

AGRADECIMIENTOS: Mis más sinceros agradecimientos a Raf Putseys, F. Hoben, H. Lettenbauer, Josef Wanner, B. Georgi, Jörg Schmidt, Stephan Tomaschko, Andreas Bucher y todos aquellos compañeros de Carl Zeiss que han hecho posible esto. A José Antonio Yagüe por su gran apoyo, a mi madre, padre, hermanos y familia porque les quiero y especialmente a Luis por su incondicional ayuda durante toda la carrera.



Proyecto Final de Carrera  
Ingeniería Industrial  
Centro Politécnico Superior  
Universidad de Zaragoza



Título: ANÁLISIS DE LA PRECISIÓN  
Y ESTUDIO DE LAS FUENTES DE ERROR  
DE LA MÁQUINA DE TOMOGRAFÍA DIMENSIONAL  
METROTOM



Realizado por: **Vanesa Andreu Ibáñez**  
Director en la empresa Carl Zeiss (Oberkochen, Alemania): **Bernd Georgi**  
Ponente en la Universidad de Zaragoza: **José Antonio Yagüe**  
**Dpto. de Ingeniería de Diseño y Fabricación**  
Mención: **Producción**  
Curso: **2006-2007**



# Índice

<b>Memoria .....</b>	<b>3</b>
<b>Introducción .....</b>	<b>4</b>
<b>Capítulo 1: Descripción de la máquina Metrotom, principio básico, manejo y aplicaciones.....</b>	<b>7</b>
1.1    Principio básico de funcionamiento .....	8
1.2    Método general en el manejo del aparato.....	9
1.3    Aplicaciones.....	10
<b>Capítulo 2: Descripción de ensayos realizados.....</b>	<b>12</b>
2.1    Patrones utilizados.....	12
2.2    Reproducibilidad y Repetibilidad en la medida.....	13
2.3    Representación de resultados: Gráficas trompeta .....	13
2.4    Características de pieza medidas y acotación de sus errores.....	14
<b>Capítulo 3: Clasificación y Análisis de las fuentes de influencia en el error               de medición con máquinas Metrotom.....</b>	<b>17</b>
3.1    Fuentes de influencia durante el proceso de tomografiado.....	19
3.1.1    Aparato .....	19
3.1.2    Pieza .....	24
3.1.3    Operario .....	25
3.1.4    Ambiente:.....	27
3.2    Fuentes de influencia durante el proceso de Reconstrucción .....	27
3.2.1    Software.....	28
3.2.2    Parámetros.....	28
3.3    Fuentes de influencia durante el proceso de valoración .....	29
3.3.1    Estrategia de medición .....	30
3.3.2    Valores Nominales.....	31
3.3.3    Software.....	31
<b>Capítulo 4: Análisis sobre las 4 Características de pieza E, PS, CR y acotación de               sus de errores <math>MPE_E</math>, <math>MPE_{PF+PS}</math>, <math>MPE_{CR}</math> .....</b>	<b>35</b>
4.1    Desviación en longitudes E y acotación de su error $MPE_E$ .....	36
4.2    Desviación en forma y tamaño PF, PS y acotación de su error $MPE_{(PF+PS)}$ .....	38
4.3    Desviación de Radios CR y acotación de su error $MPE_{CR}$ .....	40
<b>Capítulo 5: Aplicación de las conclusiones empíricas para la elaboración               de la nueva norma-recomendación técnica: VDI/VDE 2630               "Tomografía computarizada en metrología industrial" .....</b>	<b>41</b>

Capítulo 6: <b>Elaboración de “Test de Aceptación” (Carl Zeiss) para la máquina</b> .....	43
Capítulo 7: <b>Conclusiones</b> .....	44
<b>Bibliografía</b> .....	46
<b>Anexos</b> .....	48
Anexo I: Definiciones .....	49
Anexo II: Ensayos sobre plato de 27 esferas .....	52
Anexo III: Ensayos sobre juego de varillas con esferas.....	61
Anexo IV: Ensayos sobre Esferas.....	66
Anexo V: Ensayos realizados sobre placa de esferas huecas.....	74
Anexo VI: Ensayos realizados sobre placa de esferas macizas .....	79
Anexo VII: Ensayos realizados sobre pirámide cilíndrica escalonada.....	82
Anexo VIII: Ensayos sobre objetos diversos.....	85
Anexo IX: Observaciones en Calypso.....	88
Anexo X: Calibraciones en máquinas METROTOM.....	93
Anexo XI: Test de Aceptación.....	95

# **Memoria**

## Introducción

En Física e Ingeniería, medir es la actividad de comparar magnitudes físicas de objetos o sucesos reales, con objetos o sucesos previamente establecidos como estándares. En el siglo XIX fue cuando la Oficina Internacional de Pesos y Medidas estableció como estándares, patrones de medida para el metro y el kilogramo, determinándose de este modo patrones universales. Así, la medición hoy en día pretende dar garantía de calidad, dando como resultado relaciones entre el objeto en estudio y las unidades de referencia.

Actualmente la metrología, aplicada al campo de la fabricación, es la que se ocupa del proceso de medición en sí, es decir, de la planificación y lanzamiento de órdenes de inspección, gestión de los instrumentos necesarios, expresión de los resultados, cálculo y acotación de los errores de medición, calibración y corrección de los errores debidos a los instrumentos de medida y, análisis de las relaciones entre la capacidad y resolución del instrumento, tolerancia de diseño e incertidumbre del proceso [10], [13].

Debido a la gran relevancia de los instrumentos de medición en la metrología, surge la necesidad de investigar y desarrollar nuevos conceptos de medición, que den resultados lo más completos y fiables en el proceso de medición. Uno de estos nuevos conceptos es la Metrotomografía por rayos X. Metrología y Tomografía Computarizada<sup>(1)</sup> en uno.

Hasta ahora era en la medicina donde se aplicaba la Tomografía Computarizada como método de diagnóstico, observando así órganos internos de un paciente sin necesidad de abrir.

En la actualidad y por medio de la máquina Metrotom, desarrollada por Carl Zeiss, se introduce la tomografía en el campo de la Metrología industrial. Apareciendo métodos de inspección no destructivos, y principios de medición capaces de proporcionar información geométrica precisa de las entidades medidas. Permitiendo además, la reconstrucción tridimensional interna y externa de la pieza a medir.

Al igual que para cualquier otra nueva tecnología susceptible de ser comercializada, deben existir una serie de normas y recomendaciones técnicas que garanticen la calidad, y el buen funcionamiento del aparato, asegurando a la vez la homogeneidad en el lenguaje y la correcta definición de los nuevos conceptos. Para los aparatos de medición por coordenadas, es la VDI/VDE 2617, entre otras, la que recoge sus aspectos técnicos, surgiendo la necesidad de crear una nueva que contemple la nueva técnica de medición. Un grupo formado por 10 universidades, empresas privadas alemanas (Carl Zeiss entre otras) y 2 Institutos federales de física y materiales PTB (Physikalisch-Technische Bundesanstalt) y BAM (Bundesanstalt für Materialforschung und –

prüfung), lleva desde el 2003 reuniéndose para elaborar la nueva VDI/VDE 2630 “Tomografía computarizada en metrología industrial”.

Debido a la novedad de esta máquina, todavía no se conocen con exactitud sus posibles errores ni su precisión en las diferentes aplicaciones. El objetivo de este proyecto ha consistido en el estudio de las fuentes de error, como punto inicial para un futuro análisis de la precisión del sistema. Apoyo para la elaboración de la recomendación técnica correspondiente anteriormente citada, y base para la elaboración de planes internos en la empresa Carl Zeiss, que ayuden a calibrar y poner a punto la máquina en el momento final de su fabricación.

Como base y formación previa recibida para la consecución de los objetivos, se realizaron dos cursos de formación, uno sobre el manejo de la Metrotom así como de normas de seguridad recomendadas mientras su uso, y el otro sobre la herramienta informática Calypso, necesaria para la valoración final de los resultados que proporciona el aparato.

Se asistió además a dos congresos convocados con motivo de la elaboración de la nueva norma-recomendación VDI/VDE 2630, uno llevado a cabo en la Fraunhofer-Gesellschaft (Stuttgart) y otro en Carl Zeiss (Oberkochen), así como a un foro organizado por la PTB en Braunschweig, cuyo objetivo común fue compartir conclusiones y descubrimientos, hallados por cada miembro del foro, sobre la precisión del sistema.

Además, toda la investigación de este proyecto se llevó a cabo en contacto directo y comunicación permanente con los 8 especialistas de Carl Zeiss, que diseñaron y desarrollaron esta novedosa tecnología. Adquiriendo de este modo cualquier tipo de formación relevante, relativa al diseño, fabricación, montaje, puesta a punto, funcionamiento, suministro a clientes, etc.

En cuanto a bases teóricas usadas para el buen entendimiento de todo el proceso y consiguiente desarrollo de la investigación, cabe citar de entre la bibliografía adjunta a este documento, la lectura de varios textos como “*Genauigkeitssteigerung von industriellen Röntgen-Computertomografie (CT)-Anlagen für die dimensionelle Messtechnik*” por Markus Bartscher, Uwe Hilpert, Franz Wäldele, PTB Braunschweig, Jürgen Goebbels, Gerd Weidemann, BAM, Berlin [3] y “*Einsatz von Computertomografie in der Reverse-Engineering Technologie - Vollständige Prozesskette am Beispiel eines Zylinderkopfes*” por M. Bartscher, U. Hilpert, PTB, J. Goebbels, G. Weidemann, BAM, H. Puder, H.-N. Jidav, ACTech, Freiberg/Sachsen [6].

Dado que toda la investigación llevada aquí a cabo fue de carácter experimental, todas y cada una de las conclusiones sacadas proceden de comportamientos sistemáticos, observados durante los ensayos. Entendiendo como ensayos, la toma de medidas en diversos patrones, a partir de ciertas condiciones de contorno y con diferentes parámetros, utilizando alguna de las 5 máquinas Metrotom de las que se dispuso durante el período del proyecto.



Para la valoración y el análisis de los datos obtenidos tras los ensayos, se usaron principalmente gráficas trompeta, realizadas según tablas Excel. La característica principal de estas gráficas, es la de representar los resultados de las mediciones obtenidas, respecto a medidas dadas por otros instrumentos de orden superior.

Como actividades llevadas a cabo durante los 6 meses de duración del proyecto, cabe destacar la clasificación siguiente:

- Comprensión del principio de funcionamiento de las máquinas Metrotom y manejo de las mismas.

- Realización de ensayos experimentales con estas máquinas y sobre determinados patrones, previamente calibrados, con el fin de:

- Determinar, clasificar y analizar las fuentes de influencia en el error.
  - Acotar el error de medición de 4 características concretas de pieza, buscando patrones, parámetros óptimos de máquina y condiciones de contorno adecuadas que reduzcan en la medida de lo posible el error de medición.

- Aplicación de los resultados en la elaboración de procedimientos y documentación técnica, "Test de Aceptación de máquina" que garanticen al cliente la buena calidad del producto en el momento de su suministro.

- Participación en la puesta a punto de varias Metrotom fabricadas durante el período de duración de este proyecto, y aplicación de los procedimientos y documentación anteriormente citados, de obligado cumplimiento ya para la aceptación del producto.

- Realización de procedimientos de tomografiado, que recogen las recomendaciones de especialistas y ayudan al usuario en el uso del aparato.

- Asistencia a diversos actos referentes a la nueva norma-recomendación técnica: VDI/VDE 2630 "Tomografía computarizada en metrología industrial" y puesta en común de los resultados obtenidos durante los ensayos, como apoyo en la elaboración de esta norma-recomendación técnica.

## Capítulo 1:

### Descripción de la máquina Metrotom, principio básico, manejo y aplicaciones

Metrotom es un innovador invento desarrollado por la empresa Carl Zeiss, capaz de proporcionar información, en unidades de medida, de entidades físicas interiores y exteriores mediante el uso de rayos X. Como su nombre indica Metrología y Tomografía en uno.

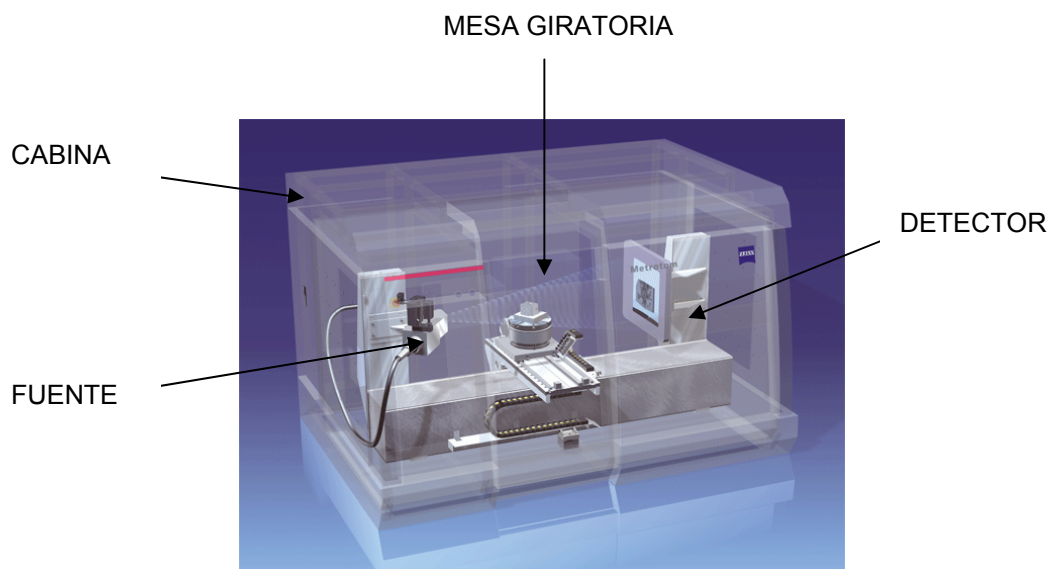


Imagen 1: Representación gráfica de una máquina Metrotom

Esta máquina consta de:

- Cabina: recubierta de plomo, que evita cualquier escape de radiación durante el estado de funcionamiento.
- Fuente: donde se localiza el foco emisor<sup>(2)</sup> de rayos X.
- Mesa giratoria: con desplazamiento en X e Y y giro en Z, en la que se sitúa la pieza a medir.
- Detector: formado por píxeles<sup>(4)</sup>, capaz de convertir los impulsos eléctricos detectados en valores binarios para cada píxel.
- 6 Procesadores localizados fuera de la cabina, que registran y reconstruyen toda la información recogida en el detector.

