

# Método de control dimensional en la fabricación de una célula de troquelado como experiencia educativa en entorno e-Manufacturing

J.M. Herrera Olivenza<sup>(1)</sup>, D. Rodríguez Salgado<sup>(1)</sup>, I. Cambero Rivero<sup>(1)</sup>, F. Morillo Tena<sup>(2)</sup>,  
F. Valdivia Calvo<sup>(3)</sup>.

(1) Dpto. de Ingeniería Mecánica E. y de los Materiales. Universidad de Extremadura  
[jherrera@unex.es](mailto:jherrera@unex.es)

(2) C.I.P.F.P. Ciudad del Aprendiz, Valencia

(3) Centro Público Integrado de F.P. "Corona de Aragón", Zaragoza

---

*En el marco de un proyecto colaborativo y formativo participado por diversos centros de formación profesional, universidad y empresas, el presente trabajo pretende plantear, como experiencia educativa, un método de control dimensional partiendo de la definición de puntos críticos de control. La finalidad es establecer estándares de ajuste que permitan la realimentación de información entre los participantes del proyecto, en el marco de la fabricación de una célula de troquelado en varias etapas.*

*La sistemática consiste en la detección de estos puntos de control, valores que surgen del modelo CAD. Posteriormente se captura información, de la propia célula de troquelado o de las piezas resultantes del proceso. El método de captura es la digitalización 3D con y sin contacto.*

---

## 1. INTRODUCCIÓN

Con este trabajo se pretende establecer un método de control de la fabricación, detectando la capacidad de trabajo de las herramientas de ingeniería inversa, de modo que los participantes en el proyecto formativo transmitan a los alumnos nuevas técnicas de control dimensional y de proceso. Ingeniería inversa es el término por el que se conocen los procesos de ingeniería que parten del producto, en oposición a la ingeniería tradicional en la que se parte de la representación gráfica del objeto o de sus planos. Estos procesos de ingeniería inversa siempre comienzan con una etapa, denominada digitalización, en la que se obtiene información de la geometría de la pieza. Dentro de las distintas aplicaciones de la ingeniería inversa [1], en este caso se presta especial atención a la comparación 3D, entre modelos diseñados por computador (CAD) de referencia, generados en uno de los centros formativos, y el modelo obtenido en el proceso de digitalización, que emana de las piezas fabricada en otros centros formativos, todos ellos participantes del proyecto. No se pretende realizar análisis de errores de los escáner láser y de contacto empleados [2,3], sino detectar si el procedimiento permite el control de la fabricación en un entorno docente y multidisciplinar.

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1. Puntos de control y modelo CAD de referencia.

El punto de partida es el conjunto fabricado en este proyecto, una célula de troquelado en cuatro etapas, como se aprecia en la figura 1.

