

Trabajo Fin de Grado  
Grado en Ingeniería de las Tecnologías  
Industriales

Aplicación de la Ingeniería Inversa a un  
Winglet de prueba

Autor: Jerónimo Baena Tabares

Tutor: Dña. Gloria del Río Cidoncha

Dep. Ingeniería Gráfica  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2016





Trabajo Fin de Grado  
Grado en Ingeniería de las Tecnologías Industriales



# **Aplicación de la Ingeniería Inversa a un Winglet de prueba**

Autor:

Jerónimo Baena Tabares

Tutor:

Dña. Gloria Del Río Cidoncha

Dep. Ingeniería Gráfica

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2016



Trabajo Fin de Grado: Aplicación de la Ingeniería Inversa a un Winglet de prueba



Autor: Jerónimo Baena Tabares  
Tutor: Dña. Gloria del Río Cidoncha

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2016

El Secretario del Tribunal





*A mi familia, a mi familia y a mi familia  
por no dejar en ningún momento que me salga del camino.*

*A mis amigos de la Escuela por aguantar mis  
infinitas tonterías durante estos 6 bonitos años.*

*A 'M' por aparecer cuando no lo esperaba  
y desordenarme la vida.*

*A Pablo, por hacerme sentir que no hay  
límites al querer a una persona.*

*A mis amigos, por ser amigos.*







*“Hay dos cosas infinitas: el universo, y la estupidez humana.  
Y del universo no estoy seguro”*

*Albert Einstein*

*“Siempre nos quedará la música”  
JB*



## RESUMEN

---

Debido a la elevada importancia que alberga la ingeniería inversa en la actualidad, el desarrollo que este trabajo contendrá, de forma detallada, será cada uno de los pasos a realizar para poder obtener un resultado óptimo al final de dicho proceso.

Tras comentar una breve línea temporal de lo que ha supuesto y supondrá la ingeniería inversa a lo largo del tiempo, se le aplicará dicho proceso a un Winglet de prueba, en el que, finalmente se podrán observar los resultados físicamente con una impresión 3D de estos.



## ABSTRACT

---

Due to the high magnitude of Reverse Engineering nowadays, the development of this work will include, in detail, step by step the realization of this process to reach an optimal answer at the end.

After explaining a timeline of the Reverse Engineering along the history, it will apply this process to a testing winglet, where, finally, we could see the goal through a 3D print.



## ÍNDICE DE CONTENIDOS

---

<b>AGRADECIMIENTOS</b>	<b>vii</b>
<b>RESUMEN</b>	<b>x</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>xi</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b>	<b>xv</b>
<b>ÍNDICE DE ILUSTRACIONES</b>	<b>xvi</b>
<b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Y CONTENIDOS</b>	<b>2</b>
1.1 INTRODUCCIÓN	2
1.2 OBJETIVO	2
1.3 ESTRUCTURA GENERAL	4
<b>CAPÍTULO 2. INGENIERÍA INVERSA</b>	<b>5</b>
2.1 ¿QUÉ ES LA INGENIERÍA INVERSA?	5
2.2 INGENIERÍA INVERSA SOFTWARE	7
2.3 INGENIERÍA INVERSA HARDWARE	9
2.4 HISTORIA Y ACTUALIDAD	10
2.4 INTRODUCCIÓN AL PROCESO DE INGENIERÍA INVERSA	13
<b>CAPÍTULO 3. WINGLET</b>	<b>15</b>
<b>CAPÍTULO 4. PROCEDIMIENTO DETALLADO</b>	<b>18</b>
4.1 INTRODUCCIÓN	18
4.2 ESCÁNER LUZ ESTRUCTURADA	19
4.2.1 SISTEMAS DE REFERENCIA	21
4.2.1.1 MMEG	21
4.2.1.2 MML	23
4.3 METODOLOGÍA COMPLETA	25
4.3.1 CALIBRACIÓN	25
4.3.1.1 GENERAL	25
4.3.1.2 CALIBRACIÓN WINGLET	40
4.3.2 DIGITALIZADO	43
4.3.2.1 GENERAL	43
4.3.2.2 DIGITALIZADO WINGLET	49
4.3.3 PROCESADO	55
4.3.3.1 GENERAL	55
4.3.3.2 PROCESADO WINGLET	61



4.3.4 MALLADO	71
4.3.4.1 GENERAL	71
4.3.4.2 MALLADO WINGLET	74
4.3.5 EDITADO	76
4.3.5.1 GENERAL	76
4.3.5.2 EDITADO WINGLET	82
4.3.6 CARACTERIZACIÓN PARAMÉTRICA	87
4.3.6.1 GENERAL	97
4.3.6.2 CARACTERIZACIÓN PARAMÉTRICA WINGLET	90
<b>CAPÍTULO 5. APLICACIONES SUPERFICIE FINAL</b>	99
<b>CAPÍTULO 6. IMPRESIÓN 3D</b>	103
<b>CAPÍTULO 7. RESUMEN DE RESULTADOS</b>	107
<b>CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES</b>	111
<b>CAPÍTULO 9. REFERENCIAS</b>	112





## INDICE DE TABLAS

---

<i>Tabla 1. Características según volumetría. ....</i>	26
<i>Tabla 2. Características para la volumetría V3 utilizada.....</i>	40
<i>Tabla 3. Precisión dada para la volumetría escogida. ....</i>	42
<i>Tabla 4. Equivalencias de color en la ventana de control. ....</i>	44



## ÍNDICE DE FIGURAS

---

<i>Ilustración 1. Ingeniería Inversa. [2]</i> .....	7
<i>Ilustración 2. Ingeniería Inversa Software [4]</i> .....	9
<i>Ilustración 3. Ejemplo Ingeniería Inversa Hardware. [6]</i> .....	10
<i>Ilustración 4. Izquierda: B-29. Derecha: Tu-4 [9]</i> .....	11
<i>Ilustración 5. iPhone real Vs iPhone copia [10]</i> .....	12
<i>Ilustración 6. Procedimiento General Ingeniería Inversa. [5]</i> .....	13
<i>Ilustración 7. Partes de un Winglet [12]</i> .....	15
<i>Ilustración 8. Efecto de un Winglet en vuelo.</i> .....	16
<i>Ilustración 9. Winglet utilizado.</i> .....	17
<i>Ilustración 10. Esquema del proceso detallado.</i> .....	18
<i>Ilustración 11. Esquema proyección de patrón. [14]</i> .....	19
<i>Ilustración 12. Formas proyección de patrón. [15]</i> .....	19
<i>Ilustración 13. Sup: Aspecto de escáner Sidio. Inf: Estructura interna escáner. [17]</i> ..	20
<i>Ilustración 14. Superficie giratoria de targets.</i> .....	21
<i>Ilustración 15. De izq a dcha mala y buena colocación de targets.</i> .....	22
<i>Ilustración 16. Colocación correcta MMLs</i> .....	23
<i>Ilustración 17. Planchas de calibrado.</i> .....	25
<i>Ilustración 18. Calibradora y planchas de calibrado.</i> .....	25
<i>Ilustración 19. Izq: Posición cercana de la cámara. Dcha: Posición alejada. [18]</i> ....	28
<i>Ilustración 20. Posiciones del ángulo de la cámara.</i> .....	28
<i>Ilustración 21. Nivelador del escáner. [19]</i> .....	29
<i>Ilustración 22. Colocación de la plancha de calibración.</i> .....	29
<i>Ilustración 23. Icono del asistente de calibrado.</i> .....	30
<i>Ilustración 24. Asistente de calibrado.</i> .....	30
<i>Ilustración 25. Cabezal bien posicionado.</i> .....	31
<i>Ilustración 26. Cabezal mal posicionado.</i> .....	31
<i>Ilustración 27. Interfaz enfocado de Sidio.</i> .....	32
<i>Ilustración 28. Sup: Franja desenfocada. Inf: Franja enfocada.</i> .....	33
<i>Ilustración 29. Sup: Lente desenfocada. Inf: Lnte enfocada.</i> .....	34
<i>Ilustración 30. Aspecto óptimo de nivel de iluminación de Sidio.</i> .....	35
<i>Ilustración 31. Proceso de calibración automática.</i> .....	36
<i>Ilustración 32. Pantalla mientras se da la calibración automática.</i> .....	37
<i>Ilustración 33. Pantalla con fallo de calibración.</i> .....	38
<i>Ilustración 34. Pantalla de resultados de calibración.</i> .....	39
<i>Ilustración 35. Pantalla final proceso calibrado.</i> .....	39
<i>Ilustración 36. Plancha V3 colocada.</i> .....	40
<i>Ilustración 37. Posición de Sidio para la volumetría utilizada.</i> .....	41
<i>Ilustración 38. Resultados para la calibración realizada.</i> .....	41
<i>Ilustración 39. Icono de la ventana de control.</i> .....	43
<i>Ilustración 40. Aspecto de la ventana de control.</i> .....	43
<i>Ilustración 41. Ventana de control. Izq: Saturada. Dcha: Poco iluminada.</i> .....	45





<i>Ilustración 42. Ejemplo de digitalizado con distintos tiempos de exposición.</i>	46
<i>Ilustración 43. Aplicación de hellin al objeto.</i>	47
<i>Ilustración 44. Encuadre de la cruceta en la franja.</i>	47
<i>Ilustración 45. Proyección en verde de la parte ya digitalizada.</i>	48
<i>Ilustración 46. Icono de detección de targets.</i>	48
<i>Ilustración 47. Izq.: Target reconocido. Dcha.: Target sin reconocer</i>	49
<i>Ilustración 48. Posición para la primera sesión.</i>	50
<i>Ilustración 49. Posición para la segunda sesión.</i>	50
<i>Ilustración 50. Posición de las primeras capturas.</i>	51
<i>Ilustración 51. Ventana de control para las primeras capturas.</i>	52
<i>Ilustración 52. Digitalización de primeras capturas.</i>	53
<i>Ilustración 53. Targets nuevos y targets reconocidos.</i>	53
<i>Ilustración 54. Reconocimiento completo de targets.</i>	54
<i>Ilustración 55. Interfaz de Polyworks.</i>	55
<i>Ilustración 56. Barra de módulos Polyworks.</i>	56
<i>Ilustración 57. Interfaz módulo IMAlign.</i>	56
<i>Ilustración 58. Barra herramientas IMAlign.</i>	57
<i>Ilustración 59. Importación de 2 sesiones distintas.</i>	57
<i>Ilustración 60. Interfaz de unión de sesiones.</i>	58
<i>Ilustración 61. Falta de solapamiento en la unión.</i>	59
<i>Ilustración 62. Icono de puntos comunes.</i>	59
<i>Ilustración 63. Interfaz IMAlign. Sesiones unidas.</i>	60
<i>Ilustración 64. Verde: Best-fit. Rojo: Overlap</i>	61
<i>Ilustración 65. Interfaz IMAlign.</i>	62
<i>Ilustración 66. Fragmentos que eliminar.</i>	62
<i>Ilustración 67. Fragmentos que eliminar.</i>	63
<i>Ilustración 68. Puntos comunes en winglet.</i>	64
<i>Ilustración 69. Winglet después de unir sesiones.</i>	65
<i>Ilustración 70. Best-fit.</i>	66
<i>Ilustración 71. Histograma en el proceso de Best-fit.</i>	66
<i>Ilustración 72. Bordes levantados.</i>	67
<i>Ilustración 73. Bordes levantados con color predeterminado.</i>	67
<i>Ilustración 74. Captura de bordes levantados.</i>	68
<i>Ilustración 75. Selección y eliminación de bordes levantados.</i>	69
<i>Ilustración 76. Resultado final IMAlign.</i>	70
<i>Ilustración 77. Módulos Polyworks.</i>	71
<i>Ilustración 78. Interfaz módulo IMMerge.</i>	72
<i>Ilustración 79. Solapamiento de superficies.[22]</i>	72
<i>Ilustración 80. Polígonos de la superficie durante el mallado.</i>	72
<i>Ilustración 81. Inicio del proceso de mallado.</i>	72
<i>Ilustración 82. Proceso de mallado.</i>	72
<i>Ilustración 83. Winglet mallado.</i>	72
<i>Ilustración 84. Barra de módulos de Polyworks.</i>	72
<i>Ilustración 85. Interfaz módulo IMEdit.</i>	72



<i>Ilustración 86. Desplegable "edit polygon"</i> .....	72
<i>Ilustración 87. Herramienta "click and fill holes"</i> .....	72
<i>Ilustración 88. Desplegable herramienta planos</i> .....	72
<i>Ilustración 89. Opción escalar objeto</i> .....	72
<i>Ilustración 90. Opción medir en objeto</i> .....	72
<i>Ilustración 91. Primer aspecto en módulo IMEdit</i> .....	72
<i>Ilustración 92. Orificios con curvatura compleja</i> .....	72
<i>Ilustración 93. Resultado de uso de la herramienta "hammer"</i> .....	72
<i>Ilustración 94. Dorso y torso de la pieza ya editada</i> .....	72
<i>Ilustración 95. Perfiles de la pieza ya editada</i> .....	72
<i>Ilustración 96. Desplegable "curvas"</i> .....	72
<i>Ilustración 97. Barra de herramientas del módulo IMEdit</i> .....	72
<i>Ilustración 98. Desplegable parches NURBS</i> .....	72
<i>Ilustración 99. Desplegable parches NURBS</i> .....	72
<i>Ilustración 100. Bordeado con curvas</i> .....	72
<i>Ilustración 101. Cuadrículas generadas a partir de curvas</i> .....	72
<i>Ilustración 102. Generación de parches a partir de curvas. Renderizado</i> .....	72
<i>Ilustración 103. Solución a la aparición de parche no óptimo</i> .....	72
<i>Ilustración 104. Solución al no reconocimiento de parches</i> .....	72
<i>Ilustración 105. Creación completa de parches NURBS</i> .....	72
<i>Ilustración 106. Proceso de ajuste finalizado</i> .....	72
<i>Ilustración 107. Primera vista previa tras el ajuste fino</i> .....	72
<i>Ilustración 108. Pellizco. Visualizado en la vista previa</i> .....	72
<i>Ilustración 109. Pellizco con parches ocultos</i> .....	72
<i>Ilustración 110. Superficie final generada</i> .....	72
<i>Ilustración 111. Torso Solid Edge</i> .....	72
<i>Ilustración 112. Dorso Solid Edge</i> .....	72
<i>Ilustración 113. Perfiles Solid Edge</i> .....	72
<i>Ilustración 114. Toma de capturas</i> .....	72
<i>Ilustración 115. Resultado final IMAlign</i> .....	72
<i>Ilustración 116. Resultado final IMMerge</i> .....	72
<i>Ilustración 117. Resultado final IMEdit</i> .....	72
<i>Ilustración 118. Resultado final Generación de superficie</i> .....	72
<i>Ilustración 119. Superficie exportada a Solid Edge</i> .....	72





## CAPÍTULO 1

### INTRODUCCIÓN Y CONTENIDOS

---

#### 1.1 INTRODUCCIÓN

A raíz de la realización de las prácticas en FAICO (Fundación Andaluza de Imagen, Color y Óptica), en particular, en el departamento de 3D, surgió la idea de realizar dicho proyecto sobre algo que realmente me levantó bastante inquietud al verlo, ya que antes de este momento no tenía la menor idea de que esto pudiese ser posible.

¿Cómo se podía obtener un modelo en nuestro ordenador de cualquier objeto, tan exacto e imperfecto como el que teníamos en la realidad, sin tener ninguna información adicional que lo que podíamos observar?

En este trabajo se puede observar el tremendo potencial que adquiere este campo actualmente en el ámbito ingenieril, la Ingeniería Inversa. En particular, se realizará el proceso completo de dicha aplicación a un winglet perteneciente a un ala de un avión de prueba, cedido por el Departamento de Ingeniería Aeroespacial y Mecánica de Fluidos de esta Escuela.

#### 1.2 OBJETIVO

Este desarrollo, con el nombre “Aplicación de la Ingeniería Inversa a un winglet de prueba” constituye el Trabajo Fin de Grado de Jerónimo Baena Tabares, para dar por concluida su etapa en esta escuela, con el título de Grado en Ingeniería de las Tecnologías industriales.

El objetivo fundamental de dicho proyecto sería la profunda familiarización con las herramientas informáticas que hacen que sea posible el desarrollo de la obtención de un modelo tridimensional en ordenador, el cuál sea posible modificar, posteriormente, a cualquier antojo.

Además, dicho trabajo servirá como base sólida para la dedicación a dicho campo en el ámbito profesional.



Se barajaron varios objetos al cual realizarle dicho proceso. La primera idea, fue una necesidad, bastante básica aunque no por ello menos práctica.

Realizarle el proceso de ingeniería inversa y la posterior modificación, a un plato de diseño de la escuela, para que encajara la cuchara al apoyarla, debido a que esta suele escurrirse con asiduidad hacia el plato ensuciándola por completo.

Quizás, para la titulación a la que va a dar punto y final este proyecto, esta idea no fuese lo demasiado “ingenieril”, por lo que, después de alguna que otra propuesta fallida, se decantó por un objeto que tuviese una balanza equilibrada entre dificultad y practicismo.

Se optó entonces por un winglet de prueba. Al cual se le dedicará un breve capítulo 3.

Especificando, que el gran peso de este proyecto recae sobre el método para realizar la ingeniería inversa de un objeto, es decir, hasta obtener la representación tridimensional en ordenador, en la que ya es posible realizarle la modificación (extensión .cad) y no en la modificación en sí.



### *1.3 ESTRUCTURA GENERAL*

Para una mayor facilidad a la hora de comprender dicho trabajo, en este breve punto se explicará la composición de éste.

Dicho desarrollo está compuesto por tres grandes bloques. El primero de ellos, en el cual se está, está abarcando la idea de comienzo, y se le sumará, en el siguiente capítulo, los orígenes, el estado de dicha aplicación en la actualidad así como cualquier desarrollo futuro que pueda darse y esté relacionado con este ámbito. También pertenece a este primer bloque de iniciación el capítulo tres, donde se dan unas breves pinceladas de lo que es un winglet.

El segundo bloque, el más importante, contendrán las aportaciones propias, es decir, la metodología seguida para realizar las operaciones pertinentes para realizar el proceso completo, así como las herramientas necesarias para este. Esto estará recogido en los capítulos cuatro y cinco.

Para terminar, y dejar claro todo lo anterior, así como los resultados y posibles mejoras se usará un tercer bloque de recopilación, el cual estará compuesto por los capítulos seis y siete y ocho.



## CAPITULO 2.

### INGENIERÍA INVERSA

---

#### 2.1 ¿QUÉ ES LA INGENIERÍA INVERSA?

*“El análisis de un sistema para identificar sus componentes actuales y la dependencias que existan entre ellos, para extraer y crear abstracciones de dicho sistema e información de su diseño” [Chifofsky, 1990].*

*“El proceso de analizar el código, documentación y comportamiento de un sistema para identificar sus componentes actuales y sus dependencias para extraer y crear una abstracción del sistema e información del diseño. El sistema en estudio no es alterado, si no que se produce conocimiento adicional acerca del sistema” [SEI, 2004].*

*“El objetivo de la ingeniería inversa es obtener información o un diseño a partir de un producto accesible al público, con el fin de determinar de qué está hecho, qué lo hace funcionar y cómo fue fabricado.” [Anónimo, Wikipedia, 2015]*

Si la ingeniería es el arte de usar el ingenio para construir cosas y sistemas que resolvieran cosas a partir de la necesidad y la escasez, la ingeniería inversa es una extraña variante de esta, que se puede definir vagamente como el arte de “reinventar lo ya inventado”, incluso saltando fórmulas o parámetros hechos por personas autorizadas y calificadas para ellos por otras que quizás solo cuentan con el instinto o la seguridad del ensayo y el error.

Actualmente, los softwares y los componentes electrónicos son los productos que mayoritariamente son sometidos a dicho proceso, aunque cualquier objeto es susceptible de ser sometido a ella.

El método se denomina así porque avanza en dirección opuesta a las tareas habituales de ingeniería, que consisten en utilizar datos técnicos para elaborar un producto determinado. En general, si el producto u otro material que fue sometido a la ingeniería inversa fueron obtenidos en la forma apropiada, entonces el proceso es legítimo y legal. De la misma



forma, pueden fabricarse y distribuirse, legalmente, los productos genéricos creados a partir de la información obtenida de la ingeniería inversa, como es el caso de algunos proyectos de Software libre ampliamente conocidos.

*“La ingeniería inversa es un método de resolución. Aplicar ingeniería inversa a algo supone profundizar en el estudio de su funcionamiento, hasta el punto de que se pueda llegar a entender, modificar y mejorar dicho modo de funcionamiento.”* [Anónimo, Wikipedia, 2015].

Las ventajas que muestra este proceso se pueden ver enumeradas seguidamente:

- Se analiza la tecnología utilizada en la fabricación del objeto, en la que por medio de análisis, se puede concluir si son de última generación, qué tecnologías son compatibles entre sí y cuáles no.
- Detectar los fallos existentes, si los hay, ya sea en software o hardware y por qué se han producido, con el fin de no volverlos a cometer.
- Al igual que la tecnología utilizada, también se puede conocer con qué materiales es más idóneo trabajar, ya sea económica o funcionalmente, para lograr llegar a un resultado más óptimo en el futuro.
- Averiguar cuántos y cuáles fueron los pasos utilizados en la fabricación del objeto.
- Conocer las ventajas y desventajas del producto analizado, para tenerlas en cuenta en un desarrollo futuro.[1]

Se puede observar un esquema muy general que deja claro el objetivo principal de este proceso.



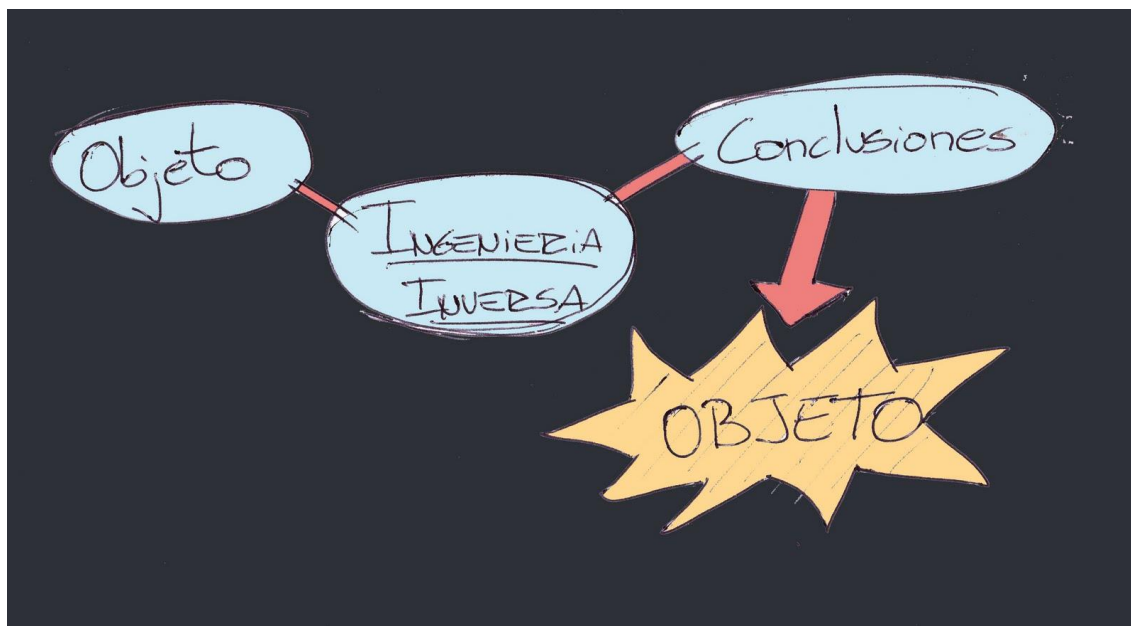


Ilustración 1. Ingeniería Inversa. [2]

Sabiendo que objeto no tiene por qué ser físico, pudiendo ser un desarrollo software o sistema.

Dentro de la ingeniería inversa en general, se puede diferenciar en dos ámbitos claramente diferenciables, como son la dedicada al software y sistemas y la dedicada al hardware y objetos físicos.

## 2.2 INGENIERÍA INVERSA. SOFTWARE

La ingeniería inversa tiene la misión de desentrañar los misterios y secretos de los sistemas en uso. Consiste principalmente en recuperar el diseño de una aplicación a partir del código.

Esto se realiza principalmente mediante herramientas que extraen información de los datos, procedimientos y arquitectura del sistema existente.

Es aplicable a sistemas con las siguientes características:

- Documentación inexistente o totalmente obsoleta.
- Programación en bloque de códigos muy grandes y/o sin estructurar.

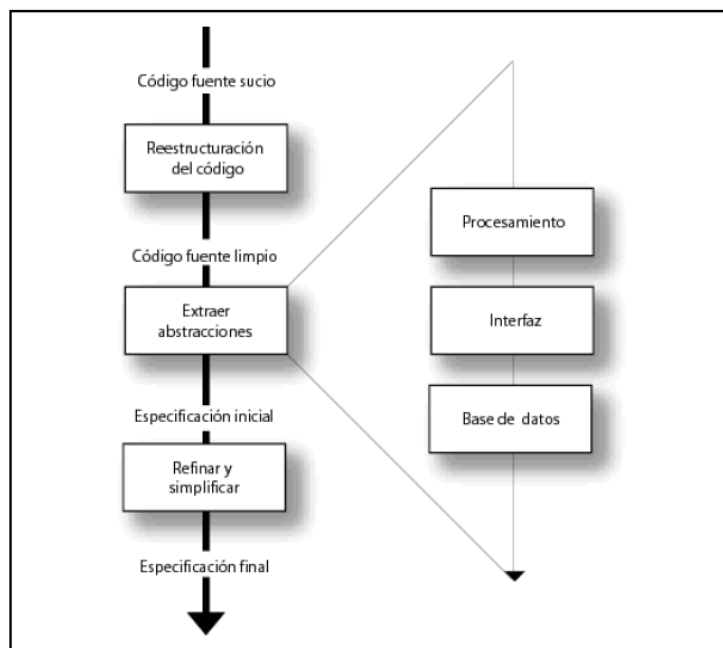


- Inexistencia de documentación interna en los programas, o bien ésta es incomprensible o está desfasada.
- La aplicación cubre gran parte de los requisitos del rendimiento esperado.
- La aplicación está sujeta a cambios frecuentes, que puede afectar a parte del diseño.
- Se prevé que la aplicación pueda tener aún larga vida. [3]

*“La ingeniería inversa puede extraer información de diseño del código fuente, pero el nivel de abstracción, la completitud de la documentación, el grado con el cual trabajan el mismo tiempo las herramientas y el análisis humano, y la direccionalidad del proceso son sumamente variables” [Cass, 1988]*

Es decir, con la ingeniería inversa, en lo que a software se refiere, se intenta descubrir cómo funciona un programa, pudiendo llegar al punto que exista una modificación de código, o una creación del mismo hasta llegar a la misma funcionalidad que tiene el programa al que se le está realizando el proceso. Claro está que no siempre se puede recurrir a este recurso, ya que en la actualidad multitud de programas que no son “open source” desarrollan en sus condiciones de uso una prohibición expresa de poder realizarle la ingeniería inversa.

En lo que refiere a la ingeniería inversa de software, no existe unos documentos que especifiquen paso a paso como realizar una ingeniería inversa “oficial”, por lo que cada ingeniero puede proponer sin ningún problema su propia metodología buscando la forma de hacer lo más práctico posible y eficiente el proceso. Aunque sí que es verdad que existen unos guiones que pueden hacer más fácil y orientar de lo que puede ser un recorrido general del proceso.



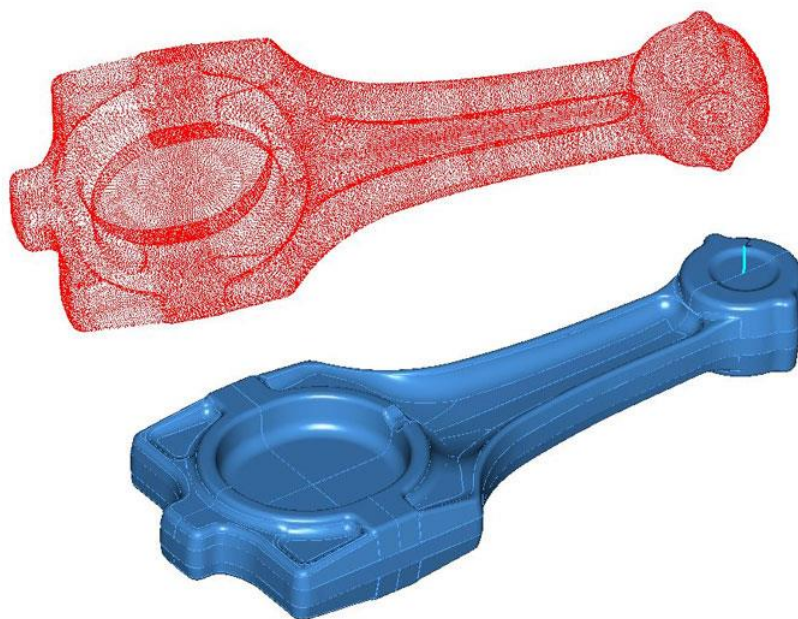
**Ilustración 2. Ingeniería Inversa Software [4]**

### 2.3 INGENIERÍA INVERSA HARDWARE

Se conoce como ingeniería inversa, hardware, al proceso de duplicar una pieza, componente o conjunto, sin la ayuda de planos, documentación o modelos de CAD auxiliares. Se parte siempre de un modelo físico y se usan métodos de ingeniería de medida, análisis y diseño, para finalmente obtener una réplica idéntica o mejorada del objeto en sí.

La ingeniería inversa puede ser aplicada en cualquiera de las fases o etapas que componen el proceso de desarrollo del producto, aplicada a cualquier sector industrial (automoción, aeromodelismo, electrónica etc.), así como para cualquier material, proceso de manufactura o geometría del producto. [5]

En este campo, a diferencia del campo software, si existen unos pasos para poder realizar el proceso para tener un resultado óptimo.



**Ilustración 3. Ejemplo Ingeniería Inversa Hardware. [6]**

Como se puede ver en la imagen, estos pasos parten desde la obtención de nube de puntos hasta, por medio de su tratamiento llegar a una superficie modificable.

Para no ser repetitivos, en esta figura sólo se observa el comienzo y el final del proceso a realizar, haciéndose un análisis mucho más profundo en posteriores capítulos.

Dejando aquí unas simples pinceladas para poder dedicarle posteriormente un capítulo completo (Capítulo 5) a este procedimiento, y explicar detalladamente esta metodología.

#### **2.4 HISTORIA Y ACTUALIDAD.**

Los orígenes de la ingeniería inversa, de los que ahora mismo se tiene constancia certera, se remontan a la Guerra Fría y a la Segunda Guerra Mundial, en la que los ejércitos requisaban material de guerra del enemigo, fuesen vehículos o armas, para mejorar las suyas a través de un exhaustivo estudio de las mismas.

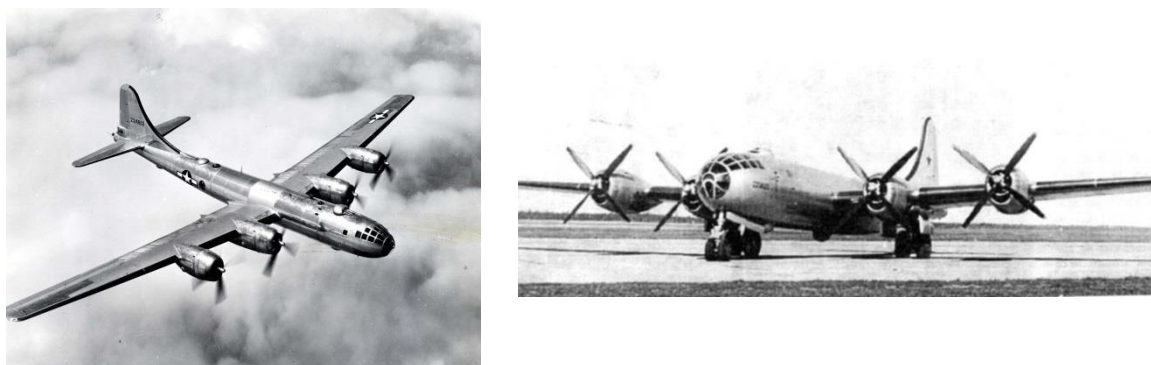
En esta época fueron sometidos a este proceso ejemplos como “Jerry can” o “Tupolev Tu-4”.



En el primero de ellos, británicos y estadounidenses se dieron cuenta que los alemanes tenían latas de gasolina con un diseño excelente. Por medio de la ingeniería inversa copiaron dichas latas. Esas latas, eran popularmente conocidas con el nombre de “Jerry cans”. [7]

En el segundo de los ejemplos, en 1944, tres bombarderos estadounidenses modelos B-29 con misiones en Japón se vieron obligados a aterrizar en la URSS. Los soviéticos, que no tenían un bombardero de estrategia similar decidieron copiar el B-29. Al cabo de tres años, habían desarrollado el Tu-4, una copia casi perfecta. [8]

Se puede ver en la siguiente comparación, la tremenda similitud que existen entre ellos.



**Ilustración 4. Izquierda: B-29. Derecha: Tu-4 [9]**

En la actualidad, se puede observar constantemente la utilización de ingeniería inversa en software, en la a menudo se introducen modificaciones en los programas open source con el fin de mejorar el código actual o bien de realizar una mejora de este. Ejemplos de este tipo de programas pueden ser LibreOffice o VLC.

Otros ejemplos que están a la orden del día y que se pueden encontrar constantemente a nuestro alrededor son los productos provenientes del mercado oriental. La ingeniería inversa es ilegítimamente utilizada por la competencia para abaratar costes y obtener un modelo exactamente calcado del original, y que debido a la calidad de las herramientas utilizadas para su fabricación (no tanto de los materiales utilizados para ello), pueden pasar desapercibidos para nuestros ojos.



Se puede ver un ejemplo de este hecho, en la siguiente figura, donde es prácticamente imposible diferenciar la copia del original.



**Ilustración 5. iPhone real Vs iPhone copia [10]**

También, aunque menos demandada que estas anteriores, o quizás menos escuchada por el secretismo inherente asociado a la religión y en particular a las hermandades, se puede aprovechar dicha tecnología y dicho proceso, (aunque no el proceso completo) para realizar copias de seguridad de imaginería.

En este caso, como resultado final se obtendría un modelo listo para la impresión 3d, aunque no modificable, por lo que se quedaría en un paso intermedio de realizar lo que es en sí la ingeniería inversa.

En el caso de que una imagen tuviera un percance por ejemplo, en un dedo de la mano, al tener dicho modelo, sería posible obtener una réplica exacta y relativamente rápida del dedo dañado para poder sustituirlo en la imagen.