## 1.1 Principio básico de funcionamiento

Al igual que en las máquinas CT (Computer Tomographie) usadas para medicina, es la fuente del aparato la emisora de haces finos de rayos X. Estos haces inciden sobre el objeto a estudiar, siendo parte de la radiación absorbida por el material en estudio, y parte transmitida. La radiación que no ha sido absorbida por el objeto, es recogida en forma de mapa bidimensional por el detector.

El objeto, posicionado previamente en la mesa giratoria, va rotando con ésta, y cada cierta variación de ángulo rotado la fuente vuelve a emitir un nuevo haz de rayos X, repitiéndose así el proceso anteriormente explicado y obteniendo una nueva proyección.

Una vez que se han recogido un número determinado de proyecciones (en diferentes posiciones del objeto) hasta girar éste una vuelta completa, una pila de procesadores (conjunto de ordenadores) 'suma' las imágenes, promediándolas y reconstruyendo una imagen digital tridimensional.

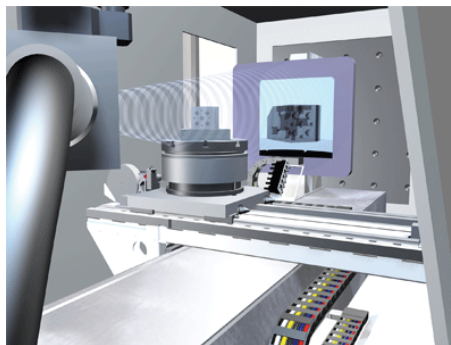


Imagen 2: Imagen virtual del interior de una máquina Metrotom

En la imagen 2 se ve cómo el haz de rayos proveniente de la fuente emisora incide sobre el detector atravesando antes el objeto.

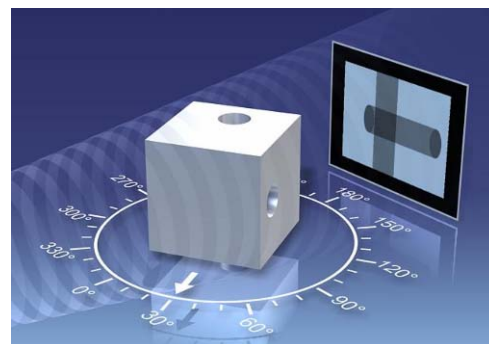
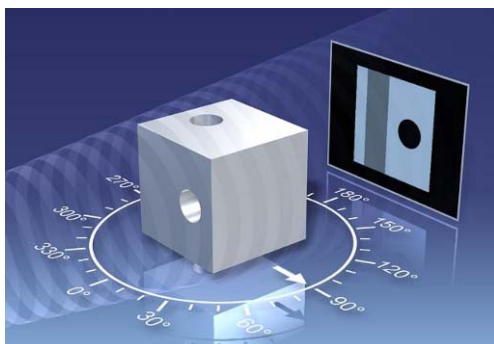


Imagen 3 e Imagen 4: Representaciones virtuales de la pieza durante el proceso de tomografiado

La imagen 3 representa la proyección captada en el detector tras una primera incidencia a 90°. La intensidad de cada tono de gris en la proyección proporciona información acerca de la densidad del material atravesado, así como de su espesor en esa dirección de radiación.

La Imagen 4 es la representación de una nueva proyección para otra posición del objeto.

## 1.2 Método general en el manejo del aparato

Aunque para el manejo de este tipo de tecnología, el principio básico son los rayos X, no menos importante son los conocimientos relativos a imagen digital, que el usuario debe poseer para poder realizar una óptima tomografía. [11], [12].

Dado que el término óptimo, referido a la tomografía aplicada en Metrología, es relativo debido al todavía amplio desconocimiento en el tema, las aportaciones de los especialistas que investigan esta tecnología, suelen ser en forma de recomendación.

Como aportación a los objetivos perseguidos en este proyecto, se ha establecido y redactado un procedimiento de tomografiado que recoge los diferentes pasos y recomendaciones que los especialistas recomiendan, ayudando a la vez al usuario a tomografiar.

Debido al carácter confidencial del procedimiento sólo se podrán mencionar aquí aquellos parámetros susceptibles de ser controlados por el usuario, sin entrar en la descripción de las recomendaciones correspondientes.

Los parámetros controlados y acciones requeridas por parte del usuario son:

- Amarre y direccionamiento de la pieza en la mesa giratoria
- Posición de la pieza respecto a la fuente (X máquina)
- Selección de la región de interés<sup>(7)</sup> sobre el detector
- Búsqueda de tamaño de foco emisor adecuado
- Búsqueda de histograma<sup>(6)</sup> completo
- Determinación de:
  - a. Intensidad del foco
  - b. Tensión del foco
  - c. Ganancia en el detector
  - d. Tiempo de disparo
  - e. Filtro delante de la fuente emisora
  - f. Número de proyecciones en una tomografía

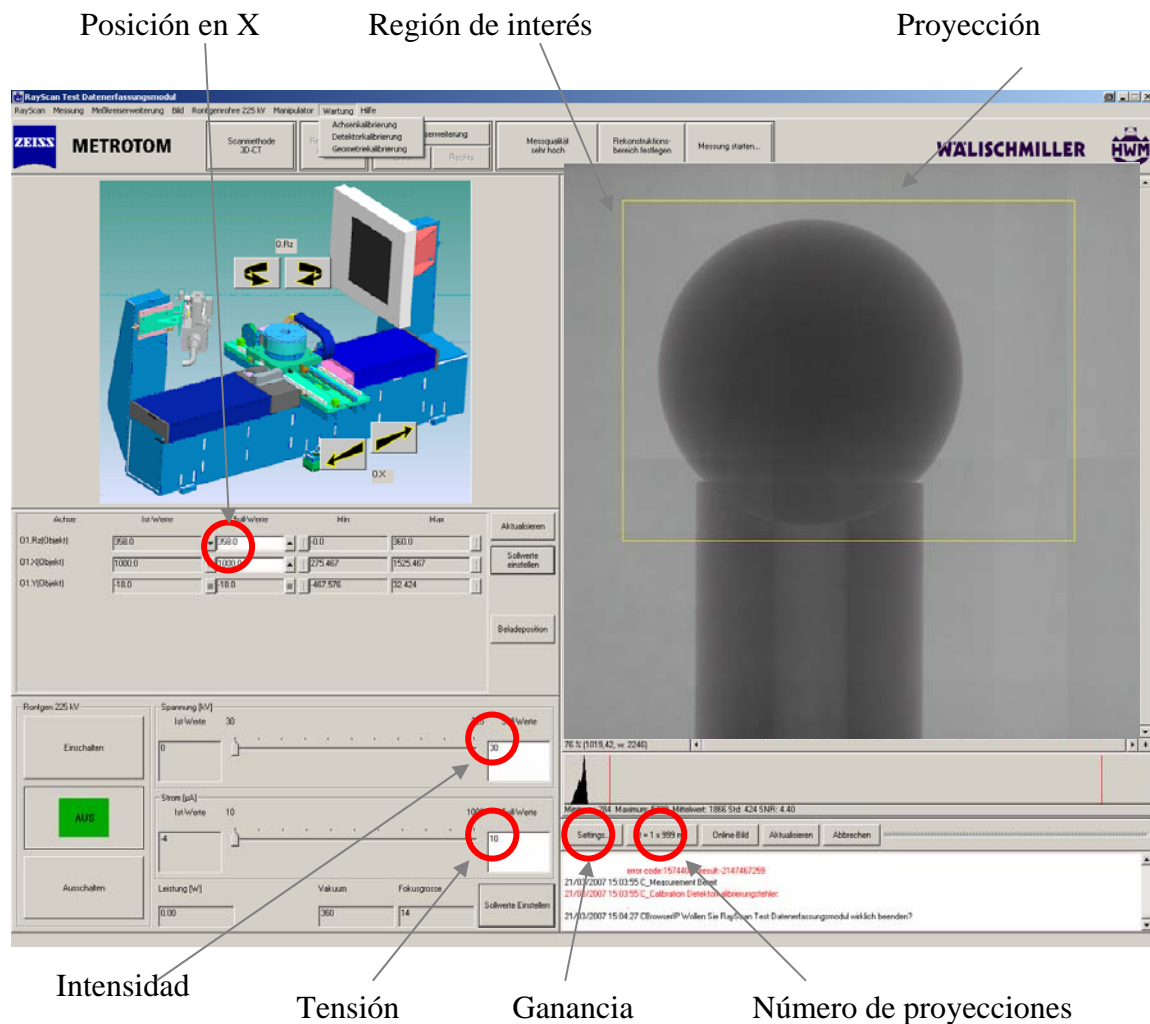


Imagen 5: Imagen vista en pantalla durante la preparación de una tomografía

En la Imagen 5 se ve la imagen en pantalla que se tiene cuando se va a realizar una tomografía. A la derecha y en escala de grises se ve la proyección del objeto que recogerá el detector, delimitada en amarillo por la región de interés .

Remarcados con círculo aparecen algunos de aquellos parámetros que el operario deberá seleccionar en función de la naturaleza y tamaño de la pieza a medir.

### 1.3 Aplicaciones

En la medicina moderna, es ésta una técnica muy habitual como método de diagnóstico y exploración así como tratamiento en algunos casos, dada la cantidad de radiación absorbida por el cuerpo humano durante el proceso.

En la actualidad, y gracias al revolucionario invento de la empresa Carl Zeiss, esta técnica es ya aplicable en la Metrología Industrial.

Esta nueva dimensión de la Metrología hace posible la visualización de superficies y geometrías internas, hasta ahora imposibles de ver sin técnicas de rotura, y la consiguiente medición de todas sus características. Haciendo incluso factible la ingeniería inversa.

Ejemplos de este nuevo campo de aplicación son entre otros, control de montaje, análisis de poros y defectos, medición exhaustiva de pieza, comparación geométrica de CAD con modelos reales, ...

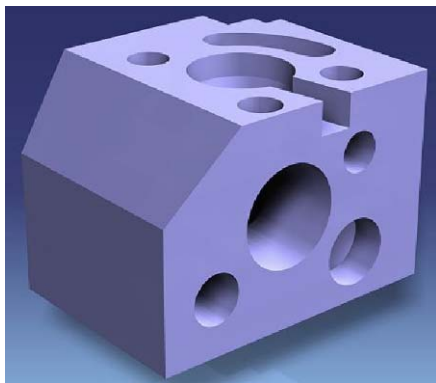


Imagen 6 : Nube de puntos

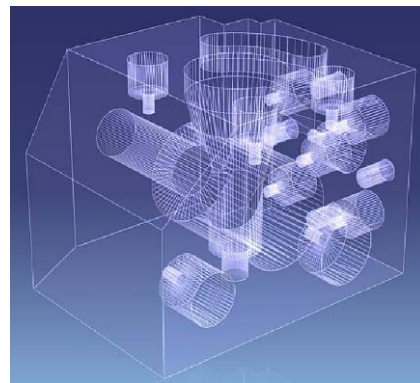


Imagen 7: Ej. de ingeniería inversa

Ejemplo de ingeniería inversa. A partir de una nube de puntos obtenida mediante tomografiado (*imagen 6*), se puede lograr la definición de elementos geométricos simples (*imagen 7*) y proceder al modelado de la pieza.

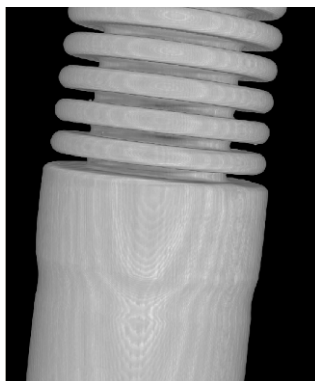


Imagen 8 : 2 tubos soldados

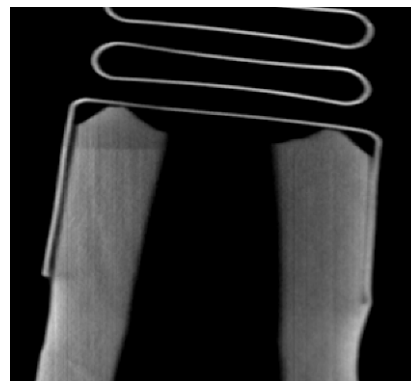


Imagen 9: Defecto en cordón de soldadura

Ejemplo de análisis de defectos. Defecto en el cordón de soldadura (*imagen 9*), detectado en la unión de 2 piezas tubulares de 3 mm de diámetro (*imagen 8*).

