibración a la mesa, si esta está colocada, se recomienda quitarla y ponerla después de haber atornillado el útil.

Para colocar la pieza hay que asegurarse de que las garras de amarre estén en posición vertical. Una vez comprobado esto, al situar la pieza, primero se introducen los agujeros en los bulones, segundo se apoyan las superficies de la pieza en los tornillos de los amarres y finalmente se aprietan las garras.

3.6.3.2.1.3.- Configuración y calibración del palpador

Es necesario que la máquina y el software de la máquina conozcan que tipo de palpador se está utilizando, ya que este puede variar, para ello se define su longitud y su diámetro. Con la utilización del joystick para desplazarse a lo largo del volumen se mide la esfera de calibración. También con este proceso se define la posición del palpador en el VUT de la máquina.

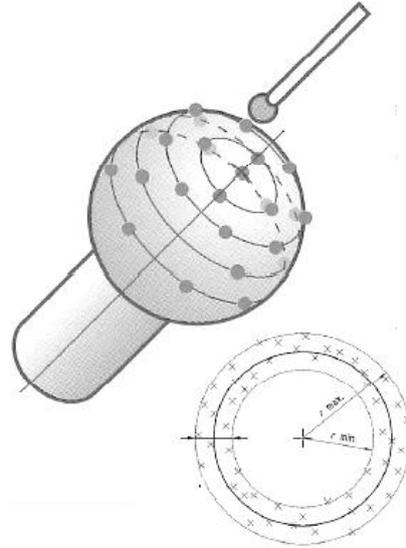


Figura 25.- Esfera de calibración.

Para la realización de las mediciones se ha calibrado el palpador en las siguientes posiciones, ya que son las necesarias para poder realizar la medición de todas las superficies de la pieza:

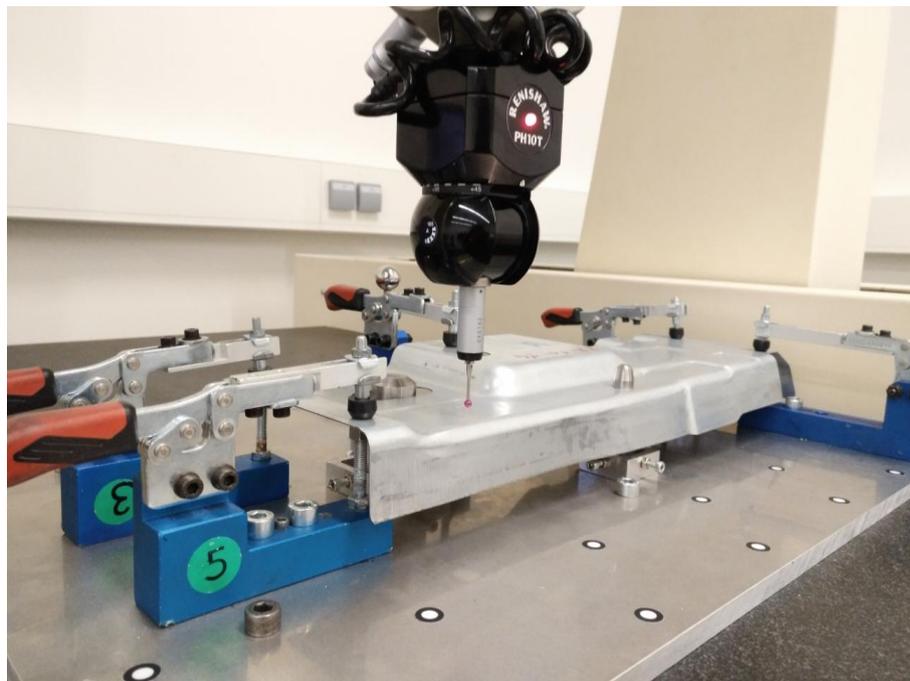


Figura 26.- Plano superior: A0 B90

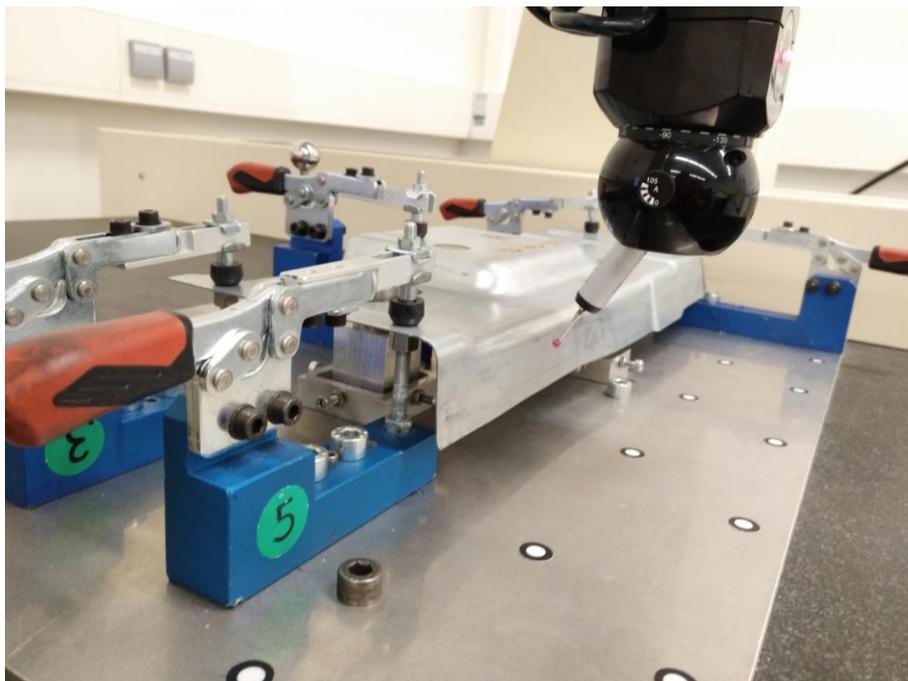


Figura 27.- Plano frontal delantero: A30B180

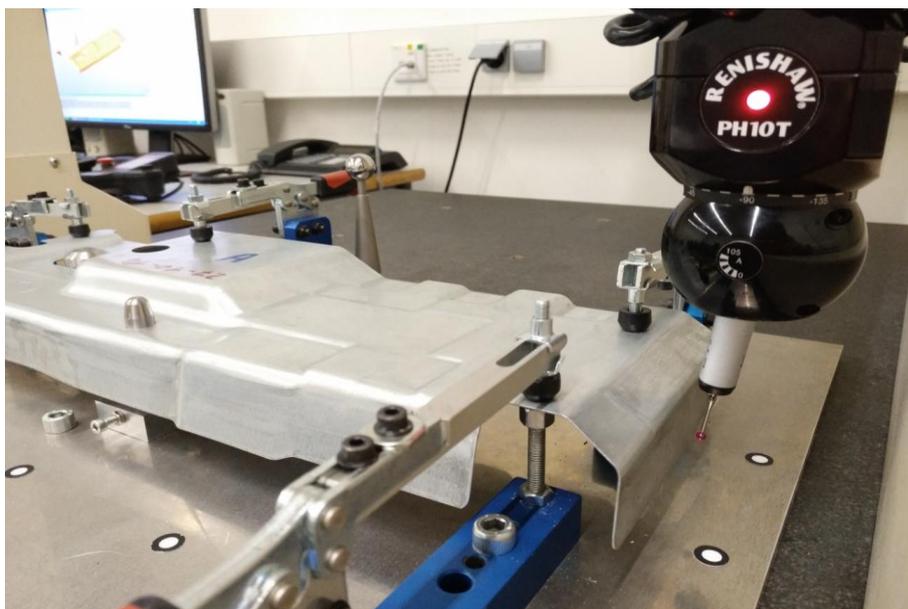


Figura 28.- Plano lateral derecho A7.5B180

Con la calibración del palpador en estas posiciones, se consigue alcanzar todos los puntos de la pieza, evitando las posibles colisiones con los elementos del útil.

3.6.3.2.1.4.- Alineación de la pieza

Este proceso se denomina alineamiento y consiste en establecer donde está la pieza en el VUT. La máquina tiene un sistema de coordenadas máquina (SCM) definido por el fabricante que siempre está en la misma posición, es el llamado Cero Máquina. El objetivo es crear un sistema de coordenadas de la pieza (SCP) para poder obtener el Cero Pieza. El sistema de coordenadas más común es el sistema cartesiano (Figura 29) y es el que se va a utilizar en este estudio.

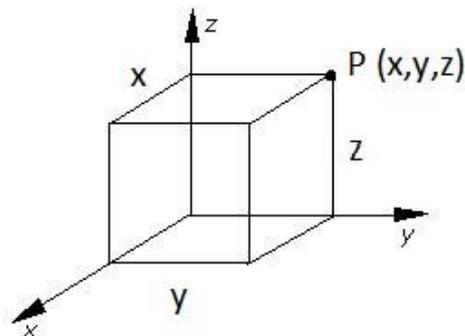


Figura 29.- Sistema Cartesiano.

Un cuerpo que se puede mover libremente en el espacio tiene seis grados de libertad; tres lineales a lo largo de los ejes X, Y, Z y tres rotaciones alrededor de esos ejes. Por lo tanto, para definir un sistema de coordenadas se necesitan un mínimo de seis puntos. En teoría basta con un plano definido con tres puntos, una línea definida con dos puntos y un punto, con lo que sumamos los seis necesarios.

Sin embargo, para la creación del SCP se han utilizado tres planos, el X e Y se han definido con dos calas patrón y el Z con las base del útil de medición. Una vez que se han creado los planos, mutuamente perpendiculares, el punto de intersección de estos tres planos será el origen del SCP.

Tras este paso, el SCP se sitúa aleatoriamente por lo que se debe trasladar y rotar hasta que esté en la posición deseada, el RPS 1, el bulón de menor diámetro. Para conseguirlo se mide en plano en el que este está contenido ($z=0$) y el diámetro del bulón, cuyas coordenadas del centro son el origen del Cero Pieza (Figura 30).

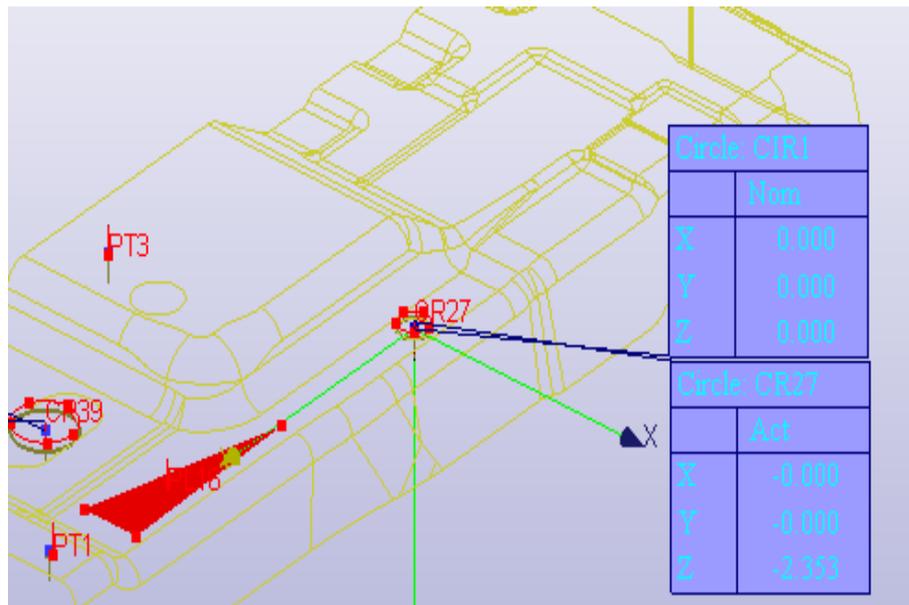


Figura 30.- Sistema de coordenadas situado en el Cero Pieza.

Este paso es muy importante realizarlo correctamente, ya que si no establece con precisión la relación entre la pieza y el CAD, las medidas obtenidas pueden contener errores graves.

3.6.3.2.2.- Medición

La medición comienza después de la realización de los preparativos iniciales, una vez que ya se ha calibrado el palpador y se tiene la pieza alineada en el software.

3.6.3.2.2.1.- Estrategias de medición

A diferencia de los instrumentos de medición simples, las máquinas de medir por coordenadas son capaces de medir diferentes parámetros geométricos. Para cada uno de estos parámetros puede adoptar cualquier estrategia de medición. Tanto el procedimiento y la estrategia de medición elegidos determinan el modo en el que los errores son introducidos en el sistema de medición afectando a la incertidumbre asociada a las mediciones.

La estrategia general de medición se puede dividir en varios pasos que deben de ser seguidos por el usuario, los cuales se explican a continuación.

- a) Selección de las figuras de la pieza que se van a medir.

En general, es importante establecer una estrategia que requiere, si es posible, una sola configuración de la pieza para la medición de todas las figuras relevantes. Si se utiliza más de una, existe la posibilidad de que surja un error del operador, con lo que empeorará el proceso de medición y además reducirá la confianza en los resultados. Sin embargo, por otro lado, si se utilizan varias configuraciones puede mejorar la precisión al minimizar el uso de complicadas posiciones del cabezal de la sonda. El objetivo debe ser una sola configuración.

El modo en el que se realiza cualquier medición, generalmente, es un compromiso entre velocidad y precisión. Para alcanzar la precisión requerida para algunas tolerancias ajustadas, pueden necesitarse múltiples configuraciones, lo que conlleva mayores tiempos de medición. Siempre hay que tener en cuenta la tolerancia objetivo.

- b) Definición de las figuras de referencia que se van a usar para crear el sistema de coordenadas.

Una referencia geométrica puede ser una superficie, un plano, una línea, un punto..., que se utiliza para facilitar la definición de elementos de una pieza. Se conoce bajo el término ISOSTATISMO (DATUM). Un isostatismo es también el origen desde el cual se establecen la localización o las características geométricas de una pieza.

En la preparación de las mediciones con una MMC es necesario:

- Identificar elementos de referencia funcionales en la pieza; es decir, aquellos que son críticos en su función
- Identificar referencias geométricas (ISOSTATISMOS) en el plano de la pieza o en el modelo CAD correspondiente
- Procurar elegir como referencia geométrica las superficies utilizadas para sujetar la pieza en el proceso de fabricación. De esta forma se pueden relacionar directamente los resultados de la medición con el proceso de fabricación.

Sin embargo, los isostatismos de la pieza pueden obtenerse a partir de puntos teóricos que no se pueden medir con la MMC.

c) Selección de la orientación de la pieza.

Al seleccionar la orientación de la pieza en el espacio de medición de una MMC, hay que tener en cuenta:

- La principal consideración es la accesibilidad a las superficies y elementos que se tienen que medir.
- No se deben utilizar los elementos de referencia para sujetar las piezas pues son esos los que hay que sondear (tocar, palpar) y tienen que quedar libres de cualquier obstrucción.
- Es recomendable alinear el elemento o dimensión crítica con uno de los ejes de la MMC con el fin de eliminar la influencia de la incertidumbre de los otros ejes.

d) Selección del sistema de fijación de la pieza.

Al seleccionar el método de sujeción (amarre) de la pieza en una MMC, se debe tener en consideración:

- La fuerza de medición. Al contactar con la pieza, el palpador de una MMC opera con valores muy bajos de fuerza (entre 0,05 N y 0,2 N). Sin embargo, muchas MMC tienen fuerzas iniciales de contacto muy superiores, pudiendo llegar hasta 3 N.
- Piezas pesadas. Se pueden medir sin necesidad de elementos de sujeción.
- Piezas ligeras. Se puede utilizar plastilina, arcilla para modelado o cera para instrumentos como material de sujeción. Asegurar que una vez finalizada la medición se ha eliminado cualquier traza de material de la mesa de medición.

e) Definición de la estrategia de palpado.

Una pieza puede definirse como una combinación de elementos geométricos como planos, círculos, líneas rectas, cilindros, conos y esferas. La geometría de un elemento se puede determinar mediante un elemento ajustado al conjunto de puntos medidos. La cantidad y distribución de los puntos a medir es muy importante para asegurar que los elementos así calculados son una representación fidedigna de las superficies medidas

Para realizar mediciones de elementos de una pieza, hay un número mínimo de puntos definidos matemáticamente que se deben dar para ajustar el elemento físico a un elemento geométrico. Por razones prácticas, es usual medir más que el mínimo número de puntos de manera que se puede determinar cualquier error geométrico de la superficie del elemento.

Por último, se debe tener en cuenta que cuanto mayor es el número de puntos medidos y apropiadamente distribuidos, más fiable será el resultado de la evaluación realizada. Sin embargo, a mayor número de puntos utilizados, mayor será el tiempo necesario para medir el elemento.

La distribución de los puntos debería cubrir de manera uniforme el elemento a medir; sin embargo, no debería ser regular para evitar seguir las deformaciones sistemáticas o periódicas resultantes del proceso de mecanizado por lo que es deseable cierto grado de aleatoriedad en esa distribución.

- **Líneas**

Para lograr una distribución uniforme de puntos en un segmento se divide éste en un número de subdivisiones de igual longitud y se sitúa un punto en cada subdivisión. Para evitar el riesgo de elegir puntos demasiado cercanos se puede refinar el proceso dividiendo la línea en $(3N-2)$ subdivisiones de igual longitud y posicionar aleatoriamente un punto en cada uno de los subintervalos.

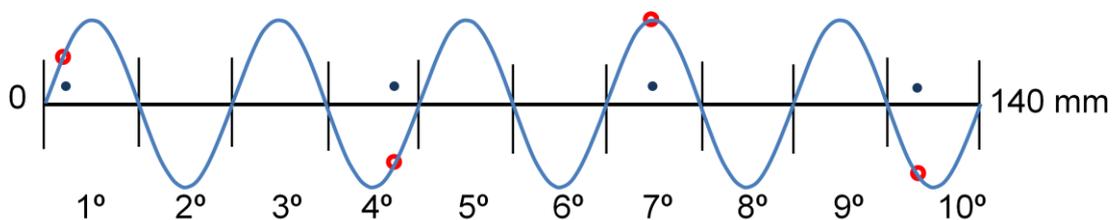


Figura 31.- Ejemplo de distribución de los puntos en una línea.

La figura muestra la distribución de $N = 4$ puntos en una línea de 140 mm de longitud:

$$3N - 2 = (3 \times 4) - 2 = 10 \text{ subdivisiones de } 14 \text{ mm cada una} \quad (19)$$

De esta manera si existe una deformación periódica en la línea, esta distribución de puntos identificará los errores de forma.

- **Planos**

Para lograr una distribución uniforme de N puntos en una segmento rectangular de un plano, hay que subdividir el plano en N_1 por N_2 rectángulos de manera que sea aproximadamente igual a N. Los rectángulos resultantes deberían aproximarse lo máximo posible a una forma cuadrada.

Si se sospecha que el plano puede tener una distorsión periódica, los puntos seleccionados no pueden conformar un patrón regular.

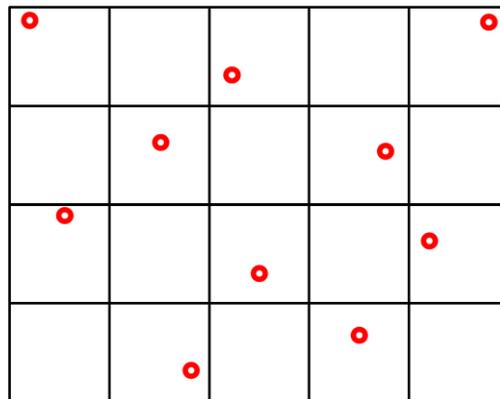


Figura 32.- Distribución de puntos en un plano.

La Figura 32 muestra un caso donde N son 10 puntos de medición.

$$N_1 \times N_2 = 2 \times 5 = 10 \quad (20)$$

Si se quiere medir un número reducido de puntos, se duplica el número de rectángulos y los puntos de medición se sitúan en rectángulos alternos.

Para las mediciones de los planos en este estudio, se ha seguido este procedimiento. El programa CAPPS 6.0 te da la opción de dividir las superficies en estas cuadrículas y te sitúa los puntos, posteriormente puedes modificar el número de puntos y la distancia entre ellos.

- **Círculos**

Para lograr una distribución uniforme de N puntos, se divide el círculo en N arcos iguales situando un punto de medición en cada arco.

Debido al proceso de mecanizado una forma circular puede adquirir formas defectuosas como la elíptica y también triangular curvilínea, además de otras formas de cuatro, cinco, siete, nueve y más vértices (lóbulos).

Si se sospecha que el círculo tiene lóbulos, no se debe usar una distribución regular de puntos. Por lo tanto se tiene que cumplir que:

$$N > q \quad (21)$$

Donde:

q es el número de lóbulos.

N es el número de puntos a medir

También se debe tener en cuenta que N y q no tengan factor común, pues si N fuese divisible por q , la información recogida de las mediciones estaría severamente limitada .

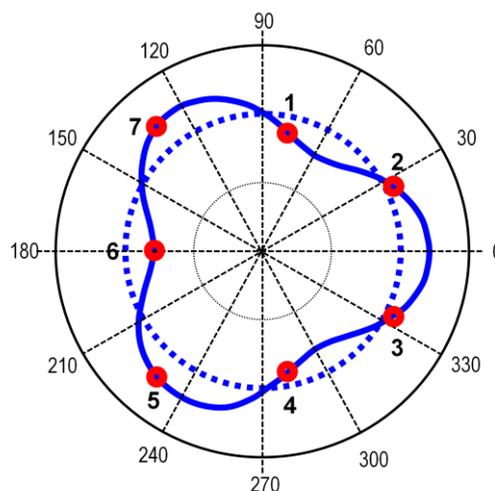


Figura 33.- Distribución de puntos en un círculo detectando lóbulos.

En la Figura 33 se muestra el caso de un círculo con tres lóbulos y siete puntos igualmente espaciados. Como se puede observar esa elección será capaz de detectar el defecto de forma que tiene el círculo.

A la hora de medir los círculos en este estudio, con tres puntos es suficiente matemáticamente, sin embargo no estaríamos teniendo en cuenta los lóbulos. Es por ello que a la hora de medir los círculos se han utilizado cinco puntos, considerando que son suficientes para definirlos correctamente.

- **Esferas**

Para distribuir de manera uniforme aproximadamente un número N de puntos en la superficie del sector de una esfera de radio r entre dos planos separados por una distancia h se procede del siguiente modo:

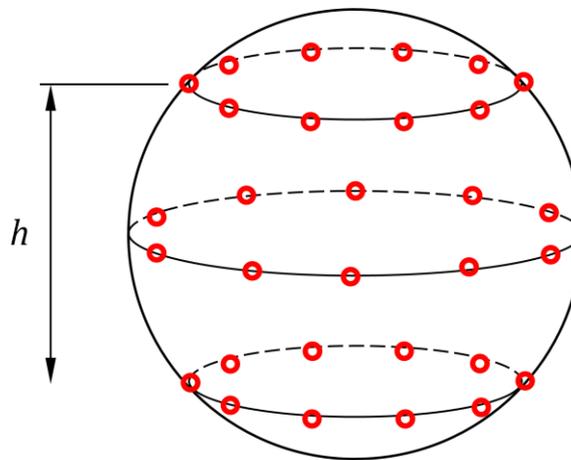


Figura 34.- Distribución de puntos en una esfera.