Otra aplicación actual importante, además de aplicación de este trabajo, a la hora de ahorrar tanto coste como tiempo son las modificaciones a través de la ingeniería inversas aplicadas al aeromodelismo. Para poder hacer pequeñas sucesivas modificaciones, en un periodo pequeño de tiempo, manteniendo la mayor parte del objeto intacta se usa este proceso, para después poder hacer pruebas con este nuevo objeto por ejemplo en un túnel de viento.

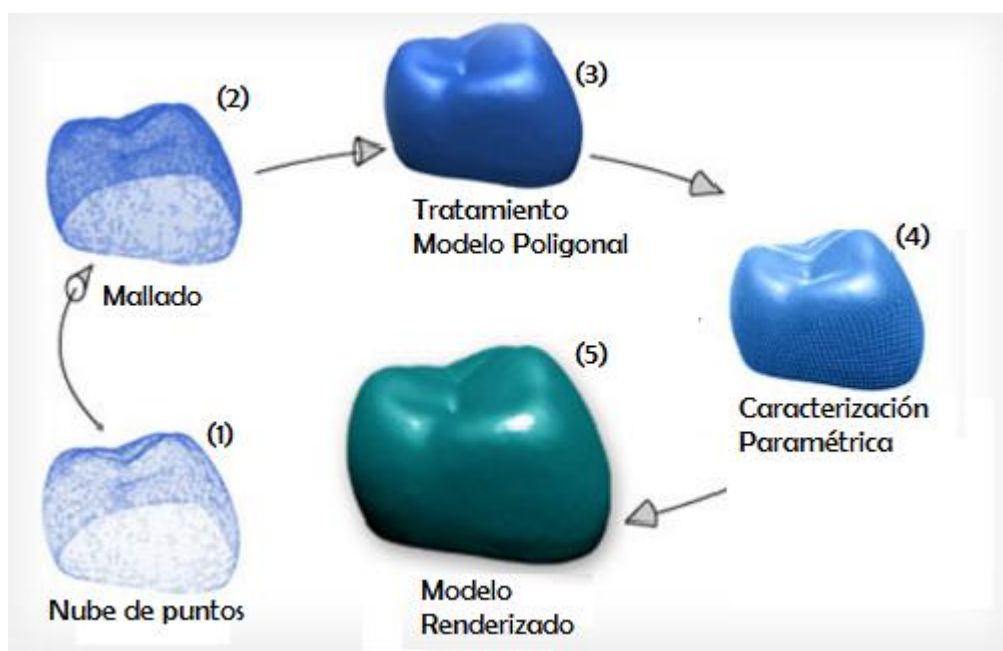


## 2.5 INTRODUCCIÓN AL PROCESO DE INGENIERÍA INVERSA

En este apartado se mostrará el ciclo general del proceso al que se debe este trabajo, el de ingeniería inversa. Será breve, con el fin de tener una idea clara para poder entender mejor todo lo que se desarrollará en adelante.

Como se ha podido ver en la ilustración 3 de este mismo capítulo, el inicio del ciclo se presenta, recogiendo información de tal forma que se obtiene la nube de puntos del objeto real, y que, al final del proceso, se tiene como resultado una superficie sólida, modificable en el software adecuado, que puede ser, entre otras opciones, analizada o impresa.

Como es obvio, este resultado no es directo. Con la imagen siguiente se puede obtener una idea de los pasos a seguir.



**Ilustración 6. Procedimiento General Ingeniería Inversa. [5]**

Una vez que se tiene el equipo de obtención de puntos calibrado, escáner de luz estructurada, que más tarde se comentará, se comienza a tomar capturas, las cuales, se pueden ver en el pc asociado al escáner, en forma de nube de puntos en el software triple.

Lo normal, es que la pieza necesite más de una sesión para tenerla cubierta en su totalidad, es decir, que esté escaneada por partes. Si es así, estas partes serán unidas en otro software, Polyworks, en forma de nube de puntos. Punto 1 del esquema.



Una vez que se tenga la pieza completa en nube de puntos, se transferirán estos a otro módulo de este mismo software, IMMerge, en los que dicha nube se habrá transformado en una malla o polígonos. Punto 2.

Cuando este proceso haya finalizado, se tendrá el modelo poligonal, listo para tratarlo, en un módulo nuevo de este mismo software. Módulo IMEdit que corresponderá al punto 3 de la figura 6.

En esta sección se eliminarán impurezas si las hay, se rellenarán huecos, y se suavizará, entre otras operaciones, el modelo.

Ya se tiene el modelo en condiciones para pasar al siguiente escalón. En este mismo módulo se procederá a la caracterización paramétrica, punto 4, que no es más que generar una superficie, idéntica a la de la pieza, que pueda ser importada por un software específico, para poder tratarla, modificarla o simplemente someterla a un estudio.

Este sería el último paso de nuestro proceso, correspondiente al punto 5 de nuestra figura.

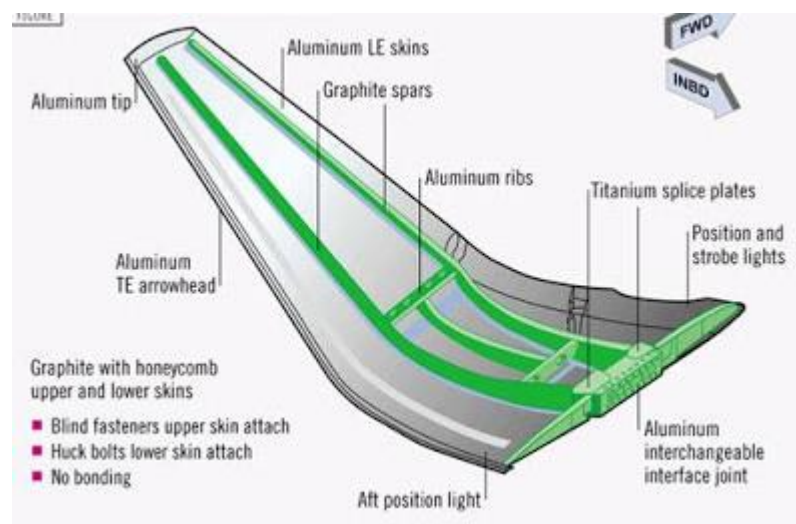




## CAPÍTULO 3

### WINGLET

Winglet, también llamados dispositivos de punta alar, son superficies aerodinámicas, con una estructura interior generalmente de dos largueros (son vigas horizontales que recorren las alas desde el encastre hasta el extremo), un par de costillas (vigas perpendiculares a las anteriores para dar rigidez a la estructura), y dos paños o placas planas exteriores que son las que dan la forma por fuera. Dependiendo del modelo de avión o fabricante, estas estructuras son totalmente metálicas o mitad metálicas mitad material compuesto. Se encastran a la punta del ala, integrándose en su estructura, de forma que sólo se quitan si se detecta algún problema o corrosión. [11]



**Ilustración 7. Partes de un Winglet [12]**

Cuando un perfil alar rompe la corriente de aire durante el vuelo, se producen dos líneas de corriente de aire, una por la parte superior del ala y otra por la parte inferior que son las que proporcionan sustentación y así se podrá mantener en el aire (no se entrará en los principios del vuelo debido a que sería más largo y complejo este capítulo).

Debido a diferentes cuestiones físicas, cuando las dos líneas de corriente se unen a la salida del ala, se forma un vórtice de alta energía a la salida



(aire en movimiento turbulento), el cual proporciona resistencia. Debido a que se tienen infinitos perfiles alares a lo largo de la envergadura del ala, hay infinitos vórtices a la salida del ala, siendo de menor magnitud en el encastre del ala, y de mayor en la punta de plano.

De hecho se puede ver el fenómeno del "Vortex Lattice" o vórtices de salida de ala, cuando se producen ciertas condiciones de presión, temperatura ambiente y punto de rocío, que desencadena dos estelas blancas finas en la punta del ala:



**Ilustración 8. Efecto de un Winglet en vuelo.**

La finalidad del winglet, es atraer todos los vórtices hacia la punta de plano (donde está el winglet) e intentar juntarlos en un vórtice más grande (de hecho si se observa la ilustración inmediatamente superior, se podrá ver que la estela sale de la punta del winglet, se separa el vórtice del ala). De esta forma se consigue reducir la resistencia.

Esto implica el adelanto que supuso la incorporación del winglet en los aviones. Consiste en una reducción del 0.3%-0.5% en combustible.

En un ejemplo práctico, teniendo en cuenta que un vuelo Madrid-Londres consume unas 18000lbs que equivale a unos 8100kg aprox. el 0.3% de 8100kg son 24.3kg. Suponiendo que una aerolínea puede estar haciendo fácilmente 4 o 5 vuelos de este calibre durante los 365 días del año, esto puede suponer 44400kg al año por avión. Multiplicando por el precio del



kilo de keroseno (jet a o jet a1) y por el número de aviones de que disponga la aerolínea, es una gran cantidad de dinero a lo largo del año.

Una vez se ha comentado un poco que son y para qué sirven los winglets, se puede ver en la siguiente imagen el objeto real al que va a estar dedicado este trabajo. Un winglet de prueba de túnel de viento cedido temporalmente por el departamento de mecánica de fluidos y aeroespacial, como ya se dijo anteriormente.



**Ilustración 9. Winglet utilizado.**



## CAPITULO 4

## PROCEDIMIENTO DETALLADO.

## 4.1 INTRODUCCIÓN

Como una imagen vale más que mil palabras, se dedicará la introducción de este capítulo, en el que se realizará un exhaustivo análisis de nuestra metodología y de cómo funcionan las herramientas utilizadas, a mostrar un esquema detallado del procedimiento y la metodología a seguir en los siguientes puntos, que ha sido exactamente la utilizada para la realización de este trabajo.



Ilustración 10. Esquema del proceso detallado.

En la imagen superior se puede ver cada paso, con la respectiva herramienta utilizada, así como el resultado del objeto al que se le está realizando el proceso, en este caso de ejemplo, una pieza dental.

Antes de profundizar en cada uno de los pasos seguidos, se hará un desarrollo detallado de las características de la herramienta más



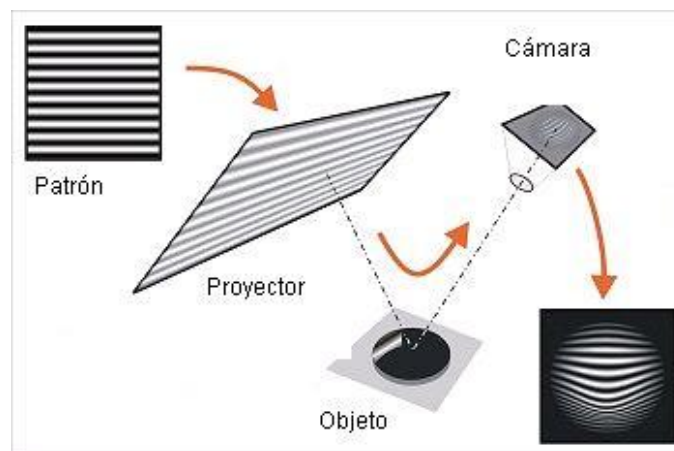
importante en este proceso, el hardware encargado de realizar cada una de las capturas de la pieza, el escáner de luz estructurada SIDIO.

#### 4.2 ESCÁNER DE LUZ ESTRUCTURADA.

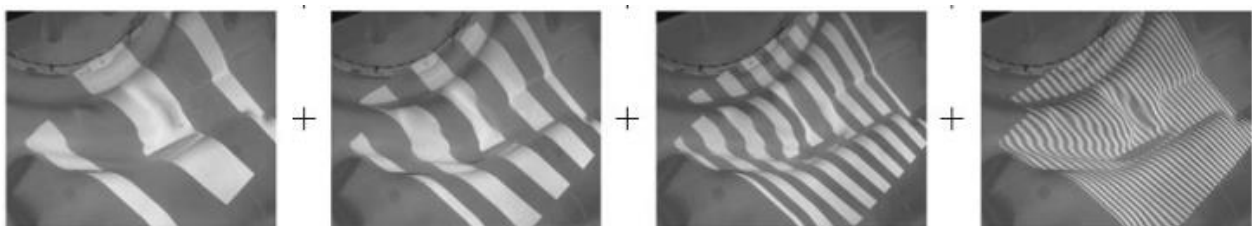
En este caso, se ha utilizado el escáner de luz blanca estructurada SIDIO, fabricado por la empresa NUB3D, y que utiliza la técnica conocida como triangulación de luz blanca estructurada.

En esta técnica la luz es el único elemento utilizado en todo el proceso de medición por lo que es idóneo para su uso con piezas de antigüedad elevada, con superficies frágiles como imaginería religiosa o piezas relacionadas con la arqueología.

‘La información tridimensional lograda por esta técnica se adquiere analizando la deformación causada cuando se proyectan líneas paralelas sobre la superficie de un objeto. Una cámara integrada en el cabezal medidor captura una serie de imágenes. Este proceso se realiza en segundos. Con estas imágenes, la tecnología integrada SIDIO calcula las coordenadas XYZ de un punto en relación a la superficie del objeto’. [13]



**Ilustración 11. Esquema proyección de patrón. [14]**



**Ilustración 12. Formas proyección de patrón. [15]**



‘Este método para generar los patrones, es el método de proyección, el cual utiliza luz incoherente, y tiene un funcionamiento similar al que tiene un proyector de video. Los patrones son generados por el display que incorpora el proyector, normalmente LCD (pantalla de cristal líquido) o, no tan habitual, LcoS (cristal líquido sobre silicio). Una técnica propietaria es la proyección empleando displays DLP (procesado digital de la luz). Por su naturaleza digital, los displays DLP no absorben la luz de manera significativa, por lo tanto; permiten trabajar con intensidades de luz altas’. [16]

Las texturas se pueden captar de igual modo gracias a cámaras métricas integradas en el propio aparato. Obtiene muy buenos resultados de pequeños elementos consiguiendo precisiones de micras.

También es necesario saber que este escáner mantiene la posibilidad de elegir la precisión a la que queremos trabajar. Esta se elegirá en la calibración del equipo.

En la siguiente imagen se puede ver su aspecto. En la zona céntrica de la máquina, la óptica de proyección de luz, que actúa como emisor del patrón, y el la lateral, la cámara, que recoge la deformación de este.

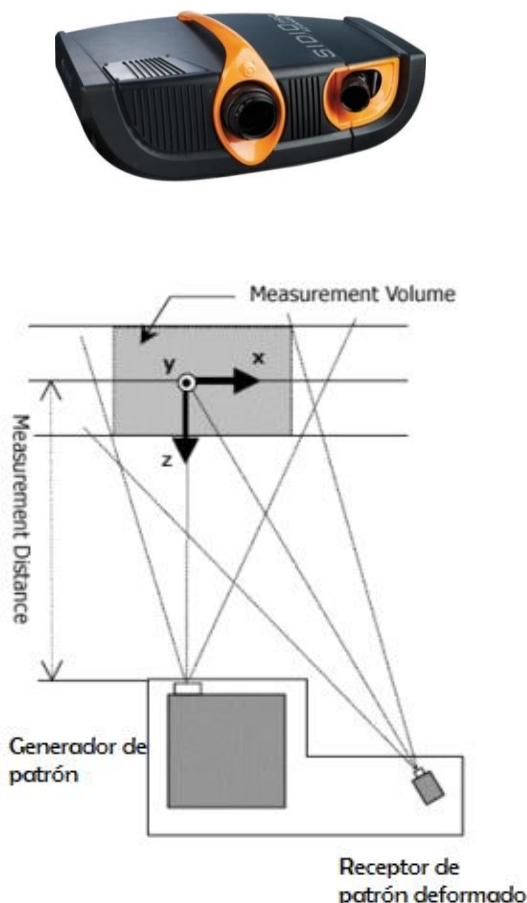


Ilustración 13. Sup: Aspecto de escáner Sidio. Inf: Estructura interna escáner. [17]



El funcionamiento de este tipo de escáner es sencillo. El aparato se puede posicionar libremente en cualquier posición, debido a su multitud de ejes que permiten posiciones bastante inverosímiles, con el objetivo de que el patrón llegue a cualquier rincón de nuestra pieza. Todas estas vistas que se realizan, referencian al mismo sistema de coordenadas utilizando cualquiera de los métodos disponibles para ellos, y que seguidamente se comentará.

Siempre y cuando no se cambie el sistema de referencia, las vistas se irán alineando entre ellas automáticamente gracias a la tecnología integrada Sidio. Este conjunto de vistas alineadas automáticamente se denominan Sesiones.

Es necesario aclarar que es importantísimo optimizar las capturas de las sesiones, ya que un exceso de estas, ralentizaría considerablemente el proceso, debido a la multitud de puntos obtenidos.

Por lo general, en un 99% de los casos, para tener información completa de la superficie del objeto, es necesario desvincular la pieza del sistema de referencia (sería imposible obtener información de la parte por donde se apoya ésta), por lo que, cada vez que se haga esto, se obtendría una sesión diferente, las cuales, se tendrían que unir con las anteriores sesiones mediante puntos comunes, por parte del técnico de digitalización.

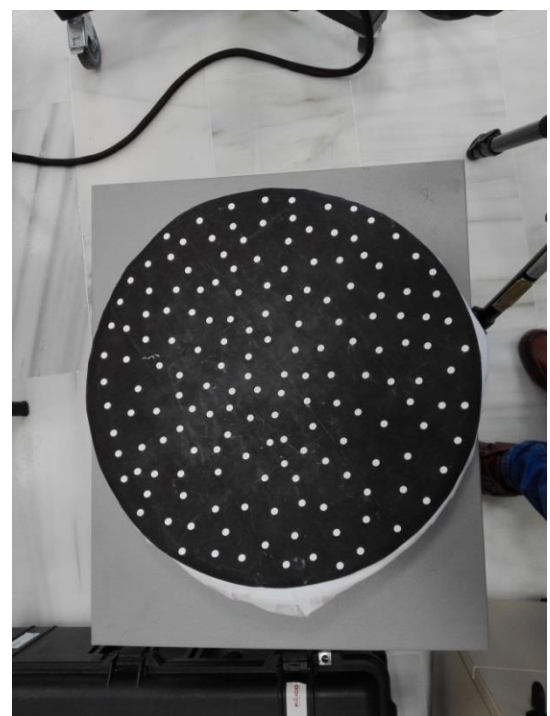
Es conveniente decir que se lograría el resultado óptimo cuantas menos sesiones existan, ahorrándonos así el trabajo “imperfecto” que supondría el alineamiento por puntos comunes del técnico.

A la hora de colocar nuestro sistema de referencia, se tiene que tener en cuenta el tamaño de la pieza a tratar. Estos pueden ser mediante targets o mediante MMLs.

#### 4.2.1 SISTEMAS DE REFERENCIA.

##### 4.2.1.1 MMEG o TARGETS.

Si la pieza a tratar tiene dimensiones por debajo aproximadamente de los 40 x 40 x 40 cm lo ideal es utilizar la referenciación mediante targets.



**Ilustración 14. Superficie giratoria de targets.**

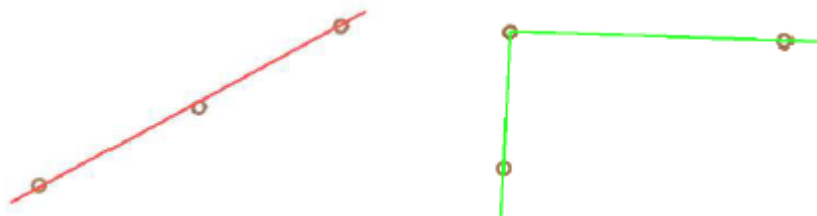


Este método utiliza elementos geométricos como referencias (Marcadores Mediante Elementos Geométricos, MMEG). Triple permite el uso de esferas o círculos blancos como referencia, aunque se aconseja el uso de círculos. Durante el digitalizado, Triple detectará automáticamente estos círculos y los usará como referencias para posicionar las vistas a medida que se va digitalizando la pieza.

Estos son puntos o marcas de referencia las cuales las entiende ya la propia tecnología del escáner utilizado. Estas marcas pueden colocarse tanto alrededor de la pieza, como sobre la misma pieza, aunque esta última opción, en el menor de los casos, ya que en la zona donde se coloquen estos se generarán agujeros por falta de información de la superficie.

Los círculos no tienen por qué ser de un tamaño predefinido, pero si deben ser lo suficientemente grandes como para que representen un número determinados de píxeles en la imagen. Esto se traduce en que, cuanto más resolución tenga la cámara, más pequeño pueden llegar a ser los círculos utilizados.

También, es importante comentar la posición de estos, e intentar que estos no queden alineados cuando sean colocados, ya que pueden dar fallos en el registro. (Ver ilustración 15)



**Ilustración 15. De izq a dcha mala y buena colocación de targets.**

Una vez que las marcas se colocan alrededor de la pieza, estas no pueden desvincularse hasta que se quiera cambiar de sesión, es decir, la pieza no puede cambiar de posición con respecto a las marcas. Una solución muy válida, y que ha sido la utilizada para el objetivo de este trabajo, es crear una superficie llena de marcas, y colocarle, bajo esta, un eje de rotación.





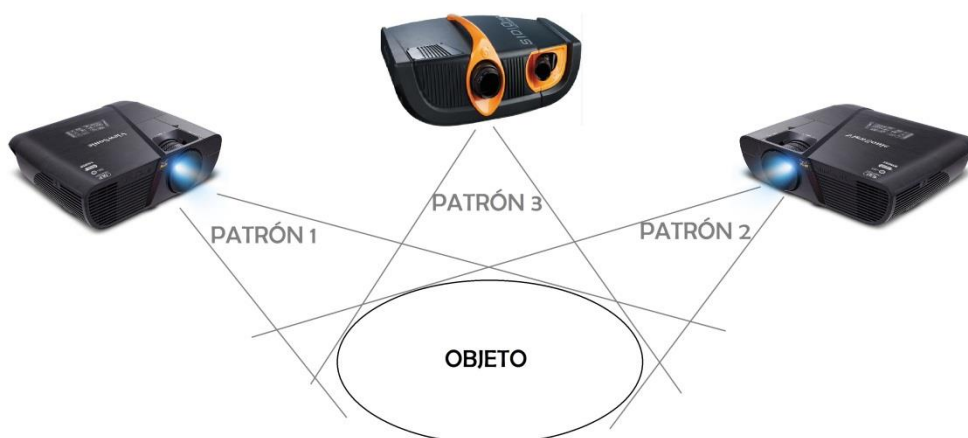
La pieza quedaría colocada sobre esta superficie, de modo que esta puede ser girada sin que se pierda la referencia, si se hace con sumo cuidado, de modo que es posible ahorrarse una cantidad considerable de sesiones, y con ello de tiempo.

Llegará un momento, en el que físicamente, será imposible que el patrón llegue a ciertas partes de la pieza, como la base sobre la que apoya, por lo que ahora sí, será necesario cambiar a una posición nueva, creando un nuevo sistema de referencia y con ello una nueva sesión.

#### 4.2.1.2 MMLs

Si no es factible utilizar el método de referencia anterior hay que recurrir a la referenciación mediante MMLs (Marcadores mediante luz). Es usado para piezas de mayor tamaño. Este sistema permite referenciar las vistas sin ningún contacto con la pieza, ya que se basa en la proyección de marcas ópticas.

Estos MMLs tienen un funcionamiento idéntico al de los proyectores de video que se usan corrientemente. Tiene como objetivo disparar un patrón de líneas paralelas sobre la pieza, al igual que el que lanza el escáner de luz estructurada, que es reconocido por la cámara de este, creando así nuestro sistema de referencia.



**Ilustración 16. Colocación correcta MMLs**




Es necesaria la utilización de dos de estos proyectores, como se puede ver en la imagen, en los que para que sea posible la creación del sistema de referencia, tienen que solaparse sobre la pieza ambos patrones lanzados por estos.

Ahora el sistema de referencia está triangulado entre los dos MMLs y la pieza en sí, por lo que un leve movimiento de ésta, o bien de los propios proyectores, desmontaría nuestro sistema referenciado, teniéndose que recurrir a una nueva sesión.

Para que el sistema de adquisición de puntos permita esta acción, la parte a digitalizar de la superficie tiene que estar cubierta por ambos patrones de los proyectores. Si esto ya no es posible, se procederá al movimiento de la pieza o de los MMLs para que así sea, de la forma que más convenga, pasándose a obtener una nueva sesión.

Tanto al inicio, como cada vez que se comience una nueva sesión, lanzaremos desde los proyectores, un nuevo patrón, esta vez cuadrículado, con el fin de enfocarlos sobre la pieza. Esto se podrá hacer manualmente, rotando la rueda de alrededor de la lente.

Una vez colocados en su posición, para poder usarlos, es necesario que el siguiente botón,  situado en la barra de menú del software triple, debe estar pulsado, quedando resaltado en el fondo naranja, y dejando activo este método para la referenciación.



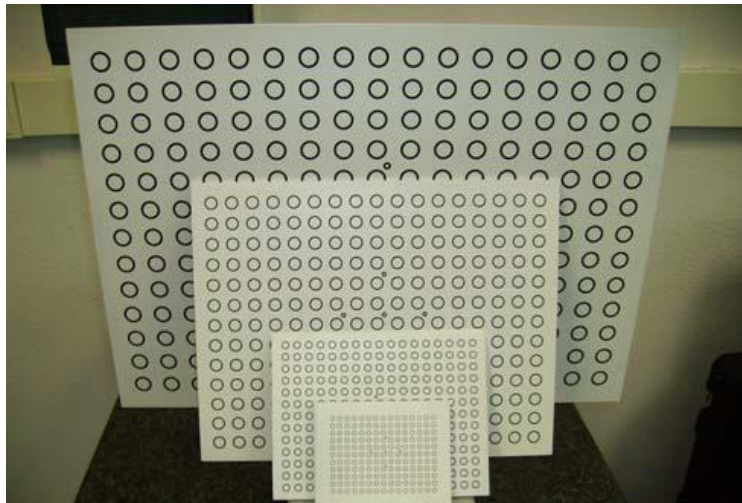
### 4.3 METODOLOGÍA COMPLETA

#### 4.3.1 CALIBRACIÓN

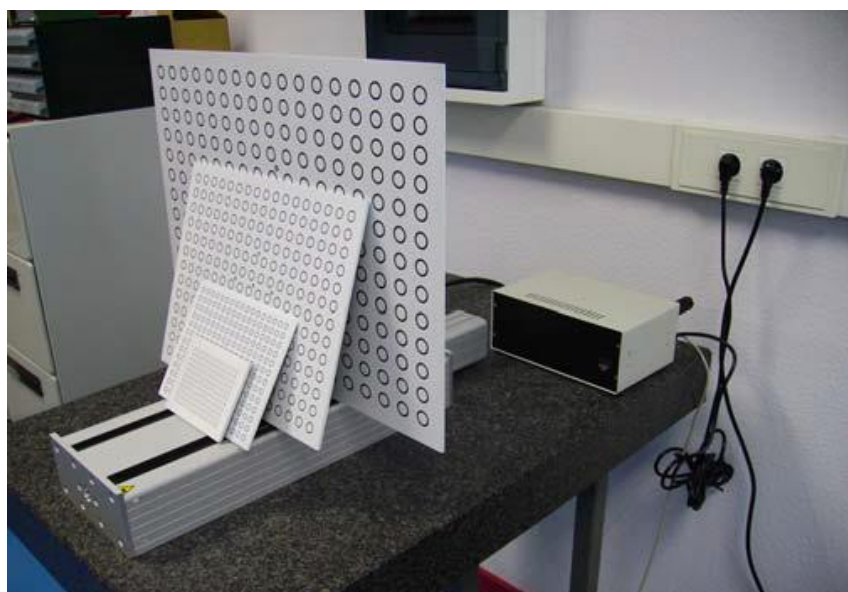
##### 4.3.1.1 GENERAL

El primer paso antes de comenzar con la toma de capturas es la preparación del equipo. Para ello se debe realizar una calibración realizada en varios pasos.

El equipo necesario para este primer paso, además del escáner en sí, son, las planchas calibradoras, en la figura 17 y la calibradora, que se puede ver en la imagen 18.



**Ilustración 17. Planchas de calibrado.**



**Ilustración 18. Calibradora y planchas de calibrado.**



Es necesario aclarar que una mala calibración puede repercutir tanto en la pérdida de escala como en una falsa textura del objeto.

Como ya se ha comentado en el punto de descripción del equipo, se tiene la posibilidad de elección de precisión en el escaneo, por lo general, buscando un equilibrio entre presupuesto y calidad.

En la siguiente tabla se puede ver las características y las posiciones que debe tomar el equipo para la precisión a la que se quiere trabajar.

**Tabla 1. Características según volumetría.**

	<b>VOLUMEN 1</b>	<b>VOLUMEN 2</b>	<b>VOLUMEN 3</b>	<b>VOLUMEN 4</b>
<b>Volumen de medida</b>	120 x 80 x 60 mm	200 x 150 x 90 mm	340 x 260 x 200 mm	550 x 390 x 240 mm
<b>Óptica</b>	28 mm	17 mm	17 mm	17 mm
<b>Exactitud</b>	0,012 mm	0,015 mm	0,023 mm	0,038 mm
<b>Precisión</b>	0,006 mm	0,007 mm	0,011 mm	0,019 mm
<b>Distancia entre puntos</b>	0,075 mm	0,15 mm	0,25 mm	0,375 mm
<b>Distancia de trabajo</b>	330 mm	330 mm	700 mm	1200 mm
<b>Tipo de lente</b>	23 mm	12 mm	12 mm	12 mm
<b>Posición de la cámara</b>	Posición más cercana al proyector, Ángulo 30°	Posición más cercana al proyector. Ángulo 30°	Posición más alejada al proyector Ángulo 30°	Posición más alejada al proyector. Ángulo 20°

Sistema de digitalización 3D SIDIO PRO ADVANCE

Óptica: 1.4 Mpixels

Se procederá a continuación a comentar los aspectos importantes de esta.

Se puede ver que cada columna corresponde a una precisión determinada. Por ejemplo, si se quiere realizar el trabajo a una precisión de 0.006mm se escogerán los parámetros de la primera columna.



En la primera fila se puede observar el volumen de medida. Esto se refiere a las dimensiones máximas que es capaz de recoger el equipo de forma óptima de una sola captura.

Para ello, es necesario que la calibración se realice en la plancha de calibrado de dimensiones 120 x 80 mm, es decir, la plancha más pequeña que se puede ver en la ilustración 17. Es razonable pensar, que para la precisión más pequeña que tiene el equipo, el área de captura sea la más pequeña posible, ya que los puntos recogidos por captura, se escoja la precisión que se escoja, serán los mismos, en torno a 1.400.000 puntos.

Se puede ver, referente a lo anterior, que en la fila de distancia entre puntos, exista menor distancia entre puntos en la opción de más precisión. Es obvio, se tienen los mismos puntos, en áreas variables.

En cuanto a la distancia de trabajo, se refiere a la distancia aproximada que debe de haber entre el cabezal del escáner y el objeto al que se le está realizando la operación. También es bastante lógico, que a más precisión, más cercanía de trabajo.

Para cuando se tenga clara la precisión que se quiere obtener, también es importante la lente con la que se va a trabajar. Se puede ver que para la precisión más baja se usará una de 23 mm, y para los demás volúmenes una de 12mm.

Si para empezar el escaneo se ha tenido que cambiar la lente, es aconsejable que se enfoque esta, porque es muy probable que en su colocación se haya desenfocado.

También habrá que posicionar adecuadamente la cámara. Tanto la posición con respecto al proyector, existen 2, cercana o alejada, como el ángulo que forma la cámara con la perpendicular del haz de luz que lanza el proyector, con dos posiciones existentes, 20° o 30°.

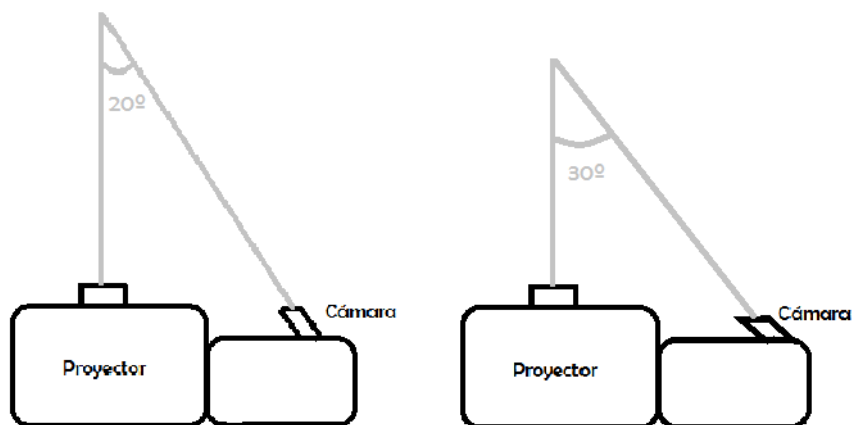
Este último párrafo se podrá entender mejor con las siguientes imágenes.



**Ilustración 19. Izq: Posición cercana de la cámara. Dcha: Posición alejada. [18]**

En la parte izquierda de la ilustración 18 se puede ver que la cámara se encuentra en la posición lo más cercana posible al proyector del escáner, lo cual sería la posición adecuada para utilizar el volumen 1 y 2 de trabajo. Por el contrario, si se usara el volumen 3 o 4 de trabajo, la posición correcta sería la que se puede ver en la parte derecha de la ilustración superior.

En cuanto al ángulo de la cámara:



**Ilustración 20. Posiciones del ángulo de la cámara.**

Una vez que se tienen posicionados todos los parámetros variables dependientes del volumen de trabajo se pasará a los pasos generales a seguir para la calibración.