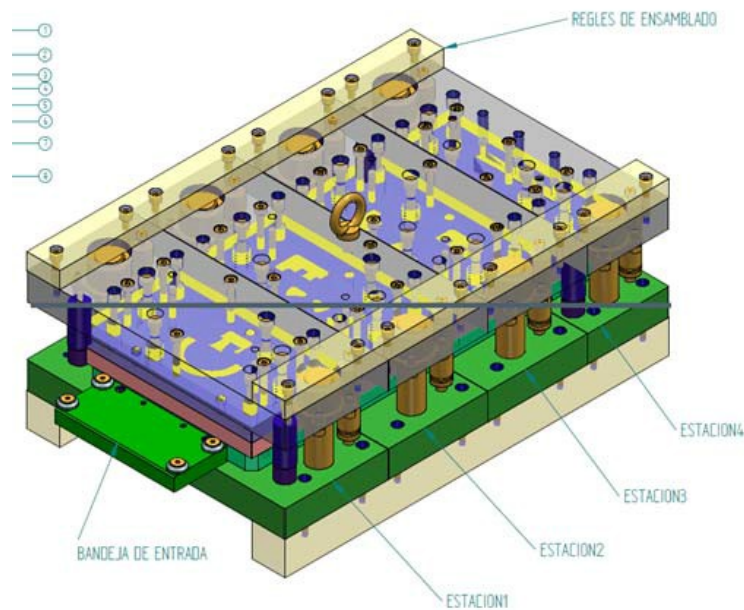


Figura 1. Célula de troquelado en cuatro etapas

El conjunto se ha modelado con un software CAD/CAM según las especificaciones de diseño correspondientes. Se emplea como ejemplo para este trabajo la placa portapunzones de la cuarta etapa. Los puntos de control dimensional seleccionados son los marcados en la figura 2. Se trata del vértice del punzón de doblado (ranura inferior), y de uno de los vértices del engranaje punzonado en esta etapa. La distancia entre ellos es el parámetro a controlar.

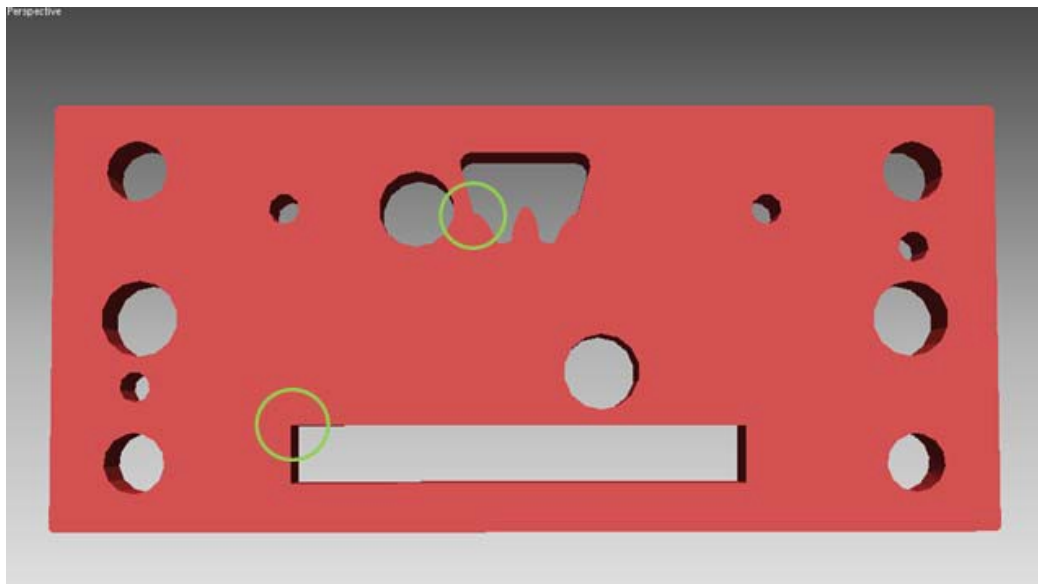


Figura 2. Puntos de control de la placa portapunzones de la cuarta etapa.

Se utiliza un soporte de archivo adecuado. Entre las opciones de gestión de estos archivos están los formatos STL o SLC, utilizados por la mayoría de equipos de RP (Prototipado Rápido) o como el caso que nos ocupa, poder realizar procesos de inspección metrológica. Entre estos dos formatos, el formato \*.stl es el más extendido.

Así pues el modelo de referencia es el archivo STL exportado del proceso de modelado 3D que podemos ver en la figura 3. La tolerancia de cuerda es 0.0191 mm y el control de ángulo

0.01 mm, valores coherentes con la precisión del mecanizado que se desea obtener 0.01 mm.