## Capítulo 2:

### Descripción de ensayos realizados

Dada la complejidad de esta nueva tecnología, así como del desconocimiento de la multitud de factores y parámetros influyentes en su proceso de medición, se optó por descartar técnicas estadísticas, como por ejemplo “ Método estadístico de los experimentos”, que hubiesen sido prácticamente imposibles de aplicar, optándose por ensayos aleatorios en los que aunque se variasen bastantes factores al mismo tiempo, se pudiese detectar algún comportamiento sistemático y de ahí su correspondiente conclusión empírica.

#### 2.1 Patrones utilizados

Para el análisis y clasificación de las fuentes de influencia en el error de medición, fueron piezas de diversa geometría, diferentes materiales y diversos tamaños, las que se usaron, (*ver anexo VIII: Ensayos sobre objetos diversos*) aunque al mismo tiempo, y para establecer acotaciones en el error de medición, se usaron patrones concretos previamente calibrados.

En las imágenes siguientes se muestra cada uno de los patrones usados para la acotación del error.



(a) Plato de 27 esferas



(b) Juego de varillas con esferas



(c) Placa de esferas huecas



(d) Placa de esferas macizas



(e) Esfera



(f) Pirámide cilíndrica escalonada

(a)Plato de 27 esferas : *ver anexo II: Ensayos sobre plato de 27 esferas.*

(b) Juego de varillas con esferas: *ver anexo III: Ensayos sobre juego de varillas con esferas.*



- (c) Placa de esferas huecas: *ver anexo V: Ensayos realizados sobre placa de esferas huecas.*
- (d) Placa de esferas macizas: *ver anexo VI: Ensayos realizados sobre placa de esferas macizas.*
- (e) Esfera : *ver anexo IV: Ensayos realizados sobre juego de esferas.*
- (f) Pirámide cilíndrica escalonada: *ver anexo VII: Ensayos realizados sobre pirámide cilíndrica escalonada.*

La determinación de usar patrones de invar<sup>(13)</sup>, zerodur<sup>(12)</sup>, rubí, cerámica o termofix, se debió al bajo coeficiente de dilatación térmica que presentan estos materiales. Calidad óptima si se pretende reducir, en la medida de lo posible, errores como por ejemplo los producidos por variaciones de temperatura durante el tomografiado, y su consiguiente dilatación del material.

## 2.2 Reproducibilidad y Repetibilidad en la medida

Durante los 6 meses de investigación, fueron varios las máquinas Metrotom que se fabricaron y suministraron, por lo que en el transcurso de esta investigación se pudieron intercomparar resultados de mismos patrones medidos en diferentes máquinas, pudiendo afirmar la buena reproducibilidad de las medias para diferentes máquinas. (*Ver anexo III: Ensayos realizados sobre juego de varillas con esferas*)

Al mismo tiempo que se buscó la reproducibilidad de los aparatos, se examinó la repetibilidad en la medida, realizando ensayos de 50 repeticiones, y acotando así la precisión del aparato. (*Ver anexo II: Ensayos realizados sobre plato de 27 esferas*)

## 2.3 Representación de resultados: Gráficas trompeta

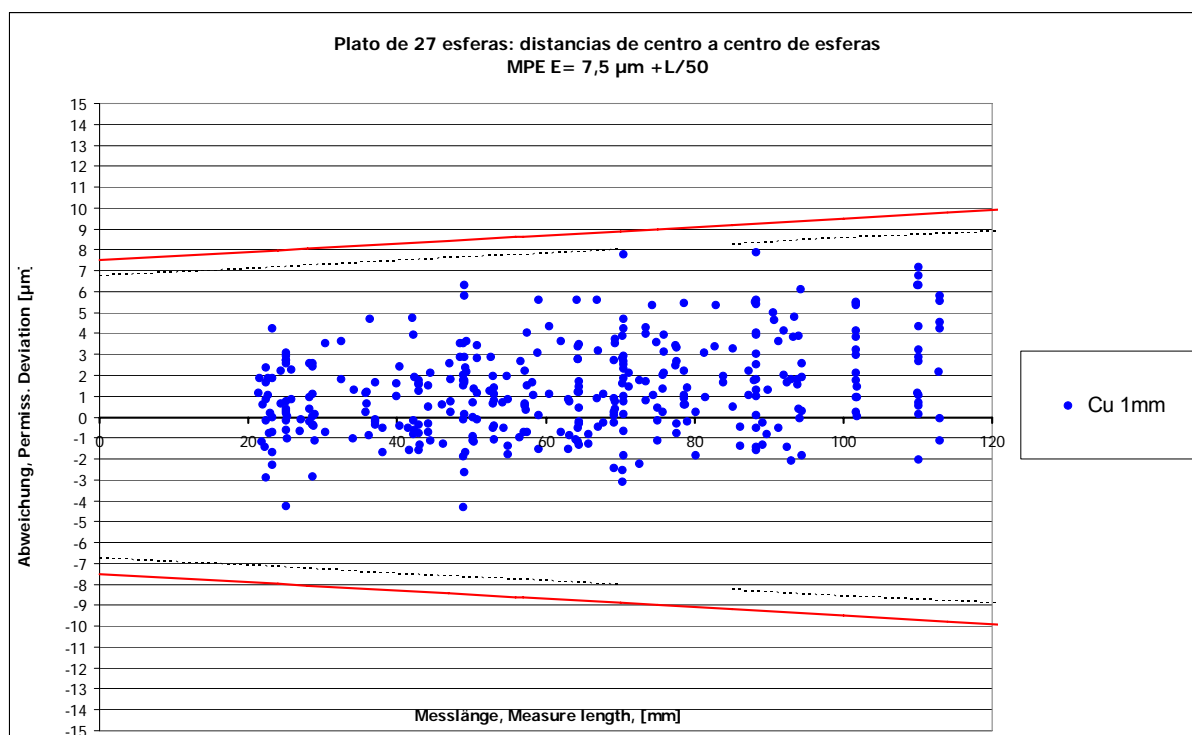
Para el análisis de los resultados se han usado gráficas trompeta, cuyo objetivo principal es representar la dispersión de los resultados de medición en función del tamaño de la característica medida, determinando con esto el grado de incertidumbre del sistema.

Una de las ventajas que muestra este tipo de gráfico es la facilidad con la que se detectan los errores lineales y corregibles del sistema.

Un ejemplo de esto se ve en la gráfica trompeta siguiente, donde son recogidas multitud de medidas para diferentes cotas de un mismo patrón.

Cada punto azul representa la desviación de la medida. Los valores en X para  $y=0$ , dados en mm, corresponden con las medidas nominales de las características medidas, mientras que la distancia vertical de cada punto (x,y) a su coordenada (x,0) correspondiente indica en  $\mu\text{m}$  la desviación de la medida.





Gráfica 1: Gráfica trompeta

Para este ejemplo el error en la medida queda acotado según  $\text{MPE } E = 7,5 \pm L/50 \mu\text{m}$ . El ancho de la trompeta indicará la incertidumbre del método, mientras que la distancia de cada punto (x,y) con su medida nominal correspondiente (x,0) indicará la precisión.

## 2.4 Características de pieza medidas y acotación de sus errores

Conocida la fuerte dependencia del error de medida respecto a la geometría de la pieza, y por tanto a la característica en ella medida, en esta investigación se midieron siempre 4 características principales de pieza, definidas y acordadas ya en la VDI 2630, acotándose como objetivo final de este proyecto, el error relativo a cada una de ellas.

Dichas características y errores son los siguientes:

### Desviación de la forma PF:

Esta característica es definida para geometrías esféricas, hallándose mediante la diferencia de radios máximo y mínimo medidos.

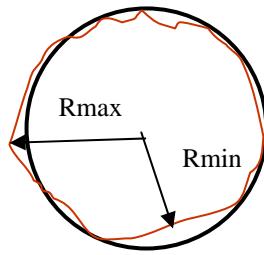


Figura 1: Representación de un diámetro medido

$$PF = R_{\text{max, medido}} - R_{\text{min, medido}} \quad (\text{ecuación 1})$$

### Desviación del tamaño PS:

Al igual que PF, ésta también se calculará para geometrías esféricas, indicando el error en tamaño

$$PS = \sum D_i / i - D_r \quad (\text{ecuación 2})$$

$D_r$ : Diámetro calibrado

$i=1,..n$

$n$ : número de diámetros medidos para una misma esfera

### MPE<sub>PS+PF</sub> :

Máximo error permisible en las desviaciones de forma y tamaño PF y PS. *(Acotado en el Capítulo 4: Análisis sobre las 4 características de pieza y acotación de sus errores.)*

### Desviación de la longitud E:

Esta característica indicará el error relativo a medidas de distancias entre centros de esferas.

$$E = L_a - L_r \quad (\text{ecuación 3})$$

$L_a$  : Distancia medida

$L_r$ : Distancia calibrada

### MPE<sub>E</sub>:

Máximo error permisible en la desviación de longitudes. *(Acotado en el Capítulo 4: Análisis sobre las 4 características de pieza y acotación de sus errores.)*

### Desviación en radios CR:

Esta característica expresa el error cometido en radios interiores y exteriores de geometrías cilíndricas.

$$CR_{int} = R_{int,a} - R_{int,r} \quad (\text{ecuación 4})$$

$$CR_{ext} = R_{ext,a} - R_{ext,r} \quad (\text{ecuación 5})$$

### MPE<sub>CR</sub>:

Máximo error permisible en la desviación de radios, dependiente del espesor de pared existente entre los radios interiores y exteriores de la pieza. *(Acotado en el Capítulo 4: Análisis sobre las 4 características de pieza y acotación de sus errores.)*

## Capítulo 3:

### Clasificación y Análisis de las fuentes de influencia en el error de medición con máquinas Metrotom

Las máquinas CT son instrumentos de medida, capaces de relacionar y comparar magnitudes físicas de geometrías internas y externas con modelos de diseño.

Al igual que los demás instrumentos de medición, su uso en la Metrología introduce ciertos errores en el resultado de la medida, siendo importante reducirlos y acotarlos en la medida de lo posible.

Debido al complejo principio de esta tecnología, y a la gran diferencia con respecto a otros aparatos de medición, surgen nuevas y desconocidas fuentes de error, apareciendo la necesidad de investigarlas, estudiar sus causas, prever sus efectos y consecuentemente calibrar y corregir aquellos errores que se muestren sistemáticos para que en definitiva se pueda acotar la incertidumbre del sistema.

La importancia de una correcta calibración y acotación de la incertidumbre serán vitales para garantizar la calidad de este nuevo concepto de medición, evitándose así la aceptación de productos defectuosos, producción de datos de calidad erróneos, falseo de evaluaciones, etc....

Con el objetivo de dar con esta investigación una primera aproximación a la comprensión de los errores que esta nueva tecnología produce, se ha realizado un análisis del proceso clasificando cualquier elemento, factor o parámetro que pueda influir en el error del resultado final de la medida. Los ensayos realizados se detallan en el *Capítulo 2: Ensayos realizados*, así como en los *anexos II, III, IV, V, VI, VI*.

Como primera aproximación a la clasificación final, se ha descompuesto el proceso en 3 claras etapas :

- Proceso de tomografiado:

Etapa en la que la pieza en el interior de la máquina es sometida a rayos X y cuyas proyecciones recogidas en el detector serán procesadas en la siguiente etapa.

Por proyección se entenderá aquel mapa bidimensional 1024x1024 píxeles, cuya información contenida serán los coeficientes de atenuación lineal<sup>(5)</sup> del cuerpo a estudiar.

Para el buen entendimiento de esta etapa, caben destacar 3 fases: Producción de rayos X, transporte de los mismos y recogida de la información resultante en el detector. [1], [2], [6], [7].

- **Reconstrucción:**

Una vez obtenido un conjunto de proyecciones, éstas son sumadas y ensambladas, obteniéndose así un volumen, también denominado imagen tridimensional.

Por volumen se entenderá aquella matriz tridimensional  $1024 \times 1024 \times 1024$  vóxeles<sup>(9)</sup>, cuya información contenida serán los valores grises con los que se definirá en la tercera etapa el cuerpo a estudiar.

Los complejos cálculos matemáticos, necesarios en esta etapa, se llevan a cabo en 6 procesadores capaces de traducir la información bidimensional, recogida en la primera etapa, en información tridimensional.

- **Valoración:**

Calypso es la herramienta informática, desarrollada también por Carl Zeiss, capaz de llevar a cabo el paso final. Traducir el paquete de vóxeles que se recibe de la segunda etapa, en una nube de puntos con la geometría y dimensiones reales de la pieza a evaluar. La unidad fundamental en esta etapa es el mm. [9]

Dentro de cada una de estas etapas serán diversas las fuentes que llevarán a error en la medida final.

En la figura 2 se observa una representación esquemática de estas 3 etapas así como de las fuentes de influencia dentro de cada una de ellas.