El primero de ellos es colocar el escáner totalmente paralelo al suelo. Para ello hay que desprender el cabezal de su trípode de sujeción y

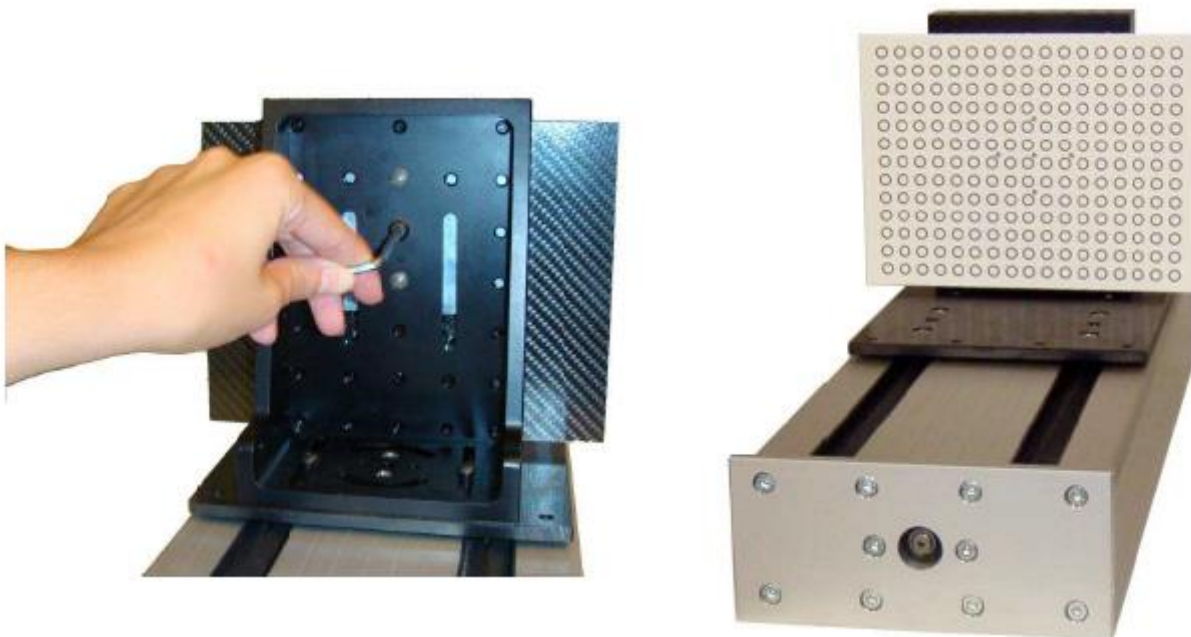


mover la rótula indicada en la siguiente figura, hasta nivelarlo, ayudándose de un nivel de burbuja colocado en el trípode.



**Ilustración 21. Nivelador del escáner. [19]**

Una vez se ha hecho esto, se colocará la plancha elegida en la calibradora, como se puede ver en la figura 22.



**Ilustración 22. Colocación de la plancha de calibración.**



Ahora ya se está listo para abrir el asistente de calibrado, que se encuentra en la barra de menú del software triple asociado al escáner SIDIO.



**Ilustración 23. Icono del asistente de calibrado.**

Una vez clicada esta opción saltará una ventana, como la de la figura, paso 1, en la que se tendrá la opción de seleccionar la plancha de calibrado que se va a utilizar así como el número del puerto USB con el que está conectada la calibradora al ordenador. Ya se puede saltar al siguiente paso.



**Ilustración 24. Asistente de calibrado.**

El objetivo de este segundo paso es posicionar la plancha de calibrado en el centro del volumen de trabajo.

Para ello, el kit de calibrado moverá la plancha hasta el final de la guía.

Una vez posicionado, se muestra en pantalla la imagen captada por el cabezal de medida.





Ahora, en la pantalla del ordenador aparecerá lo que está captando la cámara, además de una franja vertical. Seguidamente, se colocará el escáner de forma que la máxima área de emisión de luz del proyector del escáner coincida con los bordes de la plancha de calibrado, a la vez que la cruceta que dispara dicho proyector este apuntando al círculo central de la plancha y la línea vertical de la cruceta coincida a su vez con la franja vertical que se puede ver por la pantalla.

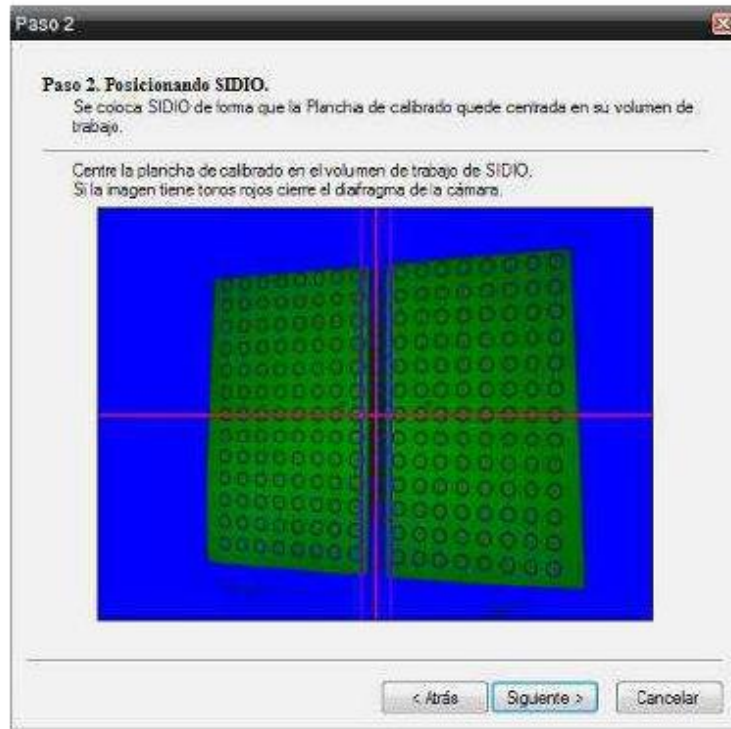


Ilustración 25. Cabezal bien posicionado.

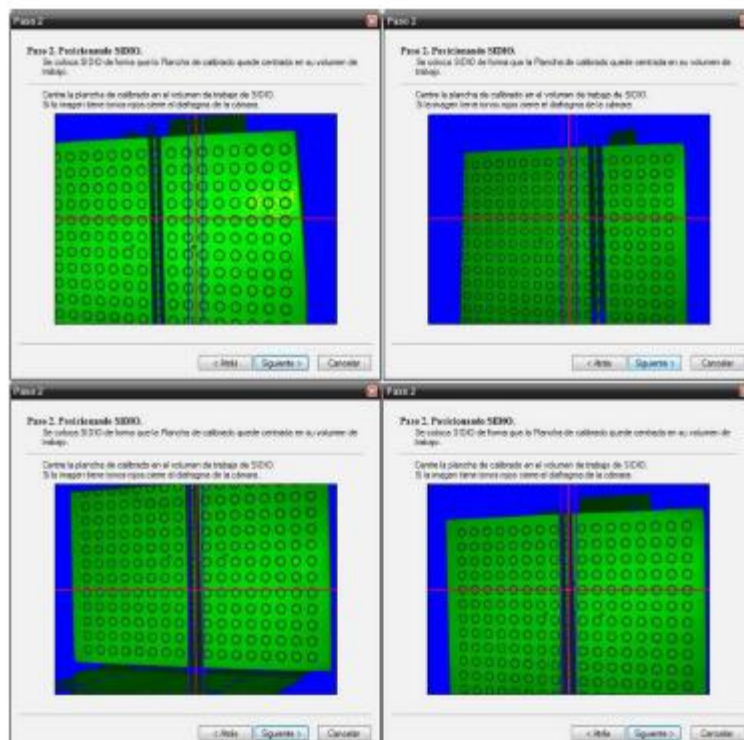


Ilustración 26. Cabezal mal posicionado.



Esta acción requiere bastante destreza, por lo que hay que ir probando varias posiciones antes de que se encuentre en la posición correcta.

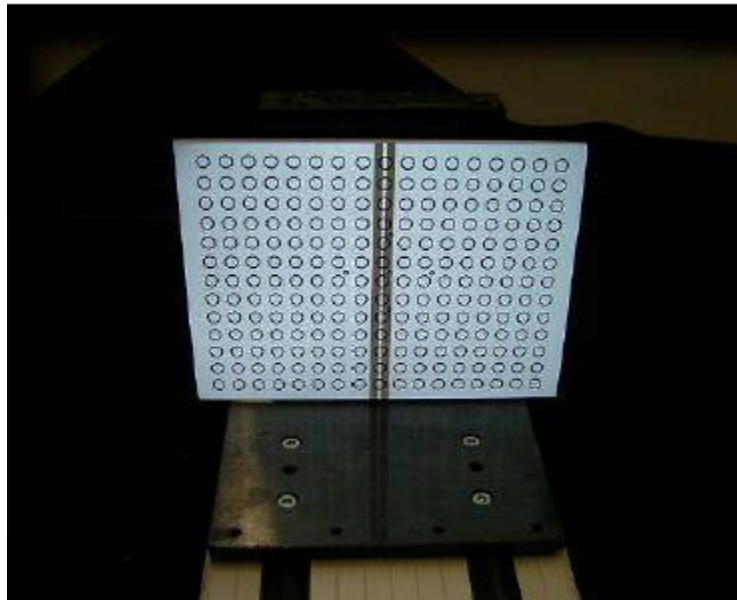
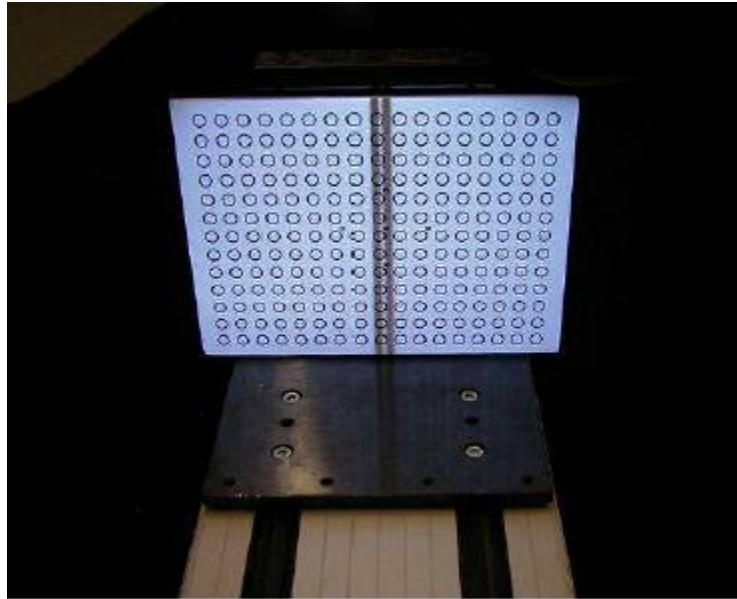
Una vez en esta posición se enfocará el proyector, hasta el óptimo, que se podrá observar visualmente. Operación perteneciente al paso 3.

Si en la última vez que se usó Sidio, se estaba trabajando con el mismo volumen de trabajo, puede saltarse este paso.



**Ilustración 27. Interfaz enfocado de Sidio.**

En la imagen de la siguiente página se puede ver la diferencia en la franja cuando el proyector está enfocado a cuando está desenfocado.

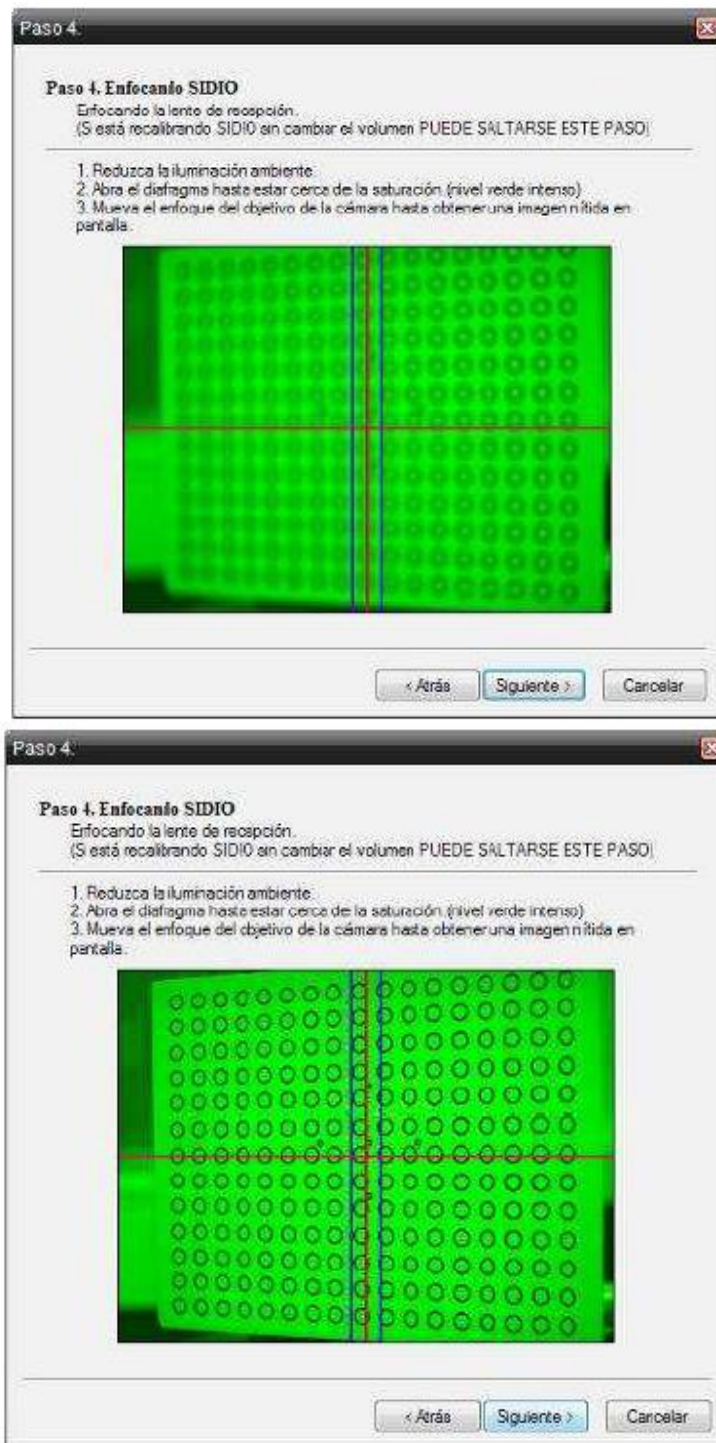


**Ilustración 28. Sup: Franja desenfocada. Inf: Franja enfocada.**

Una vez hecho esto, al igual que se ha dicho para el enfoque del proyector de Sidio, si anteriormente no se ha trabajado con el mismo volumen de trabajo, será necesario enfocar la cámara. Este será nuestro cuarto paso. Se realizará ajustando la distancia focal de esta, acercando o alejando el cuerpo de la cámara.



En las imágenes que siguen se podrá ver la diferencia entre una lente desenfocada y una bien enfocada.



**Ilustración 29. Sup: Lente desenfocada. Inf: Lnte enfocada.**

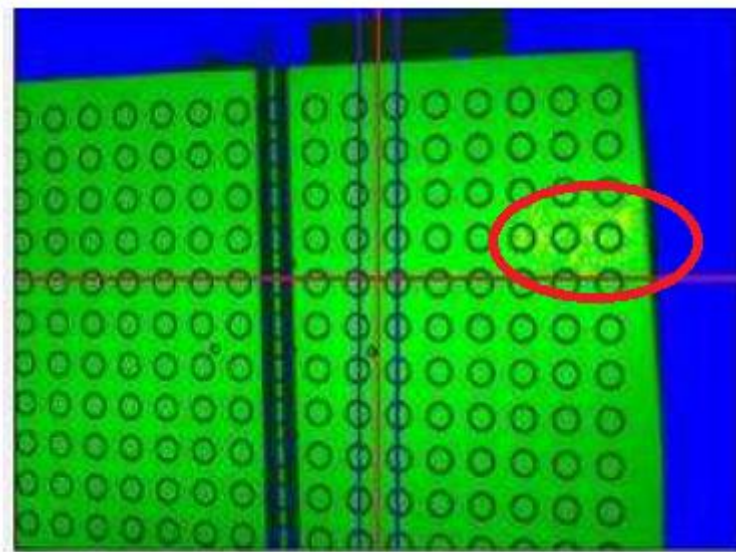
El siguiente y quinto paso, tras clicar el botón siguiente en la pantalla, será ajustar los niveles de iluminación de Sidio.



La plancha avanza hasta el plano más cercano del volumen de trabajo, por tanto la iluminación que recibe la cámara es máxima. En esta posición se ha de conseguir que Sidio reciba una imagen nítida de color verde intenso, apareciendo tímidamente algunos tonos amarillos, y en ningún caso ningún tono de rojos, es decir, sin saturar.

Esto se hará modificando tanto el diafragma como el polarizador de la lente de la cámara, con una combinación tal que el diafragma se encuentre al mínimo y el polarizador o polarizadores al máximo.

Debe quedar una apariencia como la de la siguiente imagen.



**Ilustración 30. Aspecto óptimo de nivel de iluminación de Sidio.**

Se puede ver rodeado las vagas tonalidades amarillentas, que muestra que la iluminación es la adecuada.

Es importante añadir que para hacer una óptima calibración, se debe estar en un habitáculo en la que no haya luz variable. Quiere decir, que si se está en una habitación con ventanas, lo idóneo es dejarlo todo a oscuras, para que no afecte la variabilidad de luz provocada por la posición del sol, o por que este haya sido tapado por una nube, por ejemplo.

Una vez que se ha conseguido llegar a este punto, el equipo está preparado para comenzar la calibración automática.

Esta operación trata de comprobar a distinta profundidades tanto los diámetros de los círculos de la plancha de calibrado como la distancia entre ellos, ya que estas dimensiones son conocidas, con el fin de que el



sistema corrija pequeños errores para que se mantengan las coordenadas dimensionales.



**Ilustración 31. Proceso de calibración automática.**

En este paso se realiza el calibrado automático del sistema, que coincide con el paso sexto. Aparecerá una ventana como la mostrada en la Figura 32. La guía de calibrado realizará avances sincronizados y Sidio digitalizará automáticamente la plancha.

Las barras de progreso darán una idea aproximada del tiempo de espera. La barra superior es la que indica el estado en que se encuentra dentro del ciclo completo de calibrado. La barra inferior le indica el estado instantáneo dentro de cada ciclo. Básicamente le informa de que todas las operaciones se realizan con normalidad.



**Ilustración 32. Pantalla mientras se da la calibración automática.**

La ventana inferior es una zona de mensajes para el usuario. Si todo ha ocurrido con normalidad aparecerá el mensaje de la Figura 32. De ser así se puede continuar el proceso pulsando la tecla Siguiente.

Si aparece tal y como se puede ver en la imagen superior querrá decir que la calibración ha sido óptima.

En la mayoría de los casos, en la ventana de diálogo puede que aparezcan algún que otro tipo de mensajes.

- Si aparece una advertencia, el sistema le está informando de que el calibrado se ha podido realizar pero las condiciones no han sido las óptimas. Tal vez en algún momento del calibrado el sistema ha recibido un reflejo de luz, se ha bloqueado la visión de la plancha, etc.
- Si aparece un mensaje de error como el de la figura 33 puede deberse a varias causas:

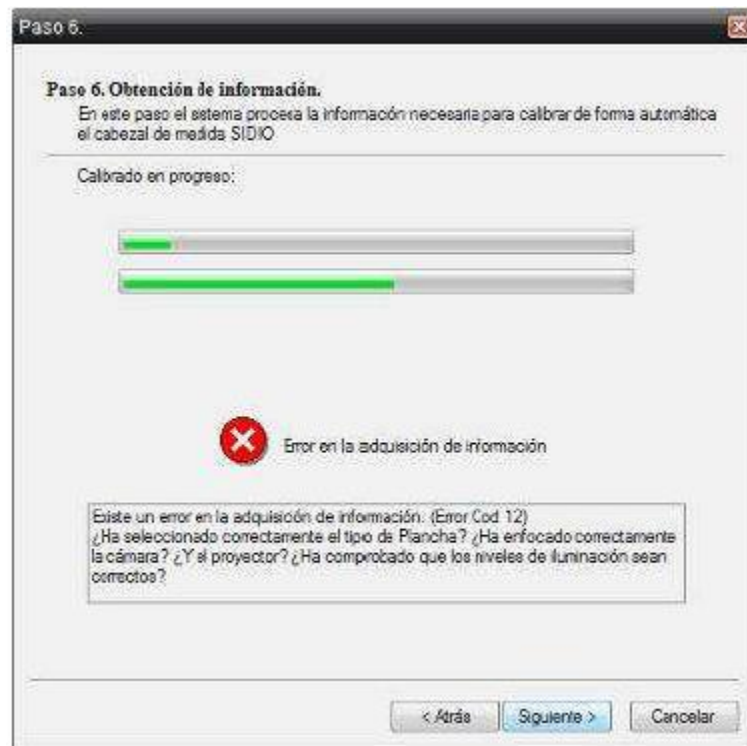
\_ La plancha de calibrado no es la que corresponde al volumen elegido.

\_ La plancha está sucia.



\_ Se ha entorpecido el ciclo de calibrado seriamente. Esto puede ser debido al bloqueo de la línea de visión de la cámara, bloqueo de la línea de iluminación del proyector, mala orientación de Sidio respecto a la plancha, etc.

En caso de error, si se presiona el botón Siguiente, el asistente de calibrado vuelve al primer paso para repetir el proceso de ajuste.



**Ilustración 33. Pantalla con fallo de calibración.**

Ya en el séptimo paso se presentan los resultados del calibrado, y si éste ha sido correcto o no.

Si el semáforo es de color verde, figura 34, significa que los resultados son aceptables para el volumen seleccionado, si por el contrario el semáforo está rojo el sistema le obligará a iniciar de nuevo el proceso de calibrado.

En esta pantalla también se puede observar tanto el error medio global, como los errores medios que se dan en los tres ejes coordenados.

Pulsando siguiente el programa permitirá finalizar el ciclo si el resultado ha sido satisfactorio, si no le obligará a comenzar de nuevo.





**Ilustración 34. Pantalla de resultados de calibración.**

En este último, y octavo paso, Triple utilizará los resultados del calibrado para ajustar las medidas de Sidio. Para ello, hay que presionar el botón de finalizar. Si cancela en esta ventana y no pulsa finalizar, el calibrado no será válido.



**Ilustración 35. Pantalla final proceso calibrado.**



#### 4.3.1.2 CALIBRACIÓN WINGLET.

La precisión escogida en este caso ha sido intermedia, por lo que se usará volumen 3.

Se ha decidido así debido a que el winglet utilizado no contiene demasiadas hendiduras, salvo los orificios de anclaje al ala.

Estos son los parámetros, tabla 2, relacionados con el volumen de trabajo que se ha decidido utilizar.



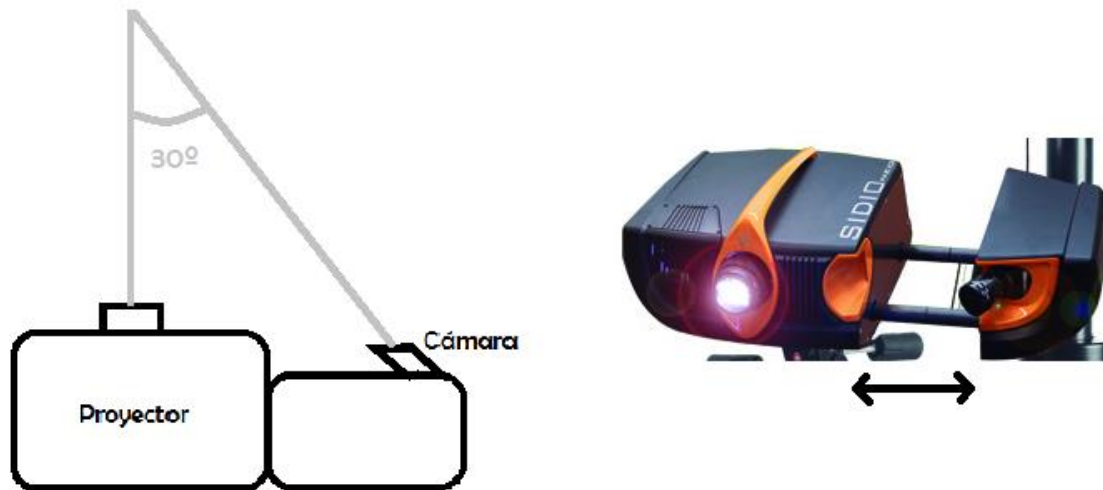
Ilustración 36. Plancha V3 colocada.

Tabla 2. Características para la volumetría V3 utilizada.

	<b>VOLUMEN 3</b>
Volumen de medida	340 x 260 x 200 mm
Óptica	17 mm
Exactitud	0,023 mm
Precisión	0,011 mm
Distancia entre puntos	0,25 mm
Distancia de trabajo	700 mm
Tipo de lente	12 mm
Posición de la cámara	Posición más alejada al proyector Ángulo 30°

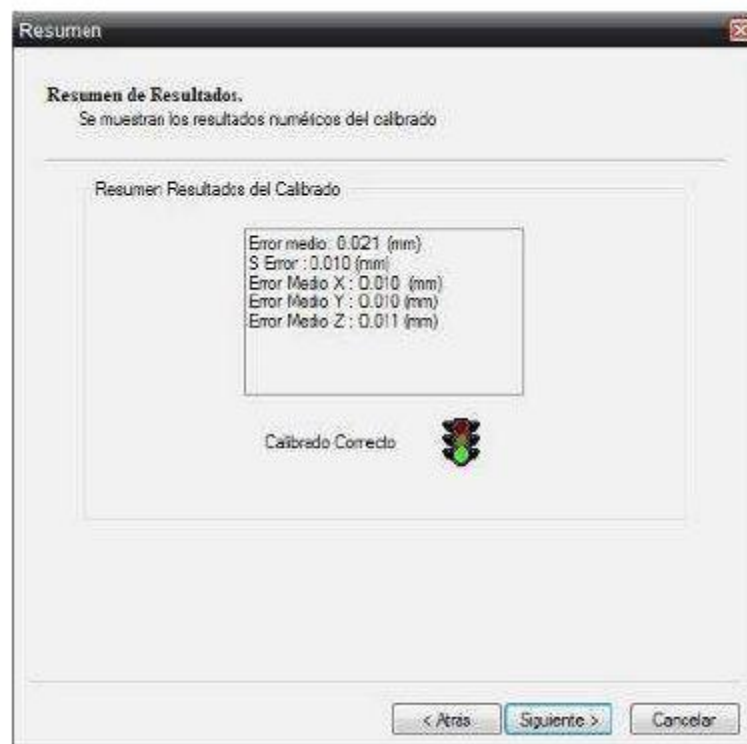


Donde los parámetros, que se deben variar, más importantes a tener en cuenta son, tanto el tipo de lente, como la posición de la cámara, que deberá quedar como se muestra en la siguiente figura.



**Ilustración 37. Posición de Sidio para la volumetría utilizada.**

Una vez que se han posicionado adecuadamente los parámetros variables y se han seguido los 8 pasos para la calibración del equipo se ha obtenido la pantalla final con la relación de errores obtenidos en esta.



**Ilustración 38. Resultados para la calibración realizada.**



Una vez que ha sido satisfactoria la calibración, se trabajará con una precisión de 0.011mm, como marca el volumen de trabajo seleccionado.

**Tabla 3. Precisión dada para la volumetría escogida.**

Precisión	0,011 mm
-----------	----------



## 4.3.2 DIGITALIZADO

### 4.3.2.1 GENERAL

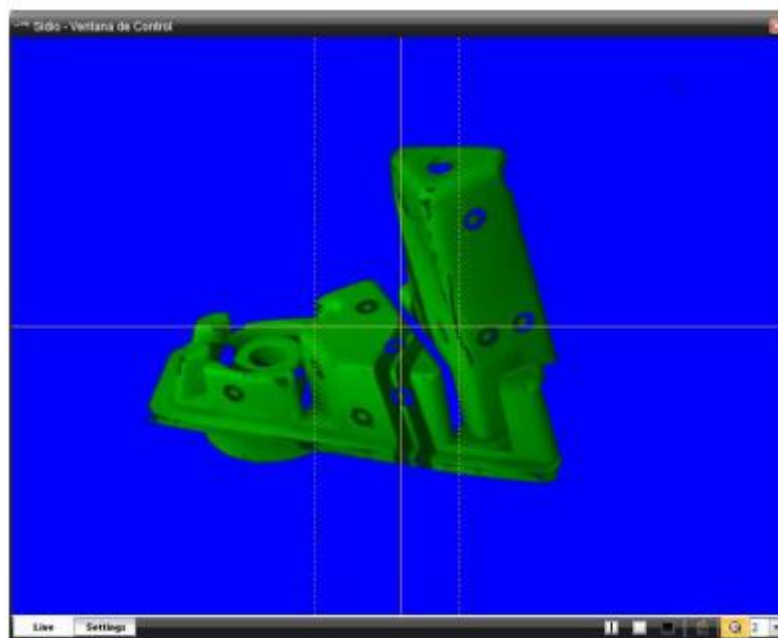
En este punto se entrará en detalle de la toma de capturas, es decir, la recogida de información del objeto al que se le está realizando la operación.

Como elemento importante en este paso se presenta la ventana de control, que se desplegaría clicando el icono rodeado de la siguiente figura, situado en la barra de herramientas del software Triple.



**Ilustración 39. Icono de la ventana de control.**

En esta ventana se permitirá posicionar correctamente Sidio frente a la pieza a digitalizar. En la figura 40, se puede ver el aspecto que se tiene al desplegarse la ventana de control.







**Ilustración 40. Aspecto de la ventana de control.**

Ocupando prácticamente la totalidad de la ventana, se muestra la imagen capturada por la cámara integrada en Sidio. En la parte inferior izquierda de la ventana se tiene acceso a dos pestañas, la de vista de cámara y la pestaña de configuración, que se verá a continuación.



La imagen de cámara siempre se muestra en pseudocolor, en este caso, se pueden ver dos de ellos. Sobre el objeto, con color verde, y todo lo que no es objeto, de color azul. En la siguiente tabla se muestran las equivalencias de color:

**Tabla 4. Equivalencias de color en la ventana de control.**

COLOR	SIGNIFICADO
 Azul	Poca iluminación. No es posible el digitalizado.
 Verde	Nivel adecuado de iluminación
 Amarillo	Nivel de iluminación demasiado alto.
 Rojo	Exceso de iluminación. No es posible el digitalizado

Como se puede ver en la imagen 40, el fondo, azul, tiene muy poca iluminación, por lo que no es posible el digitalizado, por lo tanto no sacará información.

Es bueno, que todo aquello que no sea pieza salga de este color, no siendo así si se aprecian tonalidades azules en la pieza en sí.

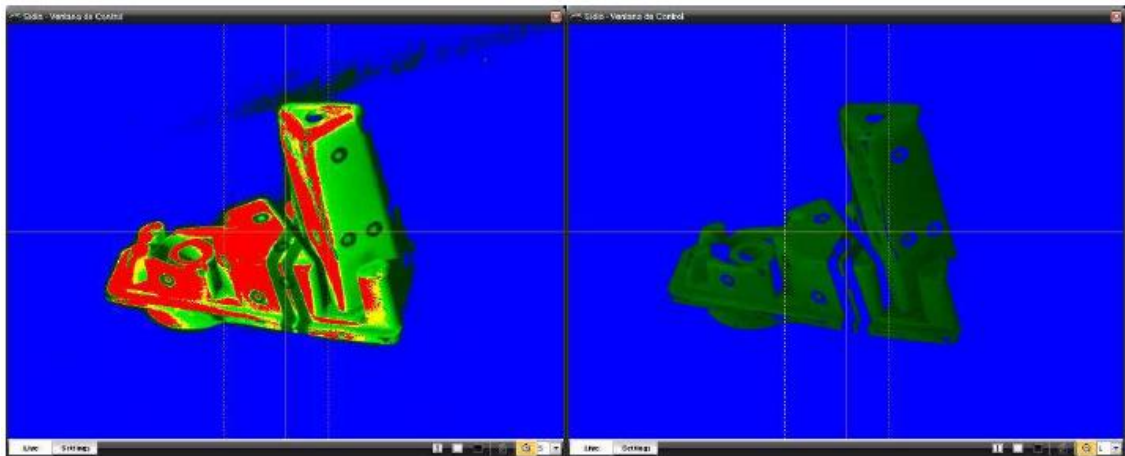
Dependiendo del color de la pieza, de su brillo, o de su textura, hay que ir jugando con los tiempos de exposición, que no es más que el tiempo que el obturador de la cámara permanece abierto permitiendo que entre luz a esta.

Este parámetro puede ser modificado en la parte inferior izquierda de nuestra ventana de control con el icono del fondo naranja, y el número dos en el desplegable. Se puede ver en la siguiente ilustración la misma pieza en la misma posición con dos tiempos de exposición distintos, y cómo afectaría esto a la misma.

En la parte izquierda, un tiempo de exposición alto, con la entrada de demasiada luz, lo que provoca la saturación de la captura. En la derecha,



el tiempo de exposición no es lo suficientemente alto para que pueda entrar la luz idónea para sacar una captura óptima.



**Ilustración 41. Ventana de control. Izq: Saturada. Dcha: Poco iluminada.**

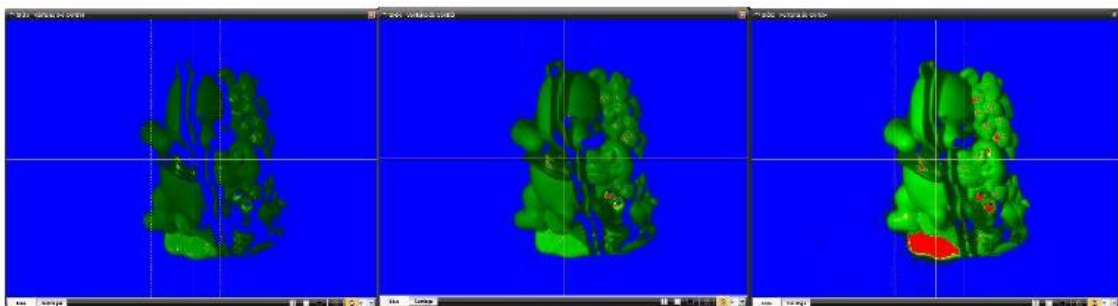
Se puede modificar el tiempo de exposición desde 1 hasta 20, siendo 1 el método más rápido (el que adquirirá menos luz) y 20 el más lento, que por tanto adquirirá más luz y será útil para piezas muy oscuras.

Existe otra posibilidad para piezas con dificultad de escaneo elevada, con muchas hendiduras que provoquen sombras por ejemplo, que es utilizar en cada captura varios tiempos de exposición.

Realmente lo que se está haciendo es disparar varias capturas en una. Una de ellas se configurará con tiempo de exposición bajo, para sacar las partes claras y la otra con tiempo de exposición alto, para las partes oscuras o con sombras.

Hay que hacer un equilibrio en la balanza a la hora de configurar esto, ya que al elevar el tiempo de exposición se hace cada vez más lenta la captura.

A continuación se podrá ver un ejemplo de un objeto con zonas claras, oscuras y hendiduras, con una digitalización con tres tiempos de exposición diferentes, 1,4 y 7 respectivamente, como se ve en la ventana de control, y cuál es el resultado de la captura.



**Ilustración 42. Ejemplo de digitalizado con distintos tiempos de exposición.**

También, si la pieza es transparente o muy oscura, no es posible sacar información óptima solamente modificando los tiempos de exposición, por lo que se puede utilizar talco, o un spray llamado “hellin” (inocuo para la superficie del objeto), para solucionar este problema.