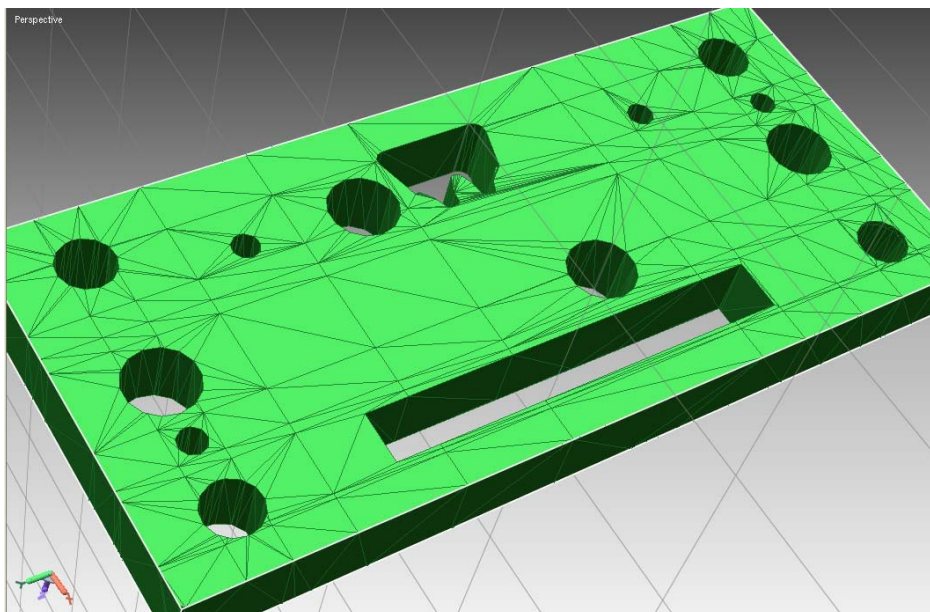


Figura 3. Placa portapunzones. Archivo STL

## 2.2. Digitalización.

El escáner láser Roland LPX-250 empleado en este trabajo utiliza la tecnología láser punto: un haz láser es proyectado sobre la superficie del objeto a medir. El desplazamiento del punto de impacto y sus coordenadas son medidas mediante uno o dos sensores CCD.

El software de gobierno de este escáner es Dr. PICZA que permite modos de escaneo rotatorio y plano. El área de exploración máxima es de 254 x 406.4 mm. La resolución empleada en el proceso es la máxima 0.2 mm. Este valor así como el resto de configuración se fija en el letrero de diálogo que se aprecia en la figura 4, que tendrá que gobernar el alumno para la definición de parámetros más adecuados.

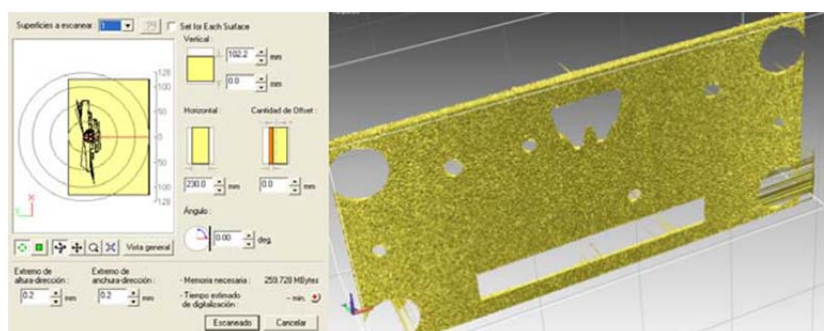


Figura 4. Configuración de parámetros de digitalización y fichero STL binario

Así mismo y debido a las exigencias de mecanizado se recurre a la digitalización de la pieza empleando un escáner de contacto Roland PIX-30 Picza (figura 5). De este modo se puede realizar una digitalización con más resolución en los puntos de control establecidos.



Figura 5. Escáner de contacto

El área de exploración máxima es de 304,8 mm (X), 203'2 mm (Y), 60'5 mm (Z). La resolución de exploración en la dirección de los ejes X e Y es de 0'05 mm respectivamente seleccionable en intervalos de 0'05 mm, y en la dirección del eje Z es de 0'025 mm.

### 3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

La sistemática en este proceso consiste, en primer lugar, en la edición de las mallas obtenidas de los procesos de escaneado, y a continuación el proceso de inspección de estas mallas respecto al patrón CAD.

Debido a las peculiaridades geométricas de esta pieza, cualquier edición del modelo puede suponer modificaciones en la geometría difícilmente cuantificables por lo que el incremento en la incertidumbre de la medición no estaría controlado.