El estándar recomienda que para cada uno de los planos espaciados aproximadamente a una distancia n_c se realicen n_p mediciones espaciadas de forma aproximadamente uniforme en la línea resultante de la intersección entre el plano y la esfera.

Sea $r=200$ mm con $h=150$ mm y $N=25$:

$$n_c = \sqrt{\frac{30 * 150}{2\pi * 100}} = 1,54 \approx 2 \quad (22)$$

$$n_p = \frac{N}{n_c} = \frac{25}{2} = 12,5 \approx 12 \quad (23)$$

Es el caso de la calibración de la esfera al inicio de la medición de los puntos con la MMC. Este proceso se realiza para determinar el error de palpado y así poder corregirlo, se utiliza una esfera patrón de diámetro 20 mm que se mide contactando de 25 a 50 posiciones recomendadas por la Norma ISO 10360-2, así se reduce de forma significativa el efecto de la variación de las desviaciones.

f) Programación de la MMC.

La mayoría de las mediciones de una MMC, una vez realizadas, se irán escribiendo en un programa. Posteriormente se podrán repetir esos movimientos o modificarlos según la conveniencia del usuario.

Después de que el palpador tome contacto con la superficie a medir, las figuras gaussianas asociadas serán computadas y se realizarán los cálculos basados en esas figuras. Un error en uno de estos pasos puede llevar a errores en el resultado final. Debido a este motivo, es necesaria mucha práctica para asegurarse de que los programas creados son correctos.

Poder programar la MMC a un nivel básico implica: conocer el uso del joystick, crear la ruta de medición en la máquina teniendo en cuenta las maniobras que tiene que realizar el cabezal del palpador alrededor de la pieza, definir el número y la distribución de los puntos objetivo de cada superficie a medir y, por último, definir las computaciones necesarias a aplicar a los datos obtenidos. Saber que existe la posibilidad de programar con la máquina desactivada mediante el uso del CAD de la pieza. La importancia de programar la MMC no se debe menospreciar, ya que un programa que contiene un error, puede conllevar mediciones incorrectas de cientos de piezas.

Por ejemplo, es una buena práctica plantear el programa antes de empezar a desarrollar el código del programa: establecer las diferentes posiciones en las que se va a situar el palpador, si se van a utilizar diferentes tipos de palpadores... Por supuesto, probar que el programa funciona antes de darlo por terminado, observando posibles errores o mejoras.

3.6.3.2.2.- Programa de medición

Previo a el comienzo de la medición, la mejor opción si es necesaria la repetición de las mediciones, es la creación de un programa de medición DMIS en el que se indican todos los movimientos que la máquina debe realizar.

Este programa se obtiene de diversas formas, lo puede crear el usuario si conoce el lenguaje de este tipo de programa o está la opción de ejecutar una primera medición en automático en la que se irá creando el programa a medida que vaya avanzando la medición, el utilizado para este estudio.

Para la realización de este estudio se han elegido 280 puntos repartidos por todas las superficies de la pieza, estos mismos puntos se han medido con el sistema óptico para posteriormente poder realizar la comparación.

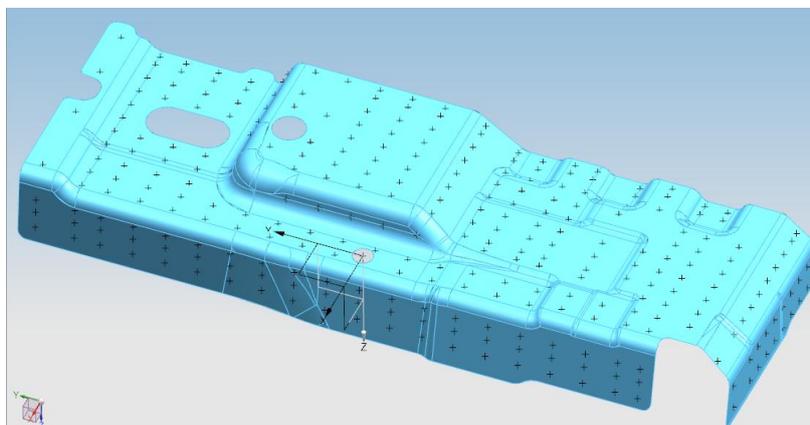


Figura 35.- Puntos elegidos para la medición.

Al realizarse primero la medición óptica se ha intentado medir los puntos en el mismo orden con la MMC, sin embargo, no ha sido posible cumplirlo fielmente, ya que implicaba mayor tiempo de medición. También se han tenido que eliminar algunos puntos ya que no se podían alcanzar a medir con el palpador, suponía colisiones con los amarres del útil.

Posteriormente se han realizado algunas modificaciones que aseguren la correcta medición, por ejemplo, se han añadido puntos intermedios a los que se desplaza el palpador para evitar la colisión de este con la pieza, en cambios de alturas y inclinación mayormente.

A continuación se muestra parte del código del programa con algunas explicaciones:

- Calibración del palpador mediante la medición de la esfera de calibración.

```

$$SELECT PROBE PA0B0 AT A=0.0,B=0.0
$$SNSLCT/VECTOR,0.000,0.000,-1.000
SNSLCT/S(PA0B0)
$$CALIBRATE PA0B0 AT A=0.0,B=0.0
S(PA0B0)=SNSDEF/PROBE,INDEX,POL,0.0,0.0,0.0,0.0,-
1.0,83.124,3.9968
CALIB/SENS,S(PA0B0),FA(MASTER),5
PTMEAS/CART,142.5092,-67.7673,-284.0927,-0.0342,-0.9975,-0.0621
PTMEAS/CART,133.0471,-55.8991,-284.0370,-0.9803,0.1895,-0.0565
PTMEAS/CART,144.7568,-47.9955,-284.0352,0.1906,0.9800,-0.0564
PTMEAS/CART,152.8100,-57.0568,-284.0358,0.9957,0.0737,-0.0564
PTMEAS/CART,143.2726,-58.2862,-273.4928,0.0421,-0.0492,0.9979
ENDMES

```

- Medición de los planos para la creación del SCP

```

F(PL1)=FEAT/PLANE,CART,$
  140.5651,-104.7284,-444.4902,-0.000,-0.000,1.000
MEAS/PLANE,F(PL1),3
PTMEAS/CART,105.8348,-83.4018,-444.5020,-0.0004,-0.0001,1.0000
PTMEAS/CART,153.9192,-152.6285,-444.4913,-0.0004,-0.0001,1.0000
PTMEAS/CART,161.9414,-78.1550,-444.4772,-0.0004,-0.0001,1.0000
ENDMES
OUTPUT/FA(PL1),TA(xx),TA(yy),TA(zzz)
F(PL2)=FEAT/PLANE,CART,$
  69.4628,-95.5793,-449.4005,-1.000,-0.000,-0.004
MEAS/PLANE,F(PL2),3
PTMEAS/CART,69.4760,-131.3531,-448.3391,-1.0000,-0.0005,-0.0040
PTMEAS/CART,69.4718,-96.0558,-451.5826,-1.0000,-0.0005,-0.0040
PTMEAS/CART,69.4404,-59.3289,-448.2798,-1.0000,-0.0005,-0.0040
ENDMES
OUTPUT/FA(PL2),TA(xx),TA(yy),TA(zzz)
F(PL3)=FEAT/PLANE,CART,$
  340.7194,42.6514,-391.3978,0.016,-0.004,1.000
MEAS/PLANE,F(PL3),3
PTMEAS/CART,333.9137,35.5696,-391.3190,0.0161,-0.0044,0.9999
PTMEAS/CART,348.0681,36.0346,-391.5454,0.0161,-0.0044,0.9999
PTMEAS/CART,340.1764,56.3498,-391.3291,0.0161,-0.0044,0.9999
ENDMES
OUTPUT/FA(PL3),TA(xx),TA(yy),TA(zzz)

```

- Medición del bulón de diámetro 12.5 (RPS 1 y origen del SCP), traslación y rotación al Cero Pieza

```

F(CR4)=FEAT/CIRCLE,OUTER,CART,$
  341.2500,73.0980,-386.3345,0.000,0.000,1.000,12.6440

```

```

MEAS/CIRCLE,F(CR4),5
PTMEAS/CART,347.5747,73.0994,-386.3343,1.0000,0.0002,0.0000
PTMEAS/CART,343.0224,79.1627,-386.3343,0.2805,0.9599,0.0000
PTMEAS/CART,337.5457,78.2242,-386.3334,-0.5857,0.8105,0.0000
PTMEAS/CART,339.0029,67.1898,-386.3359,-0.3555,-0.9347,0.0000
PTMEAS/CART,345.1869,68.1524,-386.3348,0.6228,-0.7824,0.0000
ENDMES
OUTPUT/FA(CR4),TA(xx),TA(yy),TA(zzz),TA(d5)
DATDEF/FA(PL1),DAT(Z)
DATDEF/FA(PL2),DAT(X)
D(TMP)=DATSET/DAT(Z),ZDIR,DAT(X),XDIR
D(MCS)=TRANS/YORIG,FA(CR4)
SAVE/D(TMP)
D(TMP)=TRANS/XORIG,FA(CR4),YORIG,FA(CR4)
D(TMP)=TRANS/ZORIG,FA(PL3)
MIRROR/XAXIS
MIRROR/ZAXIS

```

- Inserción del CAD de la pieza.

```
CAPPS/LOCKPART
```

- Mediante estas líneas de programación el programa se repite 3 veces.

```

DECL/INTGR,I,
DO/I,1,3,1
GOTO/22.0845,74.3761,-248.6052
...
ENDDO (última línea del programa)

```

- Se pasa a medición manual, se aumenta la distancia de aproximación y retroceso y se realiza la calibración del palpador en la posición A30B180.

```

MODE/MAN
SNSSET/APPRCH,10.0000
SNSSET/RETRCT,10.0000
$$CALIBRATE PA4B24 AT A=30.0,B=180.0
S(PA4B24)=SNSDEF/PROBE,INDEX,POL,30.0,180.0,0.0,0.0,-
1.0,83.124,3.9866
CALIB/SENS,S(PA4B24),FA(MASTER),5
PTMEAS/CART,181.2573,32.2715,-259.7764,-0.0682,-0.9812,0.1807
PTMEAS/CART,190.0245,36.4834,-259.7719,0.8085,-0.5599,0.1812
PTMEAS/CART,188.8487,49.0801,-259.7716,0.6910,0.6998,0.1812
PTMEAS/CART,182.4319,51.9062,-259.7760,0.0493,0.9823,0.1807
PTMEAS/CART,181.3743,42.6928,-251.6181,-0.0565,0.0610,0.9965
ENDMES

```

- Se reduce la distancia de aproximación y retroceso a su valor inicial, se añade un punto alejado de la pieza para evitar colisiones, configuración de nuevo al modo automático y finalmente se comienza la medición de los puntos del plano delantero.

```

SNSET/APPRCH,5.0000
SNSET/RETRCT,5.0000
GOTO/73.7125,30.4881,-242.3524
MODE/PROG,MAN
F(PNT1)=FEAT/POINT,CART,$
  23.1557,-164.9546,23.7426,0.962,0.000,-0.272
MEAS/POINT,F(PNT1),1
PTMEAS/CART,23.1557,-164.9546,23.7426,0.9623,0.0000,-0.2721
ENDMES
OUTPUT/FA(PNT1),TA(xx),TA(yy),TA(zzz),TA(LPROFPT)
F(PNT2)=FEAT/POINT,CART,$
  23.1557,-144.9546,23.7427,0.962,0.000,-0.272
MEAS/POINT,F(PNT2),1
PTMEAS/CART,23.1557,-144.9546,23.7427,0.9623,0.0000,-0.2721
ENDMES
OUTPUT/FA(PNT2),TA(xx),TA(yy),TA(zzz),TA(LPROFPT)
...

```

- Tras la medición de todos los puntos de ese plano, se introduce un punto alejado de la pieza, se cambia al modo manual y se aumenta la distancia de aproximación y retroceso para la calibración del palpador en una nueva posición.

```

GOTO/22.0845,74.3761,-248.6052
MODE/MAN
SNSET/APPRCH,10.0000
SNSET/RETRCT,10.0000

```

- Calibración del palpador en la posición A7,5B-90.

```

$$CALIBRATE PA1B-12 AT A=7.5,B=-90.0
S(PA1B-12)=SNSDEF/PROBE,INDEX,POL,7.5,-90.0,0.0,0.0,-
1.0,83.124,3.9939
CALIB/SENS,S(PA1B-12),FA(MASTER),5
GOTO/133.6863,51.5770,-156.0125
PTMEAS/CART,130.5632,52.3968,-249.9761,-0.9927,-0.0246,0.1184
PTMEAS/CART,133.6679,59.8562,-249.9752,-0.6823,0.7214,0.1185
PTMEAS/CART,142.8706,62.2839,-249.9746,0.2380,0.9640,0.1186
PTMEAS/CART,150.1560,54.9510,-250.0464,0.9666,0.2308,0.1114
PTMEAS/CART,140.3314,52.8367,-241.1634,-0.0159,0.0194,0.9997
ENDMES

```

- Se reduce la distancia de aproximación y retroceso a su valor inicial, se añade un punto alejado de la pieza para evitar colisiones, configuración de nuevo al modo automático y finalmente se comienza la medición de los puntos del plano lateral.

```

SNSET/APPRCH,5.0000
SNSET/RETRCT,5.0000
GOTO/-202.0614,30.7562,-227.8135
MODE/PROG,MAN
F(PNT65)=FEAT/POINT,CART,$
  5.4917,-230.6100,26.7900,0.000,-1.000,0.000
MEAS/POINT,F(PNT65),1
PTMEAS/CART,5.4917,-230.6100,26.7900,0.0000,-1.0000,0.0000
ENDMES
OUTPUT/FA(PNT65),TA(xx),TA(yy),TA(zzz),TA(LPROFPT)
F(PNT66)=FEAT/POINT,CART,$
  5.4917,-230.6100,13.4317,0.000,-1.000,0.000
MEAS/POINT,F(PNT66),1
PTMEAS/CART,5.4917,-230.6100,13.4317,0.0000,-1.0000,0.0000
ENDMES
OUTPUT/FA(PNT66),TA(xx),TA(yy),TA(zzz),TA(LPROFPT)
F(PNT67)=FEAT/POINT,CART,$
  5.4917,-221.1203,0.1427,0.000,-0.574,-0.819
MEAS/POINT,F(PNT67),1
PTMEAS/CART,5.4917,-221.1203,0.1427,0.0000,-0.5739,-0.8189
ENDMES
OUTPUT/FA(PNT67),TA(xx),TA(yy),TA(zzz),TA(LPROFPT)

```

- Debido a las diferentes inclinaciones de estas superficies, para evitar la colisión, se añade un punto intermedio ligeramente alejado de la pieza.

```

F(PNT68)=FEAT/POINT,CART,$
  -109.5082,-230.7100,26.7900,0.000,-1.000,0.000
MEAS/POINT,F(PNT68),1
PTMEAS/CART,-109.5082,-230.7100,26.7900,0.0000,-1.0000,0.0000
ENDMES
OUTPUT/FA(PNT68),TA(xx),TA(yy),TA(zzz),TA(LPROFPT)
F(PNT69)=FEAT/POINT,CART,$
  -109.5080,-230.7100,13.4317,0.000,-1.000,0.000
MEAS/POINT,F(PNT69),1
PTMEAS/CART,-109.5080,-230.7100,13.4317,0.0000,-1.0000,0.0000
ENDMES
OUTPUT/FA(PNT69),TA(xx),TA(yy),TA(zzz),TA(LPROFPT)
GOTO/-111.9313,-242.0164,6.9183
F(PNT70)=FEAT/POINT,CART,$
  -109.5080,-221.5218,-0.4306,0.000,-0.574,-0.819
MEAS/POINT,F(PNT70),1
PTMEAS/CART,-109.5080,-221.5218,-0.4306,0.0000,-0.5739,-0.8189

```

```
ENDMES
OUTPUT/FA(PNT70),TA(xx),TA(yy),TA(zzz),TA(LPROFPT)
...
```

- Tras la medición de todos los puntos de ese plano, se introduce un punto alejado de la pieza, se cambia al modo manual y se aumenta la distancia de aproximación y retroceso para la calibración del palpador en una nueva posición.

```
GOTO/-20.000,-5.000,-220.1842
MODE/MAN
SNSET/APPRCH,10.0000
SNSET/RETRCT,10.0000
```

- Calibración del palpador en la posición A0B0.

```
$$CALIBRATE PA0B0 AT A=0.0,B=0.0
S(PA0B0)=SNSDEF/PROBE,INDEX,POL,0.0,0.0,0.0,0.0,-
1.0,83.124,3.9871
CALIB/SENS,S(PA0B0),FA(MASTER),5
PTMEAS/CART,140.6170,32.1490,-249.1170,0.0217,-0.9895,0.1430
PTMEAS/CART,131.2851,38.1864,-249.1162,-0.9115,-0.3857,0.1431
PTMEAS/CART,133.6953,49.3362,-249.1914,-0.6706,0.7293,0.1356
PTMEAS/CART,140.7494,52.0360,-250.7421,0.0349,0.9992,-0.0195
PTMEAS/CART,139.8879,42.2675,-240.5627,-0.0513,0.0224,0.9984
ENDMES
```

- Se reduce la distancia de aproximación y retroceso a su valor inicial, se añade un punto alejado de la pieza para evitar colisiones, configuración de nuevo al modo automático y por último se comienza la medición de los puntos del plano superior.

```
SNSET/APPRCH,5.0000
SNSET/RETRCT,5.0000
MODE/PROG,MAN
GOTO/-79.3010,114.4856,-225.0239
F(PNT108)=FEAT/POINT,CART,$
-42.5080,195.0453,-6.3090,0.000,0.000,-1.000
MEAS/POINT,F(PNT108),1
PTMEAS/CART,-42.5080,195.0453,-6.3090,0.0000,0.0000,-1.0000
ENDMES
OUTPUT/FA(PNT108),TA(xx),TA(yy),TA(zzz),TA(LPROFPT)
F(PNT107)=FEAT/POINT,CART,$
-78.5080,195.0453,-6.3090,0.000,0.000,-1.000
MEAS/POINT,F(PNT107),1
PTMEAS/CART,-78.5080,195.0453,-6.3090,0.0000,0.0000,-1.0000
ENDMES
OUTPUT/FA(PNT107),TA(xx),TA(yy),TA(zzz),TA(LPROFPT)
```

3.6.3.3.- Medición Escáner Láser

La medición con el HandySCAN es diferente a la realizada con la MMC, en este caso, se mide la pieza completamente y las veces que se requiera, y posteriormente se hace la selección de los puntos que son necesarios para el estudio. Aún así también es necesario realizar unos pasos previos antes de comenzar con la medición.

3.6.3.3.1.- Calibración

El primer paso es realizar la calibración de las cámaras ya que afectan directamente a la precisión de equipo. Es necesario realizar la calibración de sus parámetros intrínsecos, como por ejemplo, la distorsión de las lentes. También los parámetros del escáner como son: la línea de base de las cámaras y del láser, el ángulo del rayo láser, la longitud focal de las cámaras y el sistema de movimiento lineal del escáner objeto; deben ser correctamente puestos a punto para encontrar exactamente la posición 3D de la línea láser en el objeto.

Para la realización de la calibración se ha utilizado una placa de calibración que viene incluida con la compra del escáner. La duración de la calibración es de unos dos minutos aproximadamente, por lo que se puede realizar antes de cada medición, aunque no es necesario mientras se haga frecuentemente.

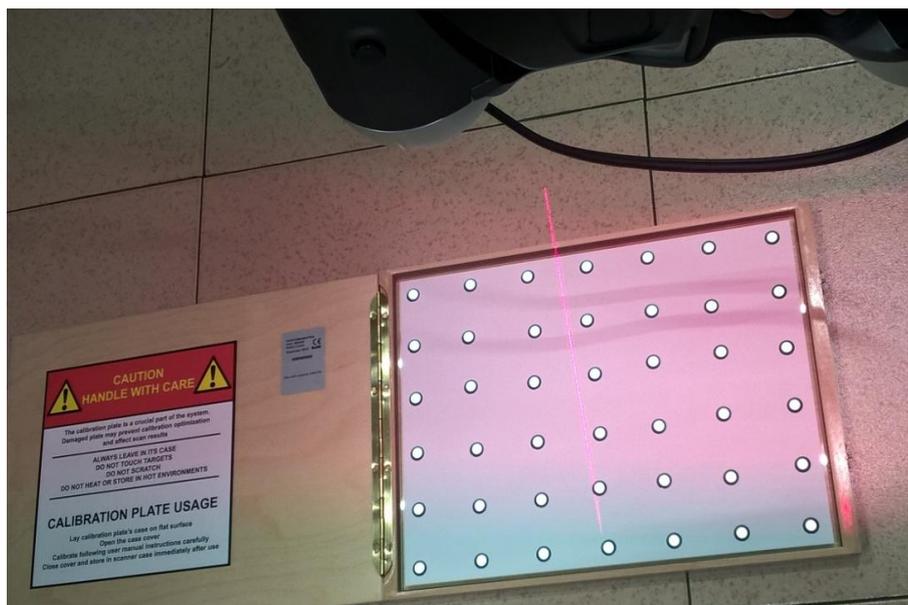


Figura 36.- Placa de calibración.

3.6.3.3.2.- Pre-Modelado

Se colocan objetivos de posicionamiento (pegatinas) antes del escaneo sobre el objeto o alrededor de su entorno inmediato. Los objetivos permiten al usuario registrar todos los marcos de cámara diferentes para los conjuntos de datos 3D adquiridos por el escáner. Los objetivos suelen tener una forma geométrica simple, a menudo un círculo, y están diseñados específicamente para su fácil detección por los componentes ópticos del escáner 3D.

Este proceso se llama pre-modelado y con él se obtiene un algoritmo y un descriptor preliminar para el objeto que se está escaneando. Estos dos elementos hacen que la detección de las pegatinas sea más fácil y precisa. Después de que el escáner detecta objetivos individualmente, el siguiente paso es determinar su posición relativa. Se utiliza un conjunto de datos de destino con un mínimo de tres objetivos para posicionar la trama de exploración. A medida que el escáner se mueve alrededor de la pieza, se detectan y registran nuevos objetivos en el modelo de posicionamiento global.

El posicionamiento a través de objetivos permite que los datos se adquieran por separado de la superficie del objeto de exploración. El posicionamiento a través de objetivos es el único método que permite a los escáneres 3D portátiles entregar calidad de metrología.

Se deben colocar las pegatinas en superficies planas o ligeramente curvas, bien distribuidos en el volumen de medición y claramente visibles, el sistema debe reconocer tres pegatinas mínimo.



Figura 37.- Colocación de las pegatinas en las piezas.

3.6.3.3.3.- Escaneado

Realizando mediciones con el escáner se irá completando la geometría de la pieza, quedando ésta grabada en el PC. Durante la medición, se proyecta sobre la superficie del objeto un conjunto de líneas y dos cámaras se encargan de tomar la imagen del volumen que adopta dicho patrón sobre el objeto.