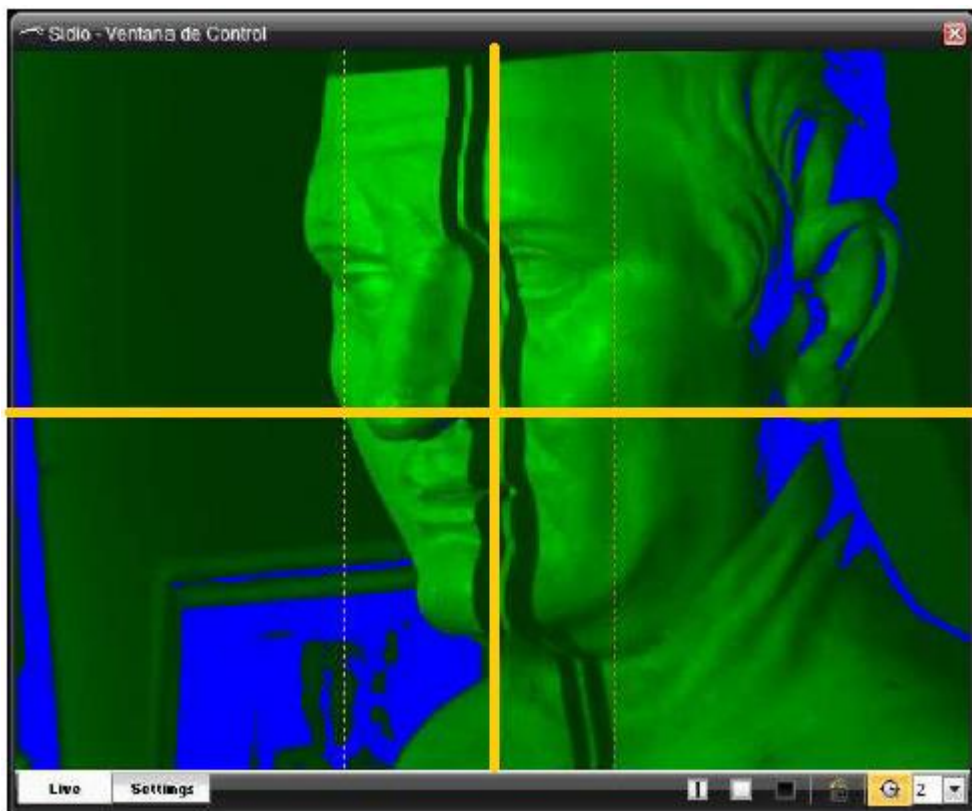




**Ilustración 43. Aplicación de hellin al objeto.**

Una vez se tiene controlada la configuración de luminosidad, se puede comenzar con la batería de capturas, optimizándolas, hasta completar la superficie del objeto. Para ello, hay que diferenciar, si se está utilizando referencias MMLs o Targets.

Si lo que se está usando son MMLs, basta con mantener la cruceta en la franja paralela, y además, en cada captura, es necesario solapar información recogida en cualquier captura anterior, es decir, puntos comunes, para que la tecnología del equipo sea capaz de posicionarla con respecto a las demás capturas.



**Ilustración 44. Encuadre de la cruceta en la franja.**



En la ilustración 44 de la página anterior se puede ver como la cruceta de la ventana de control está en el centro de la franja que proyecta el equipo sobre la pieza. Dicha cruceta está acentuada con un editor de imagen para que pueda apreciarse, ya que en la imagen original era demasiado fina y difícil de ver.

Para que se pueda hacer una idea de lo que se va tomado en la captura, es decir, lo que se lleva digitalizado, el equipo proyecta una luz verde sobre esa parte, por lo que en la siguiente captura se tendrá que solapar parte de esa proyección verde. Se puede ver esto en la siguiente ilustración.



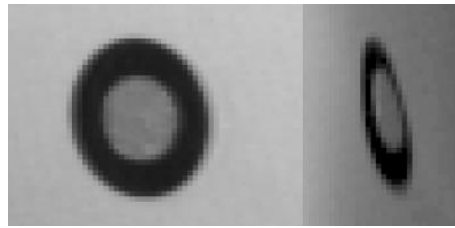
**Ilustración 45. Proyección en verde de la parte ya digitalizada.**

Si por el contrario, el método que se está utilizando es el de targets, lo primero que hay que tener en cuenta, es que debe estar seleccionado el icono de detección de círculos, que se encuentra en la barra de menú del software Triple.



**Ilustración 46. Icono de detección de targets.**

Es importantísimo que en la ventana de control se vean los círculos sin deformación, para ello, cuanto más perpendicular a estos se coloque la cámara mejor, ya que si se coloca demasiado tangencial, lo que la cámara estará viendo son elipses, con la consecuencia, de que no sean reconocidos como referencias (ver figura 47).



**Ilustración 47. Izq.: Target reconocido. Dcha.: Target sin reconocer**

En cuanto a la colocación, al igual que si se usan MMLs, la cruceta también debe estar encuadrada en la franja. La única diferencia con MMLs es que, ahora no es necesario coger parte de la pieza que ya este digitalizada para tener puntos comunes.

Ahora, lo necesario es coger tres marcas, es decir, tres círculos, al menos, que ya hayan sido identificados en una captura anterior. Estos círculos reconocidos anteriormente harán de “puntos comunes”. Cada vez que se vayan identificando marcas nuevas, al final de cada captura, se irán añadiendo al árbol del documento, que serán utilizadas para capturas posteriores.

Hay que diferenciar el término de “puntos comunes”, en una misma sesión, o en sesiones distintas. Cuando en este punto se ha hablado de puntos comunes, se hace referencia a los puntos comunes que necesita el sistema para posicionar las capturas entre sí automáticamente dentro de una misma sesión.

Cuando se pase a una nueva sesión de digitalizado, se llaman puntos comunes a parte del objeto que ya se ha digitalizado en la sesión anterior, con el fin de que el técnico tenga información redundante en ambas sesiones para poder unir las manualmente.

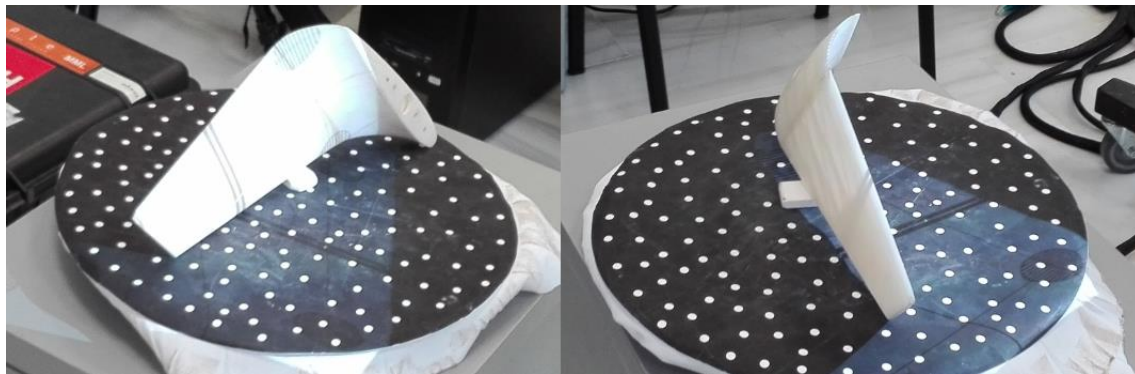
#### 5.3.2.2 DIGITALIZADO WINGLET.

En el caso del winglet, al no superar las dimensiones 40 x 40 x 40, se ha decidido usar targets como método de referenciación.

En las siguientes imágenes se puede ver la posición en la que se ha colocado el objeto para crear tanto la sesión 1 como la sesión 2 respectivamente.



**Ilustración 48. Posición para la primera sesión.**



**Ilustración 49. Posición para la segunda sesión.**

En la primera sesión, se ha digitalizado toda la parte convexa de la pieza, así como la zona donde se encuentran los orificios para atornillarla.

En la segunda, se ha colocado de dicha forma, tanto para obtener información de la parte cóncava como para poder sacar parte de la zona convexa que ya se tenía anteriormente digitalizada, con el fin de poder tener “puntos comunes” y poder unir las sesiones posteriormente.

La parte cóncava se podía haber digitalizado dándole la vuelta a la posición de la primera sesión, como si de una tortilla se tratase, lo cual sería más rápido que digitalizar la posición finalmente tomada. El software no daría problemas para realizar dicha sesión. El problema aparecería a la hora de realizar la unión de ambas sesiones, donde no se tendrían puntos de solapamiento (“Puntos comunes”) para realizar la operación manual.(Ejemplo en ilustración 61).



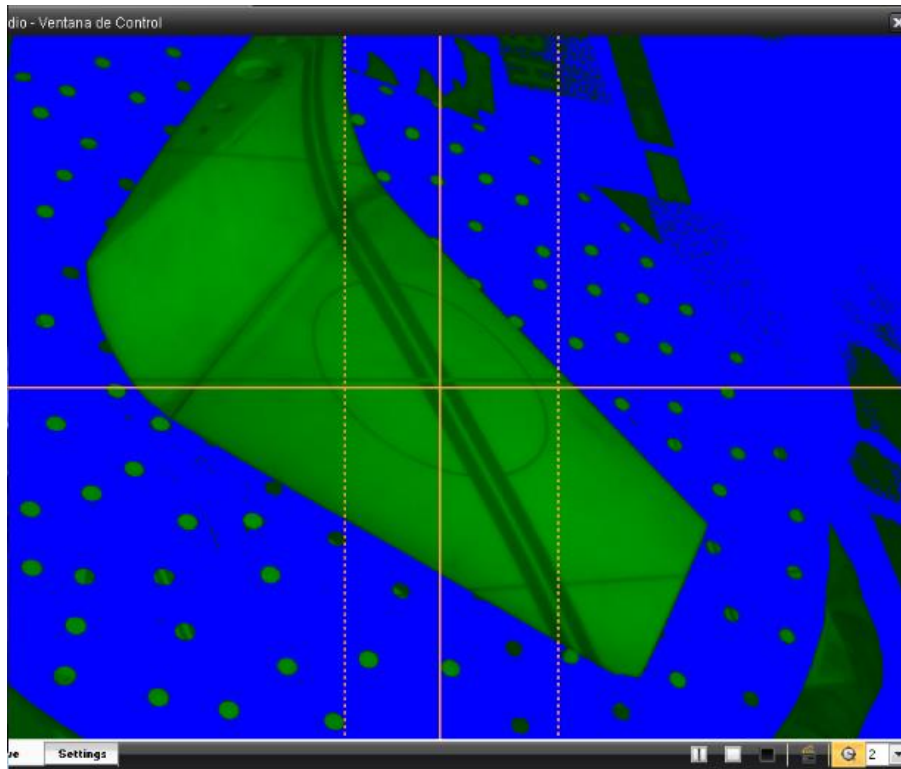
En la siguiente imagen se puede ver la posición del equipo, así como la de la pieza para la toma de las primeras capturas.

Se puede ver en dicha imagen como el equipo adopta una posición casi perpendicular a la superficie donde están colocadas las marcas, con el fin de que estas aparezcan como círculos casi perfectos, y no como elipses, y no haya problemas en el reconocimiento de estas.



**Ilustración 50. Posición de las primeras capturas.**

En la siguiente fotografía, se puede ver detalladamente, el aspecto que tendría la ventana de control en la posición que se puede ver en la figura superior.



**Ilustración 51. Ventana de control para las primeras capturas.**

Se puede apreciar claramente en la ilustración 51 como la cruceta está totalmente encuadrada en la franja y como los targets aparecen como círculos.

Ha bastado con sólo un tiempo de exposición, con valor de 2, muy bajo, gracias al buen color, forma y textura de la pieza.

Observando la figura 52, puede verse el aspecto que tiene una de las primeras capturas digitalizadas.

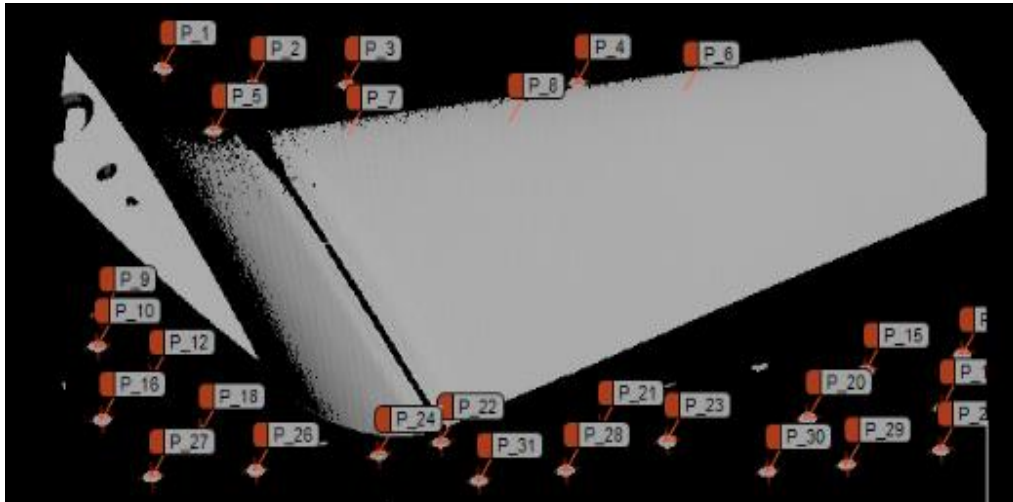


Ilustración 52. Digitalización de primeras capturas.

Se pueden ver las marcas reconocidas en la captura. También se puede observar una línea sin digitalizar que separa la pieza en dos, debido a que la pieza real está realmente compuesta por dos partes y unidas por una resina transparente, imposible de ser recogida por el equipo.

Las posteriores capturas, se irían asemejando a la siguiente imagen. En ella se puede observar lo comentado en el punto de descripción de targets, en el que se comenta como en cada captura hacen falta al menos tres marcas registradas en la captura anterior.

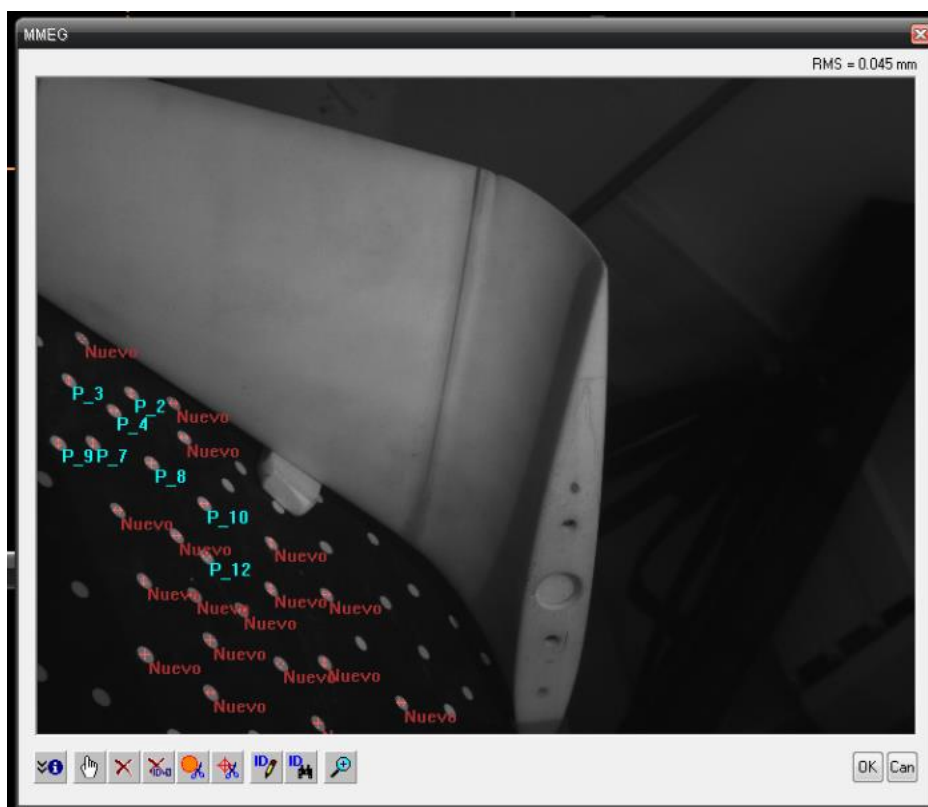
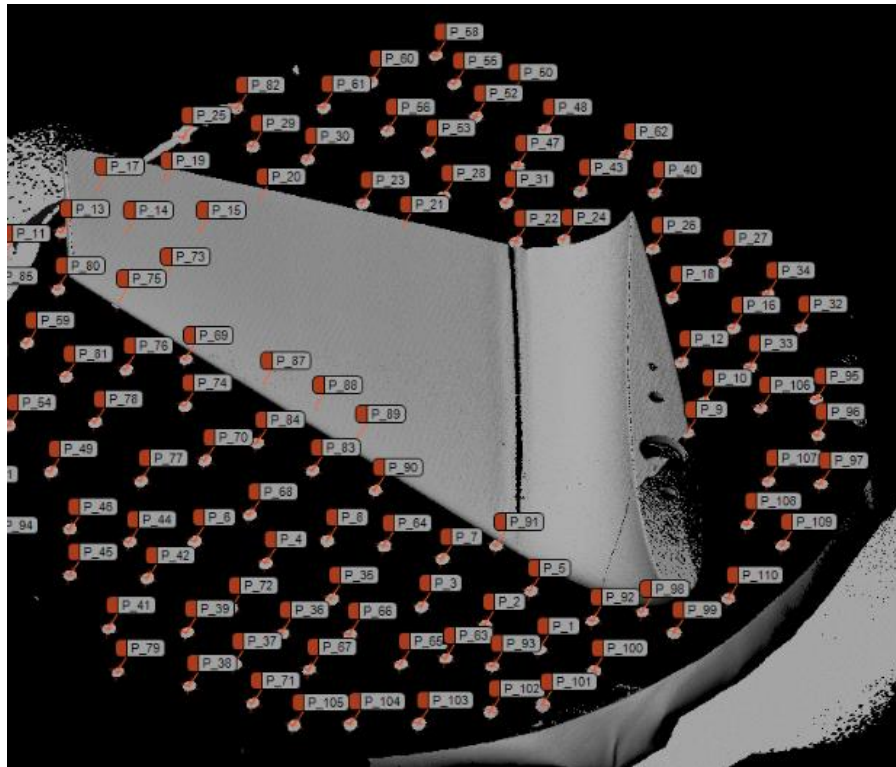


Ilustración 53. Targets nuevos y targets reconocidos.



En azul cian se contemplan las marcas registradas en capturas anteriores, y en rojo, y con letrero “nuevo” las que van a ser registradas en esta captura actual.

Se puede observar en la ilustración 54, una de las últimas capturas de la sesión 1 con casi la mayoría de las marcas de la superficie ya registradas.



**Ilustración 54. Reconocimiento completo de targets.**

Una vez que se hayan digitalizado al completo ambas sesiones, se está listo para guardarlas en extensión .pif y pasar a la unión de estas, ya con otro software.





### 4.3.3 PROCESADO.

#### 4.3.3.1 GENERAL.

Como resumen, situados en este punto, se tienen las dos sesiones que conforman la superficie completa de la pieza (separada en dos partes) en formato .pif.

Se procederá a la utilización del software POLYWORKS para el ensamblaje manual de ambas sesiones. En concreto, se utilizará el módulo IMAAlign, perteneciente a este programa.

El aspecto que muestra la interfaz del programa es el de la figura 55.

El módulo que se va a utilizar es el marcado con un círculo en la ilustración 56.

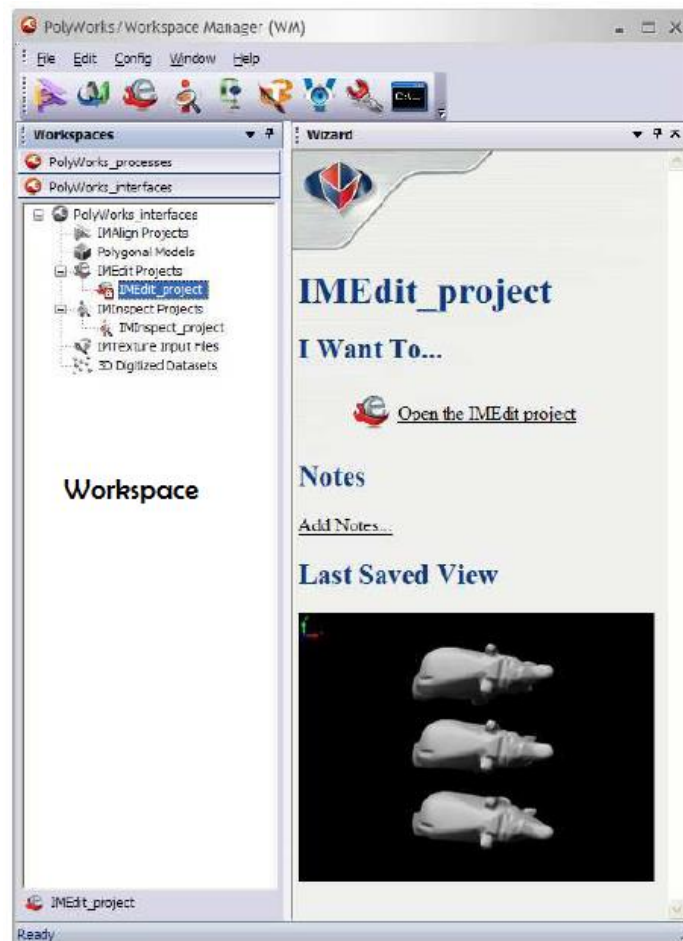


Ilustración 55. Interfaz de Polyworks.



Ilustración 56. Barra de módulos Polyworks.

Pulsando el icono señalado en la ilustración superior se abrirá la ventana del módulo IMAAlign (se puede ver en la figura 57), permaneciendo abierta la interfaz de Polyworks.

En ella se puede observar a la izquierda, cada uno de los pasos que se van almacenando en el workspace de trabajo.

Una vez que se tiene el módulo abierto, ya se está listo para importar las sesiones (.pif) que se hayan hecho del objeto.

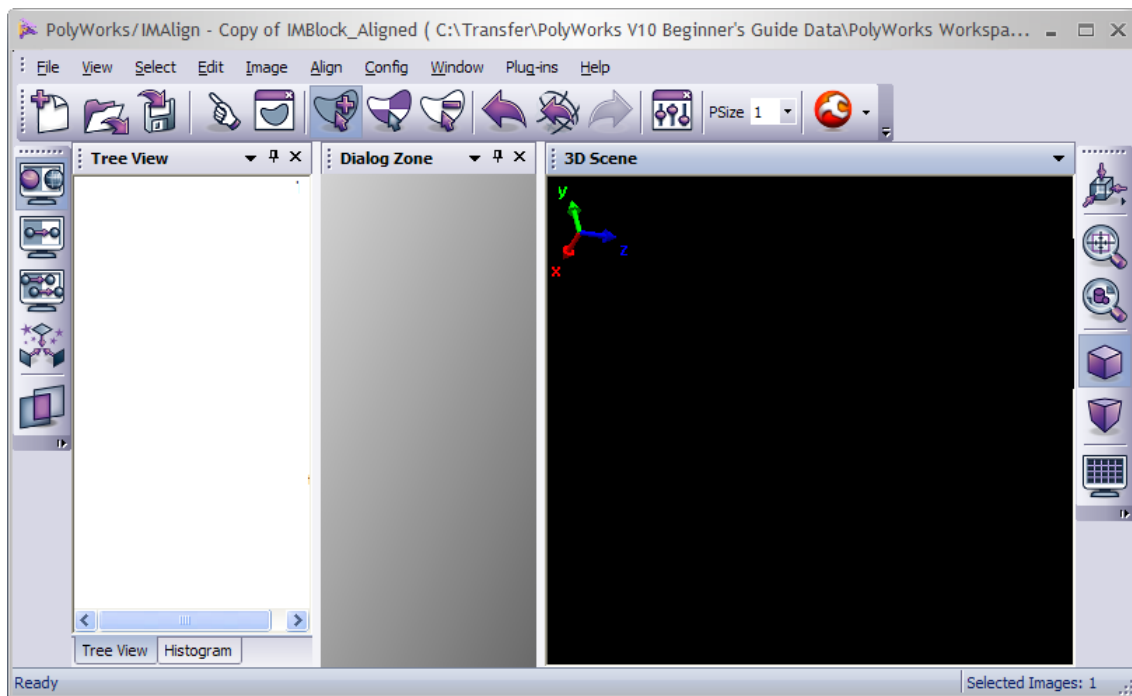


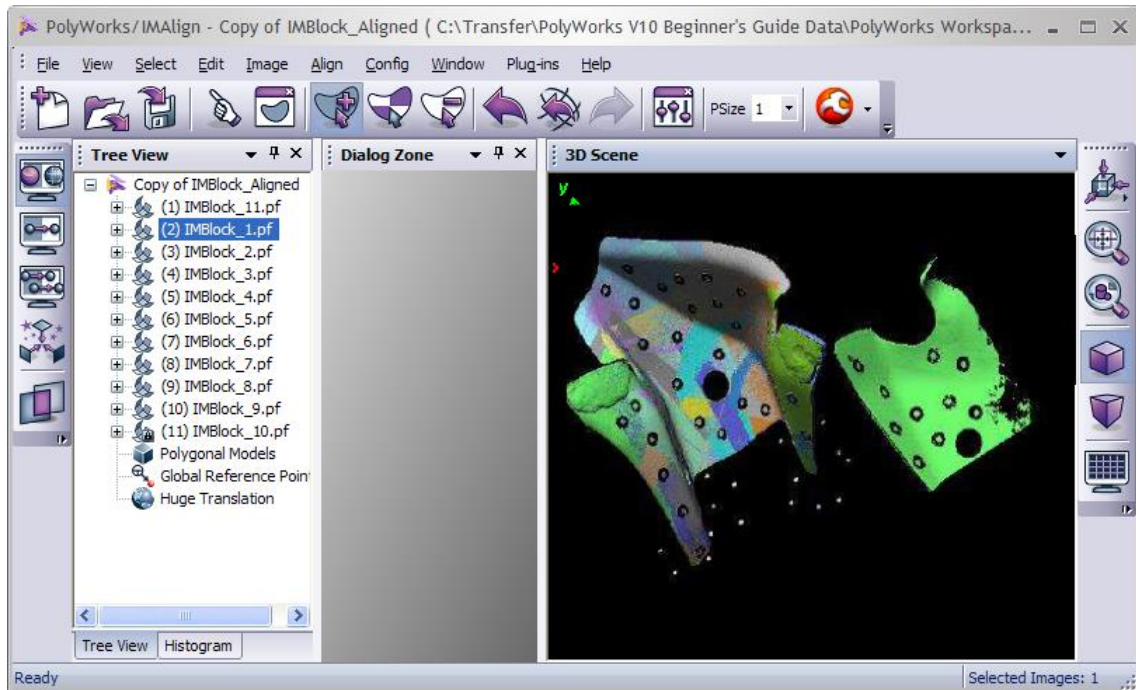
Ilustración 57. Interfaz módulo IMAAlign.



**Ilustración 58. Barra herramientas IMAlign.**

Importante decir que cuando se pulse dicho icono de importación de la figura superior, lo que se importan son los pifs de cada una de las capturas, y no las sesiones completas como tal, lo que quiere decir que tiene una importancia elevada el orden a la hora de guardar los archivos en el software Tripe, utilizado anteriormente para la toma de capturas.

Una vez que se han importado los pifs de las sesiones, se tendrá un aspecto como sigue.



**Ilustración 59. Importación de 2 sesiones distintas.**

Ese colorido corresponde a que cada una de las capturas tiene asociado un color. Tendrá sentido esto con algunos detalles que se comentará más adelante.

También, está la posibilidad, de que los objetos aparezcan con un color por defecto, gris, sin diferenciarse por capturas aunque no es aconsejable en esta parte del proceso.



En la parte izquierda de la imagen superior, se puede ver, en árbol, todos los pifs (capturas) que conforman el total de las dos sesiones importadas en ese caso.

A partir de este punto se puede “jugar” con ellas. Ocultarlas, eliminarlas etc.

Es bueno, ahora, hacer un primer limpiado, con el fin de que sea mucho más cómodo hacer la unión.

Una vez que se tiene ambas sesiones en pantalla, se procederá a colocarlas para el correcto ensamblaje.

Para ello, es de vital importancia saber que pifs, del árbol que aparece en la izquierda de la imagen (imagen 59), corresponde a una sesión y cuales corresponden a la segunda ya que antes de proceder a colocarlas, hay que bloquear el conjunto de pifs pertenecientes a cualquiera de las dos sesiones.

Una vez realizado esto, seleccionando el icono visible en la siguiente imagen se tendrán las partes del objeto tal como muestra la figura 60.

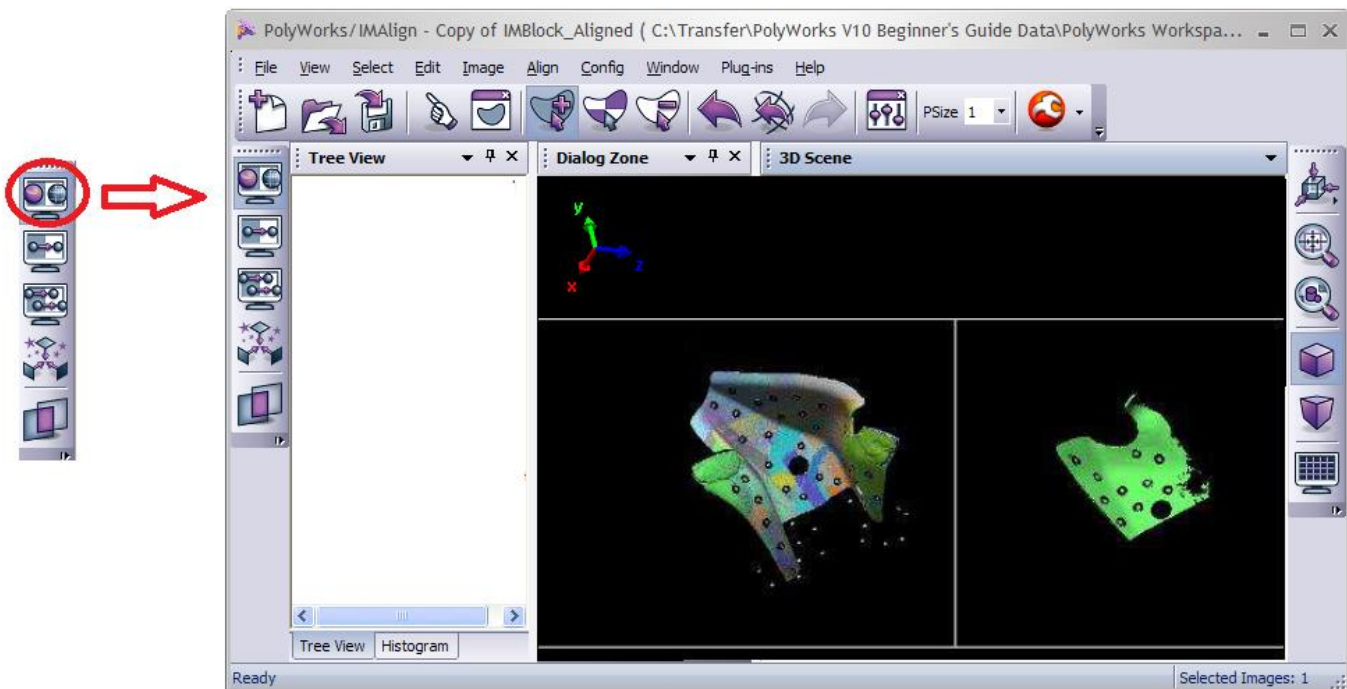


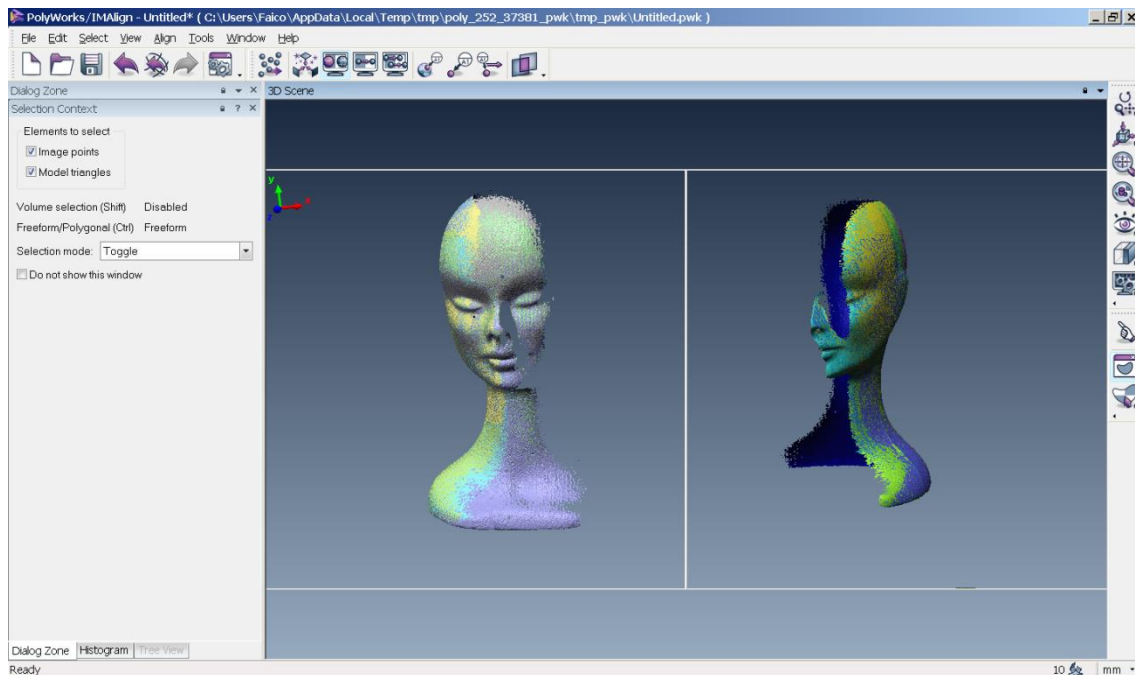
Ilustración 60. Interfaz de unión de sesiones.

Ahora, se pueden mover, las vistas de cada una de las sesiones por separado, con el fin de colocarlas en una posición en la que la selección de los puntos de unión no sea muy compleja.



Es en este punto del proceso en el que se puede observar, si las sesiones se han realizado correctamente, es decir, que en cada una de ellas haya partes que aparezcan en la otra, para poder realizar el ensamblaje.

Si la experiencia no es muy elevada puede ocurrir el caso que le ocurrió a un servidor, como puede observarse en la siguiente imagen.



**Ilustración 61. Falta de solapamiento en la unión.**

Se puede observar en la ilustración 61, como todo lo que aparece en una sesión es justo lo que le falta a la otra para completar el modelo, sin que existan partes comunes entre las dos sesiones, lo cual hace imposible la unión de estas.

La única solución que cabe aquí es volver a escanear la pieza de nuevo, quedando un sentimiento de mucha resignación.