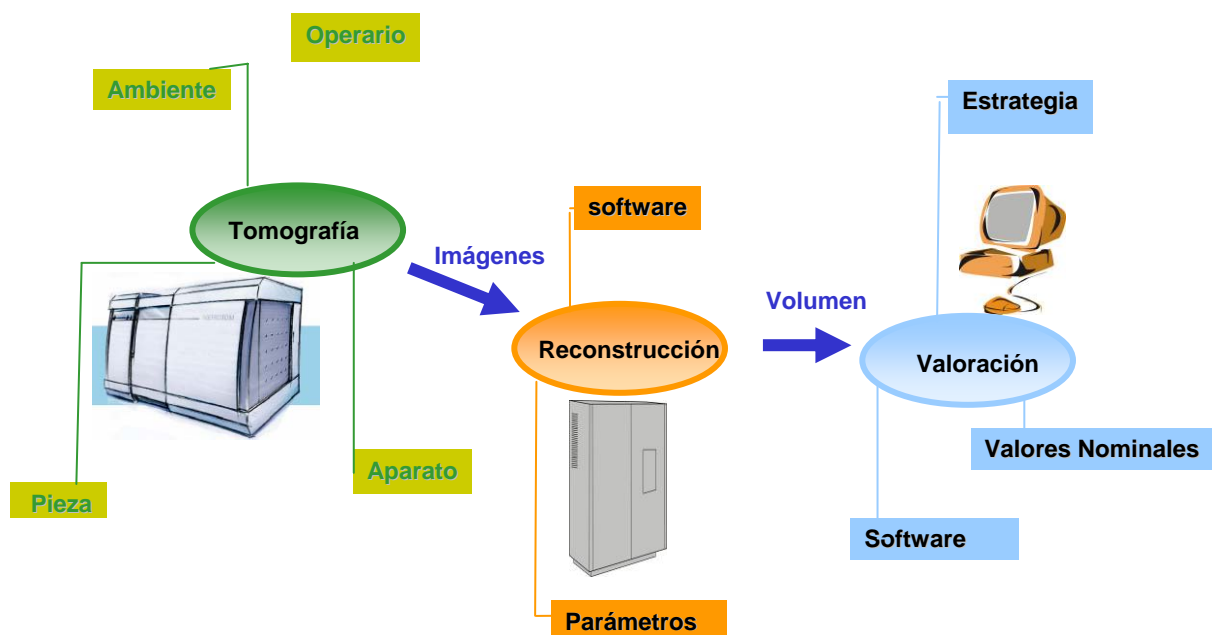


Figura 2: Etapas y factores influyentes en el resultado de la medida mediante máquinas Metrotom

### 3.1 Fuentes de influencia durante el proceso de tomografiado

Dentro del proceso de tomografiado se han observado 4 elementos o factores clave para la comprensión del error final:

1. Aparato
2. Pieza
3. Operario
4. Ambiente

#### 3.1.1 Aparato

El aparato Metrotom consta de 4 componentes fundamentales: tubo de rayos X, mesa giratoria, detector y cabina. Todos ellos determinarán un volumen efectivo de medición y serán a su vez controlados por un determinado software. Las condiciones de contorno como por ejemplo, calentamientos globales, oscilaciones, fallos de funcionamiento, etc., serán también fuentes determinantes el error de medición.

##### Tubo de Rayos X :

El tubo de rayos X es el componente fundamental generador de la radiación necesaria para tomografiar el objeto en estudio, a la vez que contribuye a determinar la nitidez de la imagen tomografiada. La buena definición de una imagen digital tridimensional, es decir su nitidez, dependerá de la resolución de ésta y del tamaño del foco emisor.

Entendiendo por foco emisor aquel área efectiva del ánodo del tubo de rayos X desde la que se emite la radiación, y cuyo tamaño es función de la tensión e intensidad usadas en el tubo, su posición relativa al sistema base de coordenadas X, Y, Z, determinará las distancias relativas de éste respecto al objeto (distancia "a") y respecto al detector (distancia "b"). (Ver figura 3)

Por resolución de una imagen digital tridimensional, se entenderá el número de vóxeles que contiene la imagen tridimensional a tamaño real. Cuanto menor sea el tamaño del vóxel, más cantidad de vóxeles serán los que definan dicha imagen y mayor su resolución.

El tamaño de un vóxel está estrechamente relacionado con el tamaño del píxel y con la posición relativa del foco al objeto y al detector:

$$\text{Tamaño vóxel} = \text{Tamaño píxel} \frac{a}{b} \quad (\text{ecuación 6})$$

Tamaño píxel dado por el fabricante del detector 0,4 mm

Durante los experimentos llevados a cabo en esta investigación se ha observado que posibles desplazamientos del Foco llevarán a errores en la medida.

*Posibles causas de error:*

- **Desplazamiento inesperado del Foco en la dirección X:** Un desplazamiento del foco en la dirección X supondrá un cambio en la distancia “a”, por tanto un error en el cálculo del vóxel, y por consiguiente un aumento o disminución proporcional de la medida final en función de su magnitud.

- Solución: Calibración Geométrica (*Ver anexo X: calibraciones en máquinas METROTOM*)

Aunque la existencia de este error ya fue detectada tiempo anterior a la realización de esta investigación, dejando establecido su correspondiente método de calibración, fue mediante estos ensayos donde se detectó un método de observación, con el que queda confirmada la corrección del error tras la calibración geométrica. (*Ver anexo II: Ensayos sobre plato de 27 esferas*)

- **Desplazamiento inesperado del Foco en la dirección Y:** Un desplazamiento en Y produciría una imagen tridimensional de contorno borroso. o incluso doble, falseando así las medidas de todas las geometrías del objeto en estudio en el momento de la valoración.

- Solución: Calibración de filamento (*Ver anexo X: calibraciones en máquinas METROTOM*)

Al igual que para el desplazamiento del foco en la dirección X, la existencia de este error también era ya conocida y corregida, aunque fue en el transcurso de esta investigación donde se detectó la consecuencia de contornos de imagen dobles, proponiendo como método de detección de desplazamientos en Y, la observación de las imágenes tridimensionales tras su reconstrucción. (*Ver anexo IV: Ensayos sobre juegos de esferas*)

- **Tamaño inadecuado de foco:** Un tamaño de foco menor al adecuado sería innecesario, y mayor podría llevar a la obtención de una imagen de contorno borroso y por tanto ser fuente de error en las medidas.[4], [5], [12].

- Como recomendación al usuario, se entiende por óptimo un tamaño de foco del 90% del tamaño del vóxel calculado.

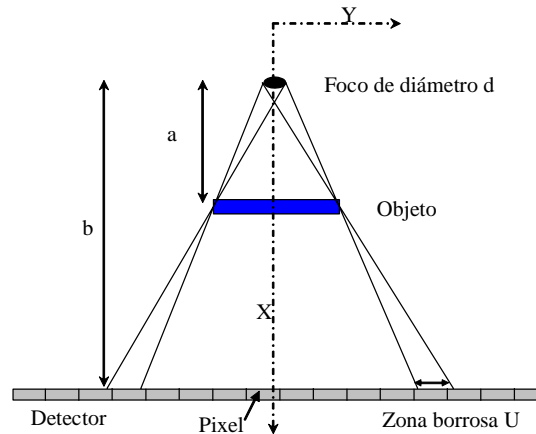


Figura 3: Representación esquemática de las proyecciones del foco sobre el detector al atravesar el objeto

En la figura 3 se muestra esquematizada la representación del foco emisor de radiación, el objeto a tomografiar, y el detector sobre el que se captan las proyecciones.

Como se ve en la figura, a mayor tamaño de foco, mayor será la zona borrosa de la proyección, es decir, peor será la nitidez de la imagen.

Dado que el objeto deberá ser en su totalidad tomografiado para una misma posición de X, el tamaño del objeto será el que limite la distancia mínima con respecto al foco, teniendo en cuenta que la proyección debe ser registrada sobre el detector sin salirse de éste. Por este motivo para objetos pequeños, la distancia "a" podrá ser menor que para objetos mayores, calculándose un vóxel menor cuanto menor sea la distancia "a" (ecuación 6).

Se puede ya afirmar que a menor tamaño de objeto, menor tamaño de foco y mejor detalle en la imagen.

#### **Mesa giratoria:**

Este elemento es aquel sobre el que se amarra el objeto en estudio. Durante la tomografía sólo gira y lo va haciendo indexadamente (según unos ángulos concretos) hasta llegar a dar la vuelta completa según su Z. El número de divisiones del giro completo determinará la cantidad de proyecciones tomadas en la tomografía.[8].

#### *Posibles causas de error*

- **La posición relativa a la cabina** así como el posible tambaleo de su eje en Z serán errores cuantificables y prácticamente despreciables,  $< 0.1\mu\text{m}$ .



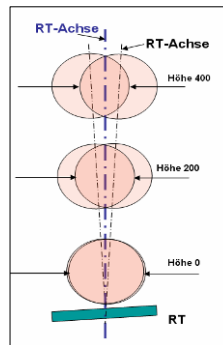


Figura 4: Método de calibración

- Solución: Calibración de la mesa

En la figura 4 se observa el método de calibración de este error relativo al giro de la mesa en Z.

Mediante el uso de un patrón de geometría esférica se toman 3 medidas a diferentes alturas, buscando siempre la posición del polo superior de dicho patrón. De este modo y con interpolación lineal se detecta y corrige el error.

Aunque los errores provenientes de la mesa giratoria fueron determinados ya en investigaciones previas a este proyecto, así como su método de calibración correspondiente, su mención en esta clasificación se ha considerado oportuna ya que lo que aquí se pretende es recoger el conjunto de fuentes, factores o parámetros que influyan en el resultado de la medida.

- **Fallos** durante el proceso de tomografiado, correspondientes al giro incorrecto de la mesa, llevarían a paquetes de información extraños y falseados en el momento de la valoración.

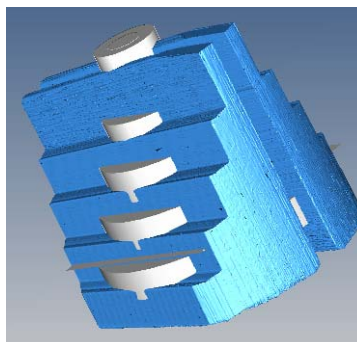


Imagen 10: Nube de puntos errónea solapada con su CAD teórico correspondiente

En la imagen 10 se muestra un ejemplo de una nube de puntos que se obtuvo en esta investigación tras un proceso de tomografiado. La mesa giratoria mostró anomalías durante su funcionamiento detectadas en el momento final de valoración. En blanco se aprecia el modelo CAD con la geometría teórica, mientras que en azul se muestra la nube de puntos, resultado de la incorrecta tomografía.

### **Detector:**

El detector de pantalla plana de 400x400 mm y formado por 1024x1024 píxeles, es el que se encarga de recoger la información de la radiación una vez que ésta ha pasado a través del objeto examinado y se ha atenuado en función del material atravesado. La información detectada en pantalla se recoge en forma de proyección, formando un mapa bidimensional compuesto por píxeles, los cuales almacenan en su interior la información en formato binario.

La sensibilidad de los píxeles se puede regular mediante un cierto parámetro llamado ganancia. A mayor o menor ganancia, mayor o menor será la sensibilidad del detector.

Asociado a los píxeles está el histograma, que no es más que la representación gráfica de la información contenida en la multitud de píxeles que componen la proyección. Aportando información sobre el brillo y contraste<sup>(10)</sup> de la imagen. [10].

### *Posibles causas de error*

- Con el paso del tiempo, puede ocurrir que algunos **píxeles se estropeen**, hecho que llevaría a información errónea en la etapa de reconstrucción.
  - Solución: calibración del Detector (*Ver anexo X: calibraciones en máquinas METROTOM*)
- **La posición de la región de interés en el detector** (*ver imagen 5*) será también indicador de una más o menos óptima tomografía. Entendiendo por región de interés, aquella zona de la proyección que será reconstruida en la segunda etapa. Durante la calibración del detector, se ha detectado que la posición de los píxeles en el detector también puede influir en el error. Los píxeles más centrados muestran menor desviación que los cercanos al borde del detector. (*Ver anexo X: calibraciones en máquinas METROTOM*)
  - Recomendación: centrar la pieza lo mejor posible localizando la región de interés en el centro del detector. (*Ver anexos II y IV: Ensayos sobre plato de 27 esferas, Ensayos sobre juego de esferas*)

**Volumen de medición:**

El campo efectivo de medición, con forma cónica, es aquel que va desde el foco hasta el detector (*ver figura 3*) coincidiendo su eje axial con el eje X de máquina. De este modo, el volumen de medición (*ver imagen 11*) queda determinado por la posición de la mesa giratoria con respecto al foco (posición en X). A mayor proximidad con el detector, mayor será el volumen de medición disponible. Y a menor proximidad, es decir, mayor proximidad con la fuente, menor será el volumen disponible. El volumen máximo es cilíndrico de 300 x 300 mm.

*Posibles causas de error*

- A mayor **volumen de medición**, mayor proximidad de la mesa giratoria con respecto al detector, mayor distancia “a”, mayor tamaño de vóxel calculado y mayor probabilidad de obtener peores resultados en las medidas.
  - Recomendación: Establecer el volumen de medición como el mínimo requerido por el objeto en estudio, aproximándolo al máximo a la fuente y obteniendo así una tomografía con la mejor resolución posible. Que el volumen de medición fuese mayor de lo necesario supondría posibles desviaciones de medida innecesarias.