#### 3.1. Inspección

El término inspección relacionado con el concepto de examen [4] es: “Evaluación de la conformidad por medio de observación y dictamen, acompañada de comparación con patrones, medición y ensayo”

Así pues se va a evaluar la conformidad de la fabricación realizando las siguientes acciones:

- Comparación. El archivo \*.stl procedente de la digitalización de la pieza a controlar con el patrón, archivo \*.stl procedente del modelado del conjunto.
- Medición. Empleando las herramientas del software de edición.
- Observación y dictamen. Por medio de herramientas estadísticas.

##### 3.1.1. Registro de mallas

Los modelos en formato STL se importan en un software de procesado y tratamiento de datos provenientes de sistemas de digitalización. Este software ofrece funciones muy potentes para tareas habituales en el procesado de esos datos 3D así como herramientas interactivas de selección, edición y medición.

Una de estas herramientas es el Registro RPS: sistema basado en puntos de referencia [5], fundamentado en el ensamblaje de las dos mallas. El cálculo de registro se realiza con dos pares de puntos homólogos y la orientación adecuada de los ejes de ambos modelos (figura 6).

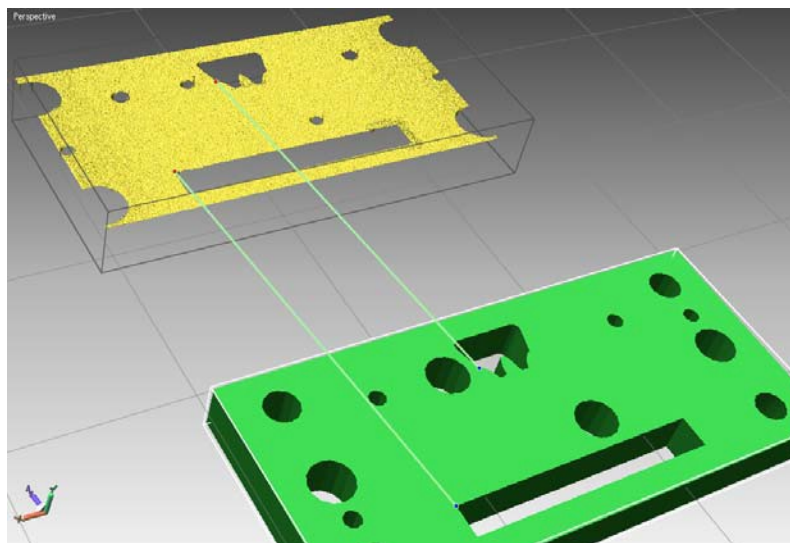


Figura 6. Registro RPS de modelo CAD y modelo Escaneado

Una vez realizada la operación de registro comienza un proceso de análisis del resultado. Este análisis se realiza en dos etapas: La primera consiste en un análisis dimensional discreto para definir numéricamente las desviaciones entre las dos mallas. La segunda etapa consiste en un análisis continuo del conjunto formado por los dos modelos acoplados consistente en la aplicación de herramientas de cálculo estadístico.

### 3.1.2. Análisis de variables discretas.

La distancia entre los pares de puntos homólogos (Figura 7) seleccionados para realizar el registro se aprecian en la tabla 1.

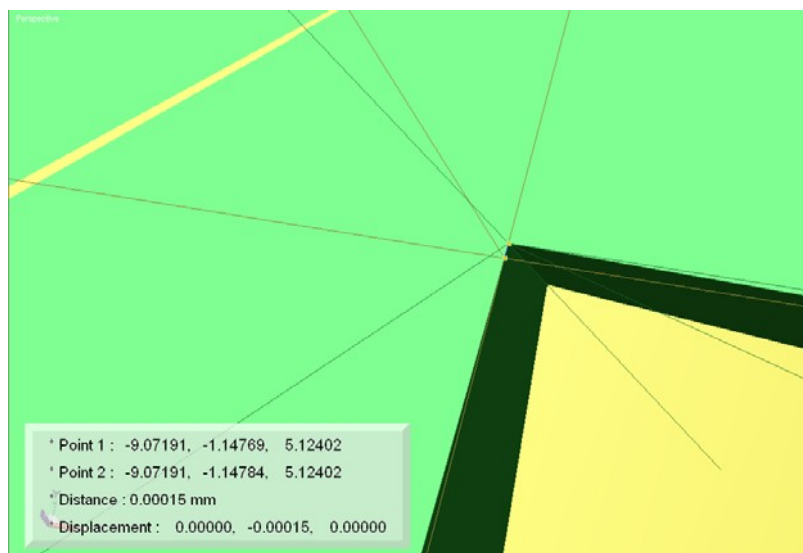


Figura 7. Distancia entre pares de puntos

Distancia (mm)