**Ilustración 62. Icono de puntos comunes.**

Una vez que se ha colocado la pieza en buenas condiciones para su unión se procederá a la colocación de puntos.

Seleccionando el icono señalado en la figura 62, se estará en disposición de hacerlo.

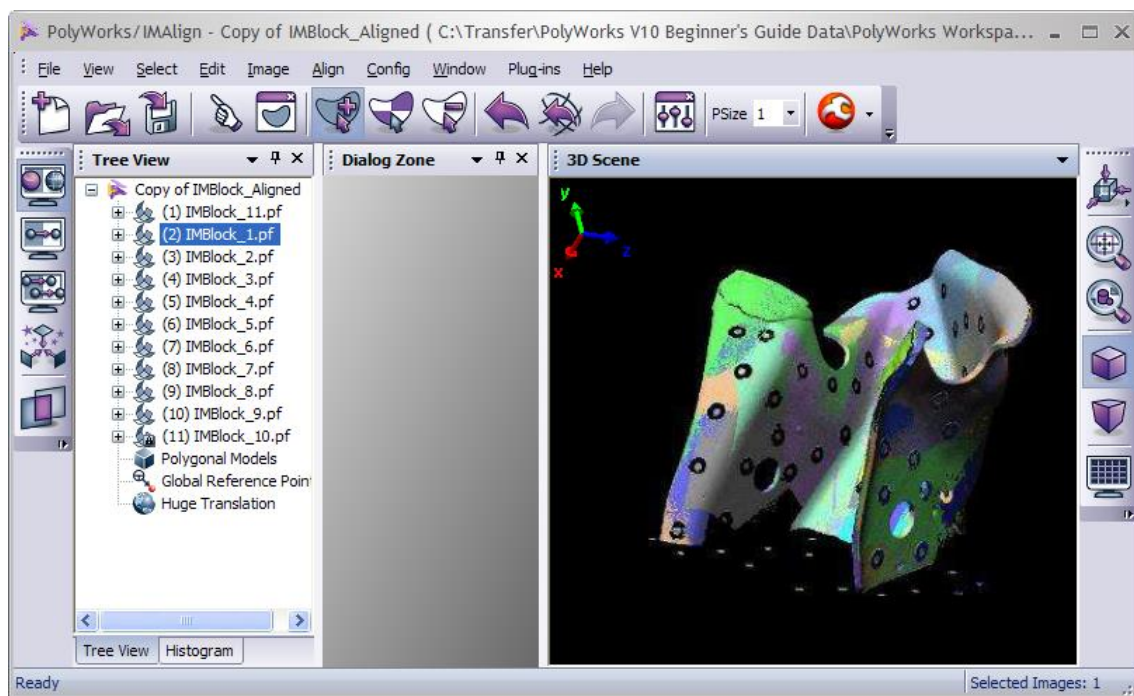
Se irán alternando puntos en una sesión y en la otra, colocándolos pulsando el botón izquierdo del ratón. Esta operación se podrá ver mejor en el siguiente punto, en la aportación propia.



Cuando se hayan colocado los puntos que se crean necesarios, se finalizará con un click en el botón derecho del ratón, quedando ensambladas ambas partes de la pieza.

Puede ser que la pieza tenga más de dos sesiones, por lo que ahora, la unión realizada hará las veces de “sesión”, se importará la siguiente y se realizará el mismo procedimiento que se ha realizado hasta aquí.

Se puede ver la pieza unida en la siguiente figura.



**Ilustración 63. Interfaz IMAlign. Sesiones unidas.**

Antes de pasar al siguiente paso, es aconsejable hacer tanto un best-fit como un overlap.

Esto son operaciones automáticas que es capaz de hacer el software.

La primera tiene como objetivo homogenizar las capturas realizadas. Esta es la razón por la que anteriormente se ha comentado tener las vistas con colores diferenciando capturas.

Cuando se realice el best-fit se podrá ir observando como ya no se ven tan claramente los cortes de colores de unas capturas a otras, si no que se irán difuminando los colores unos con otros. Esta operación corresponde al icono rodeado en verde de la figura 64.



El fin de la segunda, el overlap, es reducir el peso del archivo, y lo hace como reduciendo puntos redundantes.

Por ejemplo, cuando se realizan dos capturas consecutivas, además de adquirir puntos nuevos, también se capturan puntos redundantes que ya se había recogido en la captura anterior. Eso son los puntos que elimina dicha operación. Se realizará seleccionando el icono en rojo de la siguiente figura.

En el siguiente punto dedicado a la aportación propia del trabajo se podrá observar más claramente el objetivo de estos.

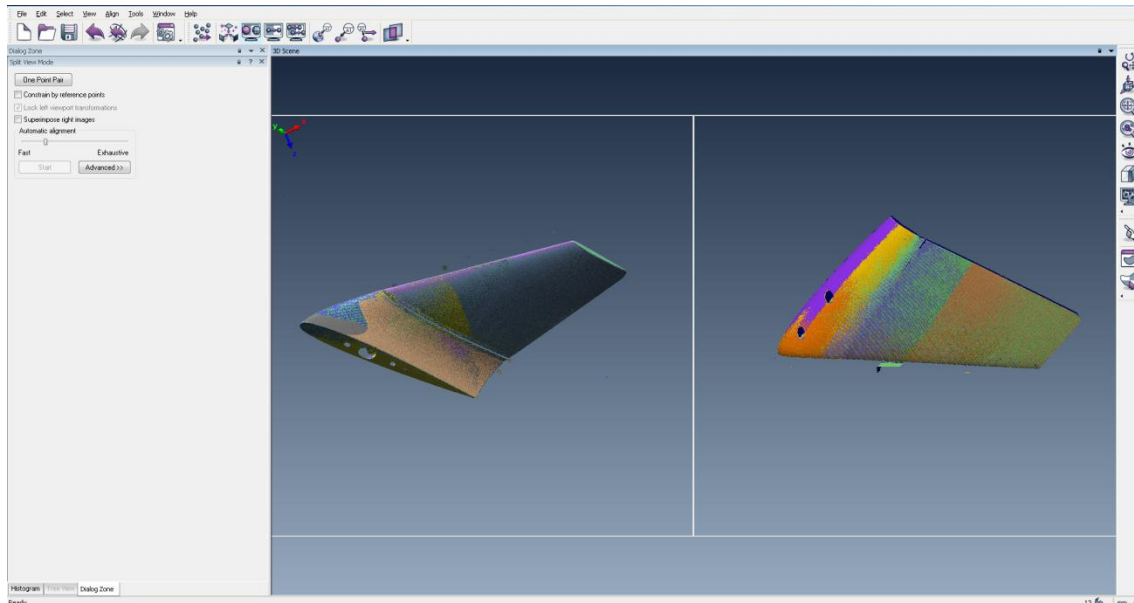


**Ilustración 64. Verde: Best-fit. Rojo: Overlap**

#### 4.3.3.2 PROCESADO WINGLET.

Como se ha comentado antes, para el proyecto que se desarrolla han hecho falta dos sesiones para completar el total de la superficie del winglet.

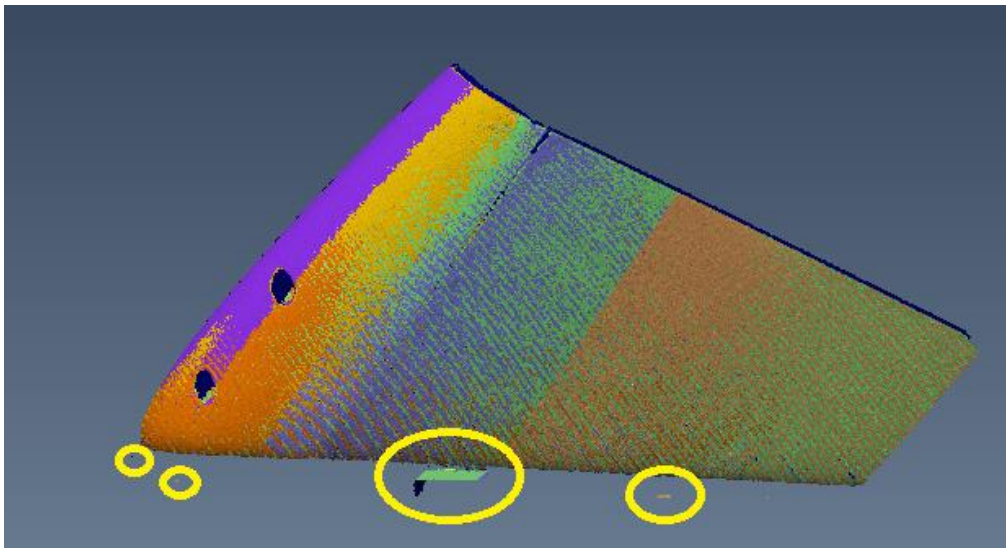
Una vez que se han importado ambas, y se ha seleccionado el icono de colocación, este es el aspecto que presenta.



**Ilustración 65. Interfaz IMAAlign.**

Como es posible moverlas de forma independiente, se irá modificando su posición, hasta encontrar una posición cómoda para enumerar los puntos comunes necesarios.

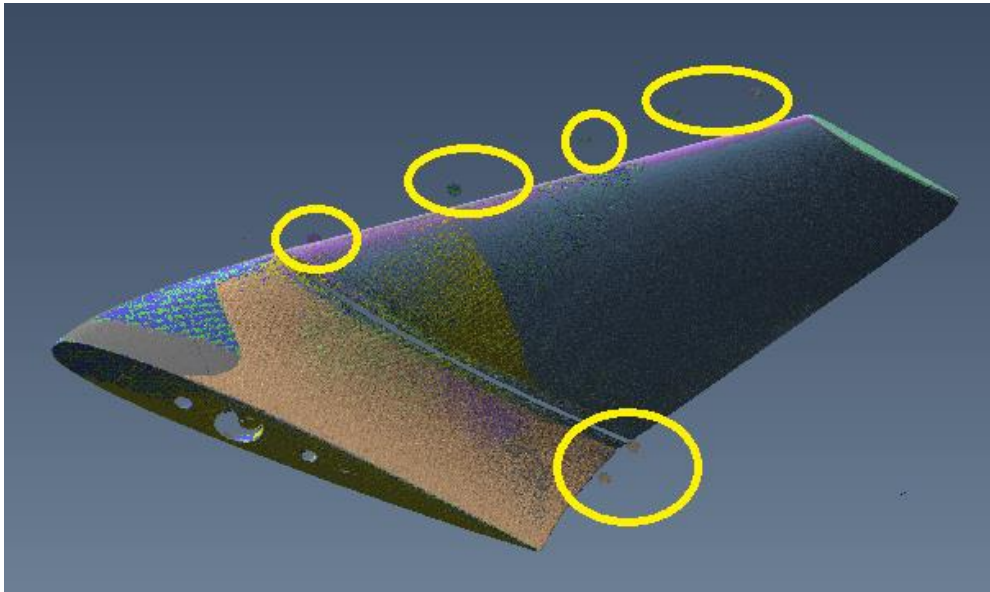
Se puede ver en la siguiente imagen como las sesiones todavía conservan fragmentos que no son de la pieza y que posteriormente habría que eliminar.



**Ilustración 66. Fragmentos que eliminar.**

El objeto que tiene el redondeo más grande en la figura 66, por citar un ejemplo, corresponde a una goma de borrar que se colocó en dicha posición para que el objeto estuviese un poco en alza y fuese más sencillo el escaneo de los bordes.



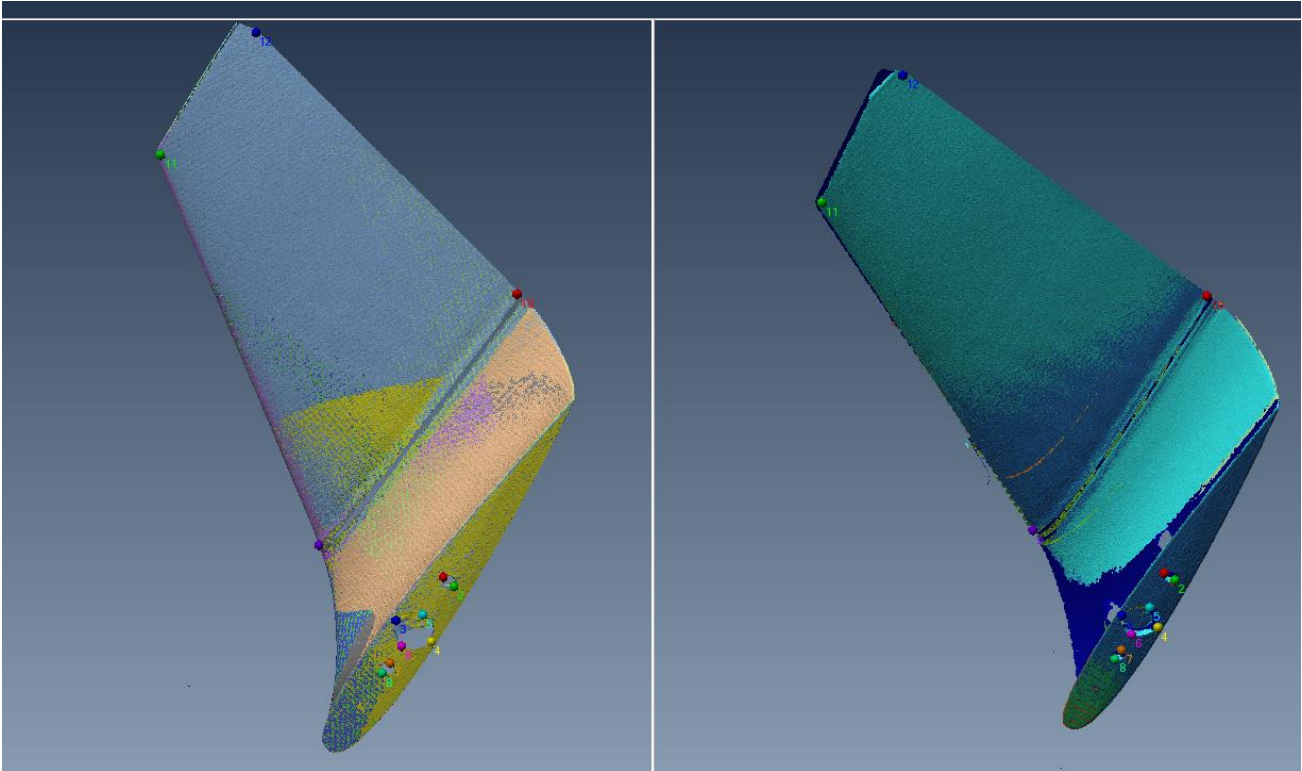


**Ilustración 67. Fragmentos que eliminar.**

También, en dichas imágenes pueden apreciarse los cortes firmes que separan unas capturas de otras, fácilmente visibles por el cambio brusco de color de unas a otras.

Una vez que han sido colocadas en posiciones en la que es fácil observar partes comunes en ambas sesiones, es el momento de seleccionar el icono de puntos comunes y comenzar la colocación de estos.

Para que la unión sea óptima, lo más fácil es colocar los puntos en zonas “peculiares”, que se diferencien del resto de la pieza. Las muescas, los fallos y las esquinas son idóneas para esta parte del proceso.



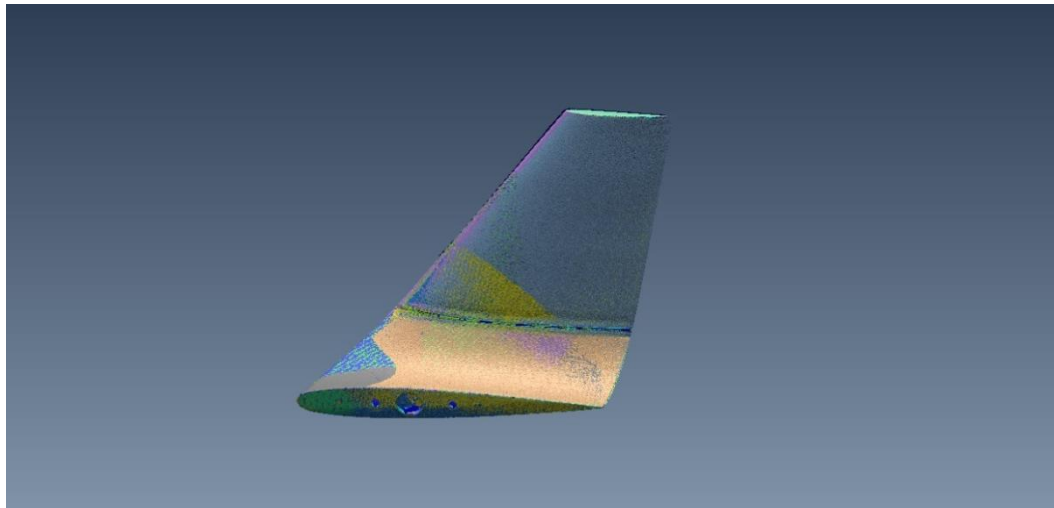
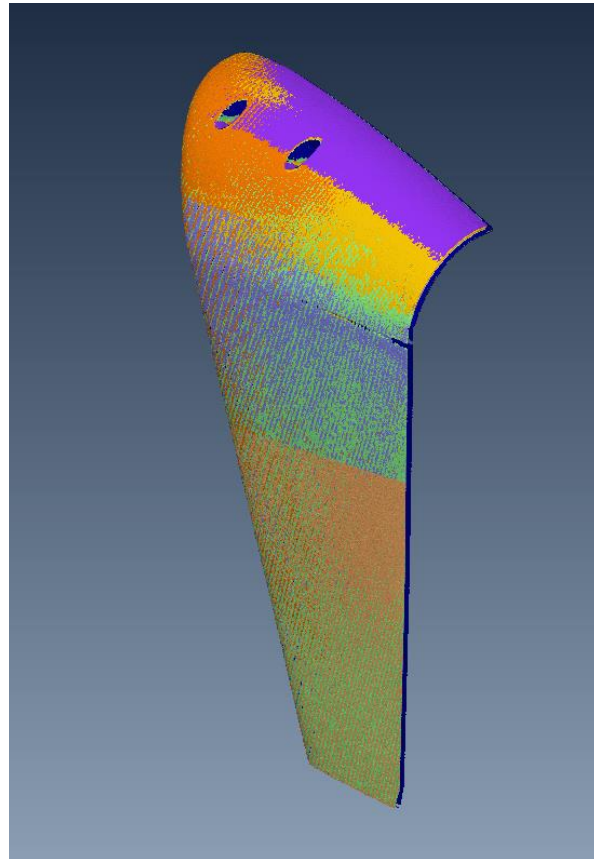
**Ilustración 68. Puntos comunes en winglet.**

En el caso propio de la figura ha bastado con la colocación de 12 puntos comunes, debido a que no existía ninguna irregularidad significativa en la pieza.

No siempre el hecho de colocar más puntos, significa mayor precisión en la unión, ya que si se hace por hacer, y se colocan “a ojo” (por ejemplo colocar algunos puntos más en la parte plana central de la pieza) puede perjudicar a esta, ya que al no tener ninguna referencia de posicionamiento, podría influir negativamente en el ensamblaje de esta.

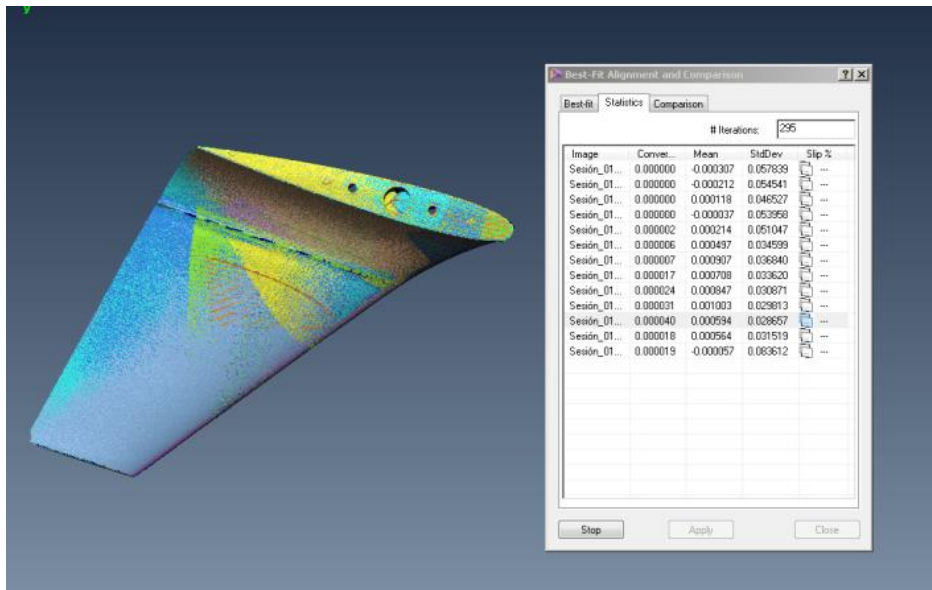
En este caso se han utilizado, las esquinas, los extremos de la franja central de la pieza, así como los orificios de los tornillos.

En la siguiente imagen se puede ver el resultado final de la unión anterior.



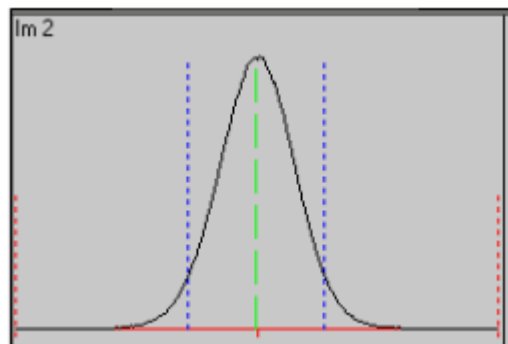
**Ilustración 69. Winglet después de unir sesiones.**

Una vez alineadas y limpiadas se pasa a realizarse las operaciones automáticas que nos ofrece dicho software, tanto la reducción de puntos (overlap), como el alineamiento fino (best-fit).



**Ilustración 70. Best-fit.**

El parámetro de convergencia (segunda columna) de la ficha de parámetros de la ilustración 70, es el criterio de parada del algoritmo de alineamiento. Para un alineamiento óptimo es necesario que esta columna haya alcanzado la convergencia a cero, o lo que es lo mismo, que es histograma de cada captura tenga una forma como la de la siguiente ilustración.



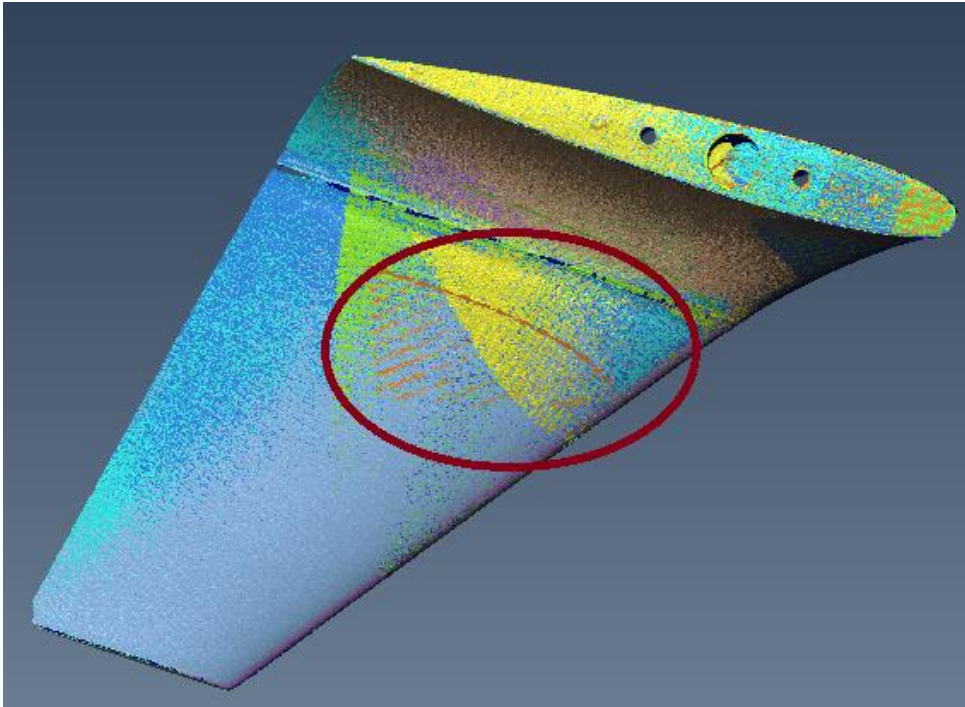
**Ilustración 71. Histograma en el proceso de Best-fit.**

También puede apreciarse como “las manchas” de colores empiezan a difuminarse unas con otras.

Una vez que ya se tiene el modelo unido y limpiado externamente hay que echarle una última vista, para comprobar si es posible eliminar alguna impureza más en este módulo del software.

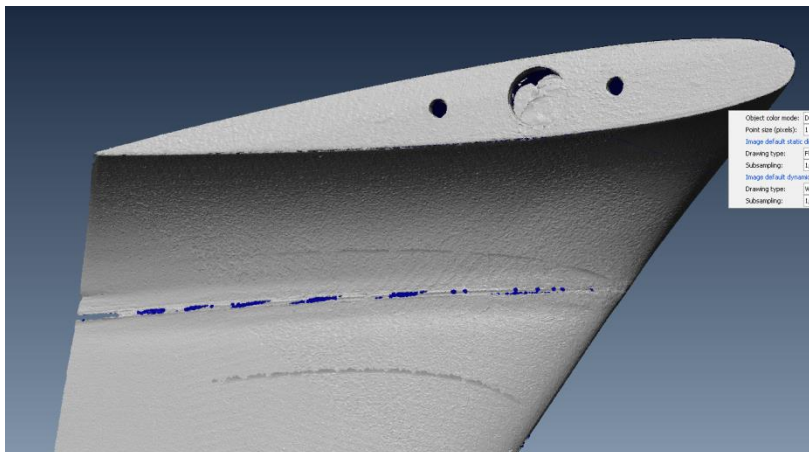


Una muy común es, que los bordes de ciertas capturas aparezcan levantados con respecto las demás. Será más descriptivo si se observa la siguiente imagen.



**Ilustración 72. Bordes levantados.**

Si se muestra la figura con el color predeterminado, aún será más intuitivo darse cuenta de este tipo de errores.



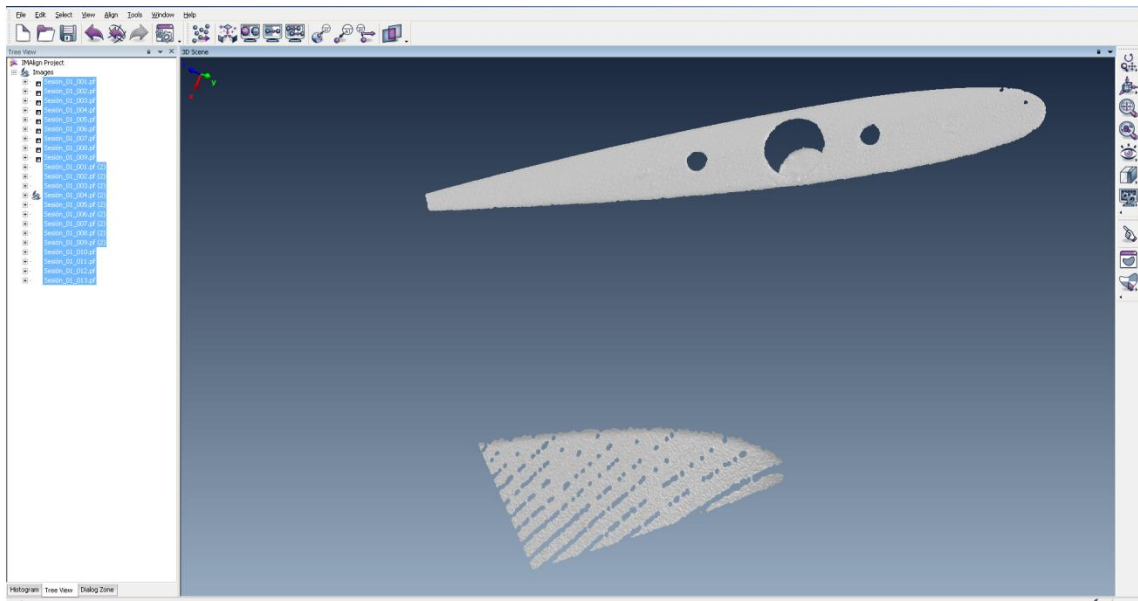
**Ilustración 73. Bordes levantados con color predeterminado.**

Se puede ver claramente el tono de gris más oscuro perteneciente a estas impurezas.



Para pasar a la eliminación de esto se procederá de la siguiente forma. Si se clicca el botón izquierdo del ratón sobre la pieza, en el árbol de capturas de la izquierda se pondrá en azul la capturas que se está pulsando.

Sabiendo esto, se puede pulsar el borde levantado, y se tendrá localizada la captura que contiene la impureza. Para poder trabajar con ella, se esconderán todas las demás capturas, y aparecerá en pantalla solo la que queremos editar.



**Ilustración 74. Captura de bordes levantados.**

Se puede ver como solo una de ellas es la que está visible, y en ella se puede ver el borde levantado que hace que no sea óptimo el modelo final en este módulo.

Se pasará, a señalar la parte que se quiere eliminar y seguidamente se pulsará la tecla suprimir.

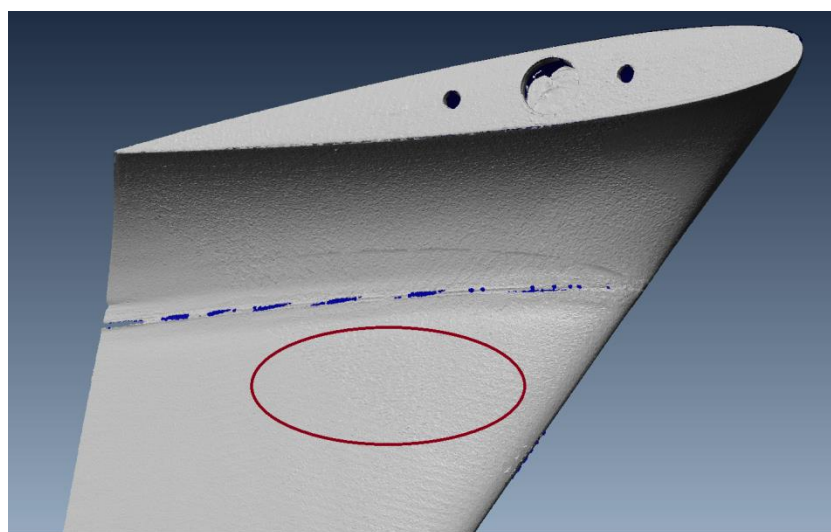
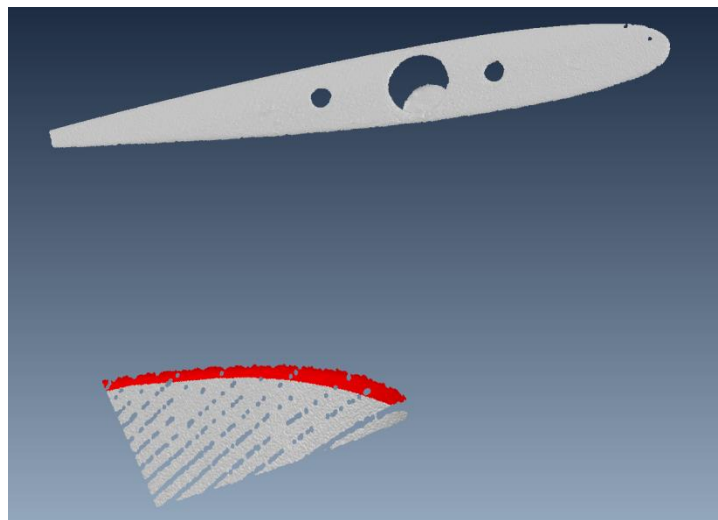
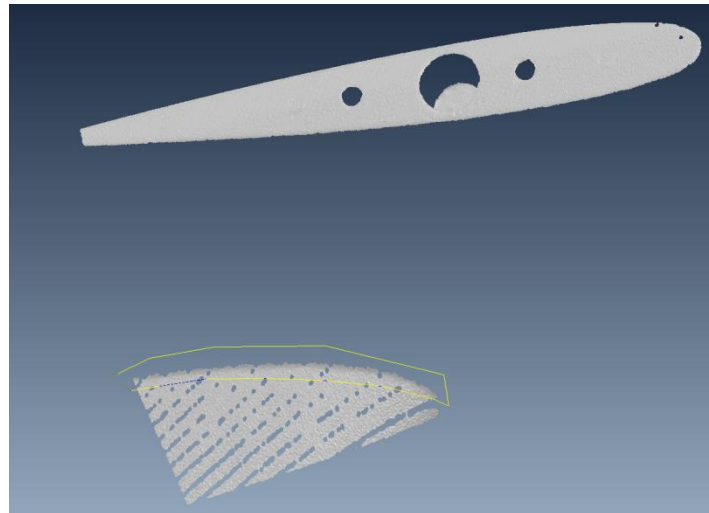
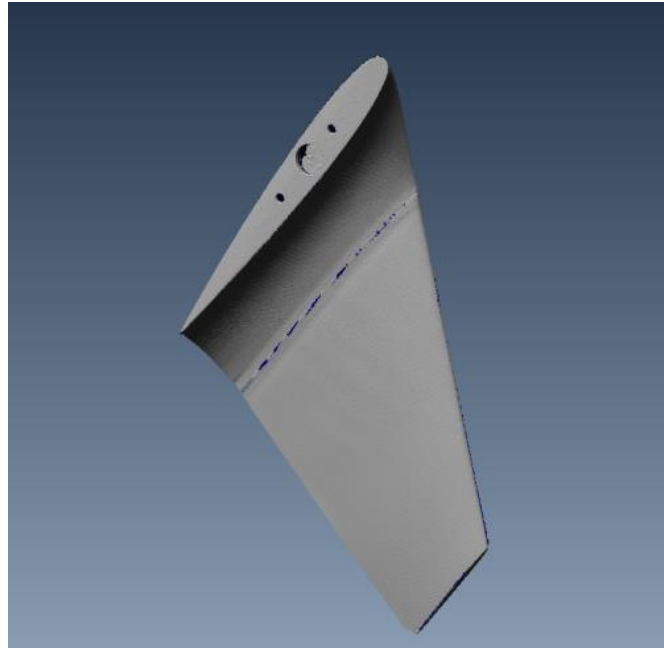


Ilustración 75. Selección y eliminación de bordes levantados.



Se puede observar como ya no aparece dicha irregularidad en la pieza. Aparece otro borde totalmente igual justo en la parte superior de la que se ha arreglado, que se podrá solventar siguiendo el mismo procedimiento.

En la siguiente imagen se podrá ver la pieza arreglada justo antes de mallar, con lo que se da por terminada la utilización de este módulo IMAAlign.