La proyección ha de realizarse desde distintos puntos y alturas alrededor de ella, de forma que cuando el PC las coloque según su orientación, el conjunto de las fotos forme un paraguas alrededor de la pieza. Se debe intentar colocar el escáner de manera que el patrón proyectado sea perpendicular a la superficie que se quiere medir.



Figura 38.- Escaneado de una pieza.

El sistema identifica las pegatinas tan pronto como son captadas por las cámaras y el Software identifica automáticamente los puntos de referencia y los agrega al proyecto proporcionándoles una numeración diferente.

3.6.3.3.4.- Tratamiento de datos

3.6.3.3.4.1.- Poligonización.

Al final del escaneado, el Software procesa todos los puntos captados por imagen y genera un mallado, obteniéndose prácticamente la superficie de la pieza real.

La superficie se construye cómo una única malla de triángulos cuyos vértices son los puntos adquiridos. Dependiendo de los distintos valores de curvatura que tenga la superficie del objeto de medición, la malla de triángulos tendrá mayor o menor densidad.

Mediante el software del HandySCAN, se puede modificar la malla creada: rellenar orificios, refinarla, desplazarla...

3.6.3.3.4.2.- Alineamiento de la malla sobre el CAD.

Los escaneos realizados tienen que ser integrados en un sistema común de referencia mediante un proceso que se llama generalmente alineación, y que transforma las coordenadas locales de cada toma en coordenadas generales del modelo.

Se alinea la primera malla por volumen con el 3D original de la pieza. Un alineamiento por volumen es un cálculo estadístico, busca la mejor posición de la malla promediando las desviaciones de todos los nodos de la malla). Como se trata de un estudio de repetibilidad del sistema de escaneado se alinean las otras dos mallas digitalizadas con la primera malla.

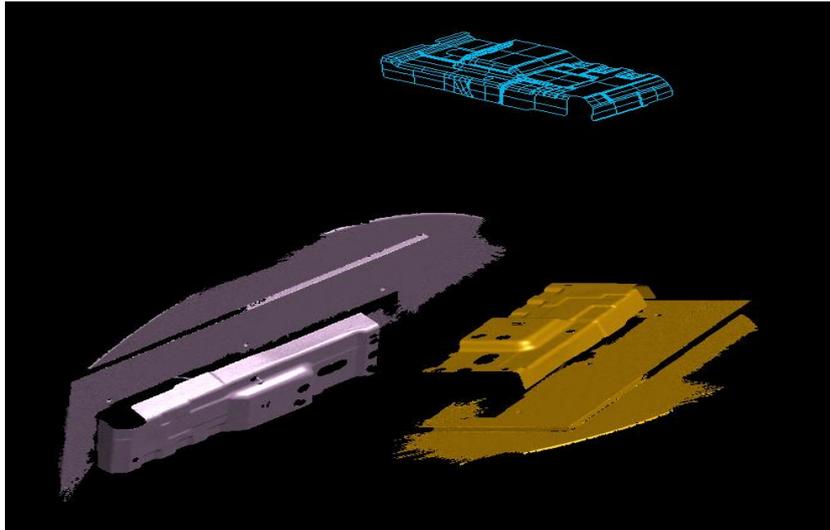


Figura 39.- Pieza original y piezas escaneadas.

Para que el programa haga el alineamiento por volumen tenemos que seleccionar solo la pieza (si se tuviese en cuenta el suelo digitalizado la alineación no sería correcta). Para ello hay que eliminar las zonas del útil que se han escaneado, así como los bulones y los amarres.

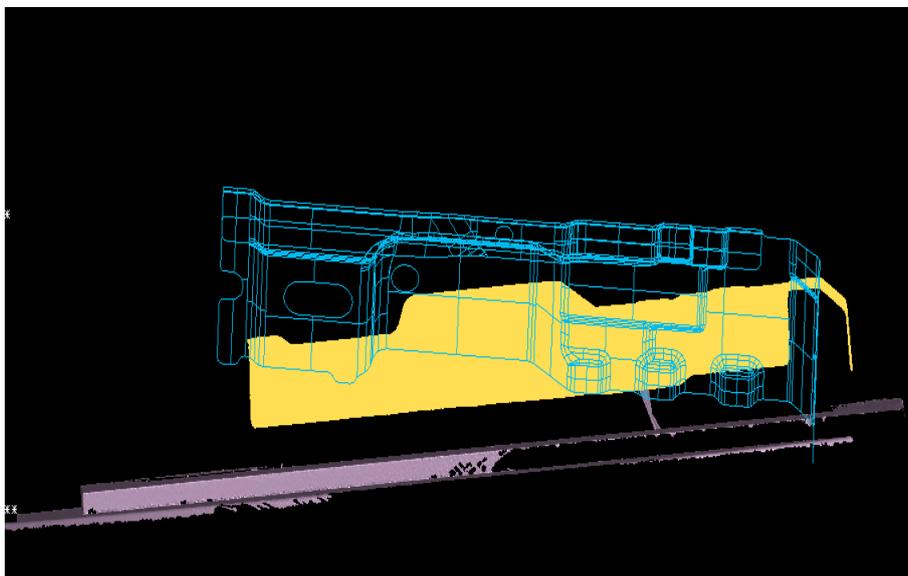


Figura 40.- Selección de la pieza.

Una vez seleccionada únicamente la pieza, se puede proceder a la alineación entre las piezas. Se ha realizado mediante el método *Best Fit*, este método consiste en que el programa va realizando iteraciones, hasta encontrar la posición en la que la desviación media de la pieza sea la más pequeña posible. Para obtener una mayor precisión se requieren más iteraciones, sin embargo

esto implica más tiempo, ya que el programa tarda bastante en hacer los cálculos necesarios.

En la Figura 41 se observan las mallas alineadas con el CAD original de la pieza.

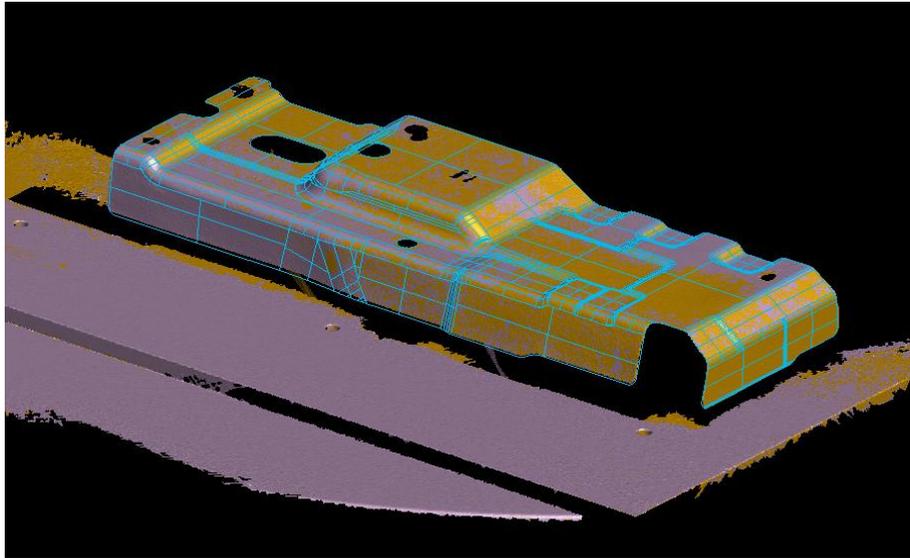


Figura 41.- Mallas alineadas.

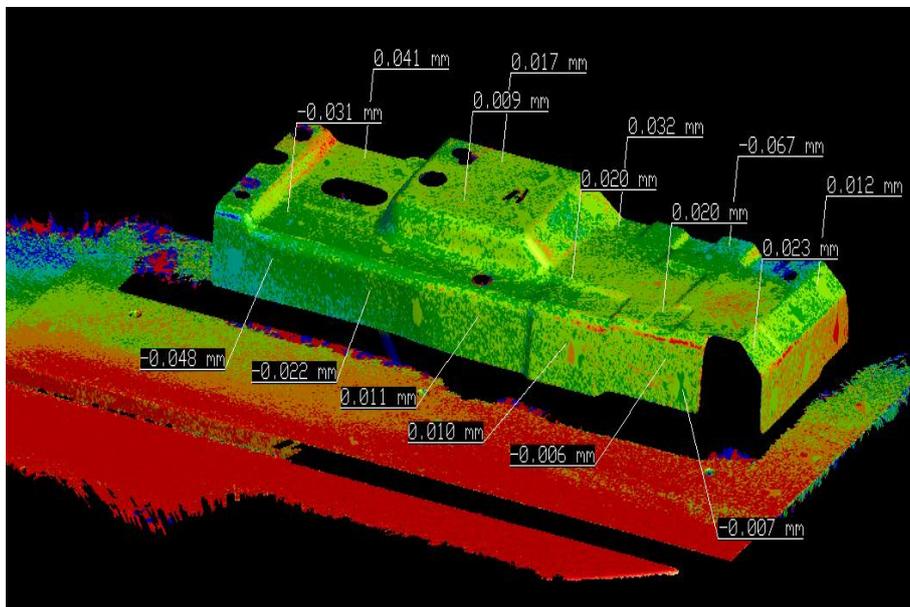


Figura 42.- Desviación entre la alineación de los piezas diferentes.

Una vez alineadas se pueden obtener las desviaciones encontradas entre las dos piezas alineadas, donde se observan valores máximos de 6 centésimas de milímetro.

3.6.4.- Procesamiento de datos.

En este apartado se describen las distintas operaciones a las que se someten los datos obtenidos anteriormente. Se explican los cálculos que se van a realizar.

3.6.4.1.- Elección de los puntos

Para la elaboración de este estudio se han medido 5 piezas de la misma serie de producción y estampadas con el mismo troquel. De estas piezas se han medido varios puntos repartidos en el volumen y se han medido tres veces para poder realizar una comparación.

Se han elegido 10 puntos de los obtenidos en la medición, ya que es necesario para poder evaluar los resultados, disminuir el número de puntos a estudiar. Los puntos elegidos se muestran en la Figura 43. El criterio elegido para la elección de los puntos es la importancia de los mismos, por ello se han elegido los de mayor proximidad a los cuatro RPS. El resto de los puntos se han elegido para poder evaluar cómo miden los equipos en planos inclinados.

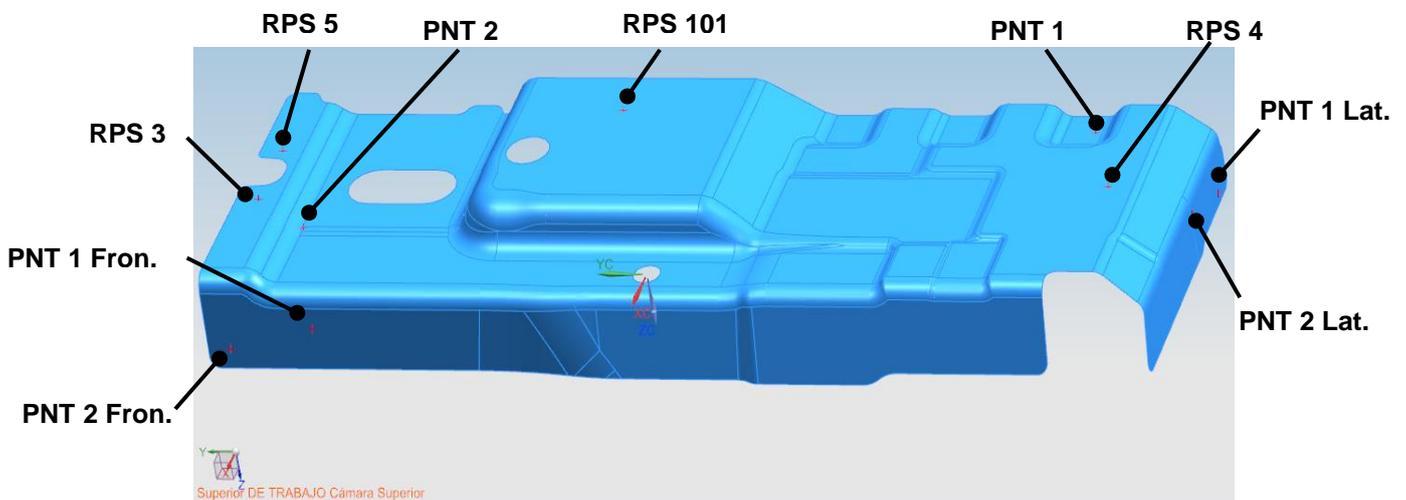


Figura 43.- Puntos seleccionados para el estudio.

A continuación se muestran en la tabla los valores nominales de dichos puntos, es decir, los valores establecidos en el CAD original de la pieza que establece el fabricante. Gracias a estos valores se podrán realizar las comparaciones, sabiendo que equipo mide con mayor precisión y exactitud.

Tabla 3.- Valores nominales de los puntos elegidos.

		X	Y	Z
1	RPS3	-42,508	195,045	-6,309
2	RPS4	-54,508	-198,955	-6,932
3	RPS5	-78,508	195,045	-6,309
4	RPS101	-90,508	35,045	-18,408
5	PNT 1	-102,508	-178,955	-1,273
6	PNT 2	-30,508	171,043	-0,800
7	PNT 1 Lateral	-66,508	-230,710	13,432
8	PNT 2 Lateral	-102,508	-230,710	26,790
9	PNT1 Frontal	16,652	155,045	16,229
10	PNT2 Frontal	17,529	195,045	25,334

3.6.4.2.- MMC

En el caso de la medición con la MMC los puntos medidos han sido 260, ya que hay zonas de la pieza que el palpador no puede alcanzar ya que podría colisionar, como son las zonas próximas a los amarres. Debido a que el estudio se va a realizar con 10 puntos, se necesitan las coordenadas de esos puntos medidos. Para obtenerlos se guardan las mediciones realizadas mediante el programa CAPPS 6.0 en un archivo de Excel, del que luego se podrán extraer los valores.

Una vez obtenidos los valores mediciones de todas las piezas se proceden a realizar los cálculos necesarios para poder evaluar las mediciones. Estos valores se pueden consultar en el Anexo 2.

Con los datos de las mediciones realizadas con la MMC y por medio de la Ecuación 2 se calculan las medias de las tres mediciones realizadas de cada coordenada y de las cinco piezas.

Posteriormente se calculan mediante la Ecuación 3 y la Ecuación 4, las desviaciones encontradas en las tres mediciones realizadas para las tres coordenadas y para las cinco piezas.

3.6.4.3.- HandySCAN

Una vez se tienen las mediciones de los puntos, en este caso son unos 286 puntos ya que el escáner puede alcanzar puntos que la MMC no era capaz, se procede a obtener las coordenadas de los 10 puntos con los que se

realizará el estudio. Para ello, lo primero es pasar los datos a un fichero CAD, para que mediante el programa NX 10 se puedan transformar los puntos que están en el CAD a un formato Excel, a partir de aquí ya se pueden seleccionar las coordenadas de los puntos necesarios.

Tras obtener los valores de las mediciones de todas las piezas se proceden a realizar los cálculos necesarios para poder evaluar las mediciones. Estos valores se pueden consultar en el Anexo 3.

Con los datos de las mediciones realizadas con el HandySCAN y mediante la Ecuación 2 se obtienen las medias de las tres mediciones realizadas de cada coordenada y de las cinco piezas. Así se pueden comparar las diferencias encontradas en las diferentes piezas.

A continuación se calculan por medio de la Ecuación 3 y la Ecuación 4, las desviaciones encontradas en las tres mediciones realizadas para las tres coordenadas y para las cinco piezas.

3.6.4.3.- Ingeniería Inversa

Para la realización de estas mediciones se ha utilizado la MMC, teniendo en cuenta las estrategias de medición mencionadas anteriormente. En este caso, al no tener un dispositivo de escaneo instalado en la máquina, ha sido necesario utilizar el modelo 3D de la pieza en el software de la máquina para poder palpar cada una de las superficies correctamente.

Tras varias mediciones, se puede observar en la siguiente Figura 44 todos los puntos obtenidos. Una vez medidos, se han guardado en formato IGES, un formato de archivos CAD para poder abrirlos luego con el software NX 10 y así poder construir el modelo CAD.

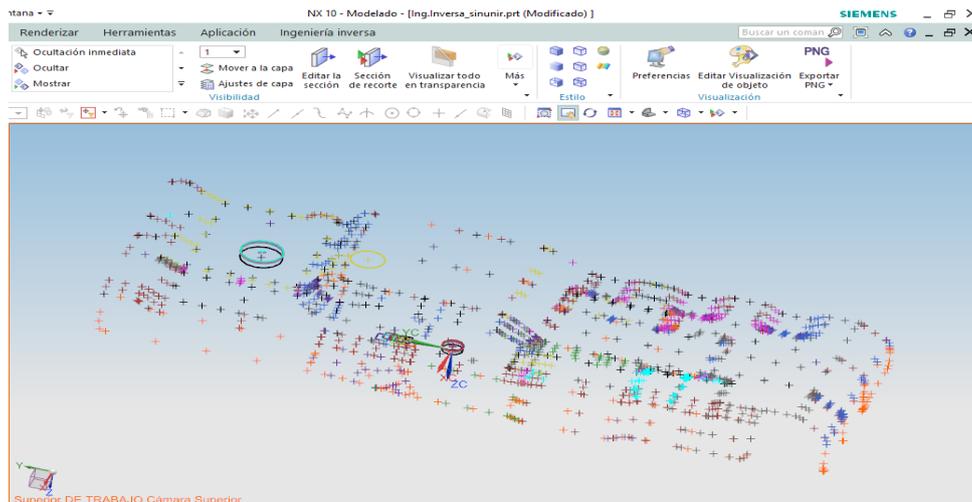


Figura 44.- Puntos obtenidos de diferentes mediciones.

En cada medición realizada se han medido distintas zonas de la pieza y algunas superficies como son las curvas se han medido de nuevo para obtener más puntos y que luego fuese más sencillo construir la superficie. Una vez se tienen todas las mediciones, se han trasladado todas al mismo punto, es decir, al mismo origen del sistema de coordenadas. Sin embargo, hay pequeñas diferencias que se pueden observar en la siguiente tabla:

Tabla 4.- Desviaciones de los alineamientos.

		RPS1	RPS 2	
		X/Y	X	Y
Negro	19-jul	REF	REF	REF
Amarillo	20-jul	0	0	0,005
Rojo	21-jul	0	0,001	0,011
Verde	22-jul	0	0,002	0,009
Rosa	26-jul	0	0	0,002
Gris	27-jul	0	0,006	0,01
Azul	02-ago	0	0	0,005
Naranja	04-ago	0	0	0,002
Morado	01-sep	0	0,003	0,002

Se ha utilizado el primer alineamiento como referencia, el resto de valores son las diferencias encontradas respecto al anterior. Donde se encuentran mayores diferencias son en el RPS 2, el bulón o posicionador 2, pero aun así estas son de milésimas de milímetro con lo que va a suponer errores mínimos a la hora de la realización de la ingeniería inversa.

El siguiente paso consiste en unir cada uno de esos puntos (no se utilizan todos) mediante líneas, curvas y splines, creando la silueta de la pieza como se puede observar en la Figura 45.

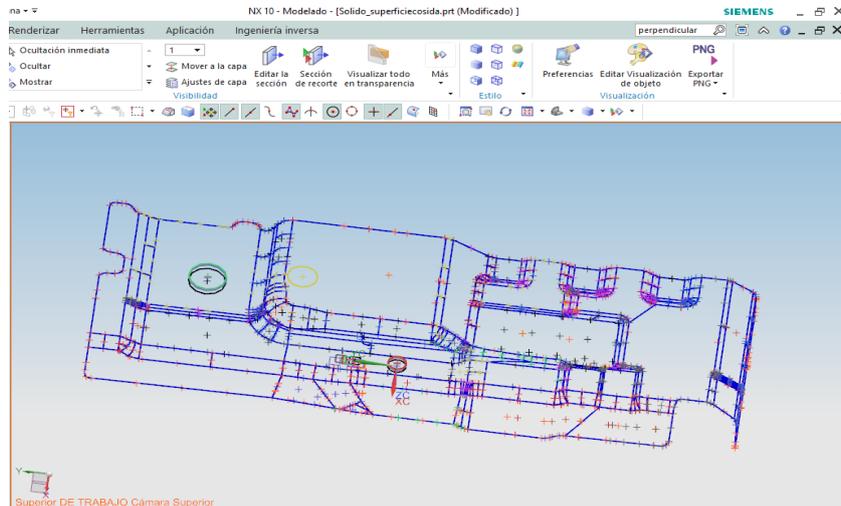


Figura 45.- Puntos unidos mediante líneas y curvas.

Ahora, una vez se tiene la silueta de la pieza completa hay que crear las superficies y que estas se asemejen a las superficies de la pieza original. Tras crear las superficies el resultado es el mostrado en la Figura 46.

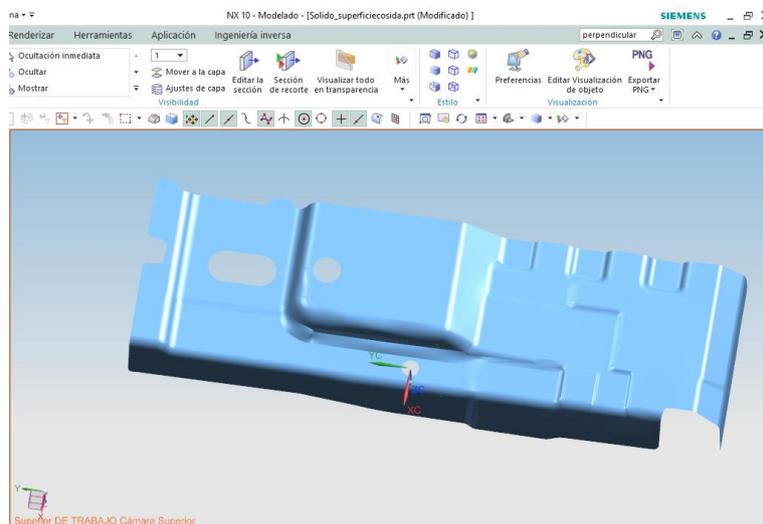


Figura 46.- Creación de las superficies.

Por último, se le da el espesor de 0,7 mm a todas las superficies de la pieza. Una vez hecho esto ya se puede dar por finalizado el proceso de la ingeniería inversa ya que se tiene el volumen completo de la pieza.

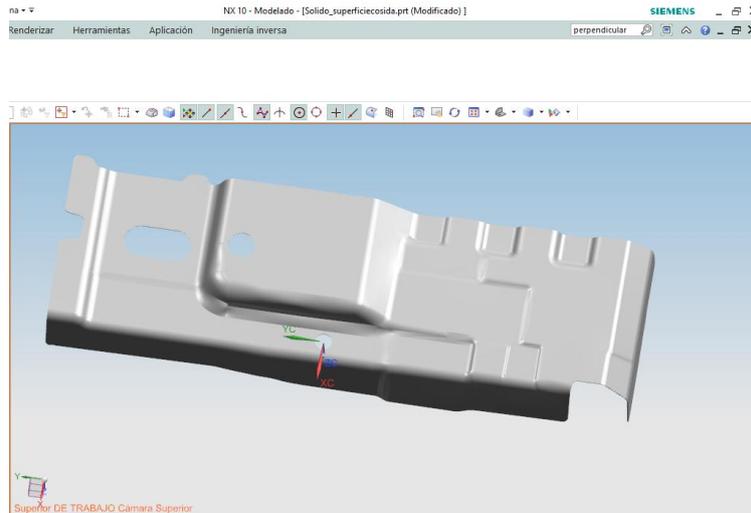


Figura 47.- Sólido tras la extrusión de las superficies.