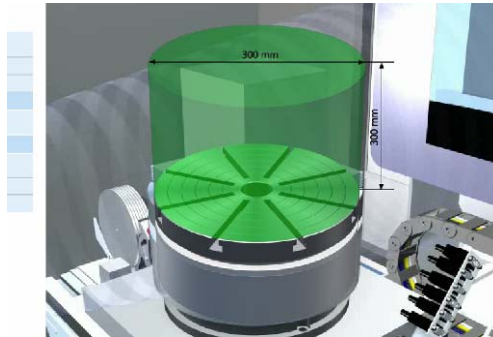


Imagen 11: Volumen de medición

**3.1.2 Pieza**

La naturaleza de la pieza u objeto a estudiar supondrá también una fuente importante de influencia en el error. Además deberá ser fuertemente amarrada sobre la mesa giratoria intentando evitar en la medida de lo posible cualquier oscilación o movimiento indeseado con respecto a la mesa. En este punto se deberán tener en cuenta los siguientes factores:

- **Coefficiente de dilatación de la pieza y su temperatura durante el proceso de medición:** Será importante tener en cuenta la temperatura a la que se exigen los valores nominales. Medidas

tomadas a otra temperatura se verían afectadas por las dilataciones correspondientes del material de la pieza.

- Solución: en el momento de la valoración se puede introducir el coeficiente de dilatación del material de la pieza, junto con la temperatura a la que realmente se encontraba la pieza en el momento de la tomografía, corrigiéndose así en gran parte ese error lineal. *(Ver anexo II y IX: Ensayos sobre plato de 27 esferas y observaciones en Calypso )*
- El uso de materiales como invar o zerodur para la elección de patrones evitaría este tipo de errores asociados con la dilatación del material *(Ver apartado 2.1 Patrones usados)*
- **Geometría:** Dado que esta tecnología se basa en la transmisión de radiación a través de un objeto, el espesor y geometría de éste podrían ocasionar artefactos<sup>(11)</sup> indeseados *(ver apartado 3.2.2 Parámetros de reconstrucción)* en el proceso de reconstrucción, fuertemente influyentes en el resultado final de medición.
  - Recomendación: Definición y acotación de 4 características de pieza que engloban las diferentes comportamientos en los resultados. *(Ver apartado 2.4 Características de pieza medidas)*
- **Material :** Cada material tiene su propio coeficiente de atenuación, es decir, facilidad que presenta de ser más o menos fácil de irradiar. Los plásticos por ejemplo, presentan en general más facilidad que los metales.  
Dentro de los metales, es el plomo de los que más fácilmente absorberán los rayos X, y por tanto uno de los más complejos de tomografiar. [8]
- **Rugosidad y posible suciedad en la pieza**
- **Variedad de materiales en una misma pieza:** Para aquellas zonas en las que la radiación detectase más de un material, podrían surgir efectos indeseados difíciles de controlar. *(ver anexo VIII: Ensayos sobre objetos diversos)*

### 3.1.3 Operario

Al igual que en otras técnicas de medición, el factor humano juega aquí un papel importante. Siendo importantes a destacar, los siguientes factores.

- **Cuidado y limpieza**

- **Manipulación:** Aunque el error debido a este factor es prácticamente inapreciable. (*ver anexo VIII: Ensayos sobre objetos diversos*)
  
- **Filtros usados:** En el momento de la tomografía, pueden ser usados delante del foco emisor, filtros que ayuden a evitar posibles distorsiones de la radiación a su paso por el material, así como ruidos y otros efectos de la radiación. Hasta la fecha, no se tiene muy claro la influencia real de estos dispositivos, suponiendo un punto abierto de estudio dentro de esta nueva tecnología.
  
- **Amarre de pieza:** Para este tipo de medición por rayos X, el tipo de amarre usado puede suponer fuente de distorsiones en la medida. Siendo importante la completa inmovilidad de la pieza con respecto a la mesa, así como la naturaleza del material del amarre. Un material óptimo para el amarre sería aquel que dejase pasar el mayor grado de radiación posible a través de él, sin alterar el resultado de la proyección captada en el detector.
  - Recomendación: Uno de los materiales hasta ahora muy utilizados es el poliestireno expandido. El único problema que presenta es su mala estabilidad durante el giro de la mesa mientras el tomografiado. (*Ver anexo IV: Ensayos sobre juego de esferas*)
  
- **Orientación de pieza:** No menos importante es el papel que juega el direccionamiento de la pieza con respecto a la radiación. Para obtener una buena tomografía, la superficie completa de la pieza debe ser correctamente expuesta a los rayos, evitando que alguna superficie quede paralela a la radiación. Esto se puede controlar al observar la pieza en el detector.
  - Recomendación: Cuanto más centrada posible esté la pieza en el detector, más se garantizará una óptima radiación. (*Ver anexo IV: Ensayos sobre juego de esferas*)

Otro factor importante a la hora de orientarla con respecto a la radiación es el espesor de la pieza en la dirección de la radiación. Pueden aparecer diferentes desviaciones de medida en función del espesor atravesado por la radiación.

- Para el análisis y acotación de este tipo de desviaciones relativas al espesor de pieza, se ha definido la característica de pieza CR y se ha establecido como patrón uno de forma cilíndrica (*ver anexo VII: Ensayos sobre pirámide cilíndrica escalonada*) cuya característica de pieza CR es calculada para diferentes alturas y representada respecto a su espesor de pared correspondiente en dicha altura.

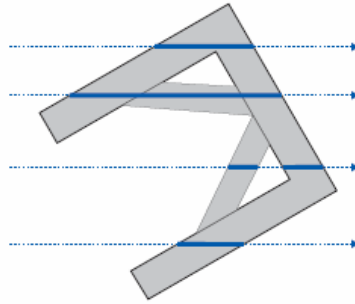


Figura 5: Dirección de la radiación a su paso por un objeto

En la figura 5 se puede observar la relación del direccionamiento de una pieza con respecto al espesor de pared que deberá atravesar la radiación.

#### ▪ **Parámetros de la adquisición tomográfica**

Para llevar a cabo una tomografía, el operario deberá determinar y controlar, con ayuda del Software que dirige el aparato, ciertos parámetros muy importantes en el proceso de tomografiado. La experiencia y habilidad de éste a la hora de elegirlos será crítica en la obtención de una tomografía óptima.

- Recomendación: Procedimiento elaborado durante esta investigación (*Ver apartado 1.2 Método general en el manejo del aparato*) [8].

#### **3.1.4 Ambiente:**

Algo a tener también en cuenta para entender el origen de posibles errores son las condiciones de contorno a las que se encontrará sometido el sistema en el momento de la medición, como por ejemplo, posibles vibraciones de suelo, calentamientos locales, malas conexiones en el aparato,...

- **Oscilaciones del suelo**
- **Variaciones de  $T^a$**
- **Temperatura en Cabina**
- **Suciedad**

### **3.2 Fuentes de influencia durante el proceso de Reconstrucción**

En esta etapa, llevada a cabo mediante 6 potentes ordenadores capaces de procesar complejos cálculos matemáticos, se obtiene una imagen tridimensional a partir de las proyecciones recogidas en la primera etapa.

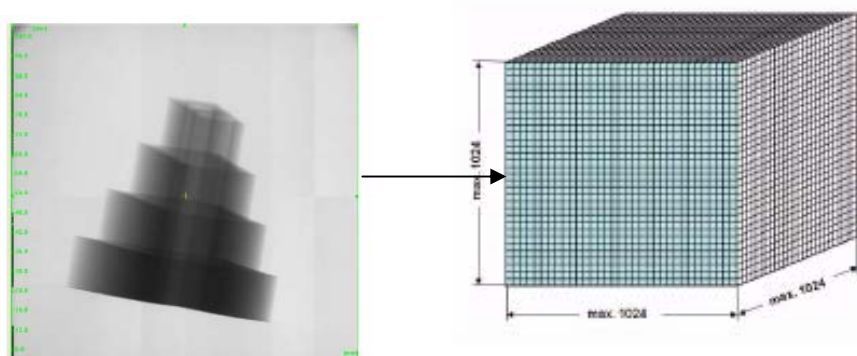


Figura 6: Esquema de los 2 pasos básicos en el proceso de reconstrucción

En la figura 6 se muestra de forma muy esquemática la función que se realiza en esta etapa de reconstrucción. Partiendo de proyecciones tomadas en el detector de la máquina y cuya unidad fundamental es el píxel, se reconstruye una imagen tridimensional cuya unidad fundamental es el vóxel.

El origen de errores en esta etapa puede ser debido a:

1. Software
2. Parámetros

### 3.2.1 Software:

Dada la complejidad del cálculo en este proceso, se deberán tener en cuenta los algoritmos usados, los procedimientos matemáticos escogidos, así como la capacidad de los ordenadores necesaria para el buen rendimiento de esta etapa. El usuario no tiene ningún tipo de control en esta etapa, siendo el fabricante el que debe prestar extremo cuidado en la determinación y establecimiento de estos factores. [11].

### 3.2.2 Parámetros:

- **Artefactos:** Entendiendo por Artefactos aquellas discrepancias sistemáticas entre los valores recogidos en cada vóxel de la imagen tridimensional reconstruida y los coeficientes de atenuación del objeto, con la aparición de éstos, aparecerán en la imagen elementos que no están presentes en el objeto explorado.

Pueden ser debidos a múltiples causas como: fallos del sistema, movimientos de pieza, efectos físicos como el endurecimiento del haz, o por el uso de contrastes de alta atenuación o alta concentración.

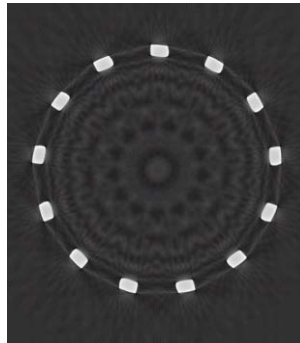


Imagen 12: Corte de una imagen tridimensional tras su reconstrucción

En la imagen 12 se muestra un ejemplo de artefacto. La diferencia de tonalidades en el interior del objeto revela falso material que en realidad no existe.

- Errores de digitalización
- Reducción de datos
- Cálculo erróneo del tamaño del vóxel
  - Solución: corregible en la etapa de valoración mediante el “factor de escala” (Ver apartado 3.3.3 *Falso tamaño de pieza*)

Mientras la realización de esta investigación fueron pocos los factores que en esta etapa se modificaron buscando su influencia, ñaque no por ello se ignora su importancia siendo tenida en cuenta en esta clasificación.

### 3.3 Fuentes de influencia durante el proceso de valoración

La 3º Etapa es la de valoración, donde mediante la herramienta informática desarrollada también por Carl Zeiss, Calypso, se transforma la matriz de vóxeles de la segunda etapa en una nube de puntos con geometría y dimensiones que caracterizan la pieza real a estudiar, susceptible de ser medida.

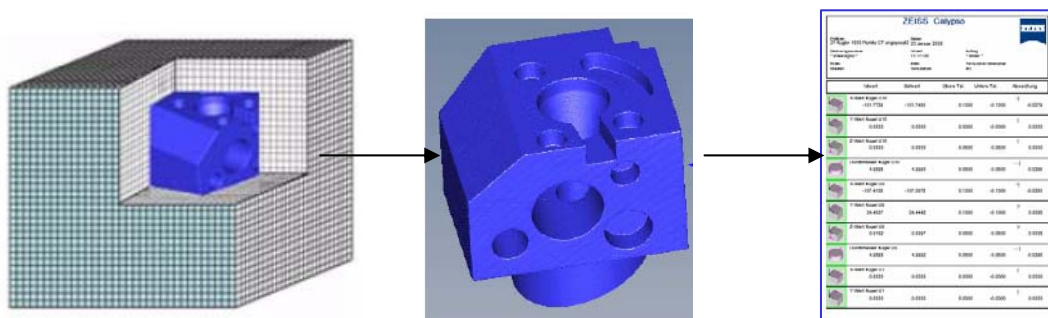


Figura 7: Esquema de los 3 pasos fundamentales que sigue Calypso



En la figura 7 se muestra de forma sencilla el paso que se realiza en esta etapa. Conversión de la imagen tridimensional digital en una nube de puntos, y posterior comparación de las medidas de la nube de puntos con las medidas nominales de la pieza en estudio.

Los factores causantes de posibles errores en la medida final podrán ser aquellos relacionados con:

1. Estrategia de medición
2. Valores nominales
3. Software

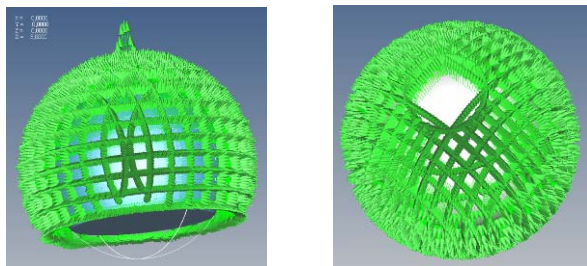
### 3.3.1 Estrategia de medición [9]:

- **Plano de prueba**

En el plano de prueba necesariamente programado con antelación para la valoración de las medidas, se deberán definir aquellos elementos geométricos relativos a las características de pieza que se deseen medir. En la definición de esos elementos, es necesario establecer estrategias de palpado, para que de ese modo se recoja y compare la información proveniente de la nube de puntos con la información teórica introducida por el usuario en el programa. Dada la importancia de los puntos de palpado escogidos, la calidad de estos será altamente influyente en el resultado.

Puede darse el caso de tomografías con zonas menos nítidas que otras, debido por ejemplo a indeseados artefactos surgidos en la etapa de reconstrucción.