Par 1: 3 – 1	0.00015
Par 2: 4 – 2	0.00027

Tabla 1. Valor medio de la distancia entre puntos de referencia

Estos resultados indican que los errores en el ajuste, al menos en términos discretos, están muy por debajo de los rangos de fabricación, por tanto se puede considerar como válido el ensamblaje.

### 3.1.3. Análisis de variables continuas.

El software dispone de una herramienta para el análisis de desviación completa. Ésta herramienta emplea el análisis de una población estadística cuyo universo son los valores de desviación entre las dos superficies que se están analizando. El software resuelve este análisis con 5 cifras decimales, considerando para este análisis las 2 primeras. En la Figura 8 se observan los resultados de este análisis.

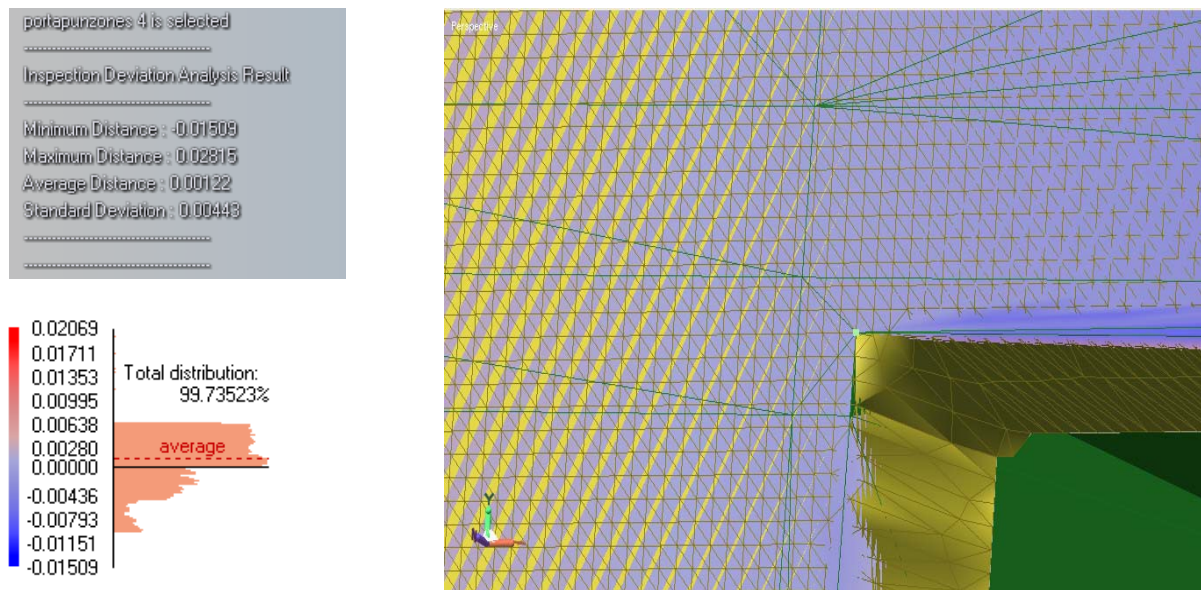


Figura 8. Resultados estadísticos del análisis continuo

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Los resultados que por defecto ofrece el software respecto al análisis del ajuste, al realizar un registro entre dos mallas, consiste en que el valor objetivo o especificado es el que marca el modelo CAD. Se considera como variable estadística a la característica medible en este análisis [6,7]. Esta característica medible es la desviación dimensional entre la malla procedente del proceso de escaneo y la malla del modelo CAD, se denomina  $X$ . Al realizar un análisis de desviación entre los dos modelos se obtienen valores de desviación que son analizados.