3.6.4.4.- Incertidumbre expandida de los equipos

Debido a que el objetivo de este estudio es comparar las incertidumbres de ambos sistemas de medición, por contacto y sin contacto, a continuación se calculará el valor de la incertidumbre expandida de cada equipo utilizado.

Para el cálculo de esta, se toman las desviaciones obtenidas en los 10 puntos medidos anteriormente y se obtiene la media de las desviaciones de cada pieza. Se muestra un ejemplo en la Ecuación 24, para la pieza A y en la coordenada X.

$$\sigma_{A,X} = \frac{\sigma_{1,X} + \sigma_{2,X} + \sigma_{3,X} + \dots + \sigma_{10,X}}{10} \text{ (mm)} \quad (24)$$

Después de haber realizado el paso anterior para cada una de las piezas, para las tres coordenadas y en ambos equipos, se obtiene el promedio de las desviaciones de las cinco piezas. A continuación en la Ecuación 25, se muestra el ejemplo para la coordenada X. Hay que realizar este cálculo para las otras dos coordenadas y en los dos equipos.

$$\sigma_X = \frac{\sigma_{A,X} + \sigma_{B,X} + \sigma_{C,X} + \sigma_{D,X} + \sigma_{E,X}}{5} \text{ (mm)} \quad (25)$$

El siguiente paso es calcular la incertidumbre típica del equipo, mediante la Ecuación 26 obtenemos el valor.

$$u_x = \frac{\sigma_x}{1000} (\mu m) \quad (26)$$

Finalmente, el cálculo de la incertidumbre expandida del equipo se obtiene mediante la Ecuación 27, en este caso siguiendo los ejemplos anteriores se muestra el de la coordenada X. Hay que realizar este cálculo para el resto de coordenadas y para ambos equipos.

$$U_x = k \times u_x (\mu m) \quad (27)$$

Teniendo en cuenta la Tabla 1, el valor del factor de cobertura k que se toma en este estudio es de 2. De esta forma se asegura que se está trabajando un nivel de confianza del 95,45 %.

3.6.4.5.- Tolerancia de los equipos

Tras obtener los valores de la incertidumbre de los equipos, también es interesante ver cuál será la tolerancia.

Cuando el intervalo de incertidumbre está contenido en el intervalo de tolerancia, se está en condiciones de afirmar, casi con seguridad, que el valor verdadero del mensurando es admisible. Cuando los intervalos de incertidumbre y de tolerancia son disjuntos, hay seguridad casi total en rechazar el mensurando. Cuando los intervalos de incertidumbre y de tolerancia se solapan en parte, es decir, cuando poseen una parte común y otra no común, la determinación de aceptación o rechazo es dudosa.

En la práctica se opta por un criterio de seguridad que consiste en rechazar cualquier mensurando en situación dudosa, lo que resulta adecuado siempre que el intervalo de incertidumbre sea varias veces inferior al de tolerancia. Esto equivale a definir como intervalo de decisión para los valores medidos el correspondiente a: $T - 2U$ (tolerancia efectiva), limitando el valor del cociente de ambos intervalos (tolerancia e incertidumbre). En medidas dimensionales, suele ser frecuente considerar admisible:

$$3 < \frac{T}{2u} < 10 \quad (28)$$

En la relación anterior, valores mayores que diez exigirían medios de medida muy costosos, y la reducción del límite inferior por debajo de tres supondría un rechazo importante de elementos correctos

Para este estudio se ha utilizado un valor intermedio, el 5 para los cálculos de la tolerancia de ambos equipos.

3.7.- Resultados y conclusiones

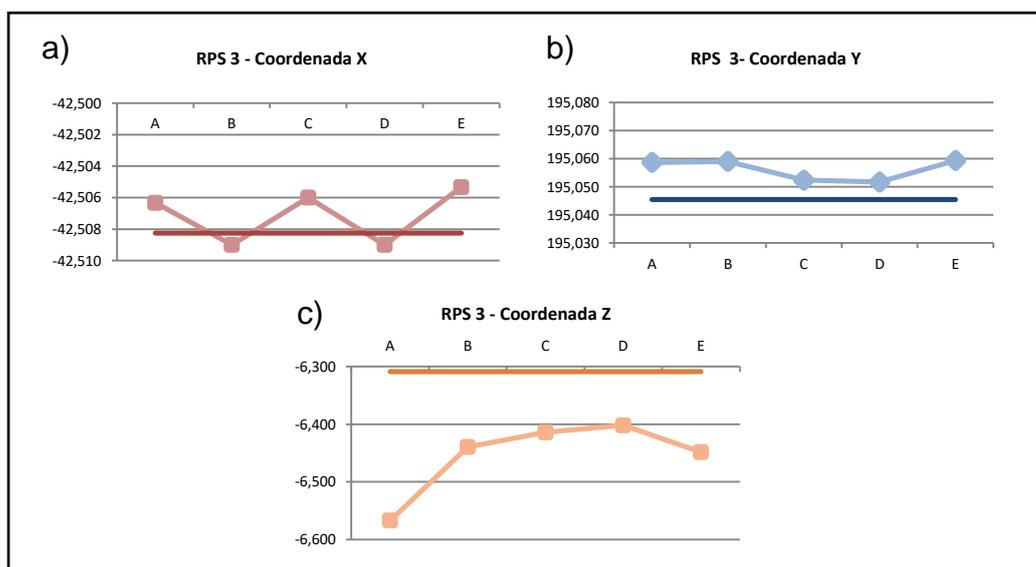
A continuación se muestran los resultados obtenidos y se establecen las conclusiones a las que se ha llegado tras observar los resultados.

3.7.1.- Resultados de la medición con MMC

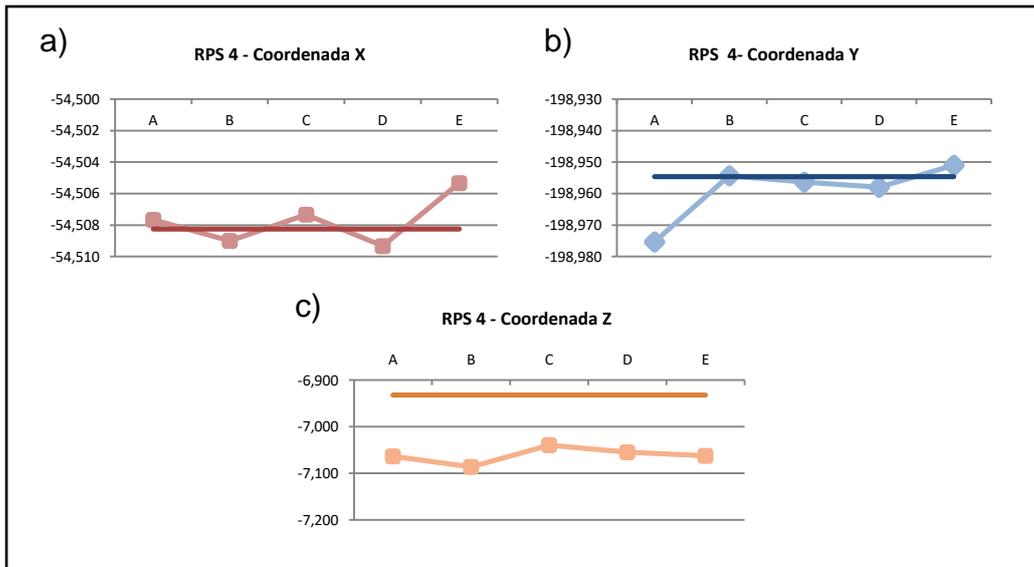
La medición de los puntos se ha realizado en unas 8 horas y 15 minutos, con la calibración de la esfera master y los palpadores en las distintas posiciones y el alineamiento de la pieza.

3.7.1.1.- Medias

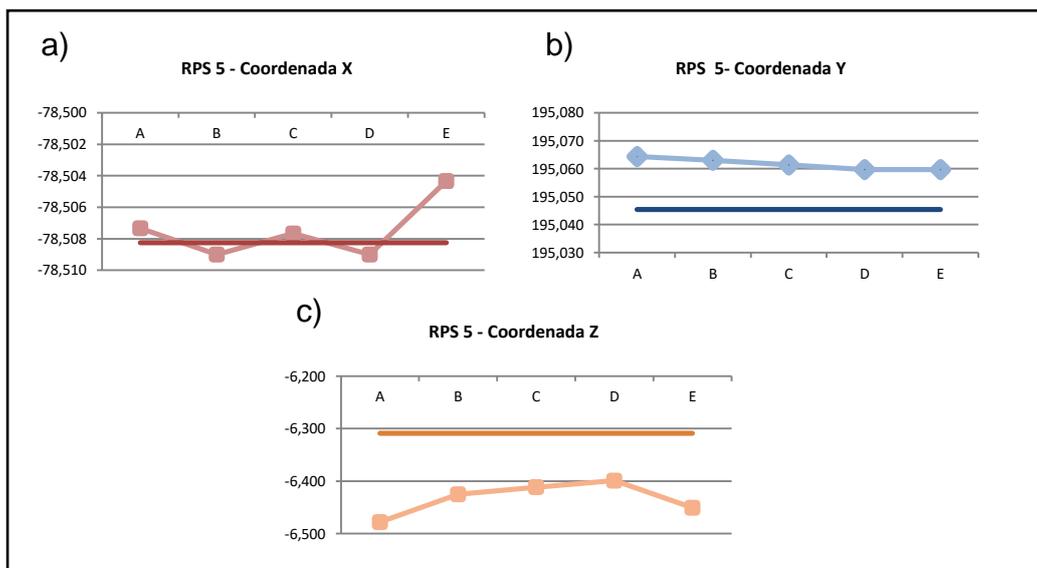
Con los datos de las mediciones realizadas con la MMC y por medio de la Ecuación 2 se calculan las medias de las tres mediciones realizadas de cada coordenada y de las cinco piezas. Así se pueden comparar las diferencias encontradas en las diferentes piezas. En las gráficas se han añadido los valores nominales de las coordenadas para poder valorar la precisión con la que mide el equipo. Los rangos de las gráficas son iguales para cada coordenada, sin embargo, hay alguna gráfica en las que el rango es diferente.



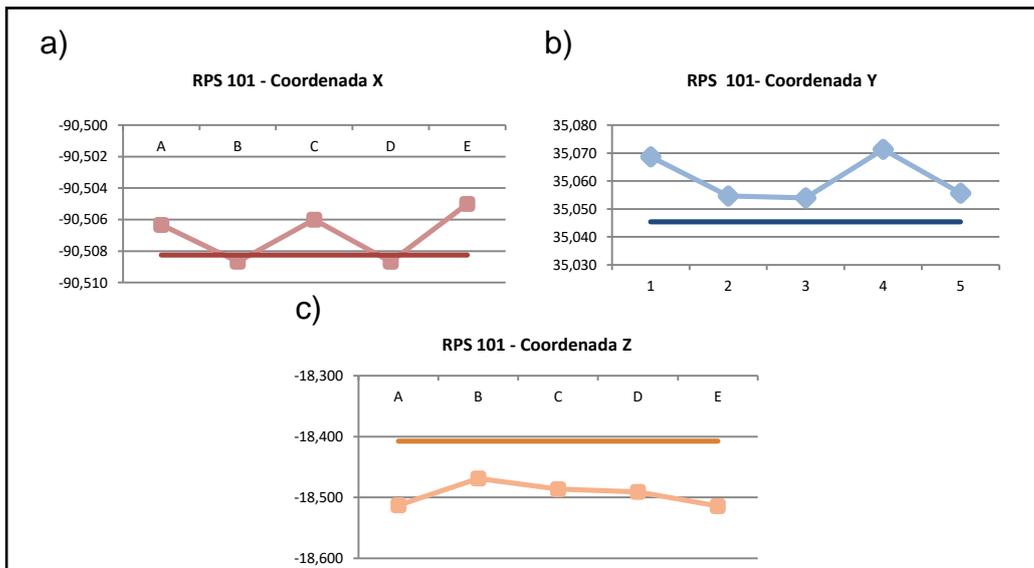
Gráfica 8.- Medias de las piezas en el RPS 3 con MMC: (a) coordenada X, (b) coordenada Y, (c) coordenada Z.



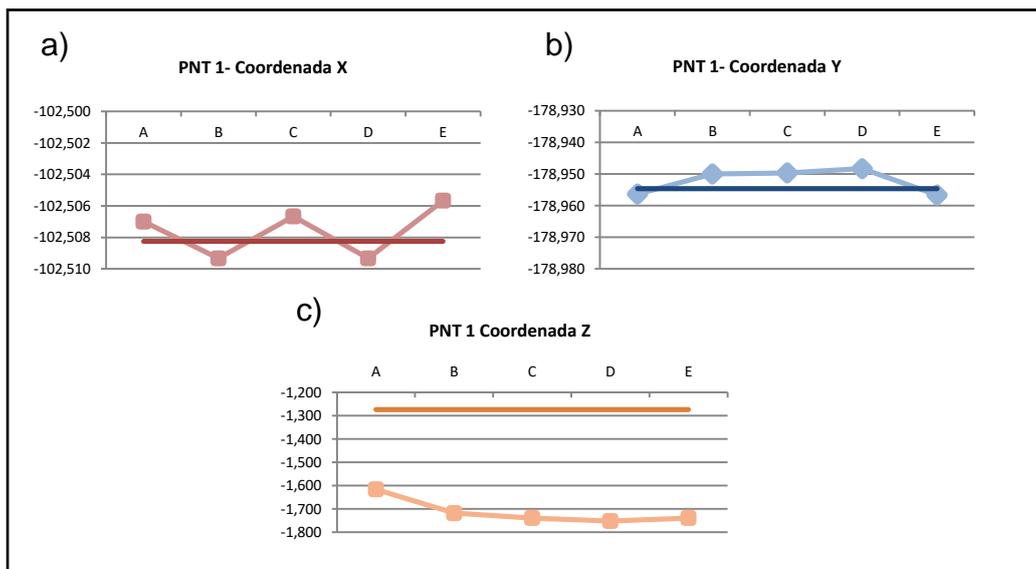
Gráfica 9.- Medias de las piezas en el RPS 4 con MMC: (a) coordenada X, (b) coordenada Y, (c) coordenada Z.



Gráfica 10.- Medias de las piezas en el RPS 5 con MMC: (a) coordenada X, (b) coordenada Y, (c) coordenada Z.

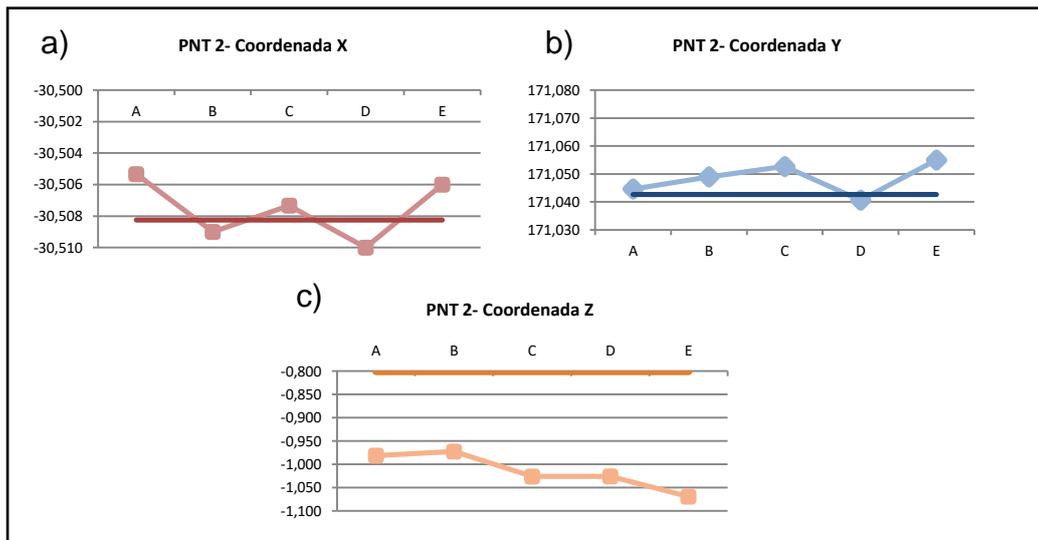


Gráfica 11.- Medias de las piezas en el RPS 101 con MMC: (a) coordenada X, (b) coordenada Y, (c) coordenada Z.

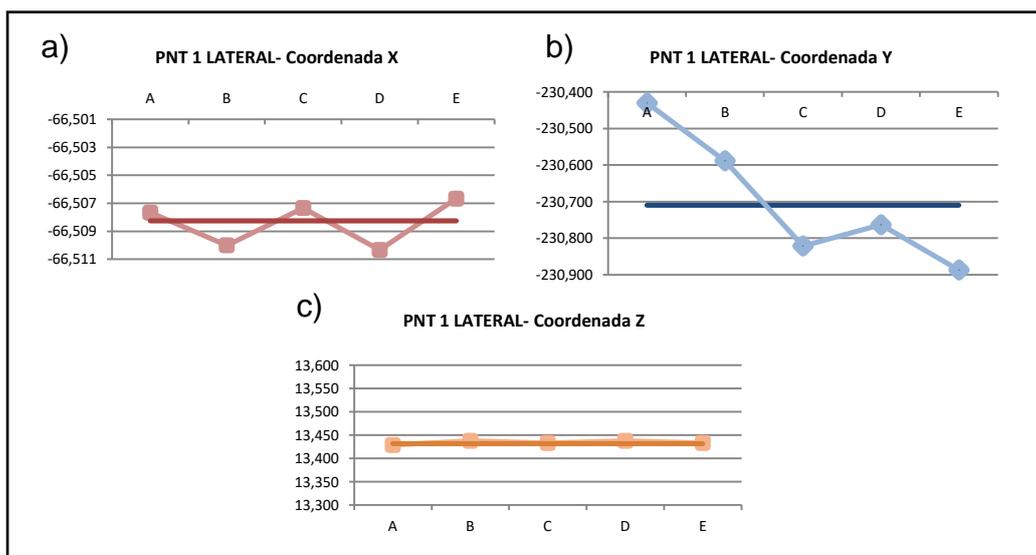


Gráfica 12.- Medias de las piezas en el PNT1 con MMC: (a) coordenada X, (b) coordenada Y, (c) coordenada Z.

En este caso, las gráfica de la coordenada Z del punto 1 tiene una un rango diferente de 0,5 mm, debido a que los valores obtenidos se alejan más de la media que el resto, en los que el rango es de 0,3 mm.

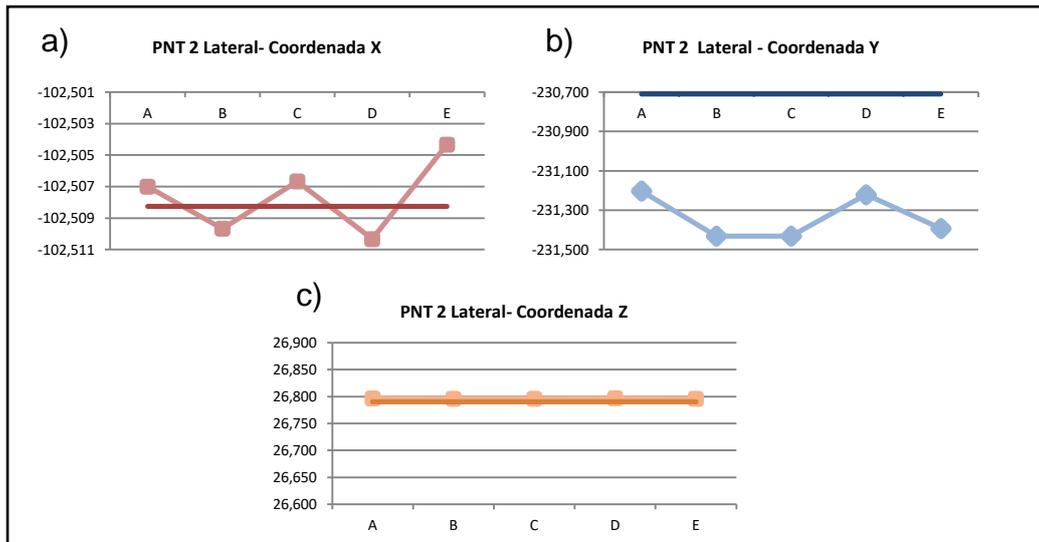


Gráfica 13.- Medias de las piezas en el PNT 2 con MMC: (a) coordenada X, (b) coordenada Y, (c) coordenada Z.



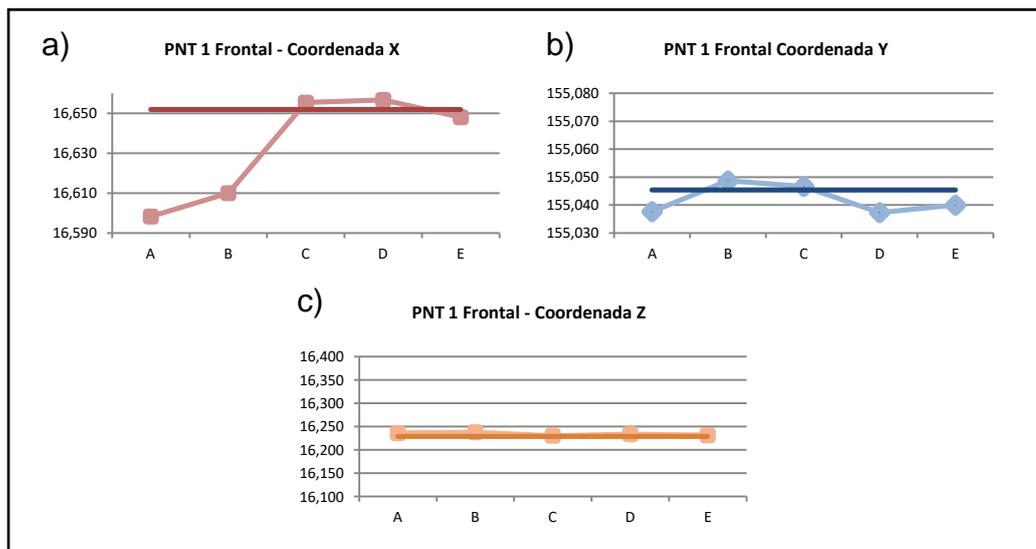
Gráfica 14.- Medias de las piezas en el PNT 1 Lateral con MMC: (a) coordenada X, (b) coordenada Y, (c) coordenada Z.

La gráfica de la coordenada Y del punto 1 lateral tiene un rango diferente a las otras gráficas, ya que los valores de las medias obtenidas se alejan más del valor nominal que en el resto de puntos. El rango en este caso es de 0,5 mm mientras que en resto es de 0,05mm, es mucho mayor.