- Recomendación: definición de estrategias de palpado en aquellas zonas donde la información sea buena, tratando de evitar en la medida de lo posible la toma de puntos en zonas que lleven a error. (*Ver anexo IV: Ensayos sobre juego de esferas*)



Imágenes 13 y 14: Estrategias de medición para los casquetes esféricos

- **Correctores de temperatura:** Durante el proceso de tomografiado será importante que la temperatura de la pieza sea estable e igual a la temperatura ambiente. En caso contrario aparecerían errores lineales debidos a dilataciones del material.

- Solución: en el momento de la valoración se puede introducir el coeficiente de dilatación del material de la pieza, junto con la temperatura a la que realmente se encontraba la pieza en el momento de la tomografía, corrigiéndose así en gran parte ese error lineal. (*Ver anexos II y IX: Ensayos sobre plato de 27 esferas y Observaciones en Calypso*)
- **Filtros matemáticos:** Mediante diversos procesos matemáticos, en el momento de la valoración se pueden depurar ciertos puntos de palpado, discriminando aquellos que según fórmulas estadísticas como Chebichev o Gauss, sean origen de error. En ciertas ocasiones, el uso de estos Filtros, en vez de solucionar errores, puede llevar a soluciones falseadas. (*Ver anexo IV: Ensayos en juego de esferas*)

### 3.3.2 Valores Nominales:

- **CAD:** En el momento de la valoración, se pueden introducir directamente las medidas nominales de aquellas características deseadas, y obtener así la desviación obtenida en el proceso de fabricación. Durante la realización de este proyecto, se observó la extraña alteración en los resultados al modificar valores nominales de algunas características. Fue esto, lo que ayudó a detectar falsas superficies erróneamente detectadas por el Software. (*Ver anexo IX: Observaciones en Calypso*)
- Solución: La detección de este error así como su comunicación al departamento de desarrollo de Softwares de la empresa Carl Zeiss, hizo posible su corrección y aplicación de la mejora en la siguiente versión, Calypso 4.4.06

- **Patrones de orden superior:** Para la realización de esta investigación se usaron tanto modelos CAD como fuente de datos nominales, como Patrones medidos inicialmente por máquinas de orden superior. Para estos casos en los que se usó patrón se introdujo un pequeño error en el resultado, relativo al aparato comparador. [13].

Dada la buena fiabilidad del aparato comparador y su gran precisión (del orden de los nanómetros), se han despreciado estos efectos.

### 3.3.3 Software:

- **Capacidad:** El ordenador requerido para esta herramienta informática deberá ser lo suficientemente potente para poder procesar y visualizar paquetes de datos muy grandes. Durante la investigación surgieron multitud de casos de mala o imposible visualización. (*Anexo IX: Observaciones en Calypso*)
- Recomendación: Utilización de ordenadores con memoria RAM superior a 3Gbytes y nueva Versión de Calypso, la 4.4.06

- **Versión:** En esta investigación, se usó la versión 4.4.01 y se fue desarrollando paralelamente una nueva versión 4.4.06 con las mejoras de aquellas anomalías y errores observados en esta investigación.
  - En la Versión 4.4.06 se mejoraron todos aquellos problemas relativos a Calypso detectados durante esta investigación.
- **Valor Umbral:** Calypso usa una serie de iteraciones matemáticas capaces de determinar la superficie de la pieza a partir de los diferentes valores grises de cada uno de los vóxeles de la matriz.
  - En la medición de una distancia entre centros de esferas, el error relativo al cálculo del valor umbral de la esfera se compensará. (*Ver anexo III: Ensayos sobre juego de varillas con esferas*)

Durante la investigación se detectaron anomalías, como por ejemplo falsos contornos en el interior de la pieza dependientes de la posición del modelo CAD, incluso tamaños erróneos de pieza.

- Para el cálculo del valor Umbral, Calypso recalcula automáticamente varios parámetros que le ayudan a buscar el contorno. Entre éstos, se encuentra aquel que determina la zona de búsqueda en la que se estima que aparecerá la superficie. Como solución al problema anteriormente citado y gracias a estas investigaciones, se propuso una revisión de este parámetro de búsqueda, aumentando el tamaño del campo y solucionando así este error. (*Anexo X: Observaciones en Calypso*)

Mejora aplicada en la siguiente versión 4.4.06.

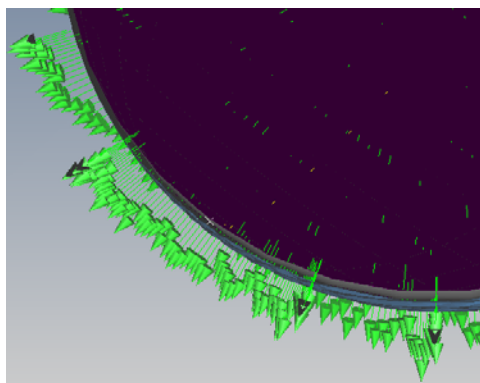


Imagen 15 : Vista en Calypso del corte de una esfera

En la imagen 15 se pueden ver la comparación entre la nube de puntos (superficie azul) y el CAD (superficie blanca). La distancia entre ambas superficies indica la desviación en la medida.

- **Falso tamaño de pieza:** Debido a errores de tomografiado, como por ejemplo el debido al desplazamiento de la fuente emisora en X, se obtendrán nubes de puntos de diferente tamaño al real. Para corregir este tipo de errores Calypso posee el **factor de escala**.

- Solución: aumentar o disminuir proporcionalmente la nube de puntos mediante un factor, factor de escala, cuyo cálculo se hace mediante la siguiente expresión:

$$\text{Factor de escala} = \text{tamaño del nuevo Voxel} / \text{tamaño del incorrecto Voxel} \quad (\text{ecuación 7})$$

Aunque sí será necesario volver a calibrar la máquina para usar en la fórmula anterior el nuevo valor del voxel calculado, se podrá corregir la tomografía defectuosa sin necesidad de volver a tomografiar el objeto. (Ver anexos II y IX: *Ensayos sobre plato de 27 esferas y Observaciones en Calypso*)

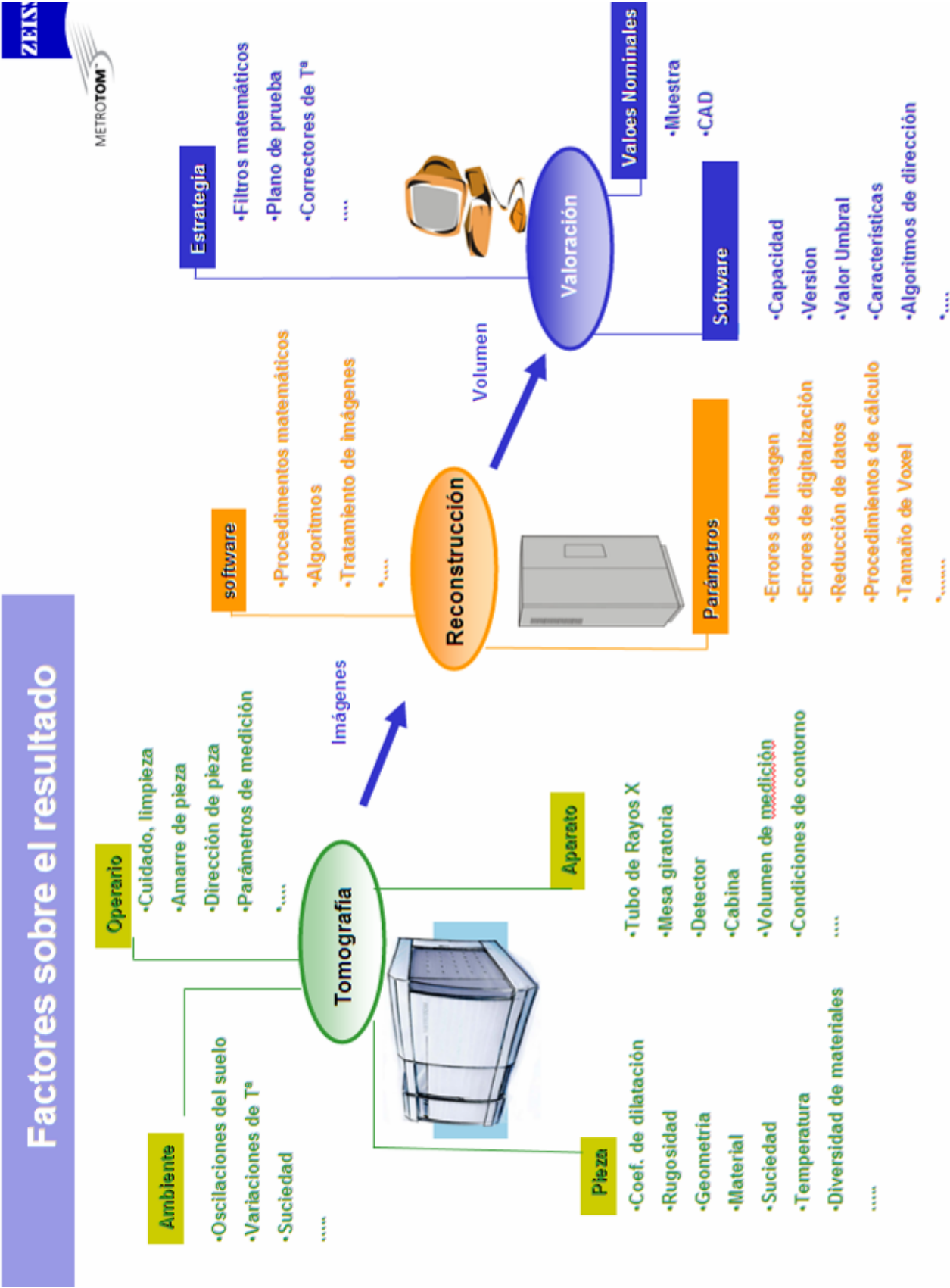
- **Características:** Para el cálculo de las diferentes características que se pueden medir en una pieza, serán diferentes los factores que influirán en la medida. Dependiendo de la localización de las superficies a que haga referencia dicha característica así como de su espesor de pared. (ver apartado 2.4 *Características de pieza medidas*)
- **Algoritmos de dirección:** Mediante una serie de procesos iterativos, Calypso busca el solapamiento de la nube de puntos con el CAD.

El indicador de este correcto solapamiento es un índice llamado “Valor A”, cuyo valor ha de tender siempre a cero.

La observación de valores oscilantes del valor A llevó a la detección de incorrectos direccionamientos entre pieza real y pieza nominal. (Ver anexo X: *Observaciones en Calypso*)

- La comunicación de esta anomalía ayudó a su corrección y posterior mejora en la siguiente Versión 4.4.06

A continuación se muestra la clasificación final obtenida tras este análisis (Figura 8).



## Capítulo 4:

### **Análisis sobre las 4 Características de pieza E, PS, PF y CR y acotación de sus de errores $MPE_E$ , $MPE_{PF+PS}$ , $MPE_{CR}$**

Una vez determinadas y clasificadas las posibles fuentes de influencia por las que se desvían los valores de medición respecto de los dados por un patrón de orden superior, se trata de corregir o compensar estas fuentes, y para el caso de imposibilidad, terminar acotando el error final obtenido en la medición.

La acotación de los errores ha sido establecida para las 4 características de pieza definidas ya en el apartado 2.4, desviación de longitudes E, desviación del tamaño PS, desviación de la forma PF y desviación en radios CR y cuyos rangos de incertidumbre serán:  $MPE_E$ ,  $MPE_{PS+PF}$ , y  $MPE_{CR}$  respectivamente.

Para el análisis de estas 4 características de pieza así como para la acotación de sus errores ha sido necesario establecer ciertos patrones, parámetros y condiciones de contorno que en base a las fuentes de influencia determinadas ya en el capítulo 3 optimizasen los resultados.

Para la selección de patrones óptimos, se han tratado de buscar aquellos en los que aparezca al menos 1 de las 4 características de pieza (*Ver apartado 2.1: Patrones usados*), evitado: Recubrimientos con otros materiales, rugosidad, suciedad y geometrías complejas (tratando de evitar artefactos), escogiendo siempre materiales homogéneos, óptimos para tomografiar (evitando el plomo) y con bajos coeficientes de dilatación.

Como **condiciones de contorno óptimas**:

Relativas a la etapa de tomografiado:

- se han realizado periódicamente las 3 calibraciones explicadas en el anexo X, evitando efectos indeseados explicados ya en el Capítulo 3 apartado 1. Se ha controlado el correcto funcionamiento de la mesa giratoria así como del conjunto completo del sistema, asegurándose de la buena estabilidad de la  $T^a$  en el entorno y ausencia de vibraciones en el suelo. Los patrones han sido cuidadosamente manipulados, así como periódicamente limpiados y bien fijados a la mesa giratoria en el momento de su tomografiado.

Relativas a la etapa de reconstrucción y valoración:

- se han elaborado racionalmente estrategias de palpado que evitasen la toma de puntos en aquellas zonas de pieza con posibles distorsiones. Para tomografías realizadas a diferente temperatura de 20°C, en el momento de la valoración se ha aplicado corrección relativa a la dilatación del material. Se ha usado la versión 4.4.01 de Calypso en ordenadores con suficiente capacidad como para poder procesar toda la información proveniente de la etapa de reconstrucción, y se ha tenido especial atención en la comprobación de correctos solapamientos entre la nube de puntos y el plan de prueba, evitando así errores provenientes del mal funcionamiento de la herramienta informática.