**Ilustración 76. Resultado final IMAAlign.**





## 4.3.4 MALLADO.

## 4.3.4.1 GENERAL.

Para realizar esta parte del proceso se utilizará el módulo IMMerge de Polyworks.

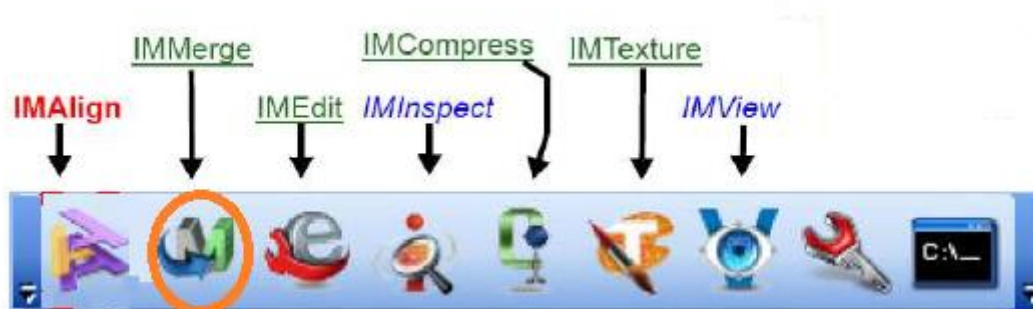


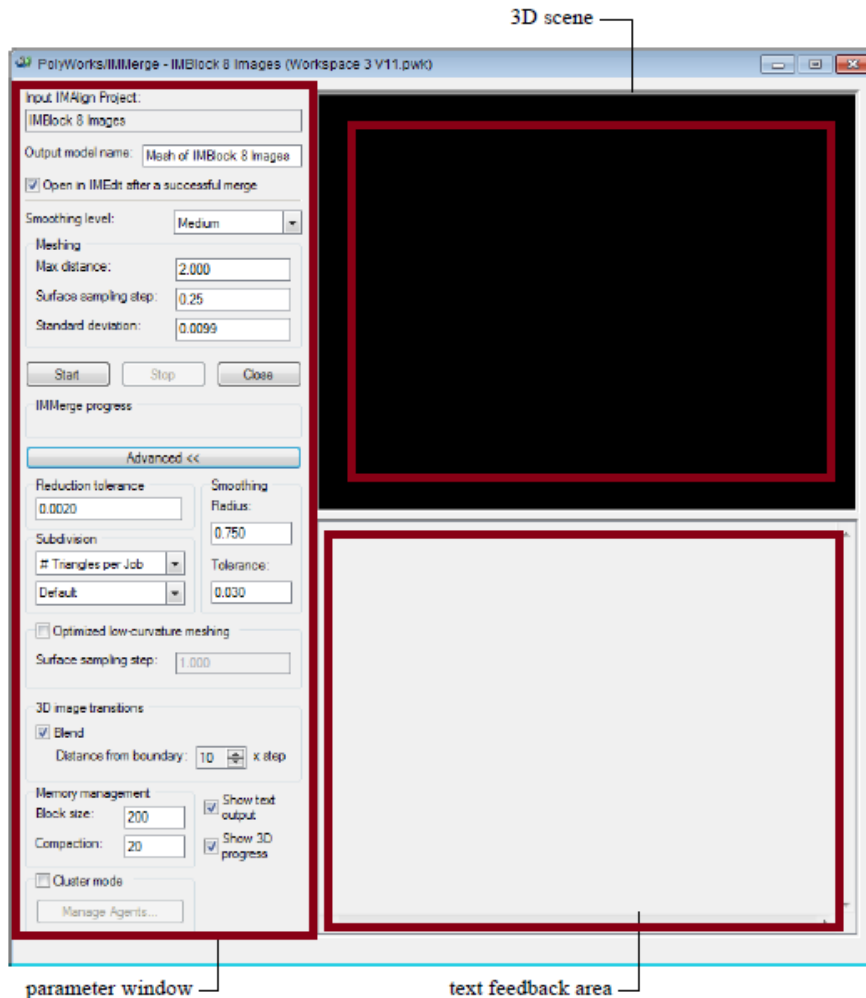
Ilustración 77. Módulos Polyworks.

Para ejecutar este módulo puede hacerse de dos maneras distintas. La primera es clicando directamente el icono que se marca en la figura superior e importando el archivo guardado en IMAAlign.

La segunda, más rápida, no es más que arrastrar el archivo desde el árbol de archivos de la izquierda del interfaz de Polyworks, hasta el icono, y directamente saltará la ventana de mallado.

Hasta ahora, se tenía un modelo de nube de puntos.

Este es el paso en el que dicha nube de puntos se convierte en malla. Es decir, convierte los puntos en modelos poligonales (triángulos) con el fin de alcanzar una pieza como “conjunto”.



**Ilustración 78. Interfaz módulo IMMerge.**

Como se ve en la imagen, en la interfaz del módulo pueden diferenciarse tres partes.

En la parte “feedback area” se podrá ver en forma de texto el progreso de la operación en sí. En ella se tiene información en tiempo real del estado de mallado de cada captura. EL proceso habrá llegado al final de forma óptima cuando se pueda leer “IMMerge has ended successfully”.

En la parte izquierda se pueden observar los parámetros que pueden ser combinados antes de empezar el mallado. Entre ellos, como más importantes, se puede diferenciar:

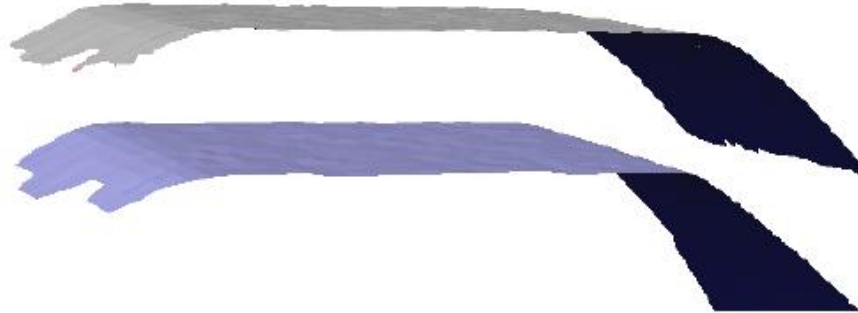
- Max distance.
- Surface sampling step.
- Smoothing level.

El parámetro “Max distance” define una distancia mínima aceptable entre dos superficies solapadas pertenecientes a dos capturas distintas. Esta detección es esencial para poder reconstruir una representación de



superficies no redundantes. El valor debe ser suficientemente grande como para detectar todos los solapamientos de la pieza.

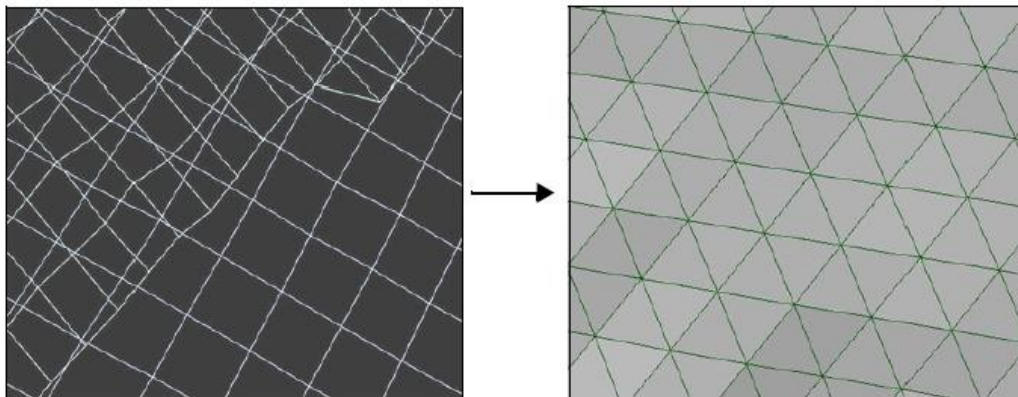
En la siguiente figura se puede ver dos superficies solapadas, en la que el resultado deberá ser una superficie colocada entre estas dos.



**Ilustración 79. Solapamiento de superficies.[22]**

En cuanto a “Surface sampling step”, se podrá modificar el paso de muestreo de la superficie.

En la imagen siguiente se podrá observar un paso intermedio del mallado (izquierda), y el resultado final de este (derecha).



**Ilustración 80. Polígonos de la superficie durante el mallado.**

El valor del parámetro debe ser lo suficientemente pequeño para que el software sea capaz de detectar el cambio de dirección que se produce de una superficie a otra para que pueda modificarla a modelos poligonales casi constantes.

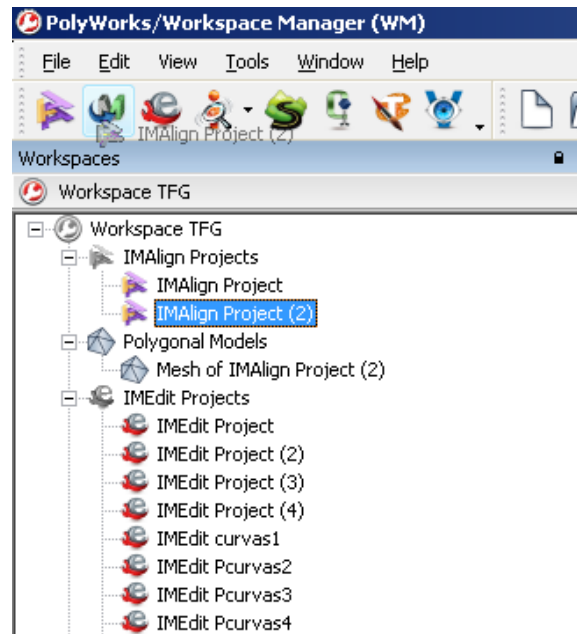
En cuanto a “Smoothing level” será el último parámetro que se comentará detalladamente. Este parámetro permite suavizar la malla



poligonal de alta resolución generada, de forma que reduce el ruido producido en la digitalización de las capturas. None, low, Medium and High son los cuatro niveles de suavizado que se ofrece.

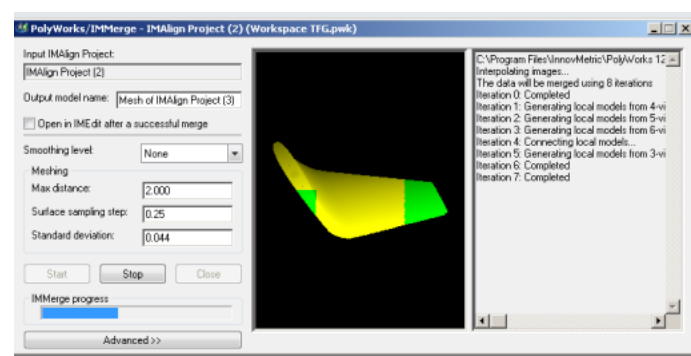
#### 4.3.4.2 MALLADO WINGLET.

En primer lugar, como se ha comentado anteriormente, se arrastrará el archivo guardado desde IMAlign, desde el árbol hacia el icono del módulo. Ver imagen siguiente.



**Ilustración 81. Inicio del proceso de mallado.**

Posteriormente saltará la interfaz del módulo. En ella, sólo se ha modificado el parámetro “Smoothing level” el cual se ha seleccionado None, dejando el resto por defecto.

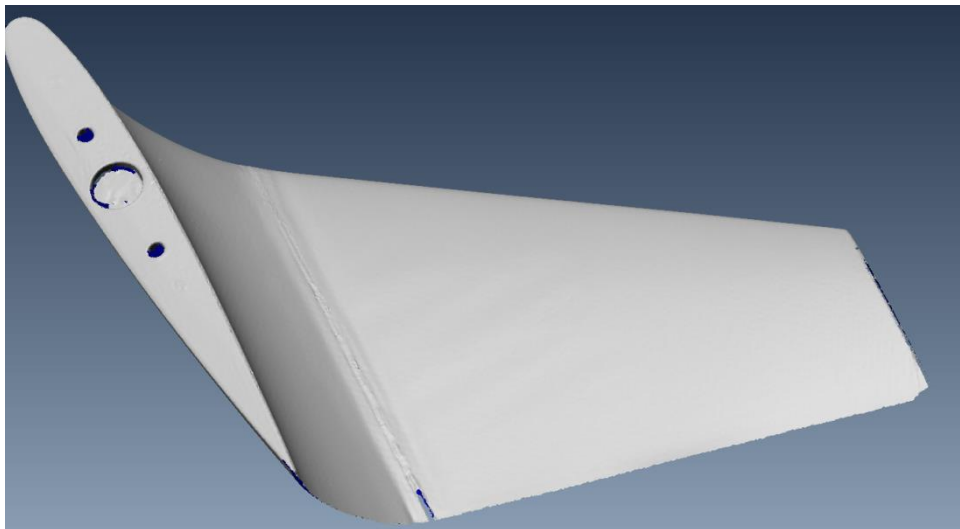


**Ilustración 82. Proceso de mallado.**



El color amarillo muestra las capturas de la pieza que están siendo malladas, el verde, que ya han sido malladas, y el rojo, que aún no ha empezado el proceso para ellas.

En la siguiente imagen se podrá ver el resultado final que se da en esta parte del proceso, dejando atrás este módulo IMMerge del software utilizado.



**Ilustración 83. Winglet mallado.**



#### 4.3.5 EDITADO.

##### 4.3.5.1 GENERAL.

Para comenzar con este paso de editado del objeto se hará uso del último módulo que será útil en Polyworks, IMEDIT. Este módulo también será el utilizado en el siguiente paso, aunque se ha preferido que quede desarrollado en el siguiente punto.



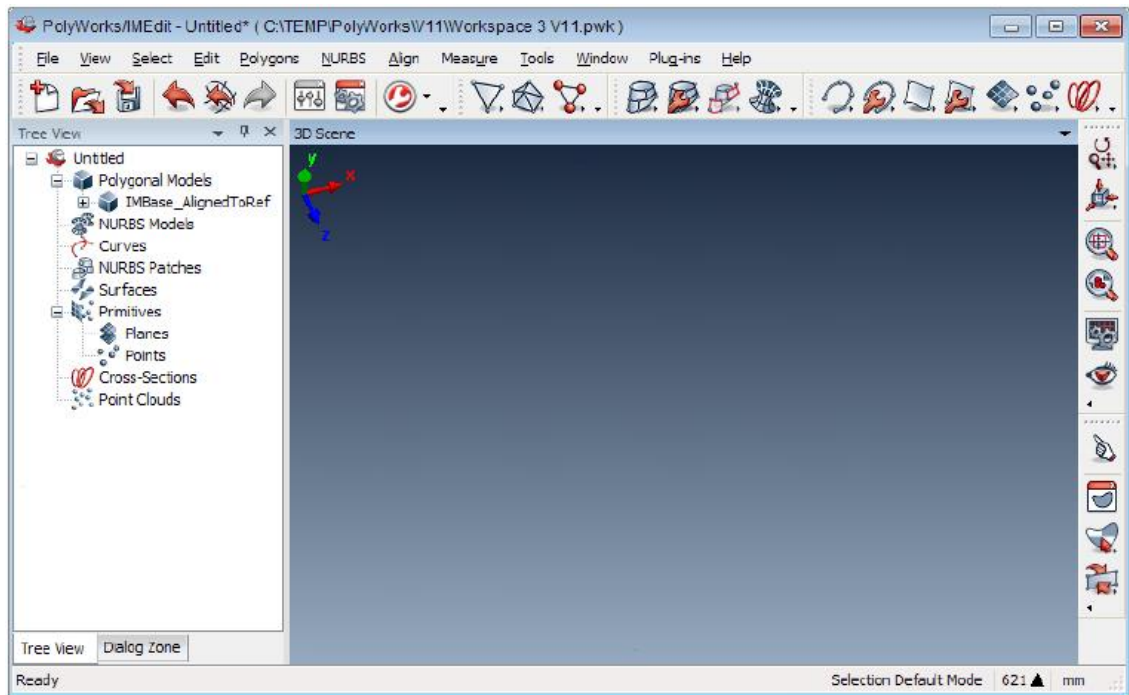
**Ilustración 84. Barra de módulos de Polyworks.**

Una vez en este punto del proceso, lo que se tiene es una malla, es decir, un modelo poligonal, en la que en el 99% de los casos es imperfecta, por lo que tendrá que someterse a una serie de mejoras.

Para proceder a ello, se abrirá dicho módulo, y desde este, se importará el archivo que se ha producido después del mallado en IMMerge.

Este es el módulo que ofrece mayor campo de edición, con multitud de opciones, por lo que solo se hará referencia a las herramientas utilizadas para llevar a cabo el trabajo que aquí se desarrolla.

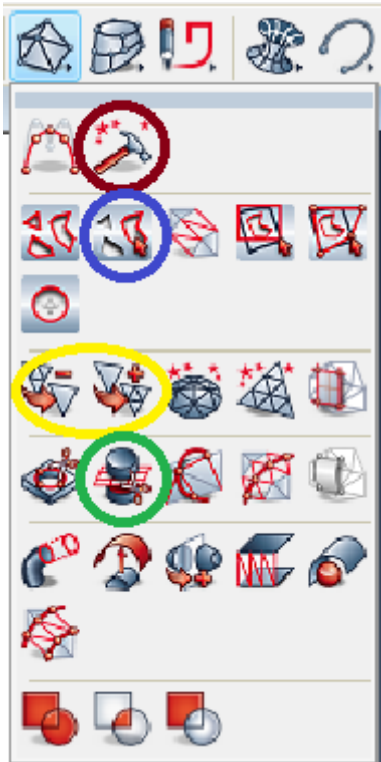
En la siguiente imagen se podrá observar el interfaz de dicho módulo.



**Ilustración 85. Interfaz módulo IMEdit.**

Lo normal, es que el modelo con el que se llega a este módulo venga repleto de orificios originados, tanto por un escaneo no óptimo como por que el proceso de mallado haya encontrado algunas irregularidades a la hora de producir el modelo poligonal, además de imperfecciones que han ido apareciendo a lo largo del proceso.

Para solventar este tipo usual de problemas se usará la herramienta “Edit polygon” que se corresponde con el icono que se puede ver en la siguiente figura.



**Ilustración 86. Desplegable "edit polygon"**

En el desplegable se puede observar multitud de opciones relacionado con la edición de los polígonos que conforman la malla creada.

Por ejemplo, se ha usado la segunda opción de la primera fila (rodeado burdeos)"hammer", en la que aparece un martillo como icono. Si en una superficie plana ha aparecido un pequeño bulto o montículo que no es la forma real de la pieza puede solucionarse con esta herramienta.

Se seleccionaría el montículo y parte plana de alrededor de este y se elegiría dicha opción una vez seleccionado, ya que el método que usa es utilizar todas las normales de la zona seleccionada y

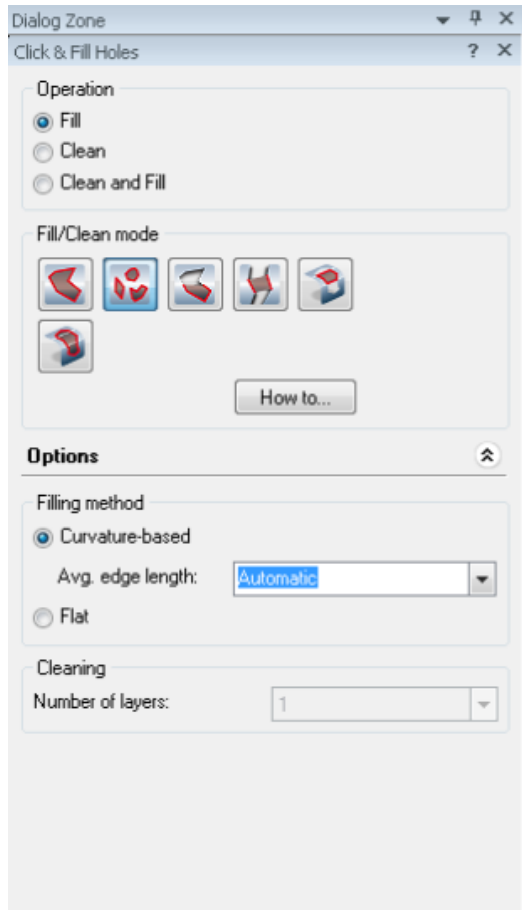
hacer una especie de moda de todas ellas, por tanto, al ser un pequeño "islote" levantado en medio de la nada desaparecería. Cuanta más superficie plana se seleccione, mejor será el resultado.

En el siguiente punto en el que se desarrolla más la aportación propia del trabajo se podrá ver un ejemplo del resultado de esta herramienta.

El segundo icono de la segunda fila (Rodeado Azul) es uno de las más útiles que ofrece este software,"Click & fill holes". Esta es capaz de, mediante un algoritmo complejo que posteriormente se explicará, cubrir los orificios y las zonas sin cerrar que trae el objeto mallado.

Si esta opción es seleccionada, a su vez aparecerá otro panel con otra lista de opciones, para que los orificios sean cerrados de una forma u otra. Estas opciones pueden verse en la ilustración 87.





**Ilustración 87. Herramienta "click and fill holes".**

Además del desplegado que aparece al seleccionar dicha opción, también se bordearán en rojo todos y cada uno de los orificios o superficies no cerradas que aparecen en la figura. (Se podrá ver con más claridad en el siguiente apartado).

Antes de seguir, para que se entienda mejor, el algoritmo que usa es, por medio del método de los mínimos cuadrados, reconocer la curvatura que trae los bordes de las partes que se quieren cerrar, para luego reconstruir y predecir la curvatura que se realizará en la parte donde está el orificio y no se tiene información.

En la imagen puede observarse las tres primeras opciones principales que ofrece el desplegable.

Si la opción seleccionada es fill se podrá seleccionar también una de las opciones (símbolos) que permiten cerrar de una forma u otra el orificio, además de la forma para hacerlo, siendo el seleccionado el explicado anteriormente (método de los mínimos cuadrados) o flat si se quiere que se reconstruya de forma plana. Para detallar un poco más sobre las formas de cerrarlo (símbolos), los más utilizados son el segundo, el tercero y el cuarto.

El segundo cerrará el agujero totalmente. Es idóneo para orificios pequeños. Si el seleccionado es el tercero o el cuarto símbolo, el técnico deberá elegir mediante puntos la parte que se quiere cerrar del orificio, es decir, se irán reconstruyendo los agujeros por partes. Es utilizado para cerrar grandes cavidades, o pequeñas si estas tienen curvaturas complejas.

Como el método que se usa se rige por la curvatura que traen los bordes del orificio, puede que estas no sean las reales del objeto. Por ejemplo



puede que hayan quedado falseadas por ser bordes levantados. Si es así, se tendrá que elegir la segunda opción principal “clean” en la que se hará un limpiado alrededor del orificio eliminando la curvatura falseada y haciendo el agujero aún más grande. El técnico podrá elegir el radio de limpiado dando un valor entre 1 y 5 en el desplegable “Numbers of layers”

La tercera opción principal “clean and fill” es una superposición de estas dos opciones explicadas hasta ahora.

Estas son las herramientas más usadas para la edición y el cierre de orificios.

Siguiendo con la figura 86, se puede observar los iconos rodeados en amarillo.

Por ejemplo, si se da el caso de que el objeto es muy grande, o se han tenido que tomar muchísimas capturas, puede que el software se vea ralentizado por la cantidad de polígonos que contiene esta. Este problema puede tener como solución esta herramienta, la cual reduce el número de polígonos el porcentaje que el técnico crea conveniente.

Hay que tener cuidado con el uso de esta herramienta, ya que una excesiva reducción puede afectar notablemente a la calidad de la superficie.

Si no se quiere usar esta herramienta, hay otra opción que hace que sólo se muestre por pantalla un cierto porcentaje de triángulos, con el objetivo de que el software trabaje más fluido, aunque el objeto siga conservando todos los polígonos.

La herramienta situada en la parte derecha dentro del círculo amarillo (figura 86) realizaría la misma operación, aunque inversamente. Esta no proporciona muy buenos resultados.

La última opción dentro de la herramienta “edit polygon”, usualmente usada es la rodeada verde en la figura 86.

Como se puede ver, el icono presenta un plano cortando un cilindro. La operación de esta no es más que el corte de un plano (creado por el técnico) a la figura, eliminando una de las dos partes de la pieza, y cerrando de forma plana, la parte que quedaría abierta.



Como otra de las importantes y usadas herramientas de la barra de menú se presenta “planos”. En ella se podrá acceder tanto a la creación de estos como a su edición.



**Ilustración 88. Desplegable herramienta planos.**

En esta herramienta se encontrará como crear planos a partir de tres puntos colocados por el técnico o planos paralelos o perpendiculares a otros planos ya existentes.

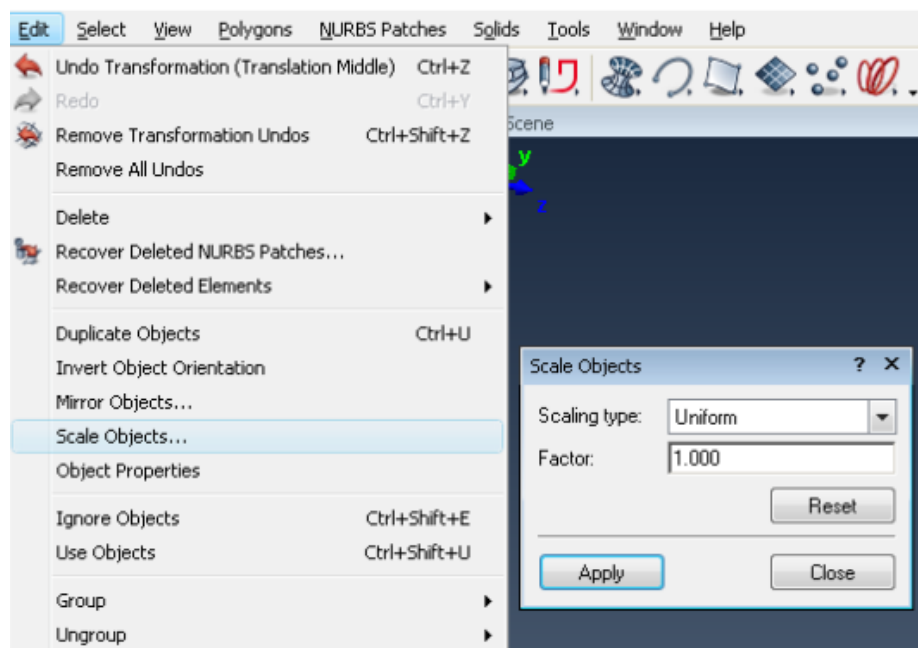
También se dará la opción de la creación de planos con respecto a los ejes coordenados, lo cual es determinante para “adherir” la pieza a estos y tener una adecuada orientación

a la hora de mostrar las distintas vistas de la pieza.

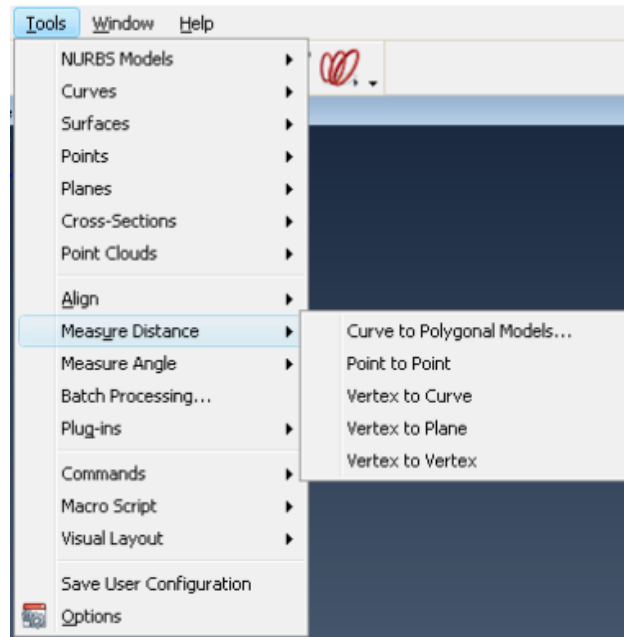
Otras opciones que también ofrece dicho módulo, son por ejemplo:

- Medir ángulos, o distancias de punto a punto.
- Escalar objetos, es decir, aumentarlos o reducirlos.

En la siguiente imagen puede verse como llegar a ambas opciones.



**Ilustración 89. Opción escalar objeto.**

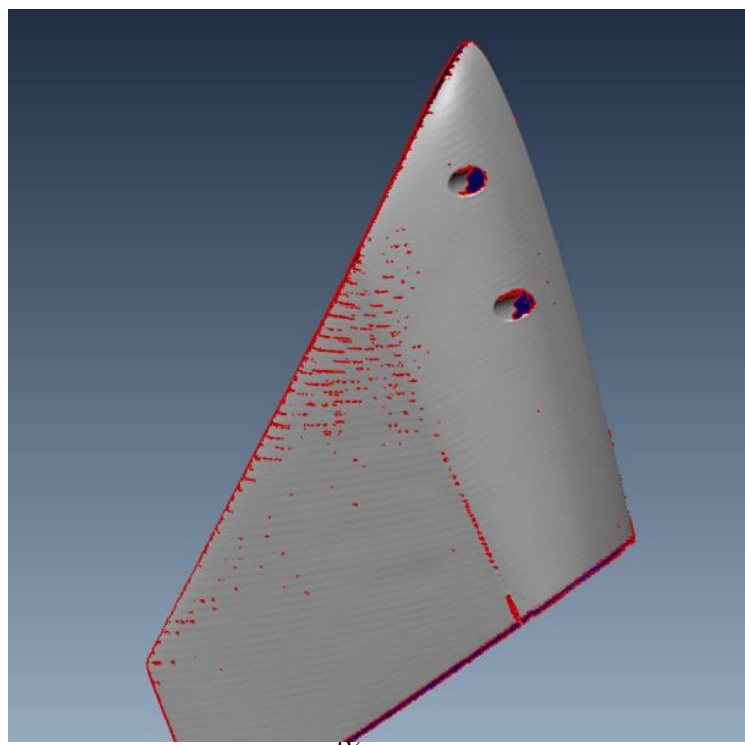


**Ilustración 90. Opción medir en objeto.**

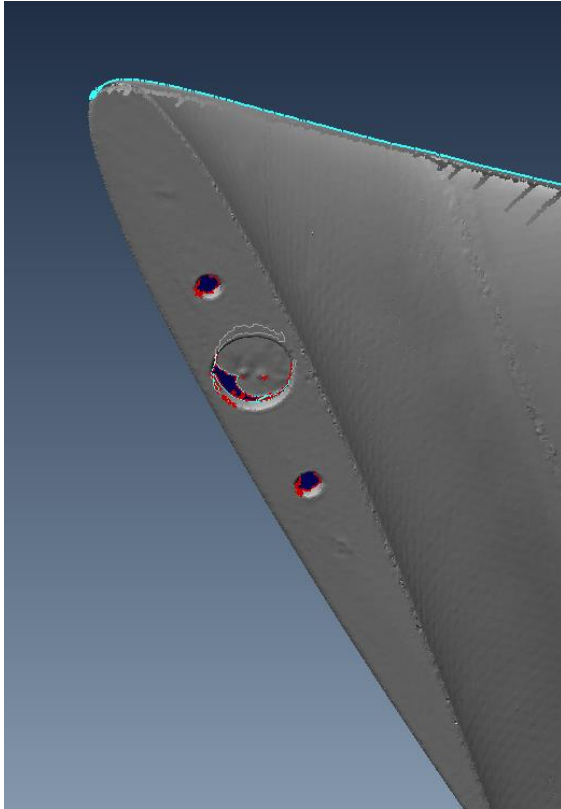
#### 4.3.5.2 EDITADO WINGLET.

Una vez mallado, el modelo ya está listo para editarlo y finalmente tener un conjunto cerrado.

En la figura se puede ver la apariencia de la pieza una vez mallada y abierta con el módulo IMEdit.



**Ilustración 91. Primer aspecto en módulo IMEdit.**



**Ilustración 92. Orificios con curvatura compleja.**

En ambas imágenes (91 y 92) se puede ver tanto el torso como el dorso de la pieza.

El color rojo representa los bordes de los orificios que deben ser cerrados.

Para los más pequeños (los que aparecen en la cara plana de la figura 91) se ha usado la opción de cerrado directo en la herramienta “click & fill holes”.

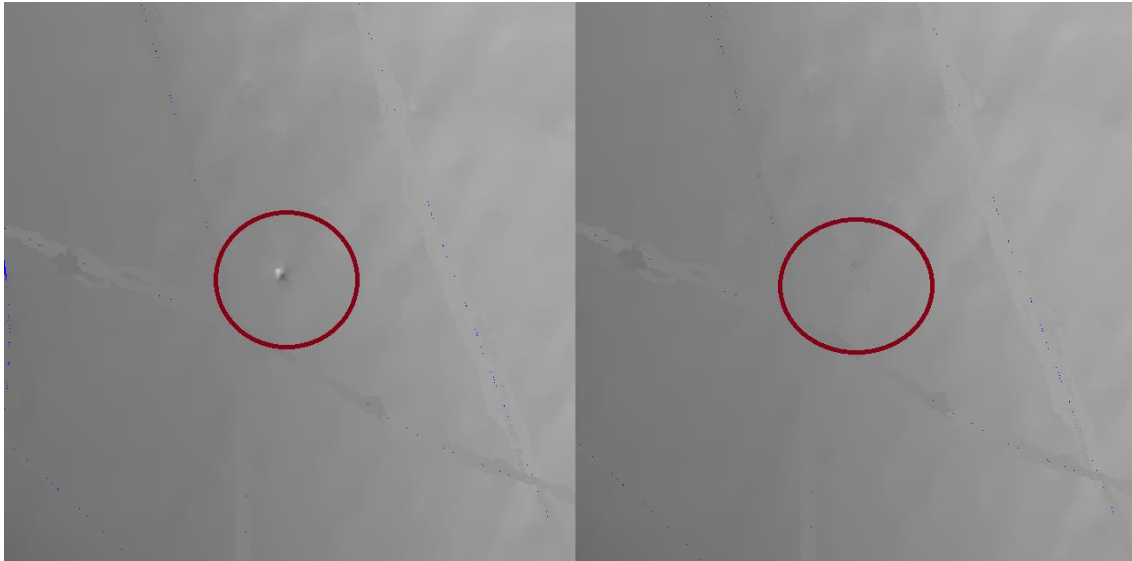
No se puede decir lo mismo de los que aparecen tanto en los cantos de la pieza como en las perforaciones de atornillamiento de esta.

Debido a que estas zonas traen una curvatura compleja se ha tenido que ir cerrando por partes cada uno de ellos ya haya sido con “cerrado por

regiones” o “cerrado por puente” (tercer y cuarto icono que se pudo ver en la imagen 87).