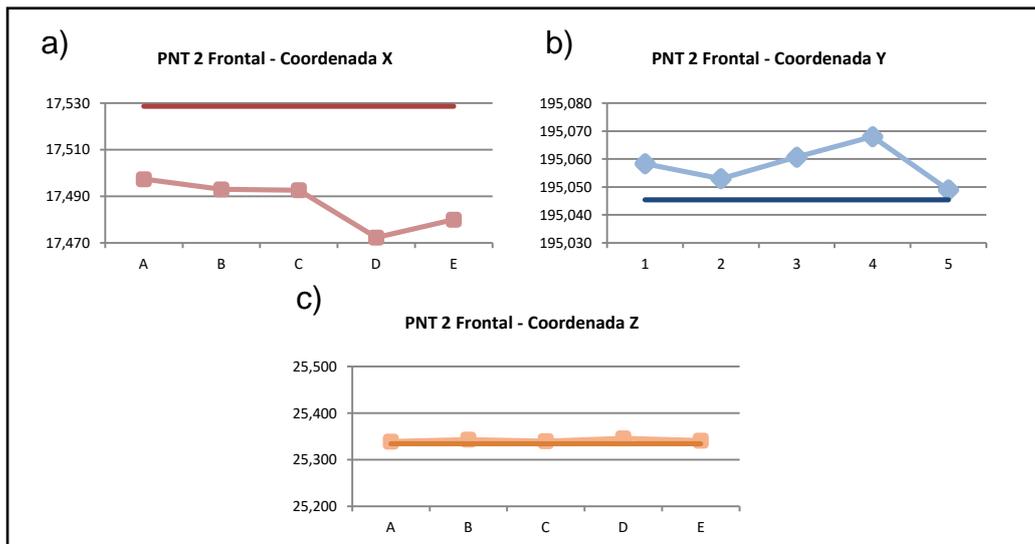
Gráfica 15.- Medias de las piezas en el PNT 2 Lateral con MMC: (a) coordenada X, (b) coordenada Y, (c) coordenada Z.

En la gráfica del punto 2 lateral sucede lo mismo, el rango es mayor que en el resto de los puntos, en este caso es de 0,8 mm, casi de un milímetro.



Gráfica 16.- Medias de las piezas en el PNT 1 Frontal con MMC: (a) coordenada X, (b) coordenada Y, (c) coordenada Z.

Para la gráfica del punto 1 frontal en la coordenada X se ha tenido que ampliar el rango ya que los valores obtenidos se distanciaban más del valor nominal que en los otros puntos. Se ha utilizado un rango de 0,05 mm, mientras que en los demás este es de 0,01mm.



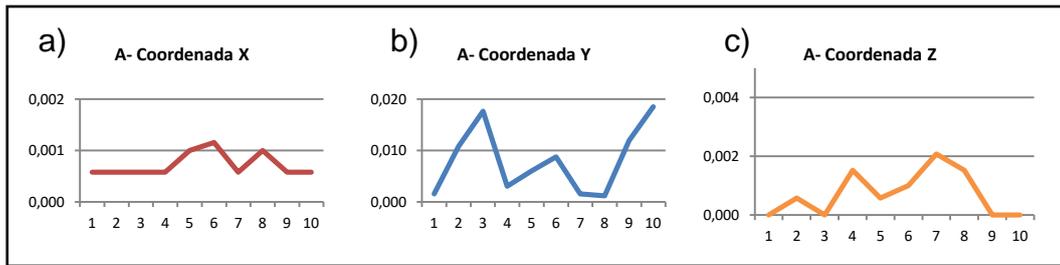
Gráfica 17.- Medias de las piezas en el PNT 2 Frontal con MMC: (a) coordenada X, (b) coordenada Y, (c) coordenada Z.

En la gráfica del punto 2 lateral sucede lo mismo, el rango es mayor que en el resto de los puntos, en este caso es de 0,06 mm.

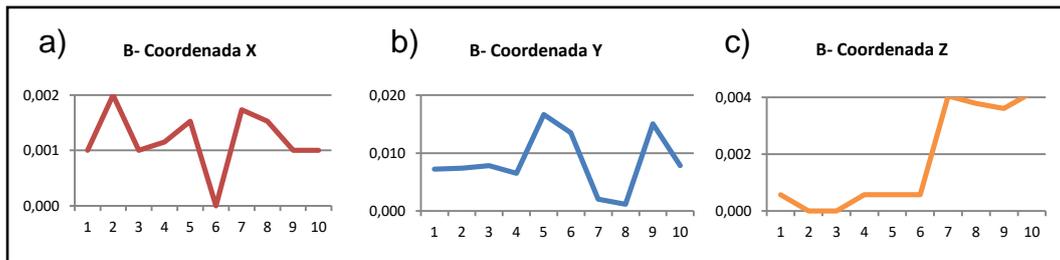
Las variaciones encontradas en estos últimos cuatro puntos se pueden deber a dos motivos principales. El primero, las piezas han podido sufrir alguna deformación, son piezas de pequeño espesor y si no se tiene cuidado a la hora de manipularlas pueden sufrir deformaciones. Como segunda opción, puede ser que en la medición, la fuerza que ha ejercido el palpador sobre las superficies haya sido mayor de la que estas podían soportar. También destacar que estas piezas por sus características pueden sufrir deformaciones momentáneas y luego volver a su posición original, fenómeno denominado "springback". La solución estaría en añadir elementos al útil que impidan el movimiento de estas zonas de la pieza.

3.7.1.2.- Desviaciones

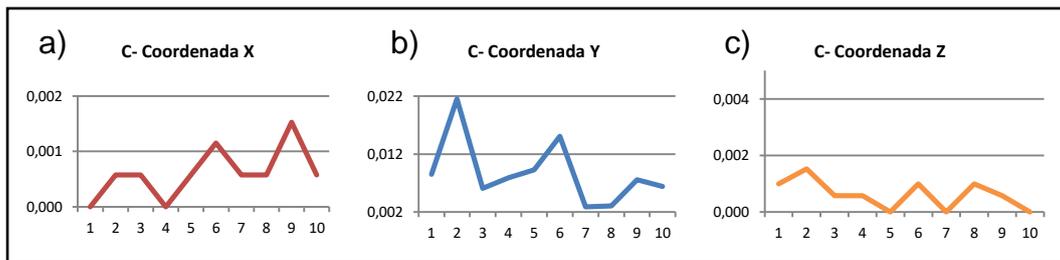
En las gráficas que se muestran a continuación están representadas las desviaciones obtenidas en cada pieza para cada punto medido por medio de la Ecuación 3 y la Ecuación 4. Están divididas en las tres coordenadas para poder evaluarlas. De esta manera se puede estudiar la precisión de las mediciones mediante este equipo.



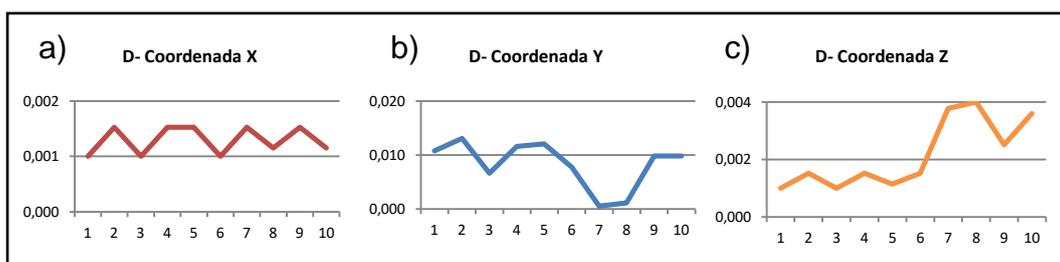
Gráfica 18.- Desviaciones en la pieza A con MMC: (a) coordenada X, (b) coordenada Y, (c) coordenada Z.



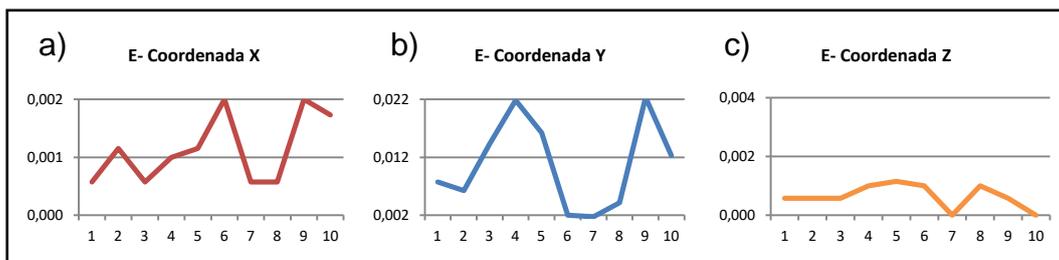
Gráfica 19.- Desviaciones en la pieza B con MMC: (a) coordenada X, (b) coordenada Y, (c) coordenada Z.



Gráfica 20.- Desviaciones en la pieza C con MMC.



Gráfica 21.- Desviaciones en la pieza D con MMC.



Gráfica 22.- Desviaciones en la pieza E con MMC.

Tras observar las gráficas, se establece que la desviación en la coordenada X y la Z es de 0,001 mm y en la Y de 0,008 mm, lo que implica que puede haber algún error en el eje Y.

Durante las mediciones en el eje Y se apreciaron sonidos inusuales, como si algunos de los patines neumáticos de la MMC no estuviese funcionando correctamente. Por lo tanto se debe contactar con el fabricante de la máquina y solicitar una revisión para averiguar si hay algún componente que esté fallando.

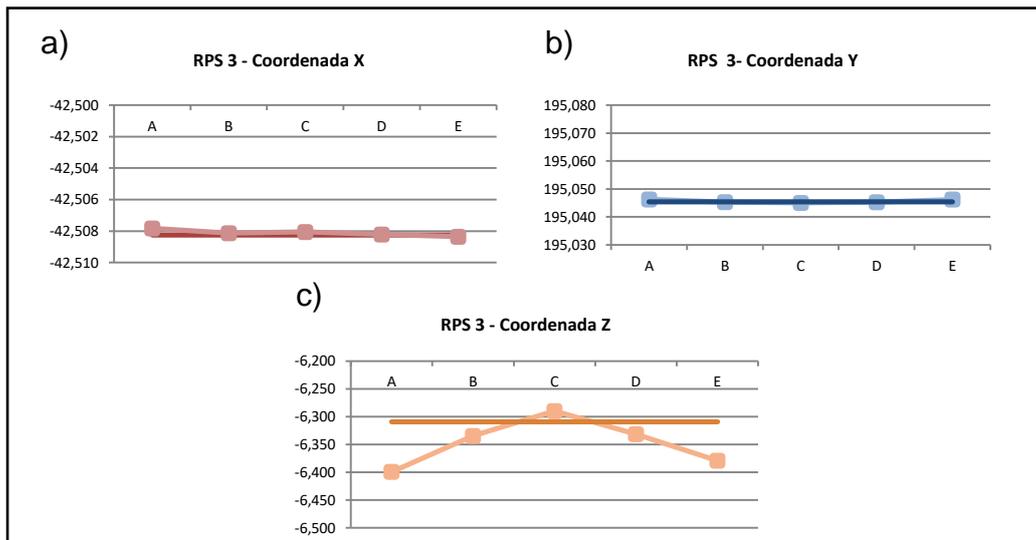
3.7.2.- Resultados de la medición con HANDYSCAN

El tiempo de medición es de unas 8 horas, con el tiempo de los preparativos y de la alineación posterior de las mallas obtenidas en las mediciones.

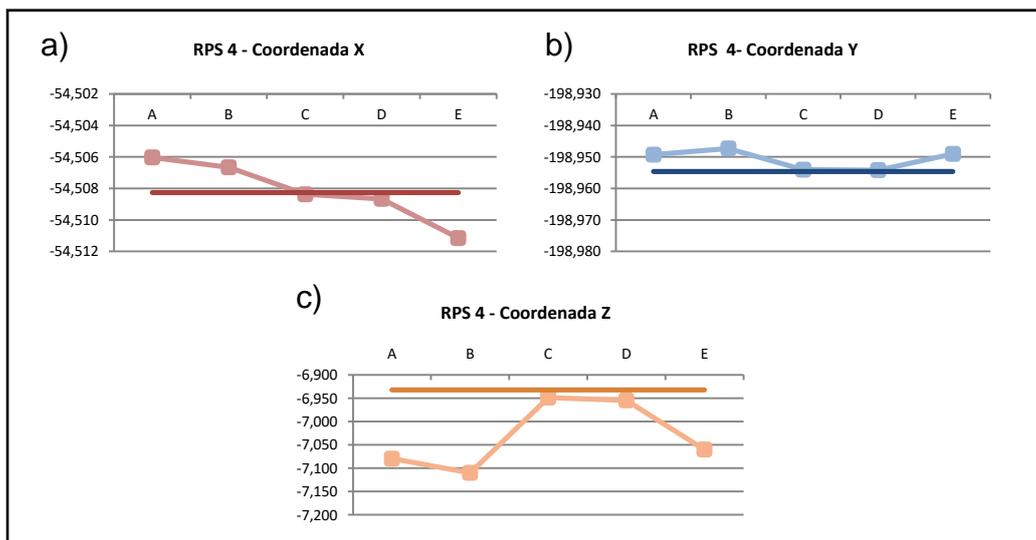
3.7.2.1.- Medias

Con los datos de las mediciones realizadas con el HandySCAN y por medio de la Ecuación 2 se obtienen las medias de las tres mediciones realizadas de cada coordenada y de las cinco piezas. Así se pueden comparar las diferencias encontradas en las diferentes piezas.

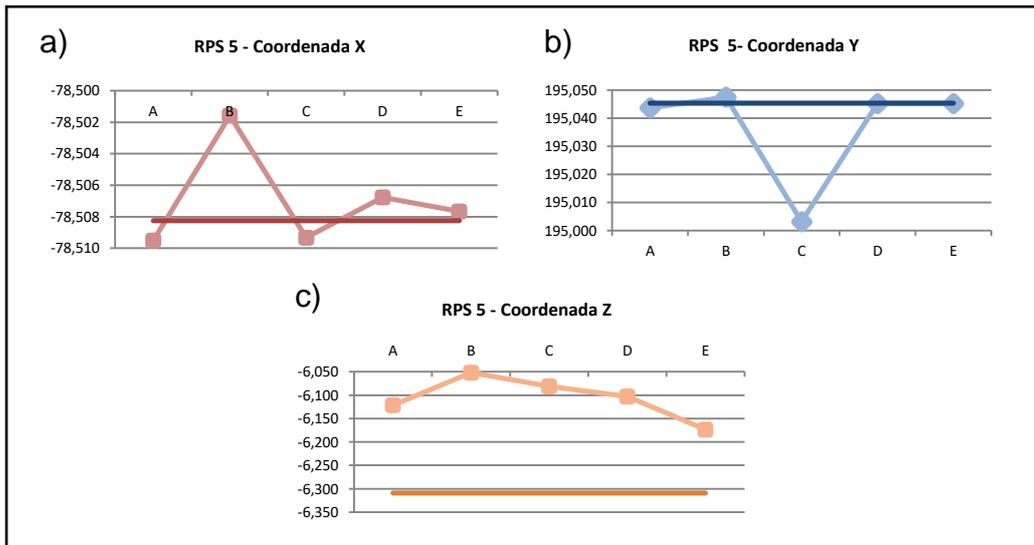
En las gráficas se han añadido los valores nominales de las coordenadas para poder valorar la precisión con la que mide el equipo. Las escalas de las gráficas son iguales para cada coordenada, sin embargo, hay alguna gráfica en las que el rango es diferente.



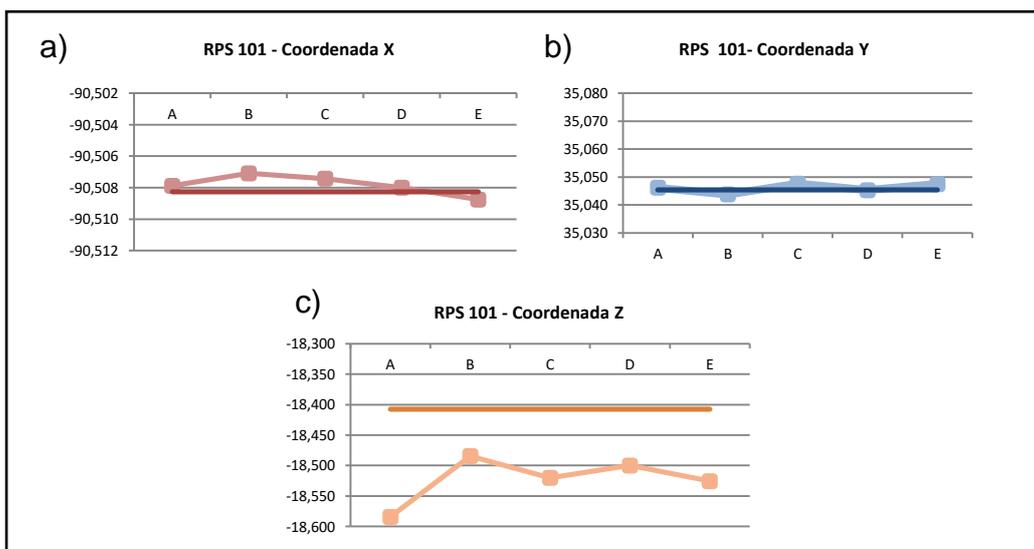
Gráfica 23.- Medias de las piezas en el RPS 3 con HandySCAN: (a) coordenada X, (b) coordenada Y,(c) coordenada Z.



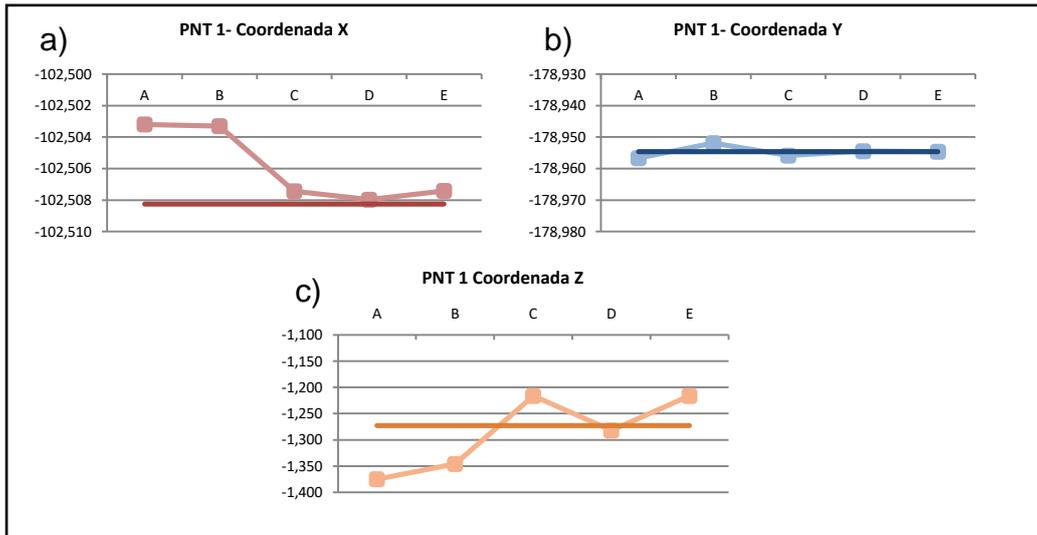
Gráfica 24.- Medias de las piezas en el RPS 4 con HandySCAN: (a) coordenada X, (b) coordenada Y,(c) coordenada Z.



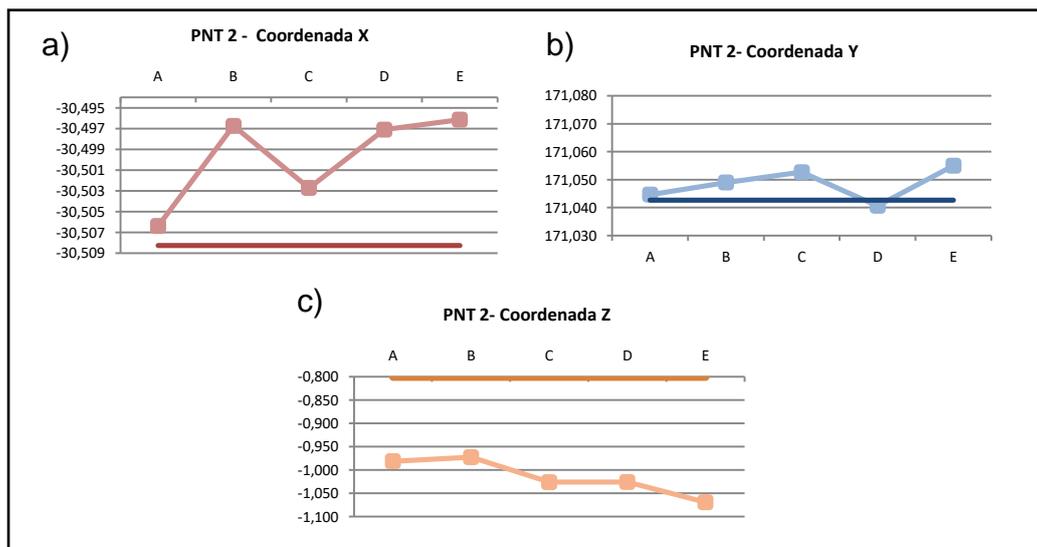
Gráfica 25.- Medias de las piezas en el RPS 5 con HandySCAN: (a) coordenada X, (b) coordenada Y, (c) coordenada Z.



Gráfica 26.- Medias de las piezas en el RPS 101 con HandySCAN: (a) coordenada X, (b) coordenada Y, (c) coordenada Z.

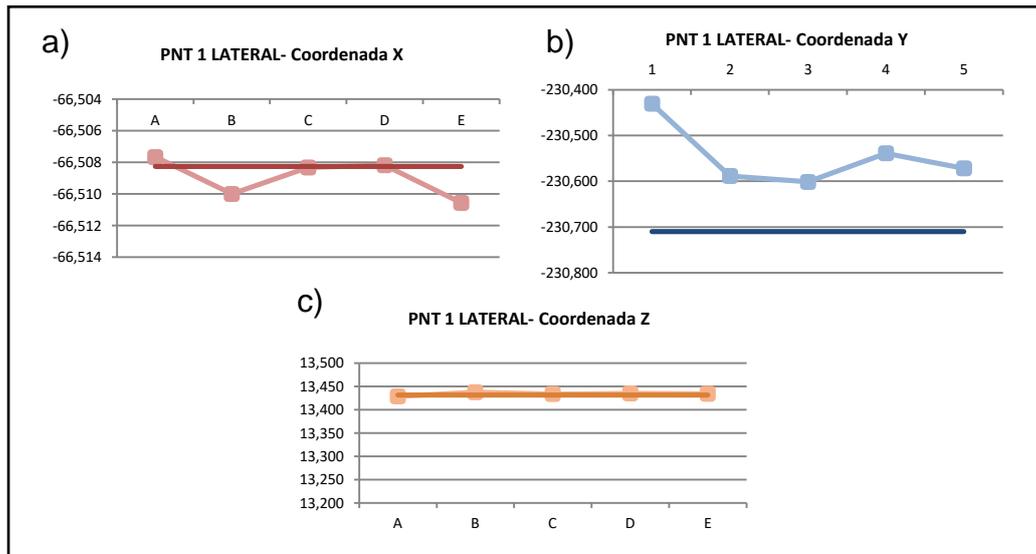


Gráfica 27.- Medias de las piezas en el PNT 1 con HandySCAN: (a) coordenada X, (b) coordenada Y,(c) coordenada Z.