Como **parámetros óptimos** de medición para cada patrón y, según su geometría, tamaño, naturaleza, y característica deseada, se han recomendado los siguientes

	Plato de 27 esferas	Varilla de esferas L=300mm	Plato de esferas huecas	Plato de esferas macizas	Pirámide cilíndrica escalonada	Esfera diámetro 7mm
<b>Filtros</b>	sin	sin	sin	sin	Cu 0,5mm	sin
<b>tiempo de disp. (ms)</b>	399	999	999	999	1500	1999
<b>Tensión (kV)</b>	180	150	200	200	200	80
<b>Intensidad (μA)</b>	280	200	180	180	190	80
<b>Nº de proyecciones</b>	720	810	720	720	810	720
<b>Ganancia</b>	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
<b>X Obj (mm)</b>	777	1500	380	475	550	340

Tabla 1: Parámetros óptimos

#### 4.1 Desviación en longitudes E y acotación de su error $MPE_E$

A continuación se listan una serie de conclusiones empíricas, sacadas a partir de los ensayos realizados durante el proyecto y mediante la aplicación de todas las condiciones de contorno anteriormente explicadas.

**Conclusiones sobre el patrón Plato de 27 esferas** (Ver anexo II: Ensayos sobre patrón plato de 27 esferas):

- Inapreciable dependencia de E con respecto a la posición de la región de interés en el detector  
Tras haber medido el patrón a diferentes alturas con respecto al eje Z de la máquina, y aun detectando ligeras variaciones en los resultados, para este patrón se puede concluir que el error es inapreciablemente dependiente con respecto al cambio de posición en Z.
- Influencia de la medida con el Filtro.

Tras no encontrar una clara explicación a los diferentes resultados con diferentes filtros, y dada la clara mejora de las medias de la característica PS sin el uso de filtro, se decidió no usar filtro, aunque por otro lado, este patrón sólo será usado para el cálculo de E.

Acotación máxima concluida para este patrón tras los resultados obtenidos:  $MPE_E = 5.5+L/50 \text{ } \mu\text{m}$

#### Varillas de 3 esferas (Ver Anexo III : Ensayos sobre juego de varillas 3 esferas)

- E calculado entre centros de esferas.  
Midiendo la distancia entre centros de esferas en vez de entre polos equidistantes, se compensa el error relativo al cálculo del valor umbral.

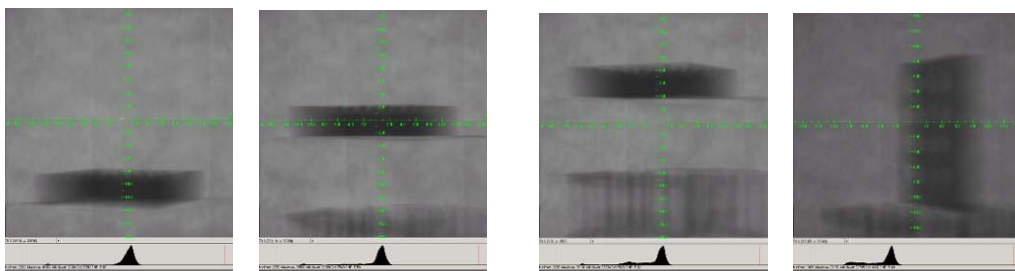
Acotación máxima concluida para este patrón tras los resultados obtenidos:  $MPE_E = 8+L/50 \text{ } \mu\text{m}$

#### Plato de esferas macizas (Ver Anexo VI : Ensayos sobre plato de esferas macizas)

Acotación máxima concluida para este patrón tras los resultados obtenidos:  $MPE_E = 6+L/50 \text{ } \mu\text{m}$

#### Plato de esferas huecas (Ver Anexo V : Ensayos sobre plato de esferas huecas)

- Influencia de la dirección de la pieza con respecto a la radiación. Esta pieza fue tomografiada en distintas posiciones comparando así los resultados y determinando como posición óptima: De pie y centrado. Es ésta una solución lógica, ya que al estar de pie presenta menos espesor de material a ser tomografiado durante el proceso.



(f) abajo

(g) centrado

(h) arriba

(i) de pie

Las imágenes (f), (g), (h), (i), muestran las 4 diferentes posiciones para las que se tomografió el patrón de esferas huecas. Aunque entre las posiciones (f), (g) y (h) no se detectó gran diferencia en los resultados, afirmando así la teoría de la inapreciable diferencia en las posiciones a lo largo de Z

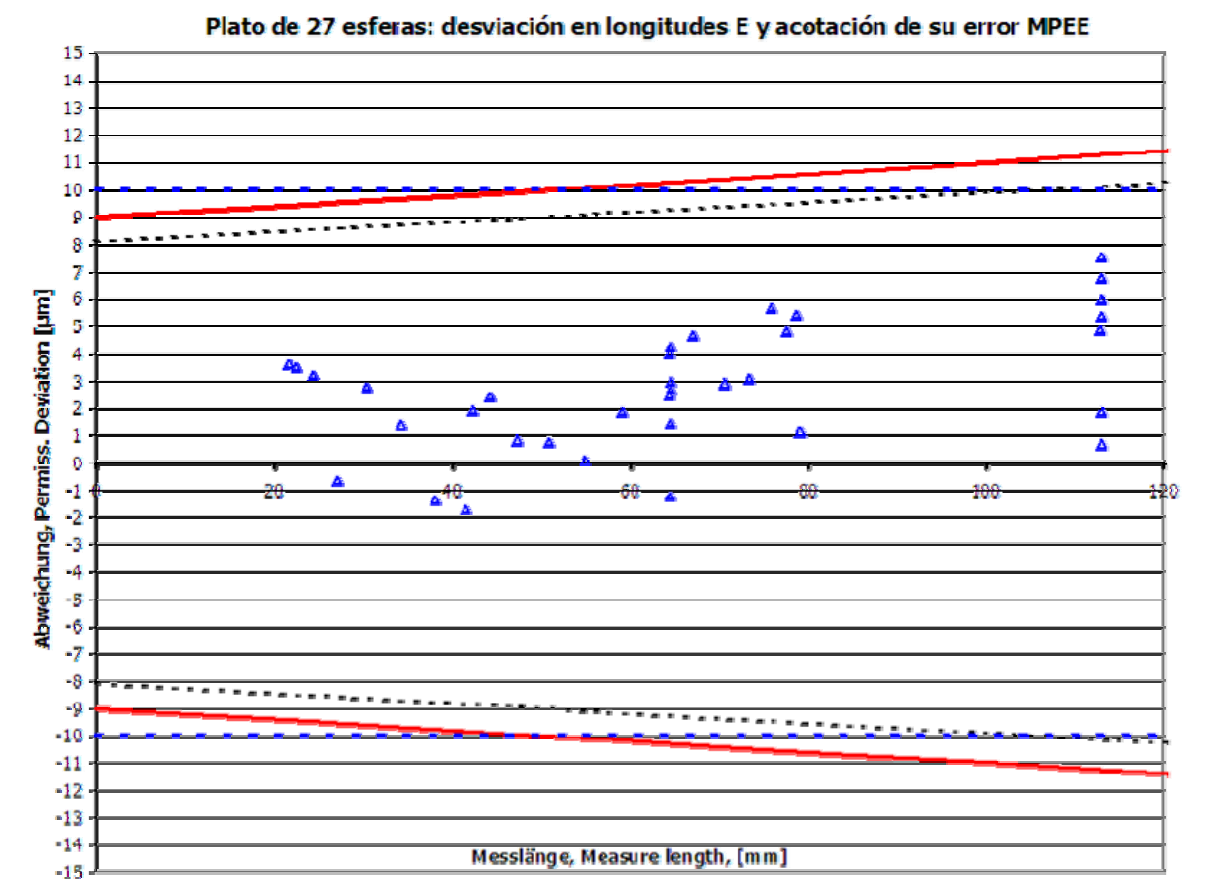


para el patrón de 27 esferas, para la posición (i) sí hubo mejora, estableciendo esta posición como la óptima para este patrón

Acotación máxima concluida para este patrón tras los resultados obtenidos:  $MPE_E = 3+L/50 \text{ } \mu\text{m}$

Como conclusión de los numerosos ensayos llevados a cabo en los patrones arriba mencionados, se ha determinado un margen de error de esta característica de:

$$MPE_E = 9+L/50 \text{ } \mu\text{m}$$



Gráfica 2: Representación de las desviaciones de longitud E, y acotación del error.

## 4.2 Desviación en forma y tamaño PF, PS y acotación de su error $MPE_{(PF+PS)}$

Esfera: (Ver anexo IV: ensayos sobre juego de esferas)

PF :

- Fuertemente dependiente de la posición sobre el detector.

La posición óptima será en el centro del detector, centrado en la mesa giratoria . Así se reducirá un artefacto que aparece en los polos de las esferas cuando pasa la radiación paralela a una superficie.

Peor posición: zona superior del detector, descentrado en la mesa giratoria.

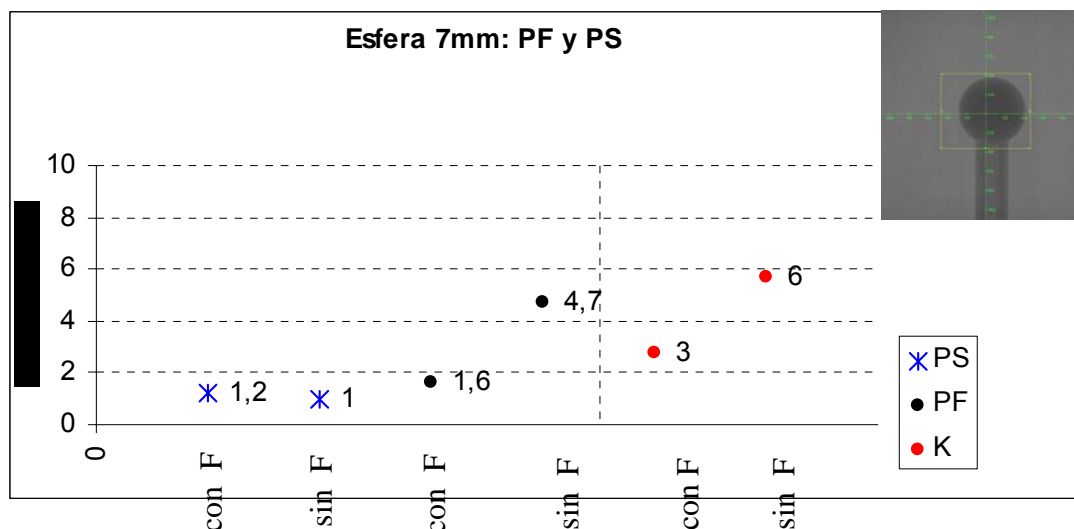
- Los filtros que usa Calypso también son fuertemente influyentes en la medida.
- Desplazamientos indeseados del Foco en la dirección Y de máquina son fuertemente influyentes, formando un contorno doble en la reconstrucción.
- Posibles oscilaciones de pieza originadas por incorrecta fijación o amarre muestran error en esta característica

**PF podrá ser utilizado como indicador de un indeseado desplazamiento en Y y por tanto indicador de la descalibración del aparato.**

PS:

- Independiente de la posición en el detector y de los filtros matemáticos usados con Calypso.
- Dependencia con posibles desplazamientos del foco según X. Indicador de tamaño de vóxel erróneo.
- Independencia con el tiempo de disparo.
- Fuertemente dependiente del cálculo del valor umbral.

Como conclusión de las numerosas medias y experimentos llevados a cabo en patrones esféricos, se ha determinado un margen de error para estas características de  $MPE_{(PF+PS)} < 7\mu m$ .