Aunque la explicación y redacción de este punto sea breve, este parte del proceso se ha llevado bastante tiempo, ya que aunque parezca trivial, se ha tenido que ir probando bastantes tipos de cierre, hasta que la curvatura ha ido tomando la forma que realmente tiene en la realidad.

También se comentaba, en la explicación genérica de este punto la herramienta “hammer”, la cual ha sido utilizada también en la realización del trabajo y cuyo resultado puede verse en la siguiente imagen.

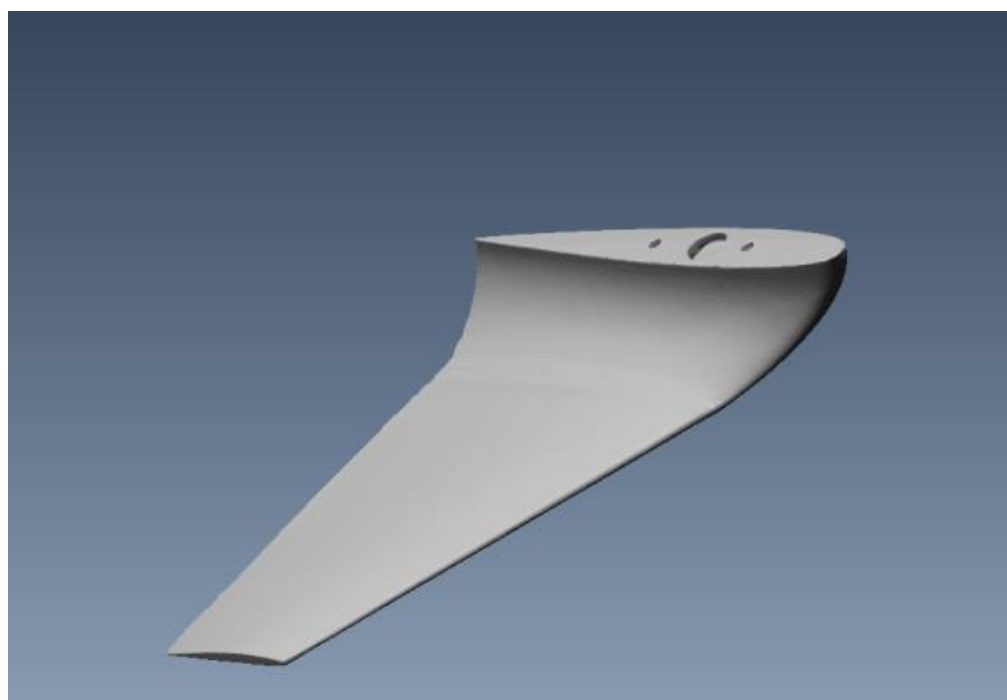
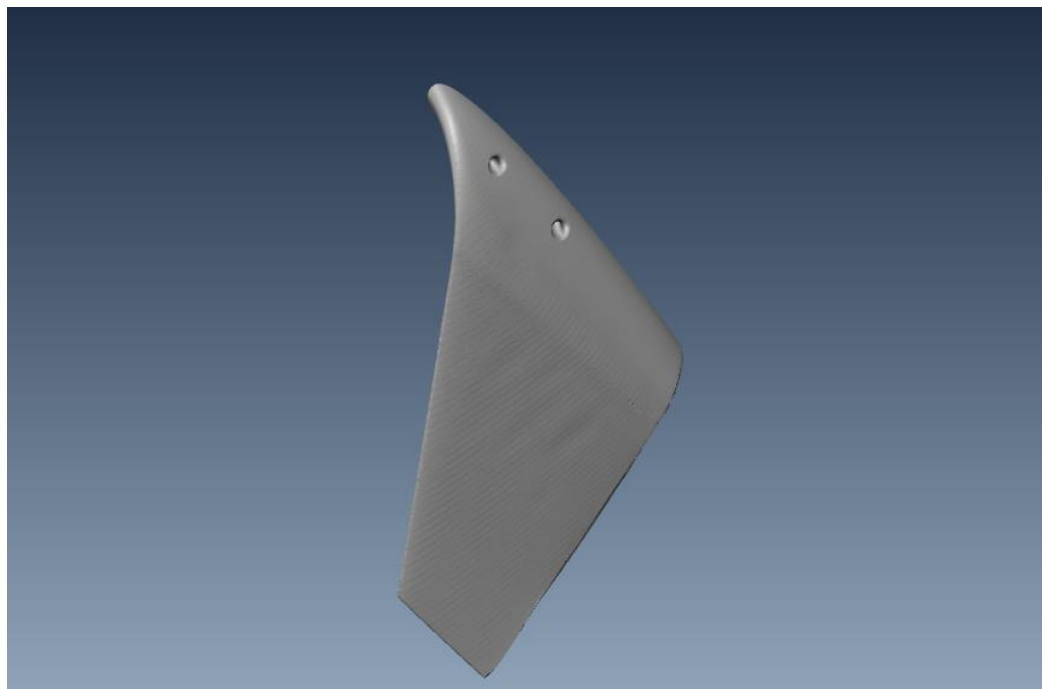


**Ilustración 93. Resultado de uso de la herramienta "hammer".**

Esta herramienta ha sido usada en multitud de elementos similares al que se ha podido ver en la imagen.

Otras de las herramientas comentadas en el punto anterior también han sido utilizadas para la ejecución de dicho trabajo. Estas han sido tanto la reducción de polígonos, en un 25% (para una mayor agilidad a la hora del trabajo con el software) así como una reducción de escala de un 60% aproximadamente, debido a que la impresora 3D con la que se lleva a cabo la impresión no es de gran dimensión.

Si lo que en un principio, lo se quiere es un prototipado, llegados a este punto se tendría el resultado deseado, una réplica totalmente exácta de un objeto existente del que no se tiene más información que lo se puede observar o tocar.



**Ilustración 94. Dorso y torso de la pieza ya editada.**



**Ilustración 95. Perfiles de la pieza ya editada.**

En este punto se podría hacer una exportación con extensión obj y hacer un pdf interactivo, en el que con la versión simple de adobe reader se podría interaccionar el objeto, rotar, hacer zoom etc.

El término de ingeniería inversa va más allá, ya que también involucra en su definición la posibilidad de estudio tanto interno como externo (por tanto habrá que crear una superficie que haga al objeto compatible con ciertos softwares para su posterior estudio ), por lo que aún quedan un par de pasos por cumplimentar.





#### 4.3.6 CARACTERIZACIÓN PARAMÉTRICA.

##### 4.3.6.1 GENERAL.

En este desarrollo general se comentará brevemente los pasos y las herramientas utilizadas para llevar a cabo esta parte del proceso, y se profundizará más en el siguiente punto de aportación propia del trabajo para poder describir el proceso ayudado de las imágenes y que sea mucho más fácil comprenderlo.

‘Técnicamente, en este punto se desarrolla un método el cual ajusta la pieza en 3D con parches NURBS (B-Splines Racionales No Uniformes), los cuales son optimizados mediante una Estrategia Evolutiva (EE), la cual determina los pesos de los puntos de control en tales parches, sin modificar la ubicación de los puntos muestreados de la superficie original, de manera que se reduzca el error en el ajuste de las NURBS sin alterar la geometría de la superficie del objeto real’. [20]

Para que se entienda, es la creación de una superficie superpuesta que se ajusta a la que es la del objeto en sí, con la finalidad de poder tratar esta superficie posteriormente en un determinado software, en este caso, de diseño.

Esta es una de las fases más importantes del proceso que se está llevando a cabo, ya que es aquí donde finalmente se obtiene el modelo matemático o representación computacional del objeto real.

Las NURBS se han convertido en un estándar en los sistemas modernos de CAD/CAM, por su maleabilidad y propiedades de modificación local de las superficies. A pesar de sus ventajas, las NURBS también poseen inconvenientes como: la restricción de topología rectangular y la dificultad de representación de detalles finos.[21]

Para poder recurrir a este método se seguirá en el mismo módulo que se utilizó en el punto anterior, IMEdit.

Para realizar el proceso, sea la pieza que sea, se han de seguir cuatro pasos:

-Generación de curvas.



-Creación de parches NURBS a partir de las curvas.

-Ajuste fino de parches NURBS.

-Creación de superficie a partir de parches NURBS.

Estos serán explicados brevemente a continuación, y se comprenderán mejor en el siguiente punto.

Para la creación de curvas será utilizada la herramienta “curvas”, en la que puede verse el desplegable en la siguiente imagen.



**Ilustración 96.** Desplegable "curvas".

En esta se puede ver la multitud de posibilidades de edición de curvas que se pueden utilizar, desde generar curva normal hasta cortarlas o alargarlas.

Lo ideal es ir generando el contorno de la pieza, y cuando este esté definido, ir formando cuadrículas por toda la superficie. Las curvas se generan haciendo click al boton izquierdo del raton sobre la pieza. Cada click corresponderá a un punto de la curva que se está generando.

Cuanto mas clicks se hagan, más se adaptará la curva a la superficie de la pieza, y cuanto más cuadrículas se formen, más precisión tendrá posteriormente la superficie generada.

Cada cuadrícula formada se transformará, en el siguiente paso en un parche NURBS.

Una vez se ha cubierto el objeto de cuadrículas, se recurrirá a la operación automática que ofrece el software, y que corresponde con el segundo paso del proceso de generación de superficies, creación de parches NURBS a partir de curvas. Esta herramienta se encontrará rodeada (imagen 97) en el desplegable de la barra de herramientas.



**Ilustración 97.** Barra de herramientas del módulo IMEdit.



Una vez que esta operación haya concluido, aparecerán renderizado en verde los parches que aceptará el software como buenos y en color morado los que no. Las que aparezcan sin renderizar, el software ni siquiera entiende que ahí tenga que crear un parche.

Las que aparecen en morado o sin renderizar se arreglarán recurriendo de nuevo a las curvas y realizando más cuadrículas dentro de esta área sin renderizar.

Habrà concluido este paso cuando al aplicar la creación de parches a partir de curvas, todas las cuadrículas aparézcan renderizadas en verde, lo que querrá decir que en este paso, todos los parches son aceptados como buenos. Se verá más ilustrativo con imágenes en el siguiente punto.

Llegados a este punto, se realizará un ajuste fino de los parches generados en el paso anterior(Círculo azul ilustración 98).



**Ilustración 98. Desplegable parches NURBS.**

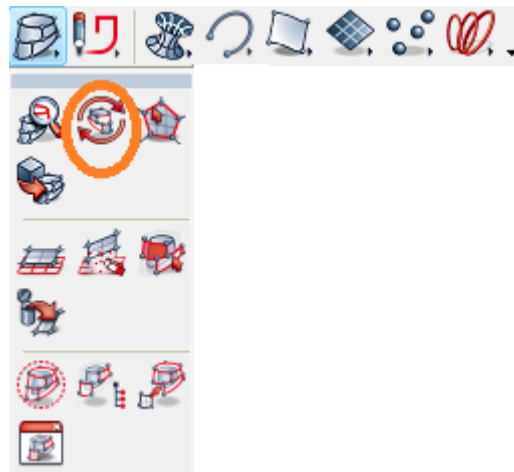
Este proceso podrá durar en torno a un par de minutos. Una vez finalizado, y antes de realizar el último paso, se podrá obtener una vista previa(círculo verde de la imagen 98) de la superficie que se podría generar en el último escalón.

Esta revisión en la vista previa es importantísima para tener una superficie óptima en la finalización del proceso, ya que el software facilita información sobre que partes podrían tener problemas en la generación definitiva de la superficie.



Si en la vista previa se observan partes que pudieran tener problemas habría que recurrir de nuevo a las herramientas anteriores, generalmente a “curvas” para intentar subsanar cualquier anomalía que se observe.

Una vez, que se puede verificar la vista previa sin ningún tipo de aviso, se podrá acceder a la herramienta de generación de superficie a partir de parches NURBS (rodeada en color naranja) para obtener nuestro modelo matemático definitivo.

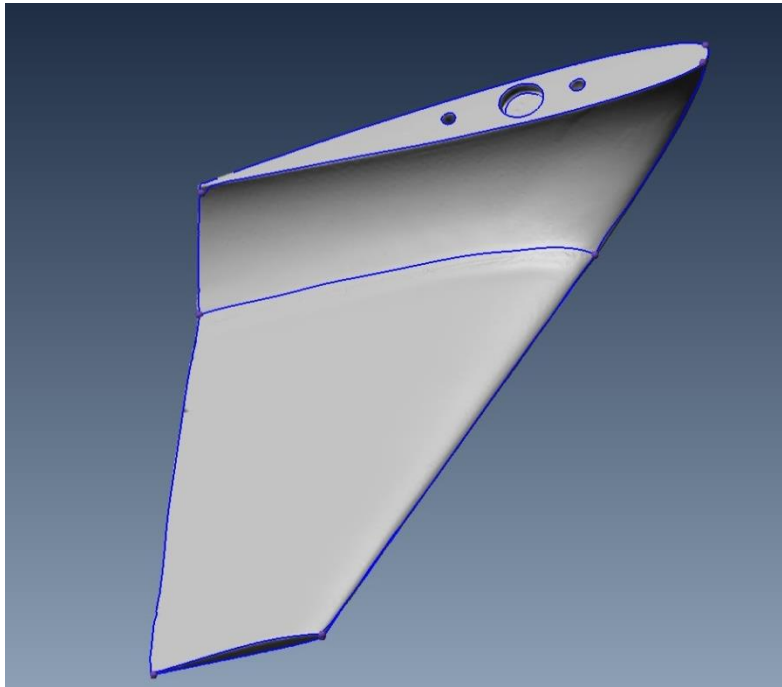


**Ilustración 99. Desplegable parches NURBS.**

#### 4.3.6.2 CARACTERIZACIÓN PARAMÉTRICA WINGLET.

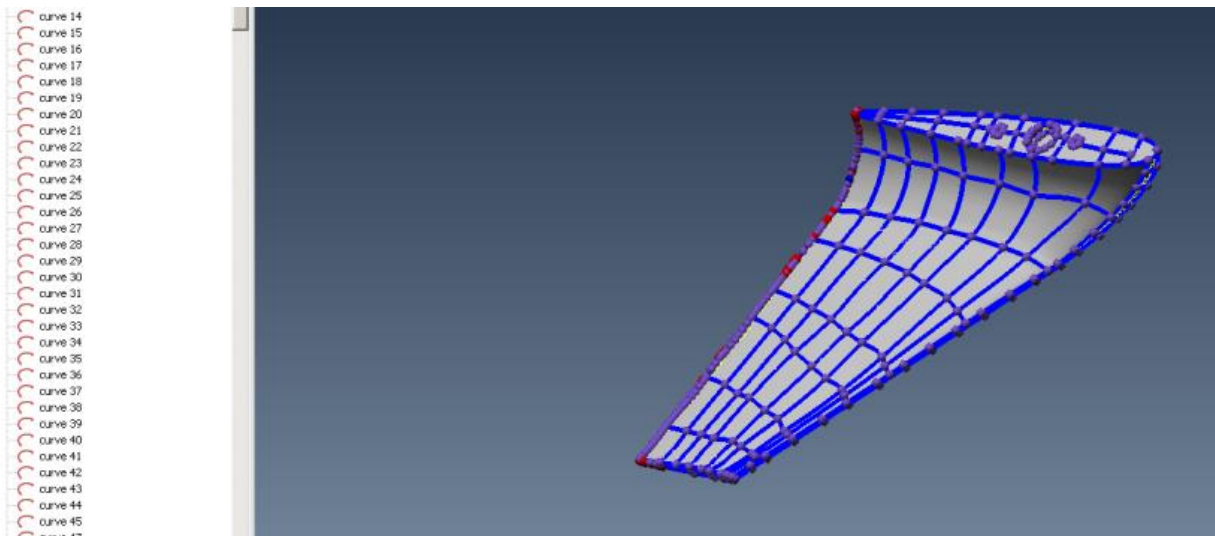
En este punto se podrá ver de forma más representativa la forma en la que se ha llevado a cabo esta parte del proceso.

Empezando por la generación de curvas en la pieza, en la que, por experiencia se ha decidido comenzar contorneando el objeto.



**Ilustración 100. Bordeado con curvas.**

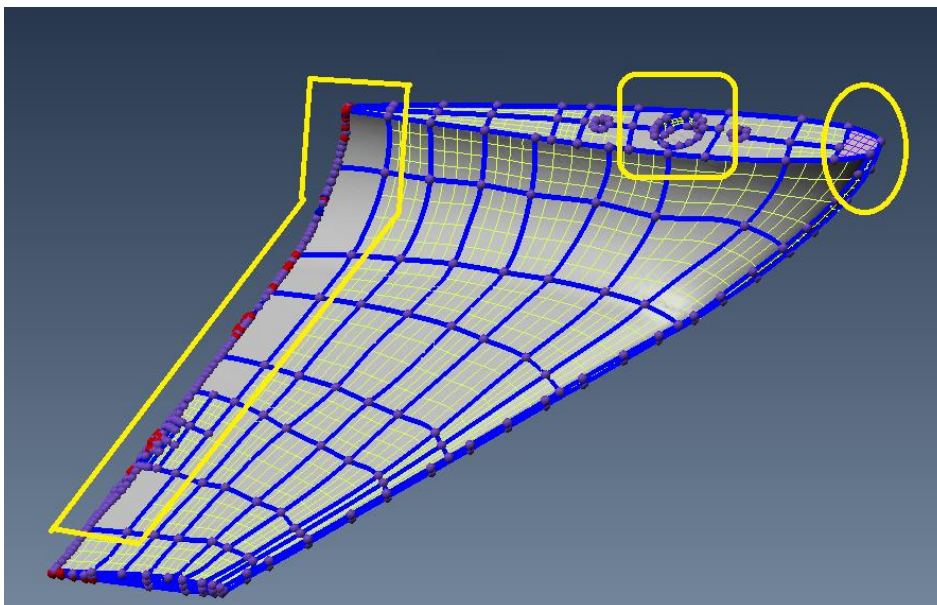
Una vez que se ha cerrado el contorno se comenzará a generar intersecciones entre curvas para generar las cuadrículas que cubran toda la superficie de la pieza.



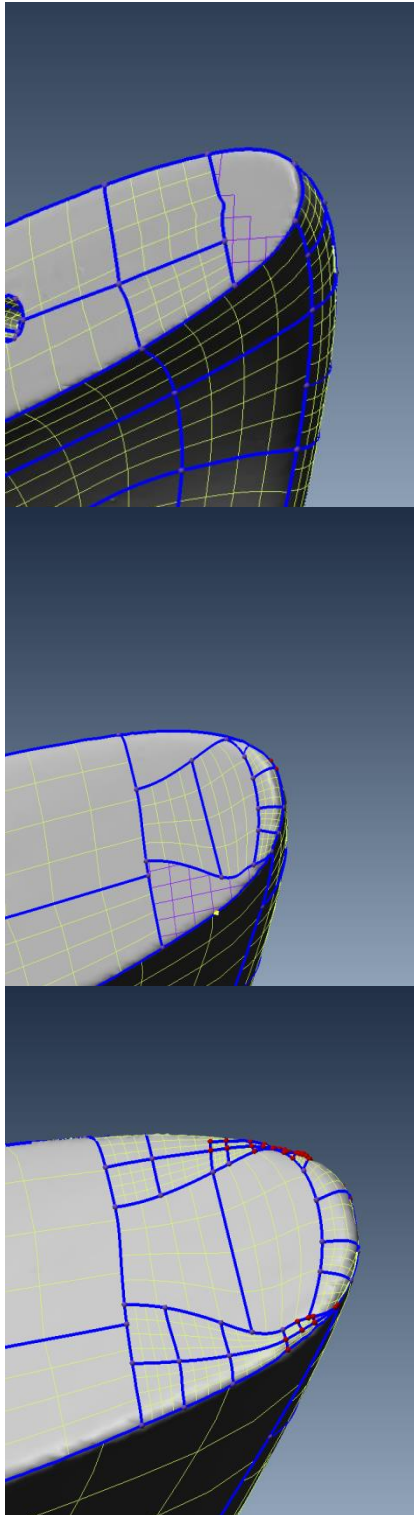
**Ilustración 101. Cuadrículas generadas a partir de curvas.**

A la izquierda de la imagen puede observarse parte del árbol de contenidos del archivo en la que se muestra una fracción de la hilera de curvas que han sido utilizadas hasta ahora para ir generando las cuadrículas.

Llega ahora el momento de crear los parches NURBS a partir de las curvas creadas.



**Ilustración 102. Generación de parches a partir de curvas. Renderizado.**



**Ilustración 103. Solución a la aparición de parche no óptimo.**

En la imagen superior puede observarse como la mayor parte aparece renderizada en color verde, aunque también se puede apreciar (marcado en amarillo) áreas en las que el renderizado es morado, o ni siquiera aparece este.

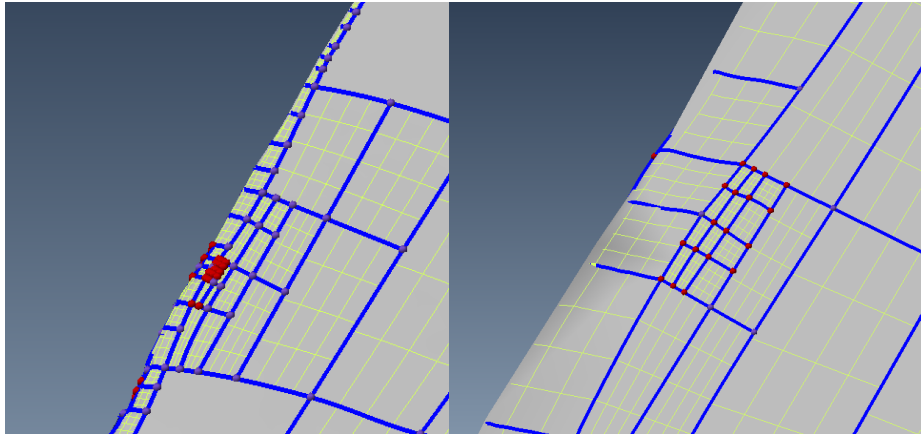
La solución a este problema es volver a recurrir a la herramienta de creación de curvas para crear más cuadrículas en estas partes, hasta que la tecnología del software las interprete como parches NURBS óptimos.

En la imagen de la izquierda puede verse un ejemplo de esta solución.

Esta solución hay que aplicársela a cada una de las cuadrículas que no aparezcan renderizadas en verde, lo cual es una parte bastante tediosa.

En esta imagen también se puede ver como aparecen tanto puntos morados como rojos. Estos muestran el cruce de unas curvas con otras, la única diferencia es que los rojos los interpreta como muy cercanos, aunque esto no signifique ningún problema.

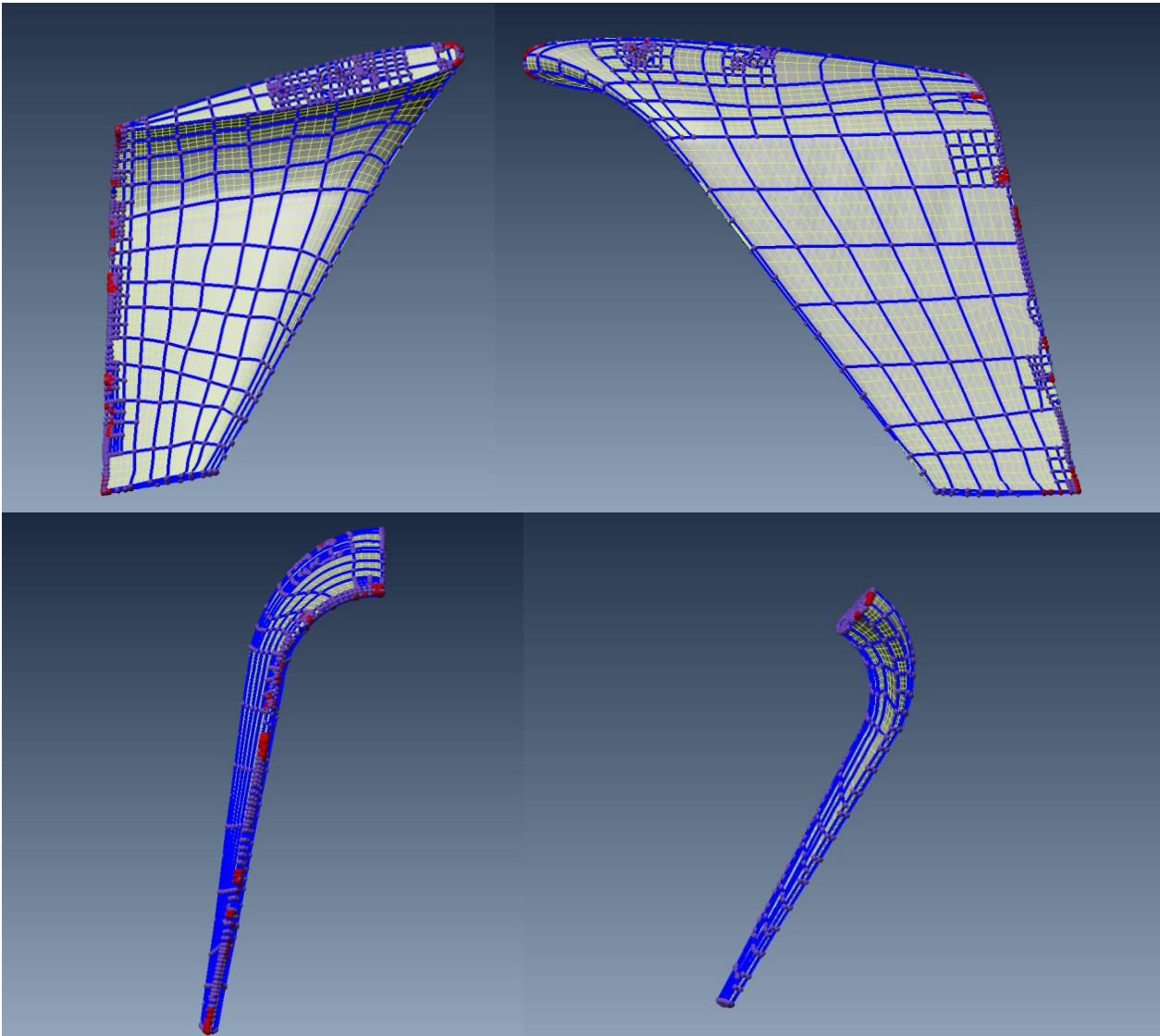
Otro ejemplo de esta solución aplicada se puede ver en la figura 104.



**Ilustración 104. Solución al no reconocimiento de parches.**

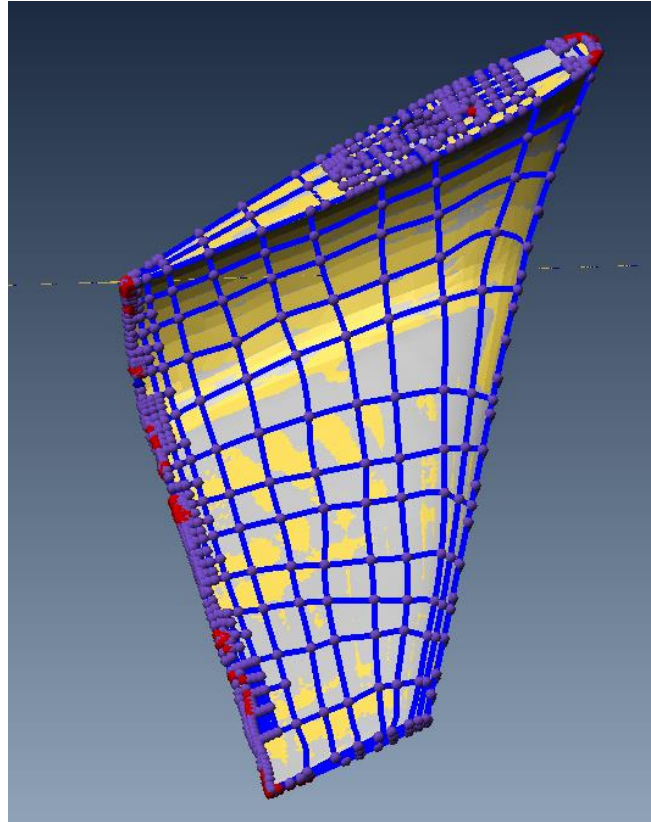
En la siguiente imagen se podrá observar el aspecto de todas las partes del winglet cuando se ha superado el segundo paso de nuestra caracterización paramétrica.





**Ilustración 105. Creación completa de parches NURBS.**

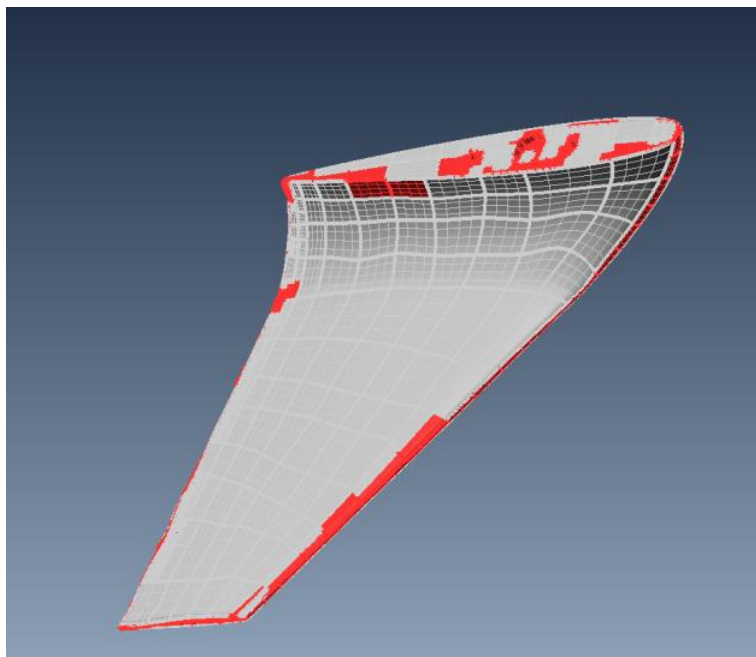
Una vez se ha llegado a este punto, la pieza está preparada para ser sometida a un ajuste fino de los parches generados, que es algo similar al best-fit al que se sometían las capturas cuando eran alineadas. En la siguiente imagen se podrá ver el aspecto al finalizar el proceso de ajuste.



**Ilustración 106. Proceso de ajuste finalizado.**

Cuando este proceso automático acabe, se podrá observar en una vista previa el aspecto que podría tomar la superficie final al ejecutar el cuarto paso de este punto. Esta vista previa es indispensable para eliminar todas las posibles irregularidades que pueda presentar.

Se puede contemplar en la siguiente ilustración la primera vista previa que se generó en la creación del trabajo.



**Ilustración 107. Primera vista previa tras el ajuste fino.**



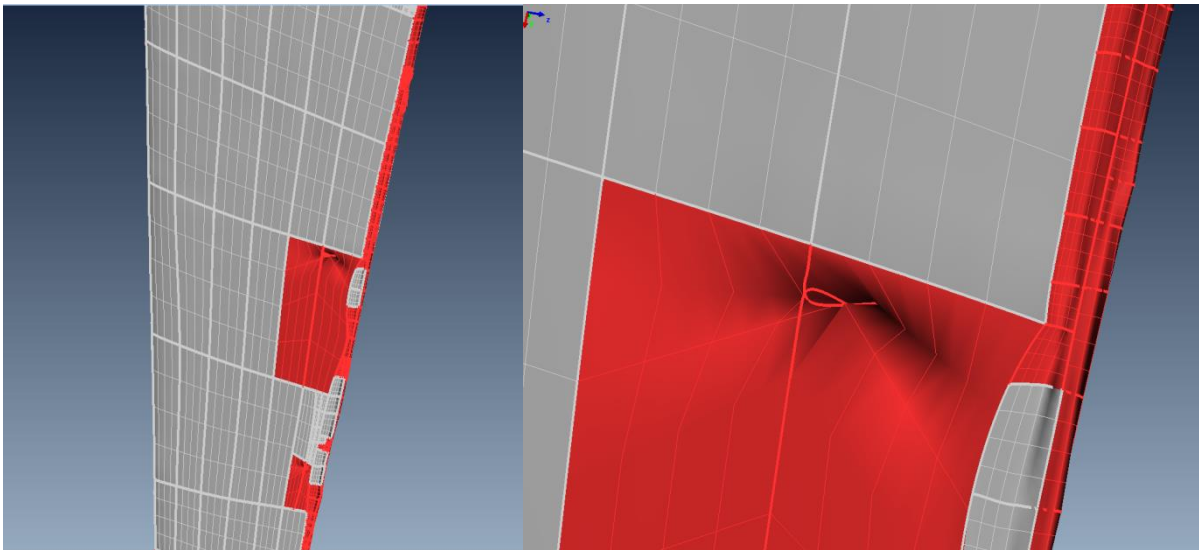
En la figura se puede distinguir entre tonos grises y rojos. Los primeros se consideran partes en las que no va a haber problemas a la hora de que se genere la superficie final, los rojos, vaticinan que pueden ocurrir problemas a la hora de generarla.

Ahora es el momento de ir área por área inspeccionando cual puede ser la anomalía por la cual el software interpreta que la creación de la superficie final no va a ser óptima.

Entre las irregularidades se pueden presentar varias opciones, cuadrículas sin renderizar, pellizcos entre ellas, etc.

Puede darse la posibilidad que el área marcada en rojo no presente ninguna rareza, y posteriormente en esta parte genere la superficie de forma corriente.

En la siguiente imagen se puede ver un ejemplo de deformidad.



**Ilustración 108. Pellizco. Visualizado en la vista previa.**

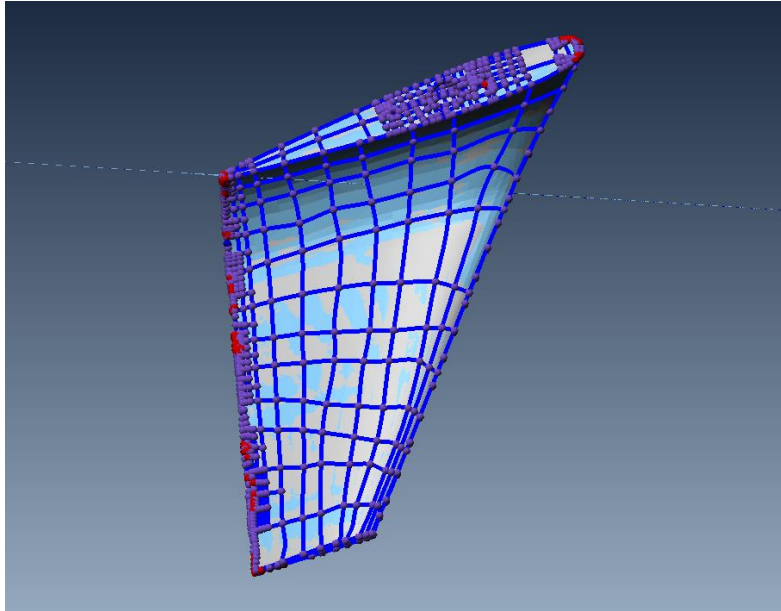


**Ilustración 109. Pellizco con parches ocultos.**

Para solucionar este tipo de problemas, se localizaría la curva anormal ocultando los parches (figura 109) y se recurriría de nuevo a la herramienta “curvas” para editarla realizando de nuevo los pasos correspondientes de creación de parches y ajuste fino para que se actualicen las anomalías.