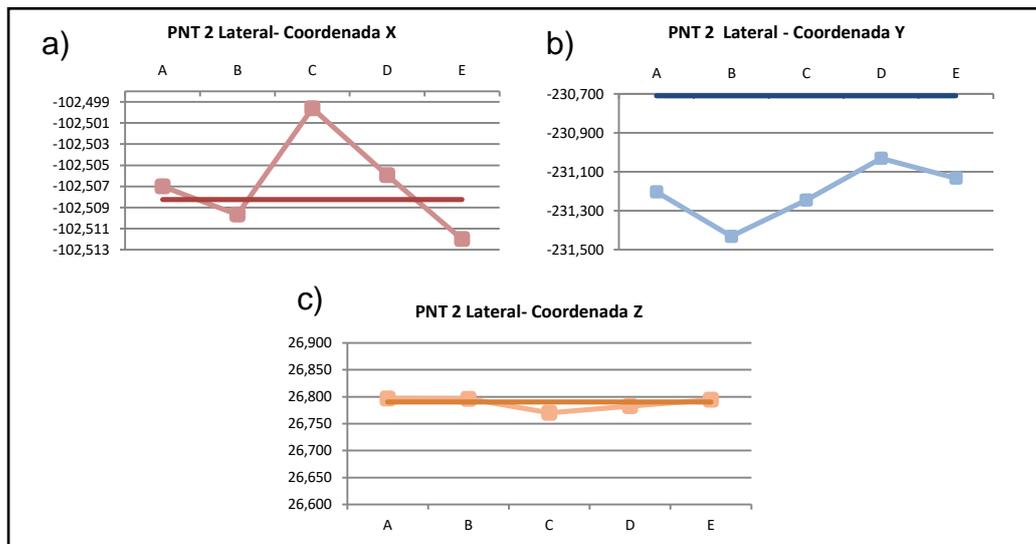
Gráfica 28.- Medias de las piezas en el PNT 2 con HandySCAN: (a) coordenada X, (b) coordenada Y,(c) coordenada Z.

En la gráfica del punto 2 en la coordenada X el rango es de 0,013 mm en vez de 0,01 mm, ligeramente mayor.



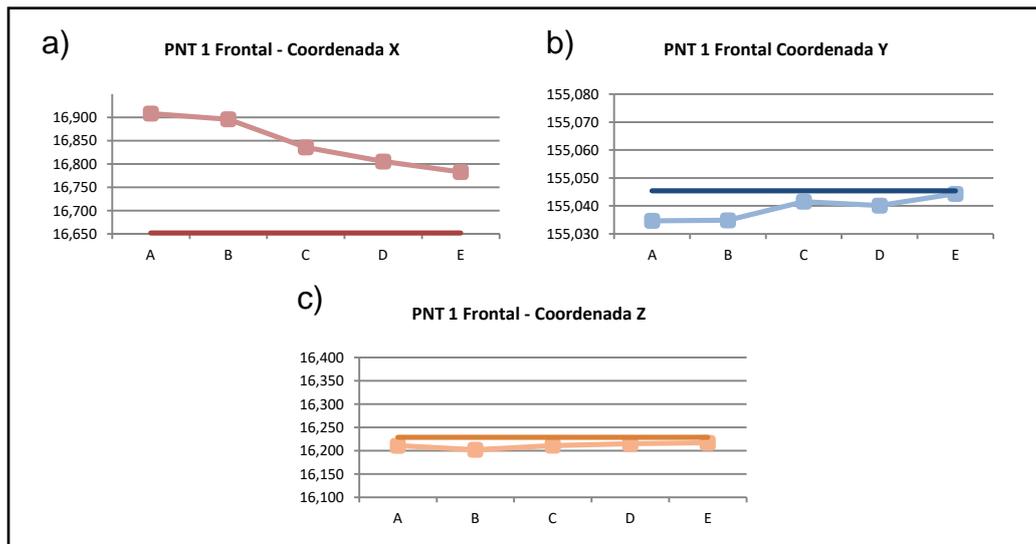
Gráfica 29.- Medias de las piezas en el PNT 1 Lateral con HandySCAN: (a) coordenada X, (b) coordenada Y,(c) coordenada Z.

En este caso es en la coordenada Y del punto 1 lateral en el que el rango varía, es 0,4 mm en vez de 0,05 mm como en el resto.

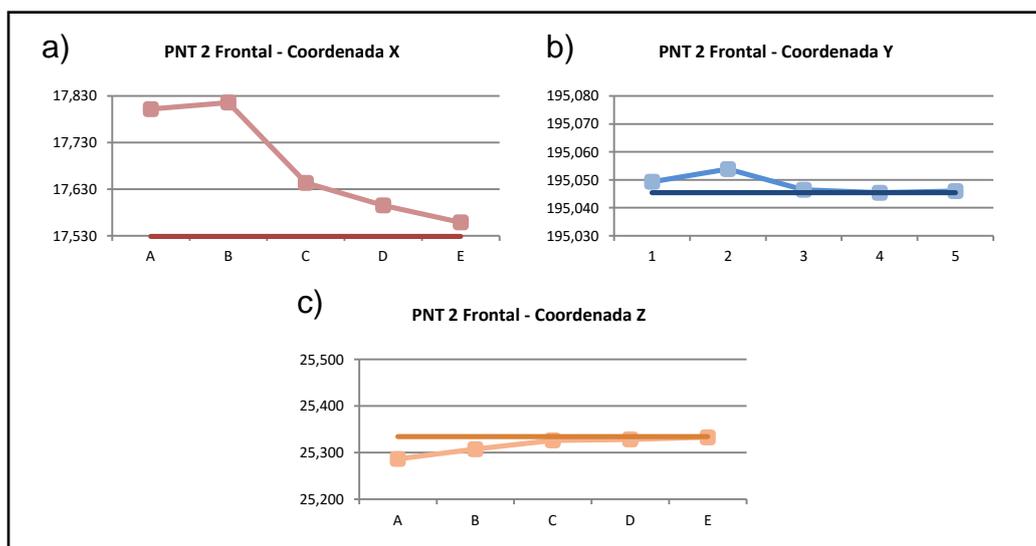


Gráfica 30.- Medias de las piezas en el PNT 2 Lateral con HandySCAN: (a) coordenada X, (b) coordenada Y,(c) coordenada Z.

Para el punto 2 lateral hay dos de las gráficas, la de la coordenada X y la de la Y en la que ha sido necesario variar el rango debido a que las medias se alejaban mucho más del valor nominal que el resto de los puntos. En la coordenada X se tiene un rango de 0,015 mm en vez de 0,01 mm, y en el caso de la coordenada Y se tiene un rango de 0,8 mm en vez de 0,05 mm, muy superior en el último caso.



Gráfica 31.- Medias de las piezas en el PNT 1 Frontal con HandySCAN: (a) coordenada X, (b) coordenada Y,(c) coordenada Z.



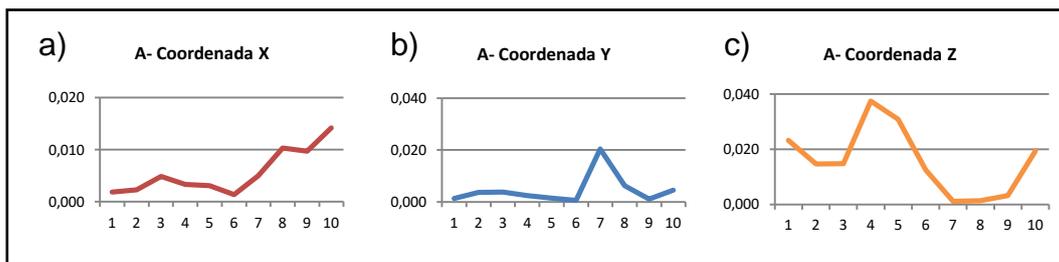
Gráfica 32.- Medias de las piezas en el PNT 2 Frontal con HandySCAN: (a) coordenada X, (b) coordenada Y,(c) coordenada Z.

Tanto en la gráfica del punto 1 lateral de la coordenada X, como en la del punto 2 lateral, se tiene un rango de 0,3 mm bastante superior a la del resto que es de 0,01 mm. Puede deberse a que la zona en la que se encuentran ambos puntos (plano frontal) haya recibido algún golpe y se haya deformado la pieza modificando las coordenadas.

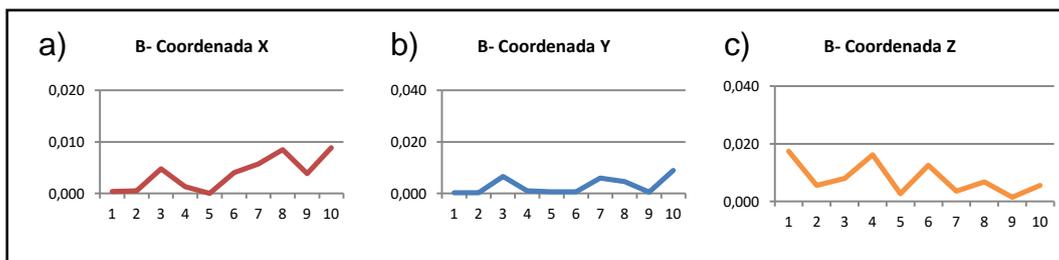
Estos últimos 4 puntos están situados en zonas sensibles a la deformación de la pieza. El espesor de la pieza es de 0,7 mm y los planos pueden sufrir ligeras deformaciones con pequeños golpes, por ello es importante tener cuidado al manipular las piezas.

3.7.2.2.- Desviaciones

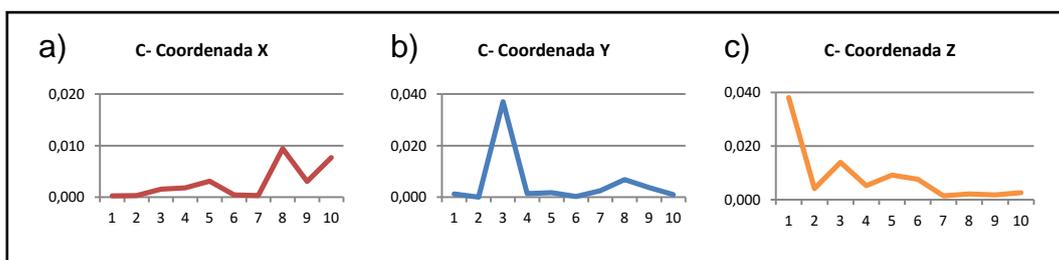
En las gráficas que se muestran a continuación están representadas las desviaciones obtenidas en cada pieza para cada punto medido por medio de la Ecuación 3. Están divididas en las tres coordenadas para poder evaluarlas. De esta manera se puede estudiar la precisión de las mediciones mediante este equipo.



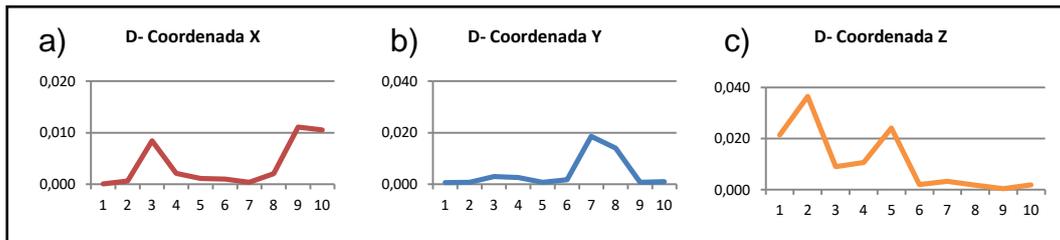
Gráfica 33.- Desviaciones en la pieza A con HandySCAN: (a) coordenada X, (b) coordenada Y, (c) coordenada Z.



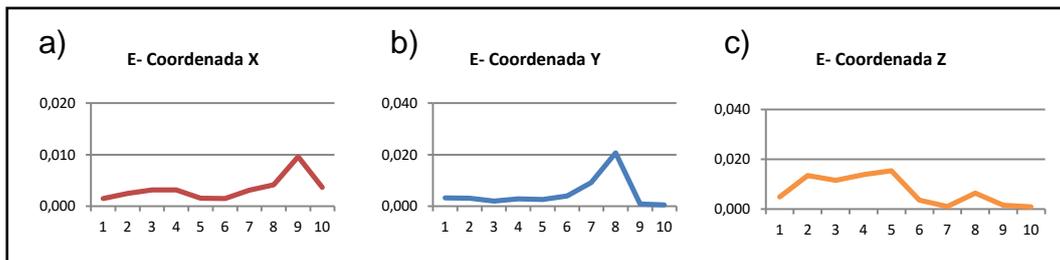
Gráfica 34.- Desviaciones en la pieza B con HandySCAN: (a) coordenada X, (b) coordenada Y, (c) coordenada Z.



Gráfica 35.- Desviaciones en la pieza C con HandySCAN: (a) coordenada X, (b) coordenada Y, (c) coordenada Z.



Gráfica 36.- Desviaciones en la pieza D con HandySCAN: (a) coordenada X, (b) coordenada Y, (c) coordenada Z.



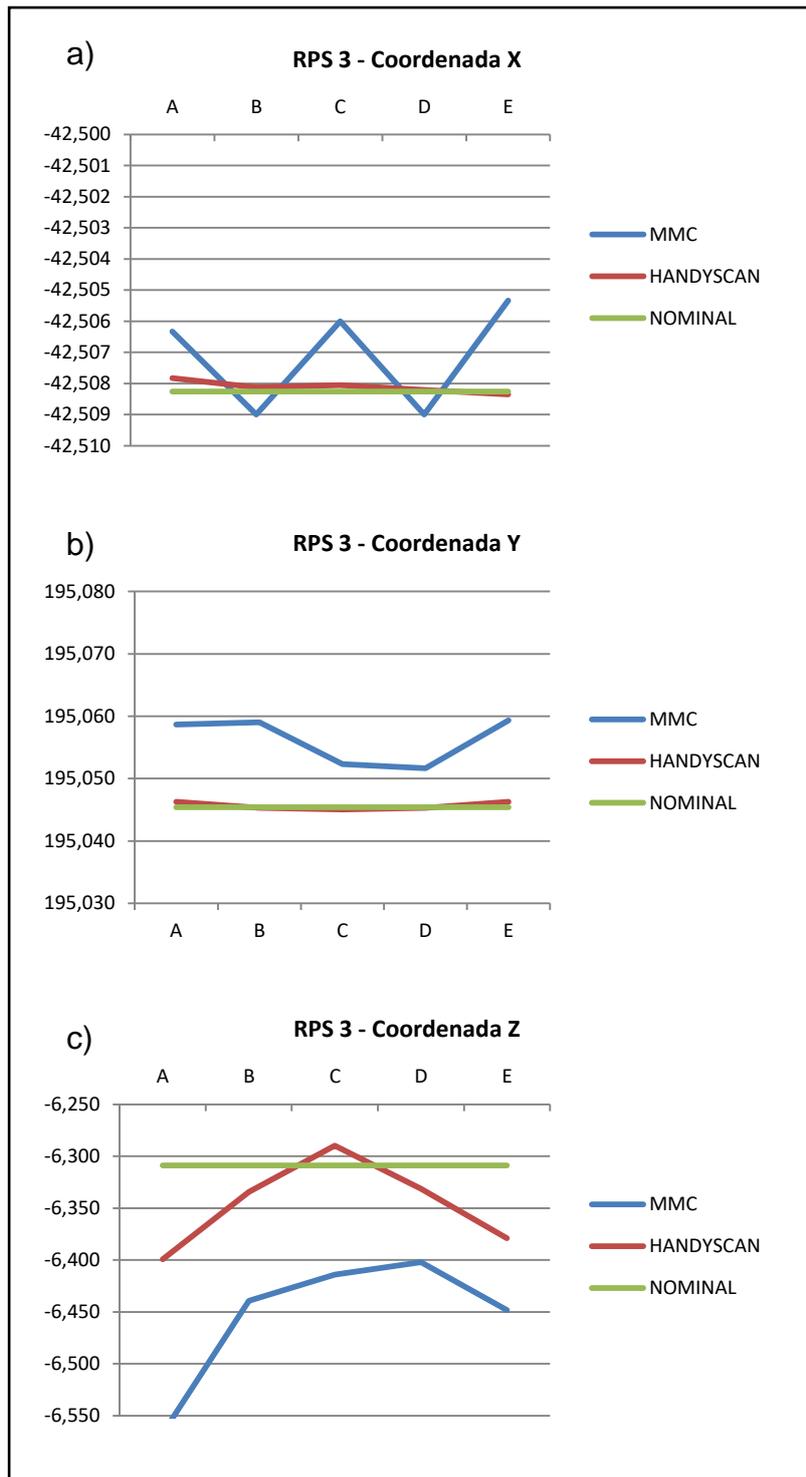
Gráfica 37.- Desviaciones en la pieza E con HandySCAN: (a) coordenada X, (b) coordenada Y, (c) coordenada Z.

Tras observar las desviaciones encontradas en cada una de las piezas, se observa que para la coordenada X su desviación está alrededor de 0,004 mm, para Y de 0,004 mm, y para la coordenada Z en torno al 0,01 mm.

Se puede observar que las desviaciones en la coordenada Z son mayores en comparación con las otras dos. Esto puede deberse a que la alineación ese eje no ha sido la correcta, al realizarse por volumen y con el método *Best Fit*, ha podido generar errores, ya que realiza la "mejor" aproximación posible.

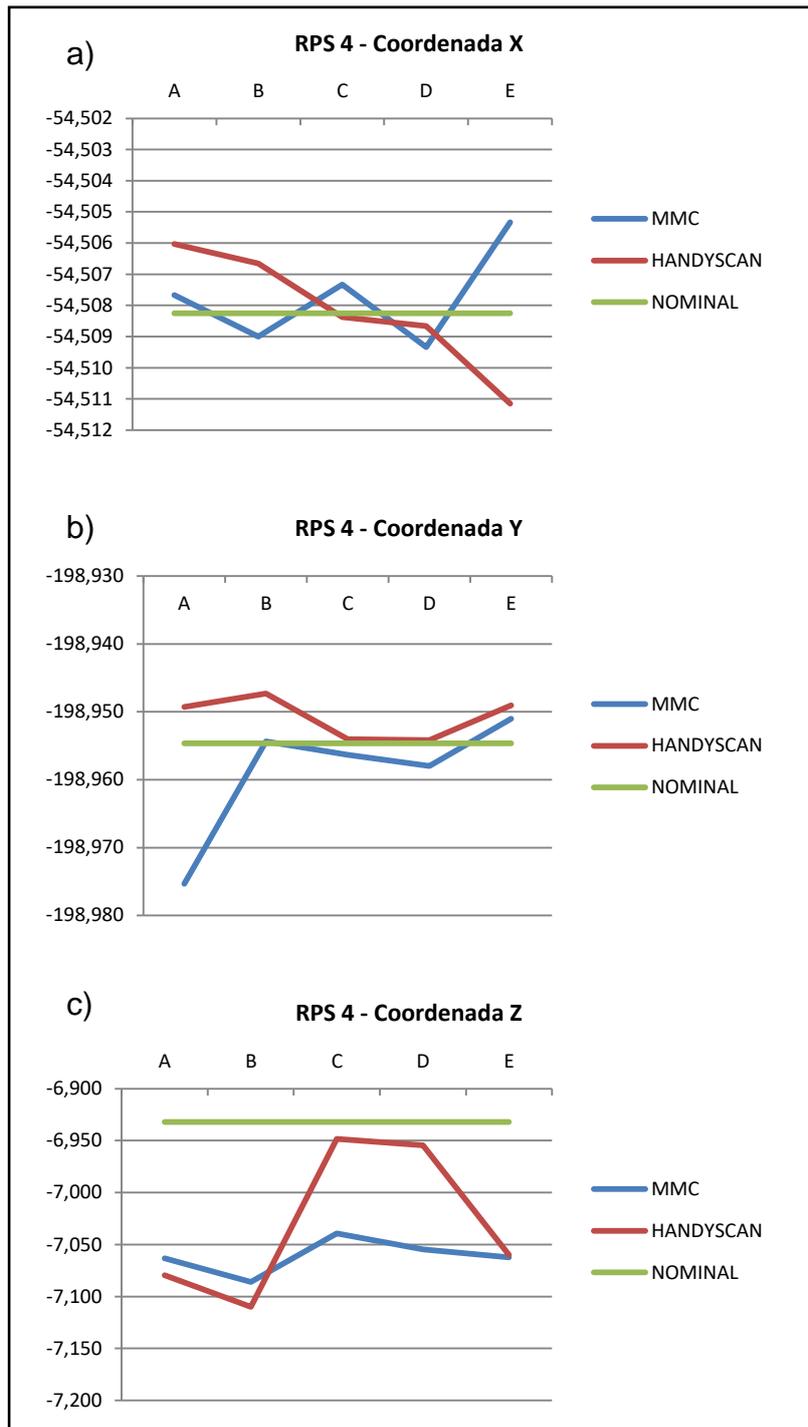
3.7.3.- Comparación de ambos sistemas

Para realizar la comparación entre ambas piezas se representa en las gráficas, las medias de las mediciones de cada pieza para cada equipo y también se ha añadido el valor nominal de los puntos. Así se podrá comparar cuál de los dos equipos mide con mayor precisión y exactitud. Las gráficas tienen el mismo rango para cada coordenada, sin embargo, hay casos excepcionales donde no se cumple pero se justifica posteriormente.