$X \rightarrow$  Variable medible: desviación dimensional entre malla procedente del escaneo y malla CAD

La premisa del análisis estadístico realizado en este trabajo consiste en considerar que el resultado del ajuste es óptimo si estos valores de desviación están bajo control estadístico, es decir se mantienen el valor objetivo  $\mu$  (valor CAD) y su dispersión sea constante  $\delta = \text{cte}$ . (varianza o desviación típica).

$\mu \rightarrow$  Valor objetivo: referencia malla CAD

$\delta \rightarrow$  Desviación típica: medida de dispersión

El intervalo de variabilidad o tolerancia  $L$  es aquel conjunto de valores que se considera admisible, asociado al objetivo. En este caso el objetivo  $\mu$  es el valor central, es decir 0, y la tolerancia que se debe marcar en primera instancia es el valor de resolución del proceso de escaneo, así pues  $\mu \pm L$  podría ser el intervalo de tolerancia. La característica de calidad de este estudio es la desviación dimensional  $X$ .

$L \rightarrow$  Tolerancia: intervalo de variabilidad de la variable  $X$

La hipótesis del análisis estadístico que se ha utilizado es: resultado de ajuste de las dos mallas es óptimo si los valores de desviación  $X$  están bajo control estadístico.

La variable  $X$  se distribuye como una Normal (Figura 9) de parámetros  $(\mu \delta)$

$$X \sim N(\mu \delta)$$

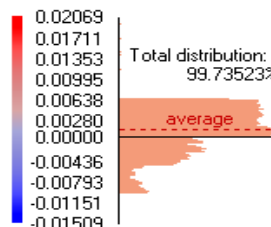


Figura 9. Distribución de la variable

Siendo así, se dice que un proceso está bajo control estadístico cuando se cumple que la Capacidad del Proceso es 6 veces la desviación típica.

$$P[\mu - 3\delta < x < \mu + 3\delta] = 99.7\% \quad (1)$$

La capacidad de un proceso determina el % de puntos analizados en condiciones de control. Fuera del intervalo  $6\delta$  es muy improbable encontrar observaciones.

El indicador de la capacidad o índice de capacidad (IC) del proceso es el cociente entre el rango de valores válidos y la capacidad del proceso.

$$IC = \frac{LT_2 - LT_1}{6\delta} \quad (2)$$

Si  $IC < 1$  el número de puntos fuera de control es  $> 0.3\%$

Si  $IC > 1$  el número de puntos que no están bajo control es  $< 0.3\%$

En el caso de los parámetros de este trabajo [8,9], la meta propuesta es la metodología Six Sigma, esto es, llegar a un máximo de 3,4 defectos por millón de eventos u oportunidades (DPMO). Por tanto los procesos de calidad Six Sigma recomiendan un índice de capacidad  $IC > 2$  que generan procesos cuyo nivel de calidad es aceptable, y siempre para procesos que están sometidos a control estadístico, procesos controlados.

Valores frontera: en el intervalo  $6\delta$  probabilidad del 99.7% de encontrar la variable  $X$ , valores obtenidos del análisis del ensamblaje de ambos modelos (figura 10)

- $\mu$  Valor esperado: 0 mm
- $\delta$  Desviación Estándar: 0.00443 mm
- L Tolerancia: 0.029 mm

Aplicando el análisis de procesos bajo control:

$$IC = \frac{(\mu + L) - (\mu - L)}{6\delta} = 21.82 > 2$$

El proceso de adquisición de datos es un proceso bajo control

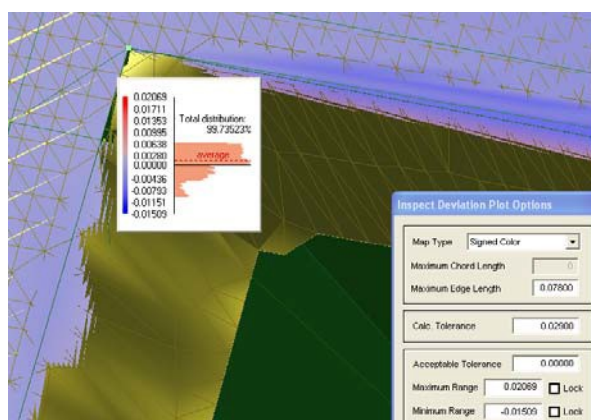


Figura 10. Tolerancia 0.029 mm

Con estos valores de partida, a continuación se realiza un análisis (figura 11) con tolerancia de 0.05 mm que es la resolución máxima del proceso de digitalización.