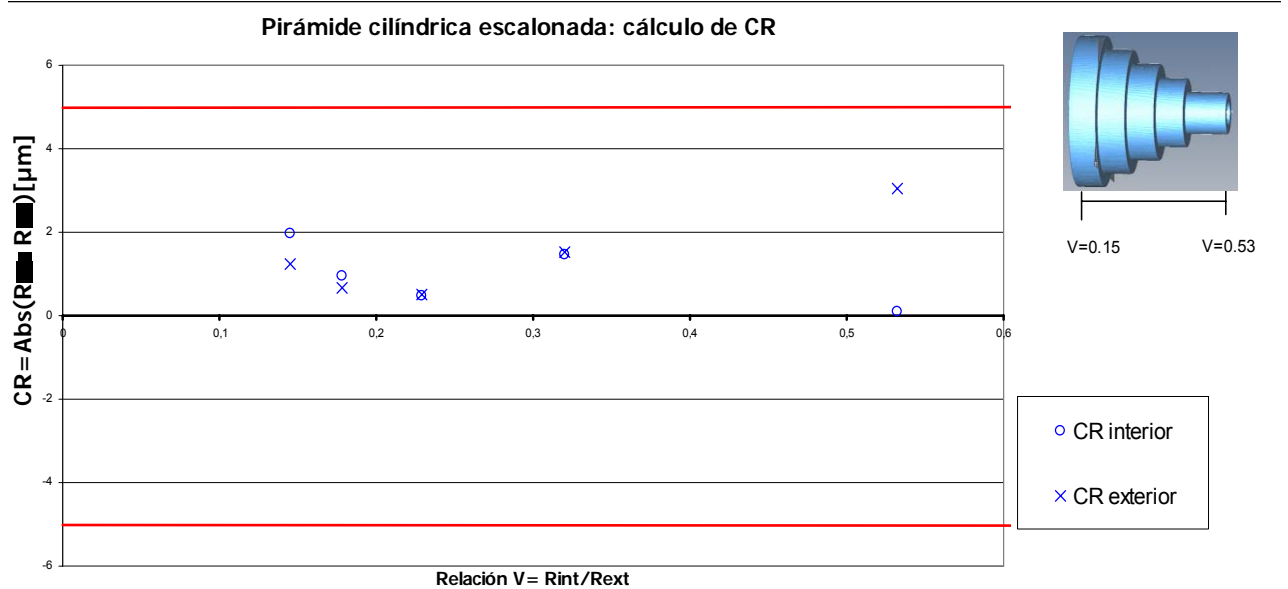
Gráfica 3: Representación de las desviaciones de forma y tamaño de una esfera D=7mm usando filtros matemáticos y sin ellos. (K=PS+PF)

### 4.3 Desviación de Radios CR y acotación de su error $MPE_{CR}$

#### Pirámide cilíndrica escalonada

Con ayuda de este patrón se ha determinado la relación de las desviaciones en radios interiores y exteriores con respecto al espesor de las paredes del tubo que los contiene. (*Anexo VII: Ensayos sobre pirámide cilíndrica escalonada*)

Acotación máxima concluida para este patrón tras los resultados obtenidos:  $MPE_{CR} = 5\mu m$



Gráfica 4: Representación de la desviación de radios interiores y exteriores en función del espesor del tubo que los comprende

## Capítulo 5:

### **Aplicación de las conclusiones empíricas para la elaboración de la nueva norma-recomendación técnica: VDI/VDE 2630**

#### **"Tomografía computarizada en metrología industrial"**

Al igual que para cualquier otra nueva tecnología susceptible de ser comercializada, deben existir una serie de normas y recomendaciones que garanticen la calidad y el buen funcionamiento del aparato, protegiendo así tanto los intereses del fabricante, como los derechos del comprador y, asegurando a la vez homogeneidad en el lenguaje y correcta definición de los nuevos conceptos básicos en dicha nueva tecnología. Las diferencias fundamentales (principios de medición y propiedades) entre una máquina CT y un aparato de medición por coordenadas aparecen reflejadas en la DIN EN ISO 10360-1. Existen procedimientos similares o incluso iguales para la medición con una u otras máquinas, sin embargo, las CT tienen propiedades especiales que también deben ser tenidas en cuenta. De ahí que aparezca la necesidad de crear la nueva VDI 2630. "Tomografía computarizada en metrología industrial".

Un grupo formado por 10 universidades, empresas privadas alemanas (Carl Zeiss entre otras) y 2 Institutos federales de física y materiales PTB (Physikalisch-Technische Bundesanstalt) y BAM (Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung), lleva desde el 2003 reuniéndose para elaborar la nueva VDI/VDE 2630 "Tomografía computarizada en metrología industrial".

Debido a la novedad de esta tecnología, todavía no se conocen con exactitud sus posibles errores ni su precisión en las distintas aplicaciones. Parte del objetivo de este proyecto ha consistido en la aplicación de las conclusiones de la investigación, como apoyo para la elaboración de la recomendación técnica anteriormente citada.

Para la creación de esta recomendación, igual que para el resto de las VDI, se siguen las directrices y procedimientos de la VDI 1000.

Las definiciones y parámetros que constan en DIN (Deutsches Institut für Normung) EN ISO 10360-1, Ausgabe 2000, DIN EN ISO 14253-1, VIM (Vocabulary International Metrology) y VDI/VDE 2617 (Verein Deutsche Ingenieure) son usadas y adaptadas en esta VDI 2630. Complementariamente se adjuntan nuevos parámetros y características de pieza que engloban los diferentes comportamientos de las CT en función de la geometría de la pieza a estudiar.

Las nuevas características definidas ya en la VDI, son las siguientes:

Desviación de la forma PF  
Desviación del tamaño PS  
Desviación en longitudes E  
Desviación en radios CR

Definidas ya en este documento en el apartado 2.4

Para acotar cada una de estas características anteriores y determinar así sus MPE (maximal permissible error) se han usado las conclusiones explicadas en el Capítulo 4 aportando a la norma-recomendación la información siguiente:

#### **Desviación en longitudes E:**

Patrón recomendado: Plato de 27 esferas  
Posición de patrón en máquina: X=777mm  
Acotación de error:  **$MPE_E = 9+L/50 \text{ } \mu\text{m}$**

#### **Desviación en Radios CR**

Patrón recomendado: Pirámide cilíndrica escalonada  
Posición de patrón en máquina: X=550mm  
Acotación del error:  **$MPE_{CR} = 5 \text{ } \mu\text{m}$**

#### **Desviación de la Forma y tamaño PF, PS**

Patrón recomendado: Esfera de diámetro arbitrario entre 3 y 30mm  
Posición de patrón en máquina: arbitraria  
Acotación de error:  **$MPE_{(PS+PF)} = 7 \text{ } \mu\text{m}$**

Quedando el resto de los parámetros a libre elección del usuario.

## Capítulo 6:

### Elaboración de “Test de Aceptación” (Carl Zeiss) para la máquina

Como cualquier otra máquina fabricada por Carl Zeiss, en el momento previo a la entrega al cliente y como prueba de la buena calidad del producto, se siguen ciertos procedimientos internos que además de calibrar el aparato garantizan su correcto funcionamiento.

Dada la novedad de esta máquina, y diferencia con respecto a las máquinas de medición hasta ahora fabricadas, surgió la necesidad de elaborar los procedimientos correspondientes, Test de Aceptación.

Para la elaboración de estos test de aceptación se han usado las conclusiones extraídas de esta investigación, determinando como patrones a usar los definidos en el apartado 2.1, así como sus parámetros óptimos explicados en el capítulo 4 y los planes de prueba de cada patrón realizados con Calypso durante las investigaciones.

La documentación elaborada se adjunta en el *Anexo IX: Test de Aceptación* y en ella se pueden ver procedimientos de medición para 5 patrones, con sus correspondientes valores nominales y medidos, así como la representación gráfica (mediante gráficas trompeta) de las desviaciones obtenidas tras la medición. El nombre de la empresa cliente, fecha, nombre del especialista que realiza el ensayo y número de referencia de la máquina examinada, es parte de la información adicional que también aparece en el documento.

## Capítulo 7: Conclusiones

Tras los 6 meses de duración de este proyecto, se puede concluir que se alcanzaron los objetivos establecidos como meta: detectando fuentes de influencia en el error de medición hasta ahora ignoradas, enumerando con acierto las diferentes fuentes influyentes en todo el proceso, recomendando patrones, parámetros y condiciones de contorno óptimas para unos más que aceptables resultados, acotando errores de medición hasta límites inferiores a los esperados (del orden de los 10 micrómetros), y aportando ayuda para la elaboración de la nueva norma recomendación técnica VDI/VDE 2630.

Además, como actividades adicionales a los objetivos de la investigación, se aportó soporte técnico a clientes piloto (cuya opinión y aceptación de la máquina era clave), y se elaboraron también documentos internos para la aceptación de nuevas máquinas Metrotom (“Test de Aceptación”), como paso final en su ciclo de fabricación.

Es cierto que todavía queda mucho por investigar en este campo, y que serán otros proyectos los que deberán ayudar a la comprensión de algunos puntos, todavía abiertos y críticos en la mejora de la precisión, como son:

- Influencia del uso de filtros delante de la fuente emisora de rayos X
- Análisis de las causas del desplazamiento del Foco emisor de rayos X
- Análisis de cantidad de potencia requerida en el Foco emisor en función del material a tomografiar
- etc...

Pero se puede afirmar ya, que esta nueva tecnología, bajo unas condiciones determinadas, y para unos patrones determinados, puede medir **desviaciones de forma y tamaño** con una incertidumbre  **$MPE_{PF+PS}$  menor de  $7\mu m$** , , **desviaciones en radios** en función del espesor de pared, con una incertidumbre  **$MPE_{CR}$  menor de  $5\mu m$** , y **desviaciones en longitudes** con una incertidumbre  **$MPE_E$  de  $9+L/50 \mu m$** .

Dado que la aplicación de esta investigación fue puramente práctica, y que todos los resultados aquí obtenidos fueron comunicados en tiempo real a los especialistas correspondientes (encargados de mejorar la máquina y de dar servicio a los clientes), se puede afirmar la completa aplicación de esta investigación al desarrollo de la metrología industrial, así como al desarrollo de nuevos usos de los rayos X.

La base fundamental de este proyecto fue la comprensión del proceso completo de medición mediante el uso de máquinas Metrotom, por lo que fue clave la comunicación permanente y directa con cada uno de los 8 especialistas de Carl Zeiss encargados de desarrollar el sistema.

La buena y rápida integración en la empresa fue vital para el buen aprendizaje de cada una de las partes del sistema (período aproximado de unos 3 meses), además de importante para que el grupo de especialistas aceptase y confiase en las aportaciones de esta investigación (originadas sobre todo durante el transcurso de los 3 meses siguientes).

No menos importante como complejidad añadida, cabe destacar el idioma en el que se realizó la investigación. Aunque parte de la documentación e información teórica que la empresa facilitó, fue en inglés, todo el desarrollo completo y comunicación con la empresa fue en alemán, requiriendo el aprendizaje del correspondiente vocabulario técnico, preciso para este proyecto.

Debido a la novedad de esta tecnología en el mercado, y al todavía amplio desconocimiento existente en este campo, cabe comentar ya por último, la gran oportunidad profesional que realizar este PFC ha supuesto. No solo han sido 6 meses de formación en una empresa puntera, y la posibilidad de aportar un pequeñito grano de arena en la Metrología Industrial, sino también la oportunidad de continuidad laboral como especialista más en Carl Zeiss.

Ha sido de gran orgullo y satisfacción personal llevar a cabo esta investigación.



## Bibliografía

[1] Flisch, A.: Industrial Computed Tomography in Reverse Engineering Applications, Int. Symp. on Computerized Tomography, March 15-17, 1999, Berlin, Proc. BB67-CD , DGZfP

[2] Mnich, F.: Einsatz der Computertomographie in der modernen Gießereitechnik. Automotive Engineering Partner 2/2000, S. 62-65

[3] Projekt: Genauigkeitssteigerung von industriellen Röntgen-Computertomografie (CT)-Anlagen für die dimensionelle Messtechnik

Markus Bartscher, Uwe Hilpert, Franz Wäldele, PTB, Braunschweig;  
Jürgen Goebbels, Gerd Weidemann, BAM, Berlin.

<http://www.ndt.net/article/dgzfp04/papers/p17/p17.htm>

[4] Neue Methode zur Charakterisierung von Brennflecken kleiner als 5 µm

<http://www.ndt.net/article/dgzfp04/papers/p16/p16.htm>

[5] Wie ändern sich die Brennflecke von Röntgenröhren mit der Spannung und mit der Stromstärke?

W. Niemann, B. Niehaus, Hamburg

<http://www.ndt.net/abstract/dgzfp98/data/p26.htm>

[6] Einsatz von Computertomografie in der Reverse-Engineering Technologie - Vollständige Prozesskette am Beispiel eines Zylinderkopfes

M. Bartscher, U. Hilpert, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig J. Goebbels, G. Weidemann, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin H. Puder, H.-N. Jidav, ACTech, Freiberg/Sachsen

<http://www.ndt.net/article/dgzfp05/htmltxt/v39.php3>

[7] wichtigen Begriffen der Röntgeninspektion

<http://www.phoenixxray.com/de/company/technology/glossary/index.html#T>

[8] Metrotom Computertomograf CT Betriebsanleitung. Carl Zeiss

[9 ] Calypso Software für Koordinatenmesstechnik Bedienungsanleitung. Carl Zeiss

[10 ] Qualitätsmanagement, strategien, Methoden, Techniken. T.Feifer, Hanser

[11] Ensayos no destructivos en materiales metálicos: Caso práctico de radiografía y gammagrafía industrial

<http://www.monografias.com/trabajos11/gamma/gamma.shtml>

[12] Control del tamaño del foco en equipos de radiografía industrial (Rayos X)

Ing. Jorge E. Schneebeli, Sr. William S. Crease, Sr. Daniel G. Vega, Sr. Damián G. Mendive.

<http://www.aaende.org.ar/sitio/biblioteca/material/focoRx.pdf>

[10] Glosario de términos más usados en Tomografía Computadorizada (TC)

Autores: Ricardo Rodríguez, Alfonso Calzado Cantera y Ramiro Méndez Fernández

[http://www.seram.es/formacion\\_glosario.php](http://www.seram.es/formacion_glosario.php)

[11] Técnicas de procesamiento de imagen

[http://www.des.udc.es/~adriana/TercerCiclo/CursolImagen/curso/web/Filtrado\\_Espacial\\_Real.html](http://www.des.udc.es/~adriana/TercerCiclo/CursolImagen/curso/web/Filtrado_Espacial_Real.html)

[12] Bases del Procesamiento de Imágenes Médicas Rubén Medina, Jesús Bellera

[http://www.saber.ula.ve/redtelemedicina/TallerTelemedicina/j\\_bellera-01.pdf](http://www.saber.ula.ve/redtelemedicina/TallerTelemedicina/j_bellera-01.pdf)

[13] Manual de gestión e ingeniería de la calidad T.Pfeifer, F.Torres, editorial Mira