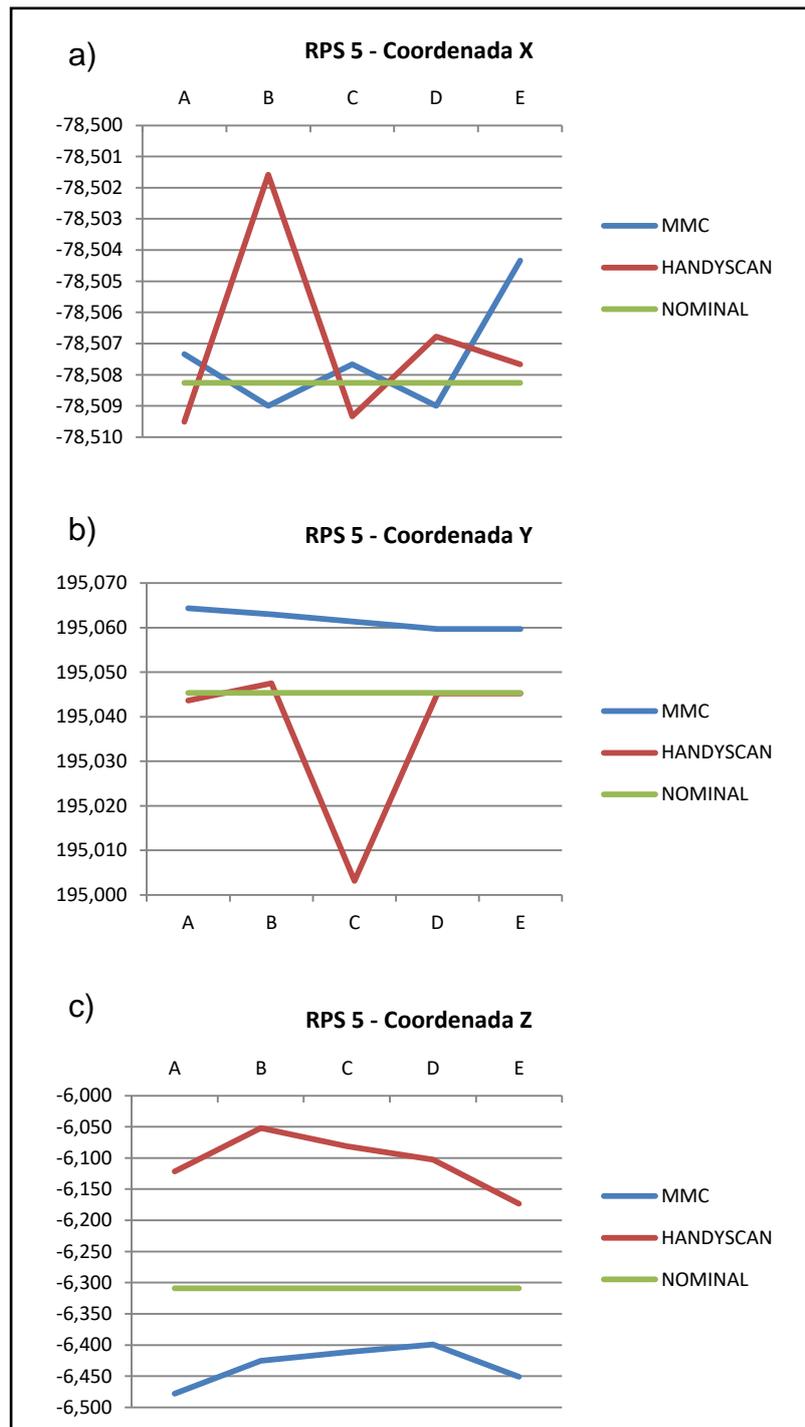
Gráfica 38.- Comparación entre equipos del RPS 3: (a) coordenada X, (b) coordenada Y, (c) coordenada Z.

Para el RPS 3, tras observar las gráficas, el HandySCAN es más exacto y preciso en sus mediciones ya que se aleja muy poco del valor nominal y la dispersión de los valores es menor.



Gráfica 39.- Comparación entre equipos del RPS 4: (a) coordenada X, (b) coordenada Y, (c) coordenada Z.

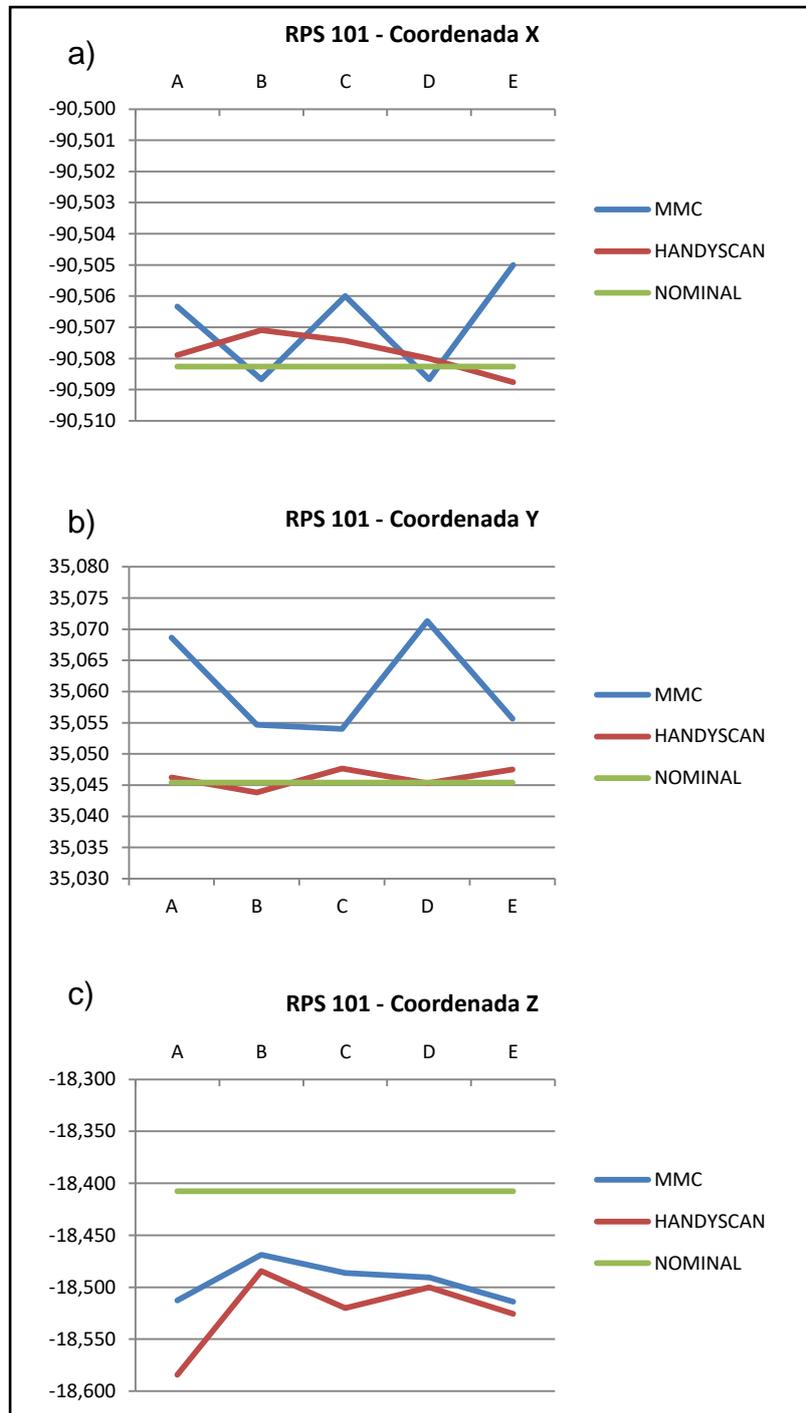
En la medición del RPS 4 no se puede determinar con exactitud cuál de los dos sistemas es más preciso o exacto en la medición de este punto debido a la similitud entre ambas representaciones.



Gráfica 40.- Comparación entre equipos del RPS 5: (a) coordenada X, (b) coordenada Y, (c) coordenada Z.

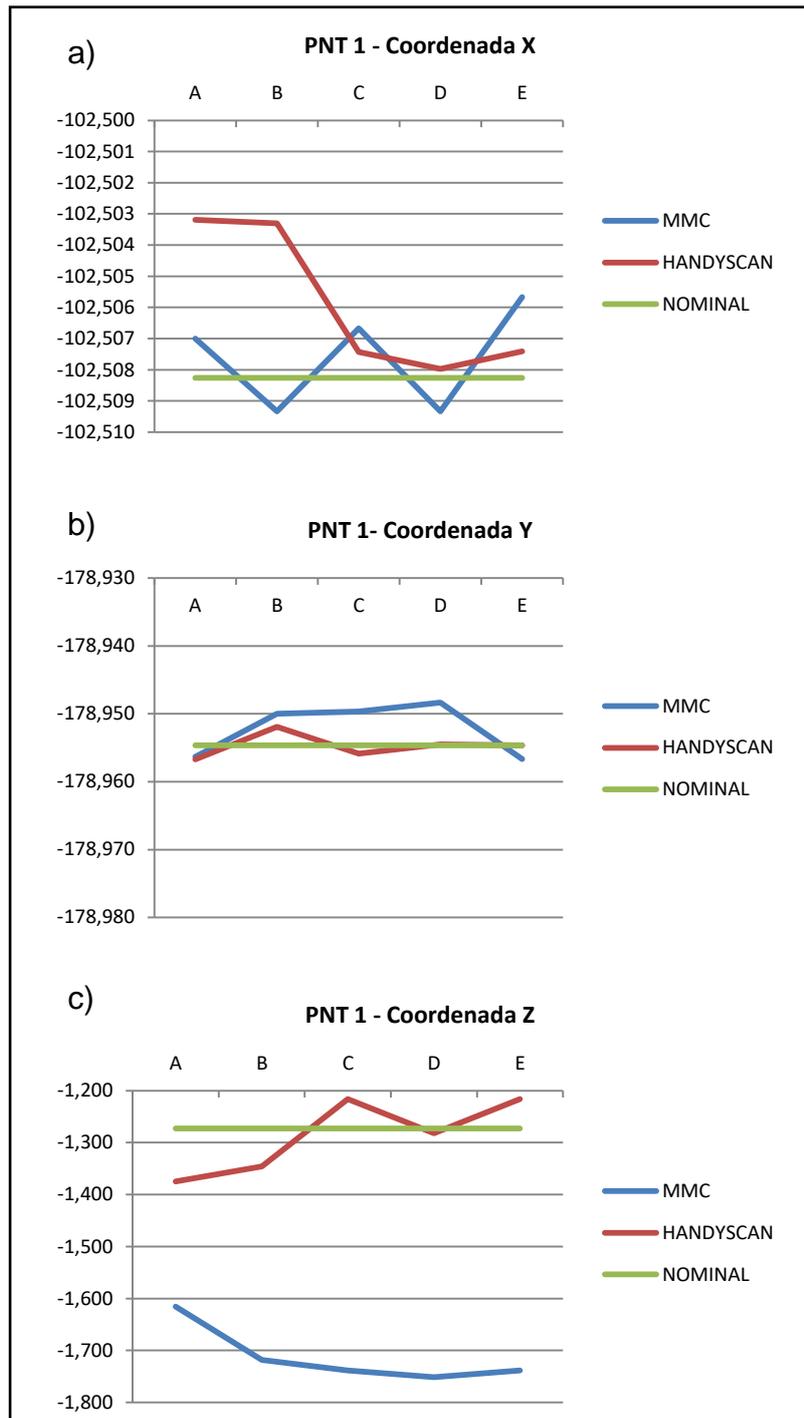
En las coordenadas Y y Z del RPS 5 ha sido necesario aumentar el rango de las gráficas, ya que los valores se alejaban más del valor nominal que en el resto de los casos. El rango en la Y, es de 0,07 mm en vez de 0,05 mm, y en el caso de la Z es de 0,5 mm en vez de 0,3 mm. En este punto es difícil valorar la

precisión y exactitud de los equipos debido a que ambas representaciones son muy parecidas.



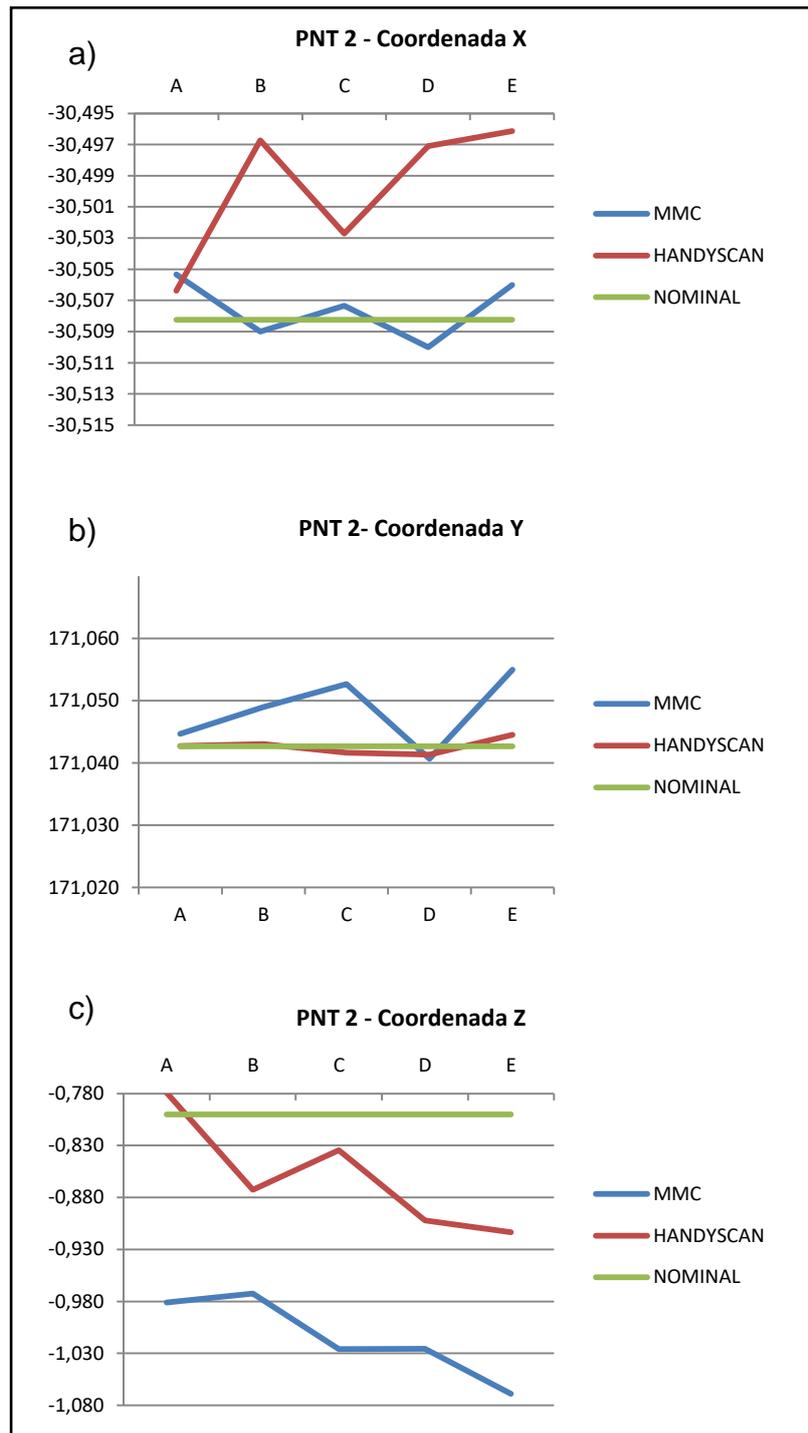
Gráfica 41.- Comparación entre equipos del RPS 101: (a) coordenada X, (b) coordenada Y, (c) coordenada Z.

Tras observar las gráficas del RPS 101 se determina que la MMC en la medición de este punto es menos precisa y menos exacta que el HandySCAN.



Gráfica 42.- Comparación entre equipos del PNT 1: (a) coordenada X, (b) coordenada Y, (c) coordenada Z.

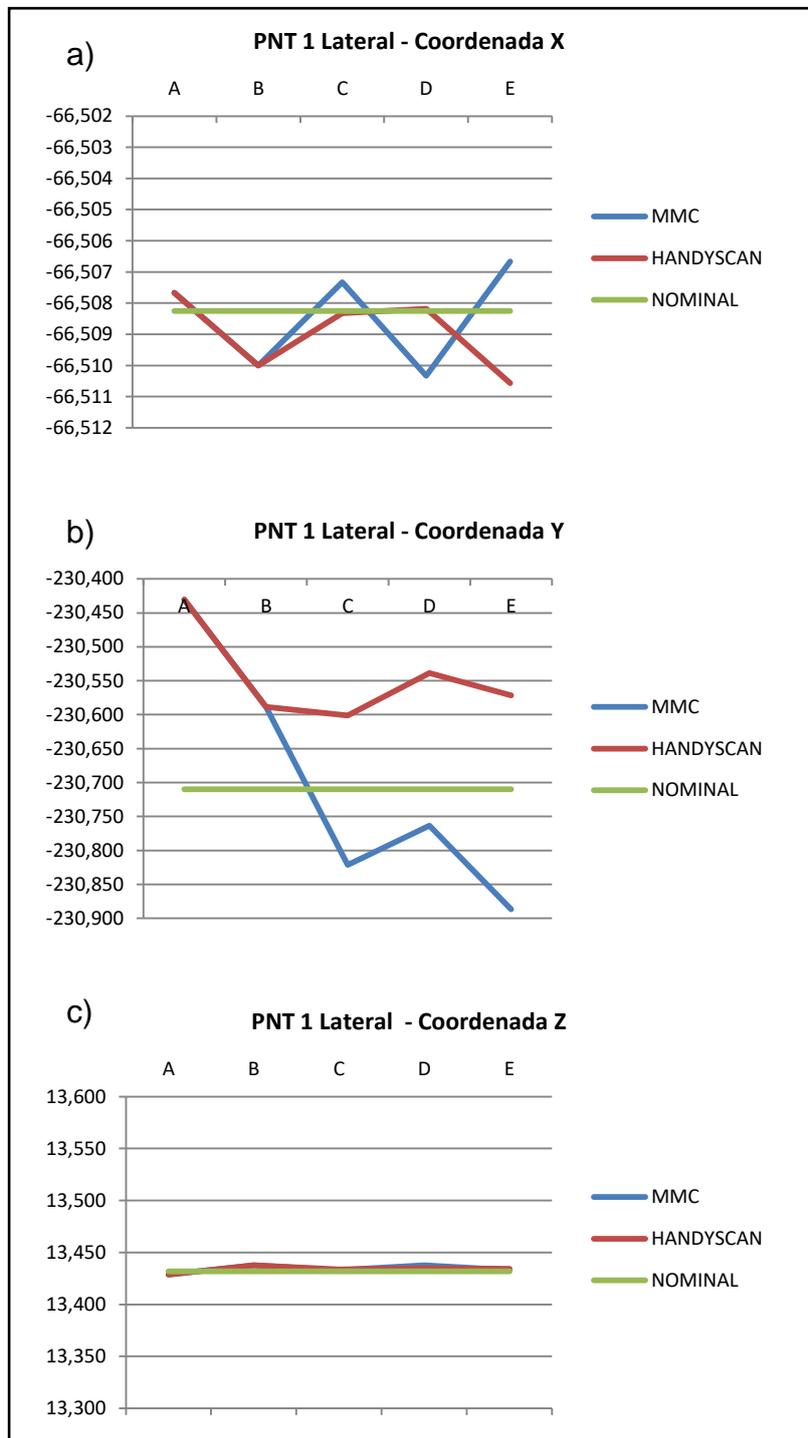
En la gráfica de la coordenada Z del punto 1 ha sido necesario aumentar el rango de la gráfica, los valores se alejaban más del valor nominal que en el resto de los puntos, es de 0,6 mm en vez de 0,3 mm. El HandySCAN es más preciso y exacto en la medición de este punto.



Gráfica 43.- Comparación entre equipos del PNT 2: (a) coordenada X, (b) coordenada Y, (c) coordenada Z.

En las coordenada X del punto 2 ha sido necesario aumentar el rango de las gráficas ya que los valores se alejaban más del valor nominal que en el resto de los casos, es de 0,02mm en vez de 0,01mm que tiene el resto. En la medición de este punto, en el eje X es más exacta la MMC, sin embargo en la

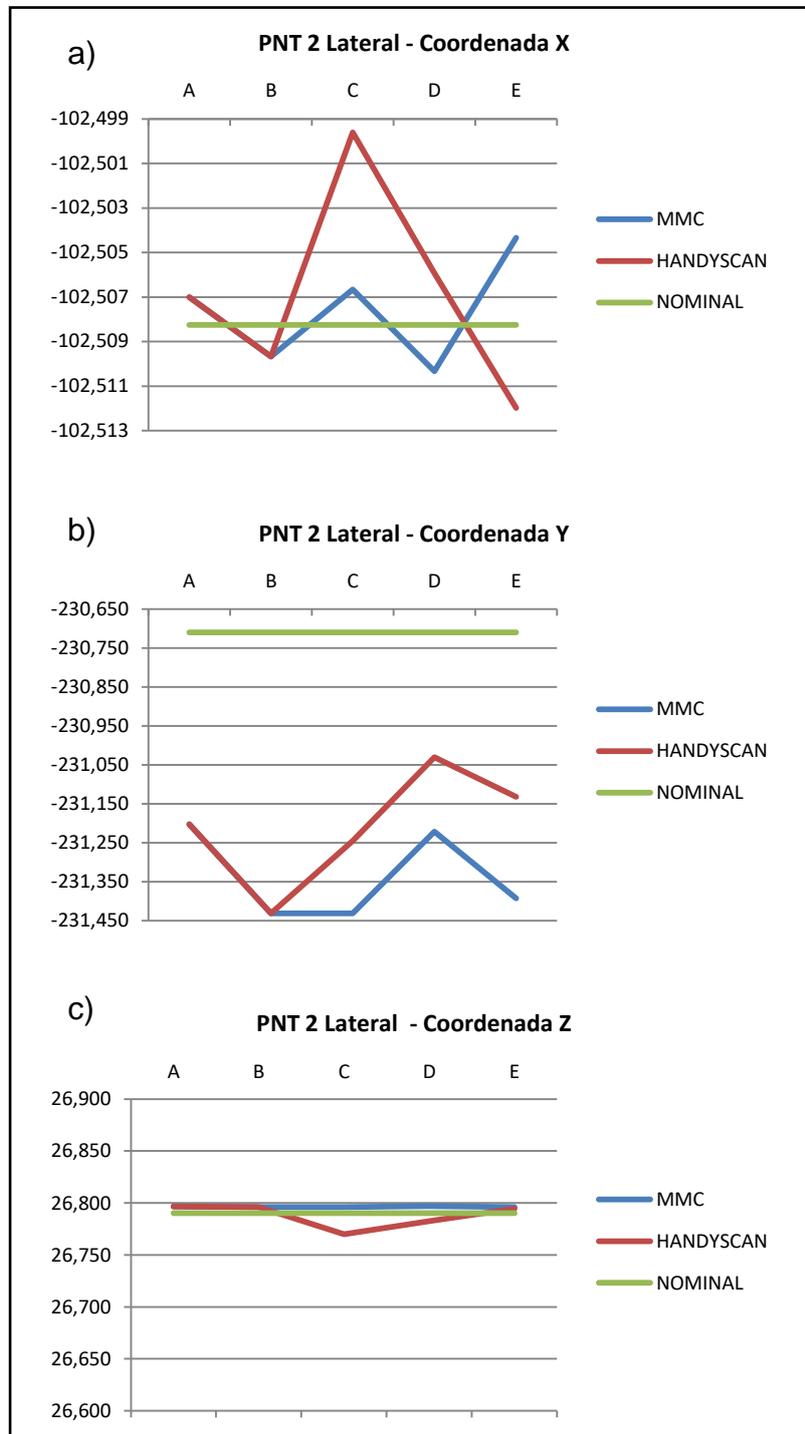
coordenada Y y Z es más exacto el HandySCAN. En cuanto a la precisión, ambos equipos tienen similar.



Gráfica 44.- Comparación entre equipos del PNT 1 Lateral: (a) coordenada X, (b) coordenada Y, (c) coordenada Z.