$\mu$  Valor esperado: 0 mm.  
 $\delta$  Desviación estándar: 0.00479 mm.  
 L Tolerancia: 0.05 mm.

$$IC = 3.47 > 2$$

% de puntos fuera de control es < 0.3%

Nivel de calidad Six Sigma asegurado

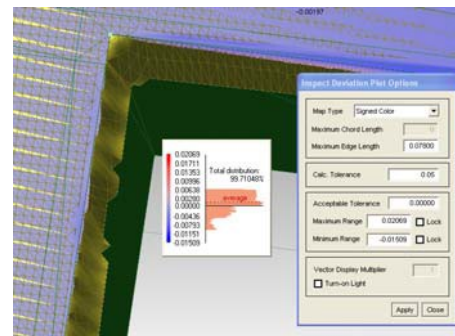


Figura 11. Tolerancia 0.05 mm

## 5. CONCLUSIONES

A la hora de controlar la fabricación de una pieza se recurre a métodos en los que, en muchas ocasiones, no es posible acceder a entidades geométricas clave en el proceso. Este método accede a nivel de vértice de generación de planos y superficies.

El alumno puede comprobar que existe la posibilidad de establecer sistemas de comparación entre, la pieza fabricada y el modelo CAD del que emana, método este alejado de la medida directa tradicional con equipos metrológicos clásicos como las máquinas de medición por coordenadas CMM o proyectores de perfiles.

Los resultados del análisis del ensamblaje y comparación de las mallas, concluye que la comparación es fiable con niveles de calidad Six Sigma. Por tanto la dimensión a controlar (distancia entre los puntos de referencia definidos) es correcta, independientemente de su valor, que viene implícito en el modelo CAD.

El participante en este proyecto por tanto puede analizar diversos puntos críticos de cada elemento de la célula de troquelado. Basta con digitalizar estos puntos de referencia para el control de la fabricación y aplicar el método de ensamblaje. Si existe un error las desviaciones en el análisis estadístico sobrepasarán el valor de diseño.

## 6. AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer a la Junta de Extremadura - Consejería de Economía, Comercio e Innovación -, al Fondo Social Europeo (FEDER) y al Ministerio de Educación, Cultura y Deporte, el apoyo en la realización de este trabajo de investigación.

## 7. REFERENCIAS

- [1] S. El-Omari and O. Moselhi. Integrating 3D laser scanning and photogrammetry for progress measurement of construction work. *Automation in Construction* 18 (2008), pp. 1–9. View Record in Scopus | Cited By in Scopus (13).
- [2] Pingbo Tang, Burcu Akinci, Daniel Huber Quantification of edge loss of laser scanned data at spatial discontinuities. *Automation in Construction*, Volume 18, Issue 8, December 2009, Pages 1070-1083.
- [3] W.X. Li and L.D. Mitchell. Laser scanning system testing—errors and improvements. *Measurement* 16 (1995) (2), pp. 91–101.
- [4] Comité Técnico ISO/TC176 de ISO. Norma ISO 9001. Organización Internacional para la Estandarización. 2008
- [5] Traian Onaciu. Alineación Acertada. Inspección geométrica de piezas industriales. Departamento Metrología de la Fundación ASCAMM.
- [6] Anderson, D. R., Sweeny, D. J. y Williams, T. A. Estadística para administración y economía. Thomson Editores. 7ª edición. 1999.
- [7] Ardanuy, R. Y Q. Martín. Estadística Industrial. Hespérides. 1994.
- [8] Douglas Montgomery. *Introduction to Statistical Quality Control*. John Wiley & Sons, Inc. New York (USA), 2004
- [9] Booker, J. M. and Raines, M. and Swift, K. G. “Designing capable and reliable products”, Butterworth Heinm., Oxford (England), 2001