Una vez que se genere la vista previa y no presente anomalías aparentemente visibles se estará en un punto en el que ya es posible la generación de la superficie final susceptible a ser exportada en extensión igs, formato en el que puede ser importado en la mayoría de los software de modelado de superficies.



**Ilustración 110. Superficie final generada.**

En la imagen superior se aprecia la apariencia final que muestra el objeto con la superficie final creada. Una vez exportada se cambiará el uso del software Polyworks por la de otro de modelado de superficie, en este caso Solid Edge, que será desarrollado en el siguiente punto.



## CAPÍTULO 5

### APLICACIONES DE LA SUPERFICIE FINAL

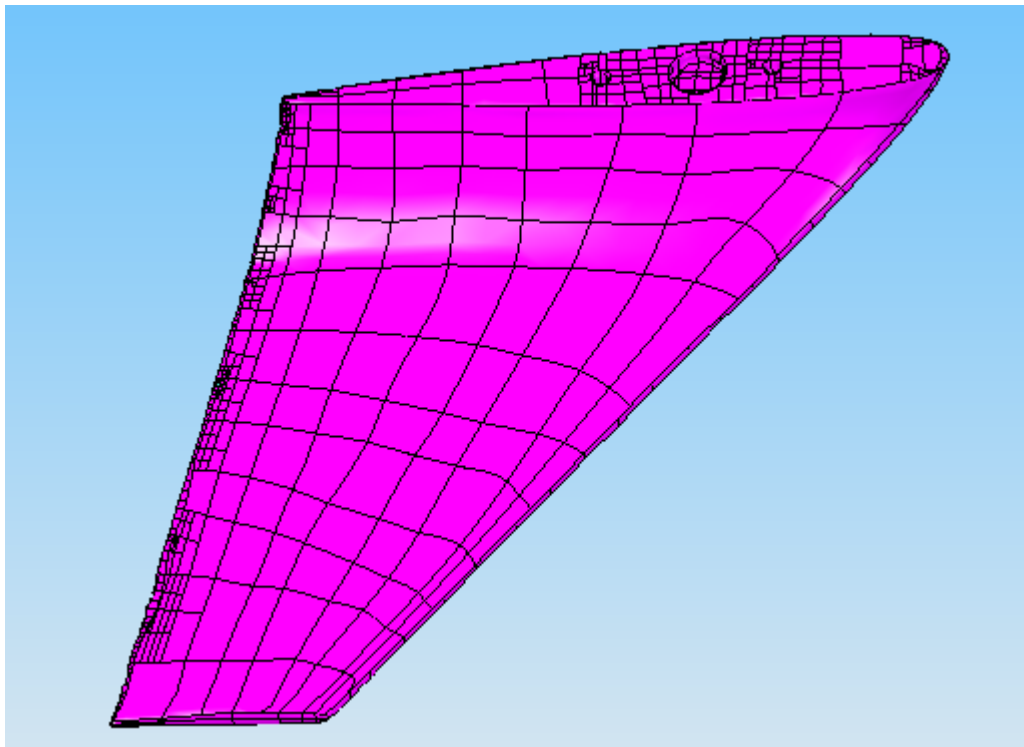
---

Una vez que se tiene la superficie final, es decir, que se ha creado el modelo inverso de la pieza, existen muchas aplicaciones.

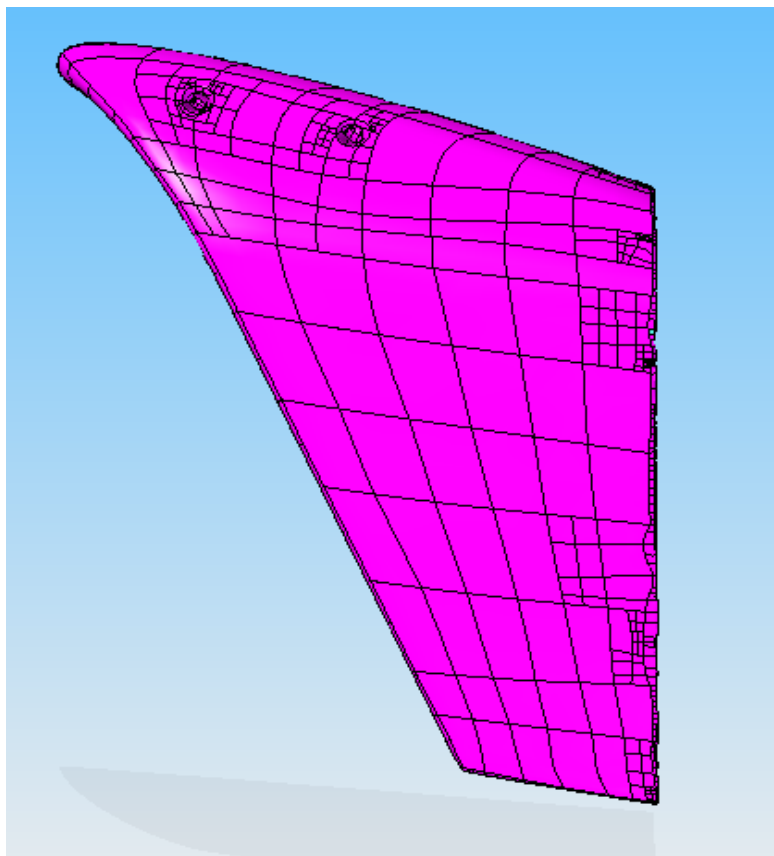
Una de ellas, por ejemplo, la modificación de dicha superficie a través de un software de diseño, con el fin de hacer una corrección o una innovación en alguna parte del objeto.

En el caso de la pieza que se ha utilizado en este trabajo, podría realizarse un cambio de dimensiones o un cambio de forma con el objetivo de tener una mejora aerodinámica que se verificará en una prueba en el tunel de viento.

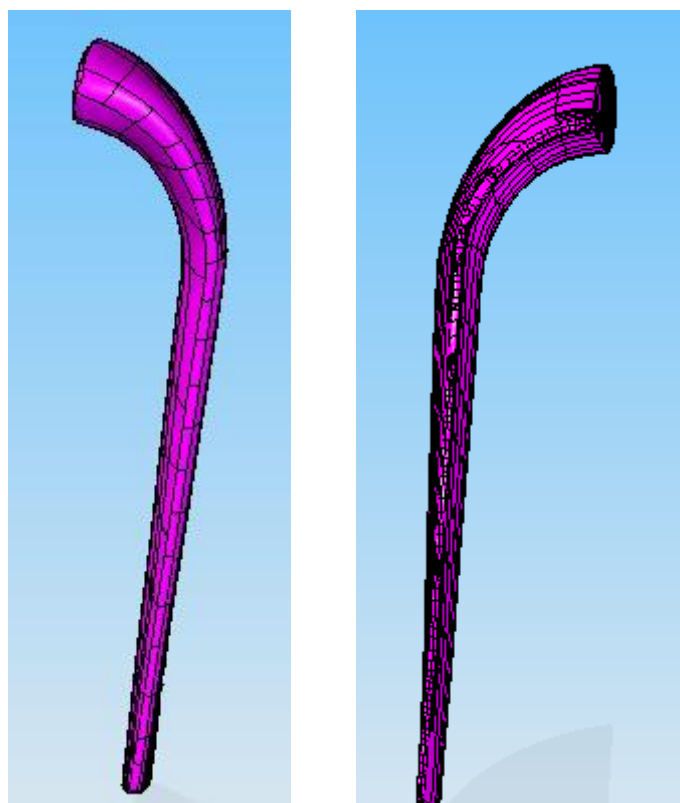
En las siguientes imágenes se puede ver que no existe ningún problema al cargar el archivo en el software de diseño Solid Edge v21.



**Ilustración 111. Torso Solid Edge.**



**Ilustración 112. Dorso Solid Edge.**



**Ilustración 113. Perfiles Solid Edge.**



Las posibles modificaciones, simbólicas, podrían ser del tipo que se presentan a continuación.

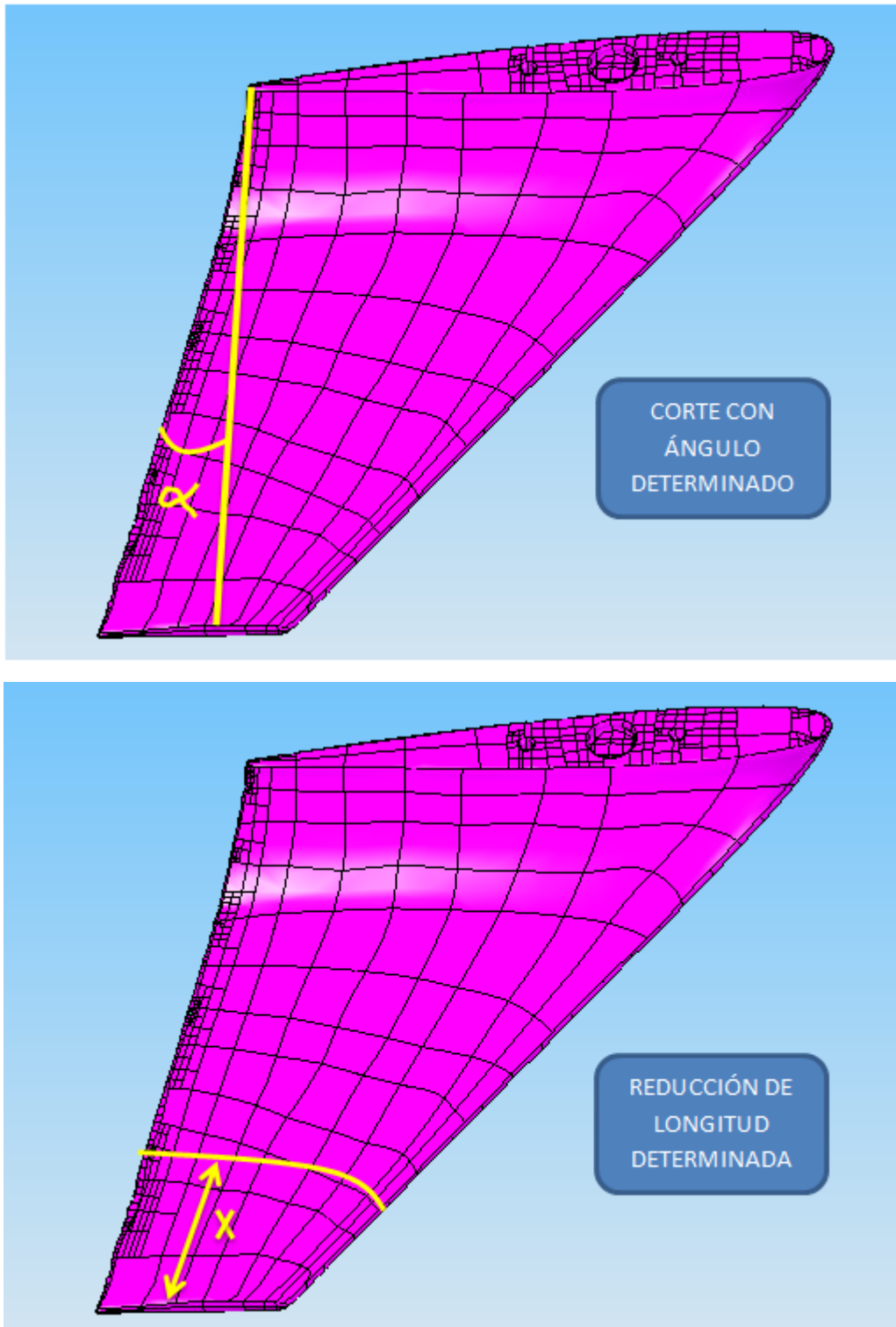


Ilustración 114. Posibles modificaciones



Remarcar, que se ha hecho el intento de demostrar esta aplicación de la ingeniería inversa, y realizar una modificación simbólica, pero finalmente no ha sido posible debido a la dificultad añadida de manejo del programa a utilizar Catia v5 (solid edge es demasiado básico para el tratamiento de superficies), por lo que no compensaba, ya que esto no era objetivo principal de dicho trabajo.

Otra aplicación, a partir de esta superficie obtenida, podría ser el estudio de esfuerzos del elemento, y como consecuencia la obtención de diagramas de momentos.

Por ejemplo, la utilización de cypecad sería buena opción, ya que acepta el tipo de formato de dicha superficie.

Quizas el elemento que se ha utilizado para el desarrollo de este trabajo no sea buen ejemplo para esta aplicación, pero se podría pensar por ejemplo en una pequeña estructura escaneada para obtener su modelo tridimensional con el objetivo de reducir considerablemente el tiempo empleado en su diseño.





## CAPÍTULO 6

### IMPRESIÓN 3D.

---

Como bien se ha comentado en capítulos anteriores, una de las más importantes aplicaciones de la ingeniería inversa es la copia y prototipado rápido de elementos.

Es esta una buena oportunidad para mostrar la simplicidad y rapidez con la que se obtiene el elemento impreso en 3D.

Esta impresión puede realizarse incluso un paso antes de haber concluido el proceso de ingeniería inversa, es decir, antes de crear la caracterización paramétrica del objeto. No es más que la exportación del archivo en extensión STL y la importación de este a una impresora 3D.

En el caso del objeto utilizado en este trabajo la impresión se ha realizado a partir del archivo creado después de la caracterización paramétrica, es decir, al final del proceso de ingeniería inversa, con el fin de que pueda observarse, que aún después de realizarse este paso queda una copia exacta de lo que es el objeto real.

‘El inicio de la impresión 3D se remonta a 1976, cuando se inventó la impresora de inyección de tinta. En 1984, algunas adaptaciones y avances sobre el concepto de la inyección de tinta transformaron la tecnología de impresión con tinta a impresión con materiales.

Charles Hull (el padre de la impresión 3D), más tarde, el co-fundador de 3D Systems, inventa la estereolitografía, un proceso de impresión que permite que un Objeto en 3D se cree a partir de datos digitales. Se utiliza la tecnología para crear un modelo 3D a partir de una imagen y permite que los usuarios prueben un diseño antes de que este invierta en la fabricación del modelo definitivo.’ [27]

En la actualidad, un gran número de tecnologías en competencia están disponibles para la impresión 3D, sus principales diferencias se encuentran en la forma en la que las diferentes capas son usadas para crear piezas. Algunos métodos usan fundido o ablandamiento del material para producir las capas, por ejemplo sinterizado de láser selectivo (SLS) y modelado por deposición fundida (FDM), mientras que otros depositan materiales líquidos que son curados con diferentes



tecnologías. En el caso de manufactura de objetos laminados, delgadas capas son cortadas para ser moldeadas y unidas juntas. [23]

Cada método tiene sus propias ventajas e inconvenientes; por ello, algunas compañías ofrecen elegir entre polvos y polímero como material de fabricación de la pieza según sean las prioridades del cliente. [24]

Generalmente las consideraciones principales son velocidad, coste del prototipo impreso, coste de la impresora 3D, elección y coste de materiales, así como capacidad para elegir el color. [25]

Los dos grandes materiales para la impresión son el metal y el plástico. Dentro del plástico, el material de menor coste para la impresión 3D, existen dos tipos que se usan en la mayoría de los casos como son el PLA y el ABS.

‘El ABS (acrilonitrilo butadieno estireno) es un termoplástico utilizado habitualmente en la impresión 3D, especialmente para las impresoras 3D caseras (impresoras 3D de plástico). De superficie rugosa y con similitudes con el plástico en términos de textura, durabilidad y funcionalidad, se funde a aproximadamente 200°C. Es resistente y está disponible en varios colores. La impresión 3D de ABS implica el uso de impresoras 3D de plástico ABS y se utiliza para crear objetos de uso diario, tales como juguetes (el famoso fabricante de juguetes Lego las utiliza para sus juguetes).

La impresión 3D de las PLA se hace con impresoras 3D para PLA y filamento PLA (un poliéster termoplástico creado a partir de recursos renovables, utilizando almidones de fuentes tales como maíz, materia vegetal o leche de cabra). Es una opción muy popular entre los clientes por el hecho de que es ecológico y biodegradable. Es menos resistente que el ABS por lo que puede lijarse y se funde a 160° C. También es sensible al agua. Procesado por las impresoras 3D PLA, este material se utiliza para crear objetos que se utilizan para la gastronomía (cuencos, platos, tazas etc)’ [26]

En el caso de la impresión del winglet de prueba se ha utilizado PLA, debido a que era la única opción existente, y la máquina utilizada una Bq Prusa i3 Hephastos.



**Ilustración 115. Bq prusa i3 hephestos.**

En las siguientes imágenes se puede ver el resultado de la impresión del objeto utilizado.



**Ilustración 116. Pieza impresa 3D**



Me gustaría decir, esta vez en primera persona, la dificultad que ha supuesto la impresión de esta pieza, lo que ha hecho darme cuenta de la poca disponibilidad de medios y de herramientas tecnológicas (y no quiere decir poca existencia) que tienen los alumnos, y más en una escuela como la ESCUELA DE INGENIEROS DE SEVILLA.

Agradecer desde aquí al departamento de física el favor por la impresión del objeto.



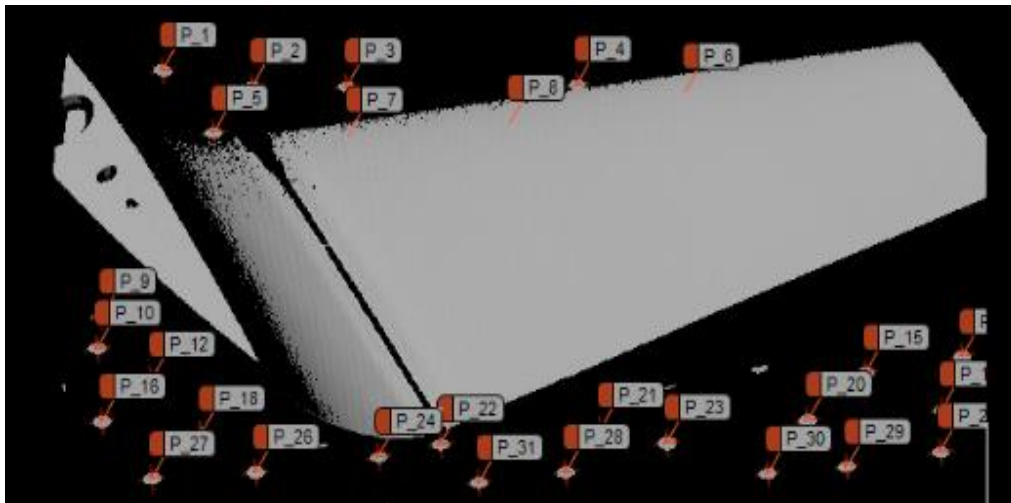
## CAPÍTULO 7

### RESUMEN DE RESULTADOS.

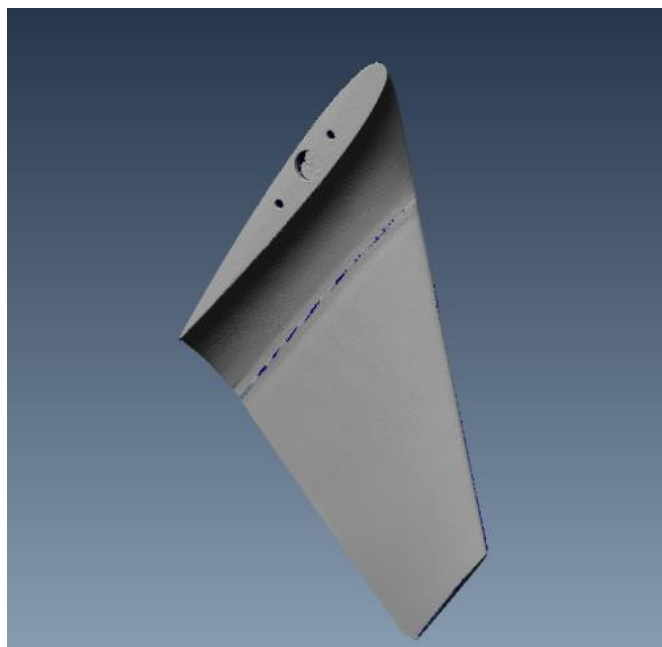
---

En este capítulo se podrá ver, en imágenes, los pasos que se han ido siguiendo y el aspecto del winglet en cada uno de ellos. Será muy breve con el fin de que quede claro el procedimiento seguido.

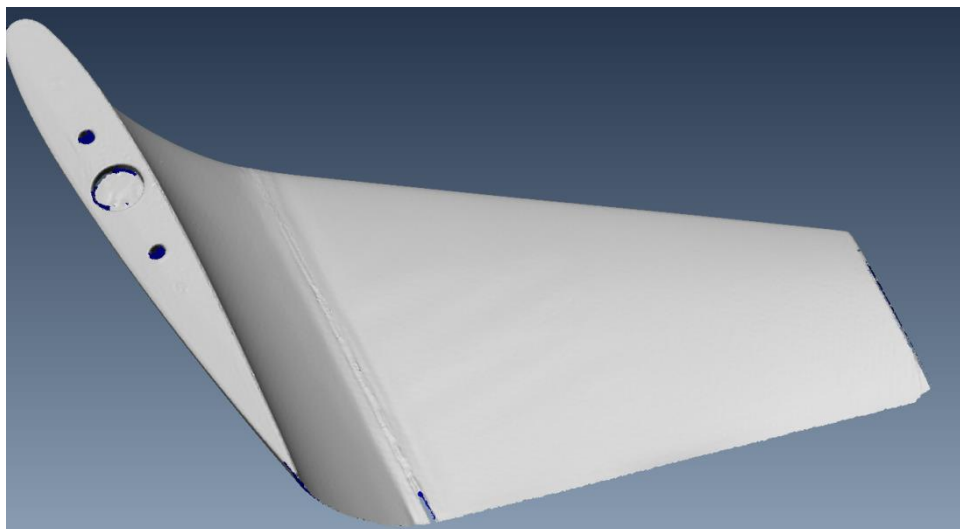
En los pie de fotos de estas se podrá saber en qué momento del proceso se encuentra el objeto.



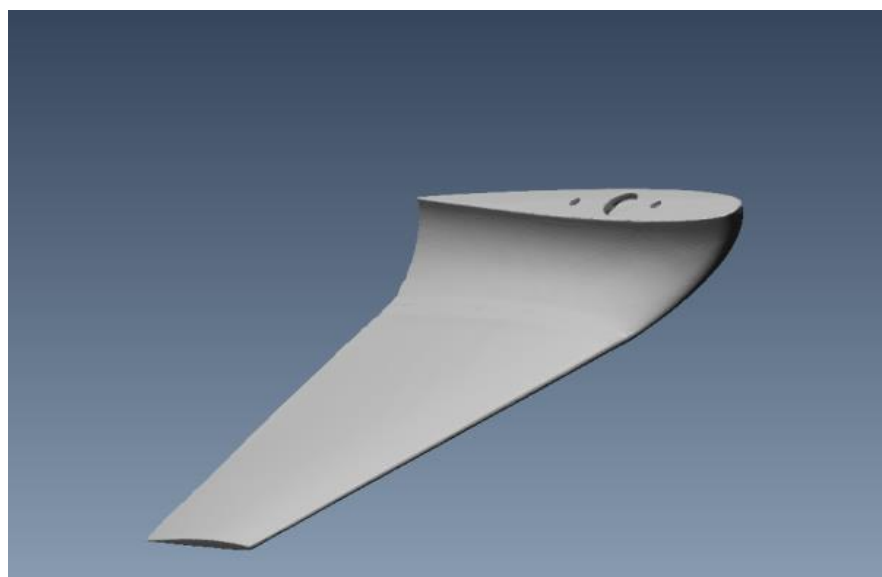
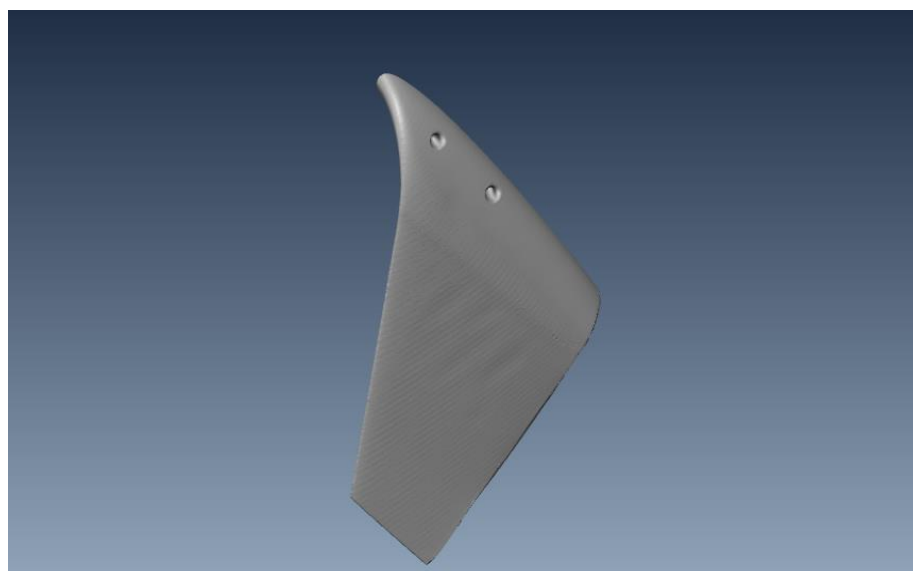
**Ilustración 117. Toma de capturas.**



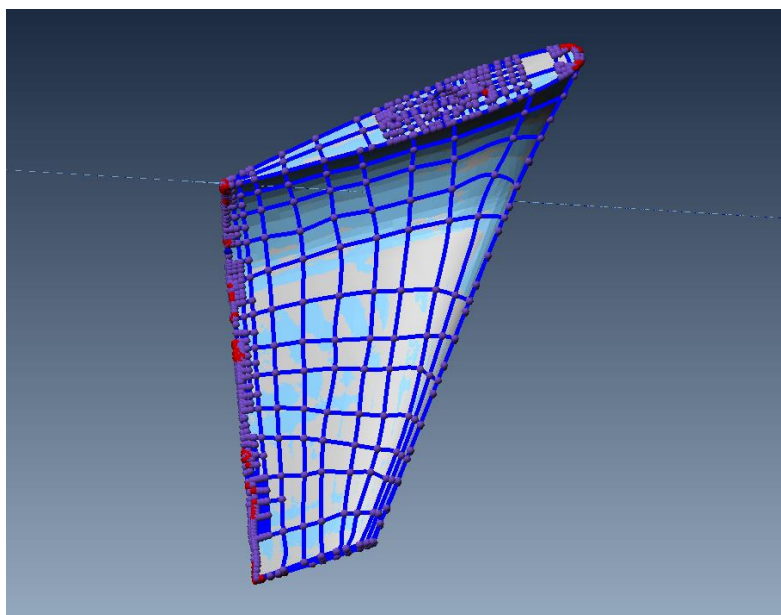
**Ilustración 118. Resultado final IMAAlign.**



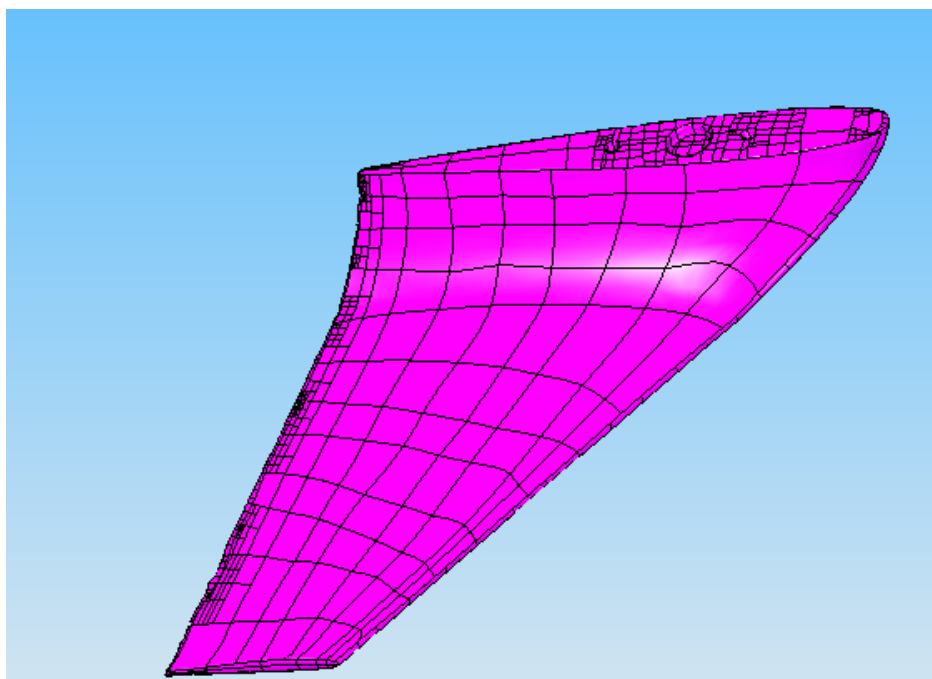
**Ilustración 119. Resultado final IMMerge.**



**Ilustración 120. Resultado final IMEdit.**



**Ilustración 121. Resultado final Generación de superficie.**



**Ilustración 122. Superficie exportada a Solid Edge.**



**Ilustración 123. Impresión pieza 3D**





## CAPÍTULO 8

### CONCLUSIONES.

---

Inicialmente, el proyecto Ingeniería Inversa aplicada al Winglet se planteó con la idea de alcanzar unos objetivos asequibles, debido a la dificultad que podía presentar el proceso completo.

En este caso, el primer fin era obtener un archivo, con extensión .IGS, el cual ya fuese posible someterlo a una modificación en cualquier software de modelado de superficies, sin llegar a realizar dicha modificación.

Posteriormente, una vez alcanzado el objetivo principal, se pensó la posibilidad de llegar a la modificación del objeto, para que se viera aún más claro una de las actuales utilidades de dicho proceso.

Debido a que ha sido severamente difícil encontrar una máquina de impresión 3D con impresión de bajo coste para mostrar los resultados obtenidos (la escuela no pone a disposición del alumnado ninguna de las muchas máquinas que tiene), se llegó a la conclusión de que no compensaba realizar dicha modificación, en relación *resultado no visible-tiempo empeñado*, por lo que se decidió dar por finalizado el desarrollo del proceso, cumplimentando el objetivo principal que se propuso al comienzo de éste, desarrollar el proceso completo de ingeniería inversa, obteniendo unos resultados satisfactorios.

Por último, después de haber realizado este proyecto y todas sus tareas correspondientes (desde la búsqueda de información, el diseño o los cálculos hasta la redacción) cabe mencionar el gran desarrollo personal que he experimentado a lo largo de este tiempo, tanto a nivel personal como de trabajo y la gran cantidad de conocimientos adquiridos de los métodos usados, así como de las herramientas utilizadas.



## CAPÍTULO 9

### REFERENCIAS.

---

- [1] [http://ing-inv.blogspot.com.es/p/ingenieria-inversa\\_13.html](http://ing-inv.blogspot.com.es/p/ingenieria-inversa_13.html)
- [2] Gisweb – Reingeniería para la implementación de un Web Feature Service
- [3] [https://es.wikipedia.org/wiki/Ingenier%C3%ADa\\_inversa](https://es.wikipedia.org/wiki/Ingenier%C3%ADa_inversa)
- [4] [https://es.wikipedia.org/wiki/Ingenier%C3%ADa\\_inversa](https://es.wikipedia.org/wiki/Ingenier%C3%ADa_inversa)
- [5] <http://www.starrett.com/industries/product-applications/2011/09/15/reverse-engineering-multi-sensor-measuring-systems>
- [6] trimetric 3d Service GmbH
- [7] *Eilam, Eldad (2005). Reversing: Secrets of Reverse Engineering. Wiley Publishing. p. 595. ISBN 0-7645-7481-7.*
- [8] *Eilam, Eldad (2005). Reversing: Secrets of Reverse Engineering. Wiley Publishing. p. 595. ISBN 0-7645-7481-7*
- [9] [https://www.google.es/search?q=tu-4&source=lnms&tbn=isch&sa=X&ved=0ahUKEwjvi86S0eXLAhWDXRQKHR5DC5EQ\\_AUIBygB&biw=1517&bih=714&dpr=0.9](https://www.google.es/search?q=tu-4&source=lnms&tbn=isch&sa=X&ved=0ahUKEwjvi86S0eXLAhWDXRQKHR5DC5EQ_AUIBygB&biw=1517&bih=714&dpr=0.9)
- [10] [https://www.google.es/search?q=iphone+6&source=lnms&tbn=isch&sa=X&ved=0ahUKEwi3ILSq0eXLAhUDVxQKHW7HCiEQ\\_AUIBygB&biw=1517&bih=714&dpr=0.9](https://www.google.es/search?q=iphone+6&source=lnms&tbn=isch&sa=X&ved=0ahUKEwi3ILSq0eXLAhUDVxQKHW7HCiEQ_AUIBygB&biw=1517&bih=714&dpr=0.9)
- [11] <http://atletasmasteriquique.bligoo.com/>
- [12] <http://atletasmasteriquique.bligoo.com/>
- [13] <http://www.factum-arte.com/pag/244/-p-Escaneado-de-luz-blanca--p->
- [14] [visionartificial.wordpress.com](http://visionartificial.wordpress.com)
- [15] Jornadas técnicas del sector de moldes y matrices Instituto Tecnológico de Aragón.
- [16] [https://es.wikipedia.org/wiki/Esc%C3%A1ner\\_de\\_luz\\_estructurada](https://es.wikipedia.org/wiki/Esc%C3%A1ner_de_luz_estructurada)



[17] Manual equipos Nub3d

[18] Manual equipos Nub3d

[19] Manual equipos Nub3d

[20] Ajustes de objetos 3D Mediante Pareches NURBS optimizados con Estrategias evolutivas. Sandra Mateus. Universidad Nacional de Colombia.

[21] Ajustes de objetos 3D Mediante Pareches NURBS optimizados con Estrategias evolutivas. Sandra Mateus. Universidad Nacional de Colombia.

[22] Guía IMMerge.

[23] Noomag, ed. (30 de octubre de 2014). «La impresión 3D, el braille del siglo XXI».

[24] «The World In 2008». Economist.com.

[25] «Factors to consider when choosing a 3D printer»  
wohlersassociates.com

[26] <http://es.3dilla.com>

[27] [impresoras3d.com](http://impresoras3d.com)