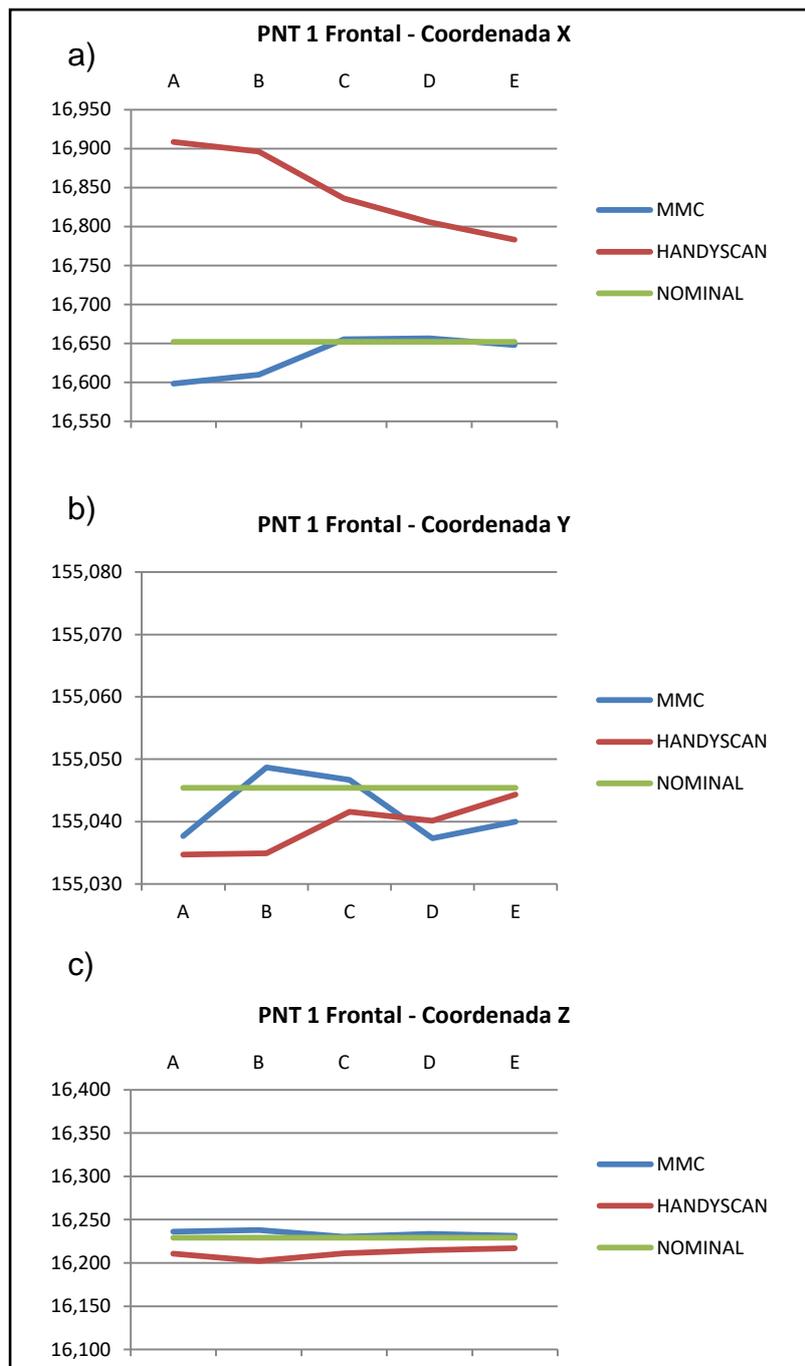
En las coordenadas Y del punto 1 lateral ha sido necesario aumentar el rango de las gráficas ya que los valores se alejaban más del valor nominal que en el

resto de los casos, es de 0,5mm en vez de 0,05mm que tiene el resto. Tras observar las gráficas, en este caso no es posible determinar cuál de los dos es más preciso o exacto.



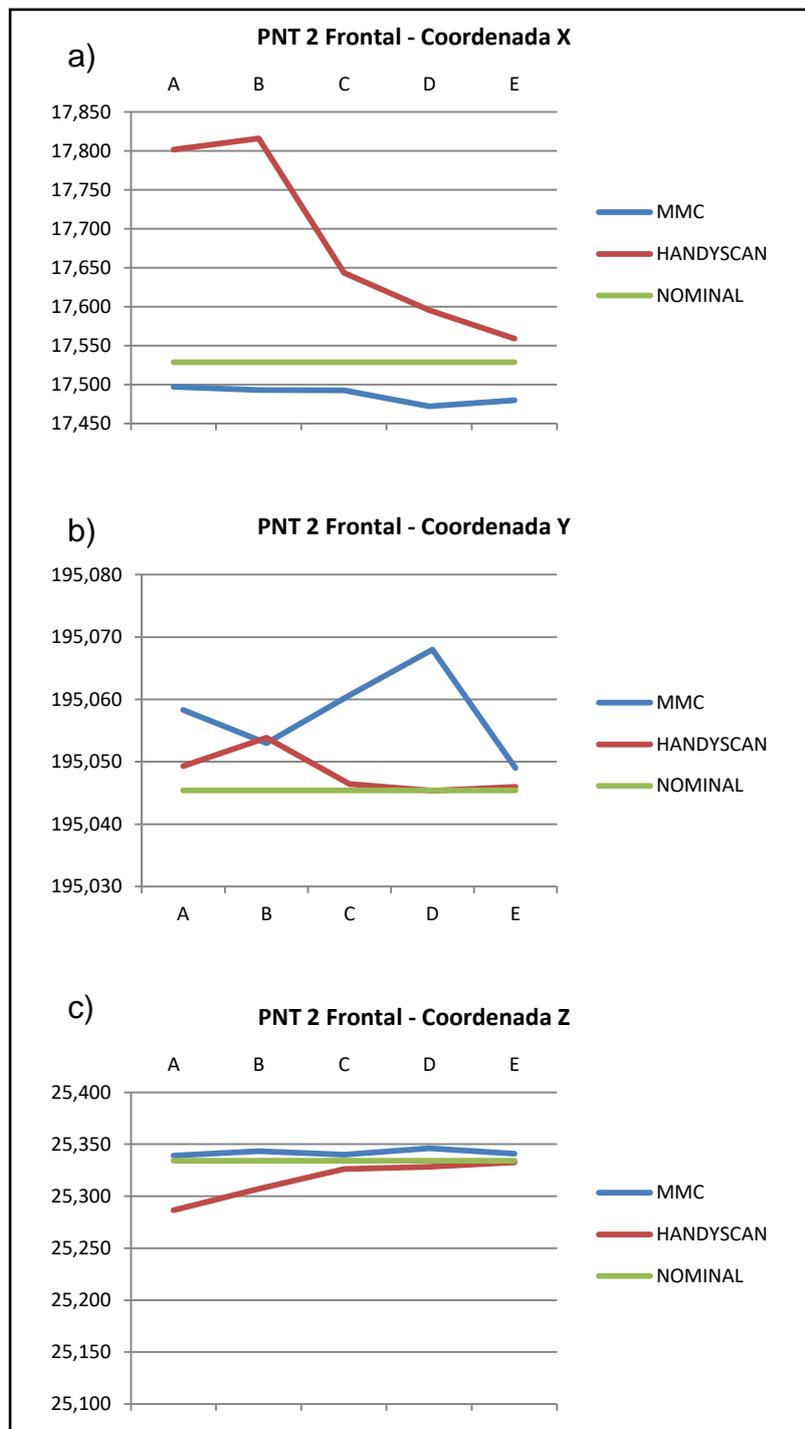
Gráfica 45.- Comparación entre equipos del PNT 2 Lateral (a) coordenada X, (b) coordenada Y, (c) coordenada Z.

En las coordenadas X e Y del punto 2 lateral ha sido necesario aumentar el rango de las gráficas los valores se alejaban más del valor nominal que en el resto de los casos: en la X es de 0,014 mm en vez de 0,01, y en la Y es de 0,08 mm en vez de 0,05 mm. En la medición de este punto es la MMC la que mide con mayor precisión, sin embargo en cuanto a exactitud no se puede determinar cuál es mejor.



Gráfica 46.- Comparación entre equipos del PNT 1 Frontal: (a) coordenada X, (b) coordenada Y, (c) coordenada Z.

En las coordenada X del punto 1 frontal ha sido necesario aumentar el rango de las gráficas ya que los valores se alejaban más del valor nominal que en el resto de los casos, es de 0,4mm en vez de 0,01mm que tiene el resto. Se debe a los valores de las mediciones del HandySCAN. Es más exacta y más precisa la MMC en la medición de este punto.



Gráfica 47.- Comparación entre equipos del PNT 2 Frontal: (a) coordenada X, (b) coordenada Y, (c) coordenada Z.

En las coordenada X del punto 2 frontal ha sido necesario aumentar el rango de las gráficas ya que los valores se alejaban más del valor nominal que en el resto de los casos, es de 0,4mm en vez de 0,01mm que tiene el resto. En la medición de este punto es difícil establecer cuál de los dos equipos es el más preciso y exacto.

Una vez observadas todas estas gráficas en las que se comparan la precisión y exactitud de ambos equipos se establece que el HandySCAN es más exacto en las mediciones, en cambio, la MMC es más precisa .

3.7.4.- Resultado Ingeniería Inversa

Tras la realización del modelo 3D de la pieza es interesante comprobar las desviaciones que se han encontrado. Tal como se puede observar en la siguiente figura, se han señalado algunas de las desviaciones máximas encontradas entre las superficies de ambas piezas.

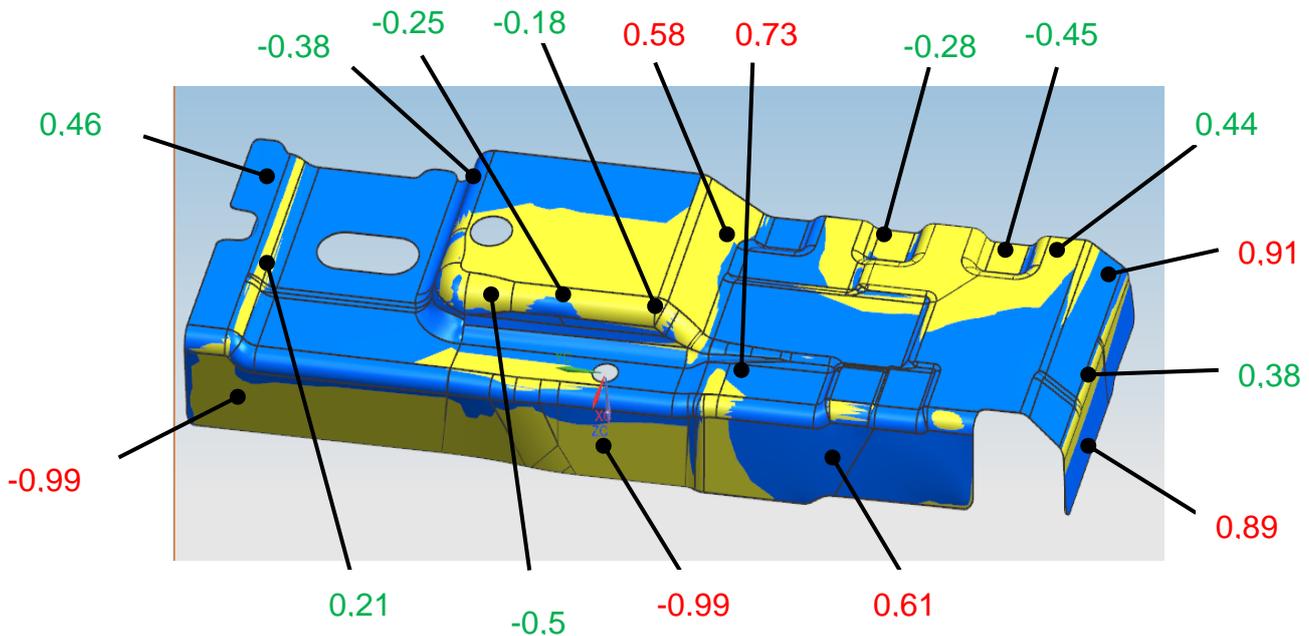


Figura 1.- Desviaciones con la pieza original.

Las desviaciones indicadas en verde son las que son menores de 0,5 mm, y las rojas las que superan este valor. Las zonas que se pueden observar en amarillo, son las zonas en las que la pieza generada por ingeniería inversa se encuentra por debajo, y cuando se pueden observar zonas azules significa que la pieza de ingeniería inversa se encuentra por encima de la original.

Las zonas donde la desviación es menor son las superficies paralelas al eje Z, durante el palpado de estas hay menos fuentes de error, la superficie es plana y el palpador sólo se desliza a lo largo de un eje. Las desviaciones pueden deberse al alineamiento y las imperfecciones de las superficies.

Sin embargo, se observan desviaciones que llegan hasta el milímetro, estas se encuentran mayormente en los laterales de las piezas, superficies inclinadas y curvas. Influyen varios factores durante la medición de estas zonas. El alineamiento puede ser una de las razones, pero mayormente el error en la medición se debe a que durante el palpado hay deslizamiento en los tres ejes, ya que el desplazamiento del palpador es perpendicular a la superficie a medir. Otro motivo para que el error sea tan alto es la propia geometría de la pieza, las zonas inclinadas han podido sufrir deformaciones al recibir algún golpe por su pequeño espesor.

Realizar el proceso de ingeniería inversa con un sistema de palpado como es el de la máquina de medir por coordenadas, no es un proceso sencillo, lleva mucho trabajo crear todas las superficies con tan pocos puntos. Mediante los escáneres láser 3D, esta tarea es más sencilla al disponer de una mayor densidad de puntos con los que crear las superficies.

3.7.5.- Resultado Incertidumbre

En la Tabla 6 y en la Tabla 7 se muestran un resumen de los valores obtenidos una vez realizado todos los cálculos anteriores para ambos equipos.

Tabla 5.- Incertidumbre de la MMC

	MMC		
	σ	$u (\mu m)$	$U (\mu m)$
X	0,0010	1	2
Y	0,0075	8	16
Z	0,0012	1	2

En el caso de la MMC la incertidumbre expandida de la MMC es de 2 micras en la coordenada X y Z, sin embargo la de la coordenada Y llega hasta las 16 micras. Este resultado hace necesaria una revisión de los mecanismos del eje Y tanto desde el punto de vista mecánico como electrónico ya que ésta es muy superior a las otras dos.

Tabla 6.- Incertidumbre del HandySCAN.

	HandySCAN		
	σ	$u (\mu m)$	$U (\mu m)$
X	0,0042	4	8
Y	0,0064	6	12
Z	0,0107	9	18

Las incertidumbres del HandySCAN son menores en la coordenada X (8 micras), un poco mayores en la Y (12 micras), y por último en la coordenada Z, la mayor (18 micras). La justificación a que esta sea más elevada en esta coordenada se debe principalmente al proceso de alineamiento, en el que debido a las superficies inclinadas y las superficies curvas se han podido generar errores.

3.7.6.- Resultado Tolerancias

En la Tabla 8 y la Tabla 9 se pueden observar un resumen de los valores obtenidos una vez realizado todos los cálculos para ambos equipos.

Tabla 7.- Tolerancias en la MMC.

	MMC		
	X	Y	Z
T	$\pm 0,01$	$\pm 0,09$	$\pm 0,01$

Tabla 8.- Tolerancias en el HandySCAN.

	HandySCAN		
	X	Y	Z
T	$\pm 0,04$	$\pm 0,06$	$\pm 0,09$

Con el valor de la tolerancia se determina con que grado de fiabilidad pueden medir ambos sistemas. Las tolerancias de la MMC son estrictas, son de un valor de una centésima de milímetro en los ejes X y Z, y de 9 centésimas en el eje Y. Se puede suponer que la MMC puede medir tolerancias de 1 centésima en todos los ejes, ya que el valor del eje Y se debe al fallo en algún componente mecánico. En el HandySCAN se obtienen tolerancias más amplias de unas 5 centésimas de milímetro aproximadamente.

3.8.- Propuesta técnica

3.8.1.- Introducción

Después de observar los resultados obtenidos y las conclusiones de los mismos, se realiza una propuesta técnica ya que puede ser interesante conocer qué ventajas o desventajas tienen estos equipos y cuál sería el idóneo para la aplicación en la que se esté interesado utilizarlo.

3.8.2.- Factores Influyentes

Hay numerosos factores que influyen en la elección de un instrumento de medida, en este apartado se han valorado aquellos que se consideran que pueden tener mayor influencia en la elección.

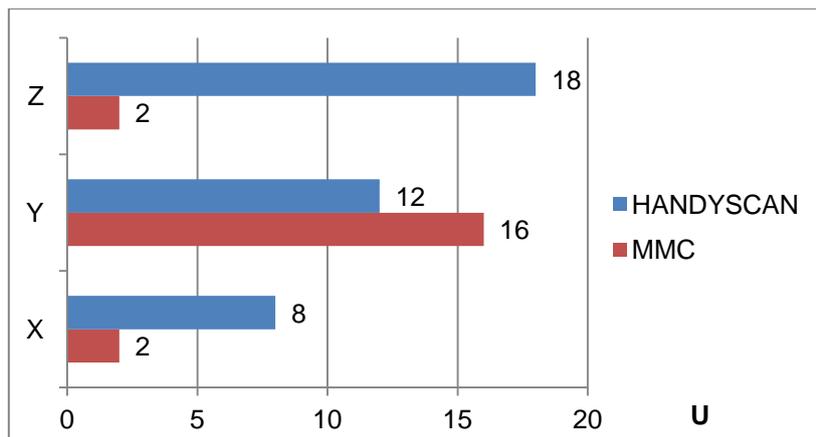
3.8.2.1.- Precisión y Exactitud

Tras observar los resultados en el apartado anterior se puede determinar que el HandySCAN es más exacto que la MMC, esto quiere decir que los valores de las mediciones se acercaban más al valor nominal. El motivo principal por el que hay esta diferencia en la exactitud de los sistemas se debe al método de alineamiento utilizado en la MMC, se ha realizado mediante la medición de tres planos. El método de alineamiento del HandySCAN es por volumen, y aún existiendo otros métodos de alineamiento este es más exacto que el utilizado por la MMC.

En cuanto a la precisión, se establece que la MMC es más precisa que el HandySCAN. Los valores medidos por la MMC tienen una menor dispersión que los obtenidos con el escáner láser.

3.8.2.2.- Incertidumbre

En la gráfica a continuación se pueden observar los valores de las incertidumbres obtenidas en cada coordenada para ambos equipos.



Gráfica 48.- Incertidumbres de los sistemas de medición.

En el caso de la MMC la incertidumbre es menor que en el HandySCAN, ya que las desviaciones encontradas en las mediciones son menores en la MMC. En el eje Y de la MMC se ha recomendado una revisión de los componentes mecánicos para alcanzar los valores de incertidumbre de los otros ejes. En cuanto a las incertidumbres del HandySCAN se deben principalmente al método de alineamiento utilizado, hay otros métodos con los que se obtendrían menor incertidumbre.

3.8.2.3.- Tiempo de medición

Variará el tiempo de medición dependiendo del tamaño, cuánto más grande sea el objeto a medir, más tiempo llevará completar la medición. En este caso influirá más en la MMC, ya que si hay que palpar muchos puntos de la superficie de la pieza aumentará el tiempo de medición considerablemente.

Sin embargo, si lo que se necesita comprobar son pequeñas dimensiones o pocos puntos, la MMC será mucho más rápida en este caso. El HandySCAN escanea toda la pieza, luego a posteriori es cuando se decide qué puntos se eligen o qué elementos geométricos son los que se quieren estudiar.

3.8.2.4.- Tamaño de las piezas

En la MMC el tamaño de las piezas es limitado, depende del VUT de la máquina. En la utilizada en este estudio las piezas que se pueden medir son de tamaño medio o pequeño.

Mediante el HandySCAN las piezas que se pueden medir son tanto pequeñas como grandes, desde un soporte de amortiguador hasta, por ejemplo, un coche.

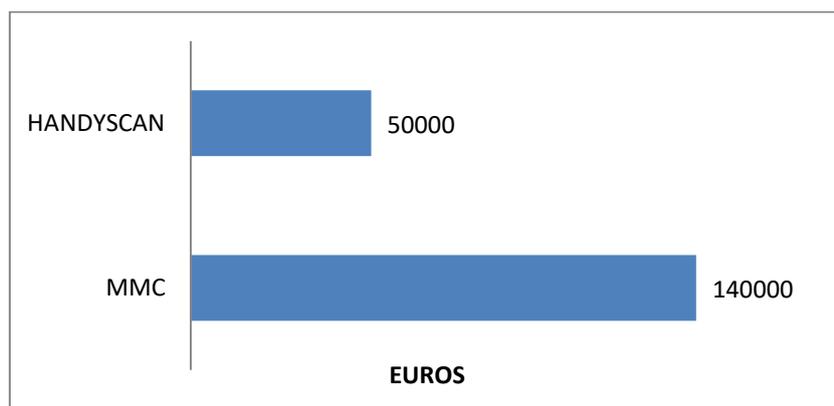
3.8.2.5.- Portabilidad

La MMC no se puede mover, es estática, su tamaño es muy grande y tiene que estar situada a poder ser en un laboratorio donde las condiciones ambientales sean las adecuadas.

El HandySCAN en cambio, es un instrumento portátil, es su principal característica. Es de fácil transporte y la puesta a punto del equipo para comenzar las mediciones no requiere mucho tiempo. A su vez, este equipo se adapta a las condiciones ambientales, aunque sigue teniendo unos límites que hay que tener en cuenta.

3.8.2.6.- Precio

En cuanto al precio de los equipos, la MMC es mucho más cara que el HandySCAN. Para comprar una MMC hay que realizar una gran inversión mientras que el escáner láser es más asequible. De todas formas, cada empresa tendrá que valorar sus prioridades, atendiendo a los factores explicados anteriormente.



Gráfica 49.- Precio de los equipos.

3.8.3.- Conclusiones

Ambos sistemas son buenos sistemas de medición, sin embargo, dependiendo de la aplicación para la que se quiera utilizarlo será preferible utilizar uno u otro.

El HandySCAN es más adecuado para mediciones in-situ, en las zonas de producción, ya que son portátiles y se puede desplazar fácilmente. Las máquinas medidoras de coordenadas en cambio, deben estar situadas en laboratorios y se utilizan para mediciones que impliquen mayor responsabilidad legal.

3.9.- Valoraciones generales y líneas futuras

En líneas generales, se puede establecer que cada sistema cubre ámbitos de trabajo bien diferenciados. Si lo que se busca es precisión y niveles de tolerancia estrechos, es la máquina de medir por coordenadas la elección que se debe tomar. Al contrario, si lo que se busca es movilidad y gran cantidad de datos de los objetos a medir, es mejor elegir los sistemas ópticos, como lo es el HandySCAN.

En cuanto a posibles estudios que se puedan realizar para continuar este mismo hay posibles opciones:

- Estudio de la influencia del alineamiento en la exactitud de cada sistema. Éste se podría desglosar en dos, depende de la profundización en el tema.
- Estudio de los factores influyentes en la incertidumbre del sistema óptico. Debido a las diferencias encontradas en los valores de incertidumbre de los diferentes ejes.
- Estudio de la influencia de los sistemas de fijación o amarre en la variabilidad de los resultados de medición.