



Modelización 3D de tres prototipos de vehículos de competición del equipo Formula Student UPV.

Julio de 2019

Trabajo de Fin de Grado

Alumno: Samuel Fita Alarcón

Tutor: José Enrique Priego de los Santos

GRADO EN INGENIERÍA AEROESPACIAL
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Agradecimientos

En primer lugar, me gustaría agradecer este trabajo por encima de nadie a mis compañeros Pachés, Fede, Rodrigo, Bea y Raúl, por el apoyo mutuo que nos hemos dado durante estos meses y por haberlos hecho más amenos con vuestra compañía.

Gracias a Enrique por haberme dado la posibilidad de realizar este trabajo que, pese a las complicaciones que han surgido, he podido realizar.

Muchas gracias a Marco por toda la ayuda que me ha proporcionado, por haberme solucionado la vida en momentos de gran dificultad durante el desarrollo del trabajo.

Por supuesto, toda mi familia, en concreto a mis padres y a Blanca, por todo el apoyo incondicional que me ha dado, sobre todo durante estos últimos (duros) meses, y en general durante toda mi trayectoria. Y a Marina, por ser la persona que más has tenido que aguantar contándote mis desgracias, y que más me aguanta en cualquier momento.

Finalmente, a todos mis amigos, Pau, David, Fer, Paco, Javi, Mari, además de los anteriormente mencionados y los que faltan por nombrar, por haber hecho estos últimos meses de carrera lo más llevaderos posibles, y estos cuatro años los mejores de mi vida sin duda alguna. Muchas gracias por todo.

Resumen

El presente proyecto consiste en el estudio de la técnica de escaneo láser para la medida de elementos de carácter industrial, mediante el levantamiento y modelización 3D de tres coches de competición del equipo Formula Student UPV. Se describirá su procesado, inicialmente como nube de puntos y finalmente como modelo sólido, y su impresión en impresora 3D.

En un primer lugar se realizará la obtención mediante un láser escáner de una nube de puntos para cada uno de los tres coches. La medida y obtención de datos se realizará mediante un láser escáner Trimble TX6, para posteriormente trabajar con el software de edición de nube de puntos Leica Cyclone y realizar la unión y limpieza de los puntos.

Una vez obtenidas las nubes de puntos y limpiados los vehículos, el siguiente objetivo es el mallado y modelado de las mismas. Se obtendrá, así, un modelo 3D por cada coche, para su posterior comparación con la realidad.

La fase final del proyecto consiste en aplicar ingeniería inversa sobre las mallas obtenidas, es decir, rediseñar los vehículos mediante la ayuda de software como Fusion 360 o Rhinoceros, para tener modelos más limpios y libres de imperfecciones. Finalmente, los modelos se imprimirán en una impresora 3D para comprobar la similitud con los vehículos reales, realizándose a su vez un análisis dimensional comparativo entre el modelo obtenido y el modelo real.

Resum

El present projecte consisteix en l'estudi de la tècnica d'escaneig làser per a la mesura d'elements de caràcter industrial, mitjançant l'alçament i modelització 3D de tres cotxes de competició de l'equip Formula Student UPV. Es descriurà el seu processat, inicialment com a núvol de punts i finalment com a model sòlid, i la seua impressió a una impressora 3D.

En un primer moment es realitzarà l'obtenció mitjançant un làser escàner d'un núvol de punts per a cada un dels tres cotxes. La mesura i obtenció de dades es realitzarà mitjançant un làser escàner Trimble TX6, per a posteriorment treballar amb el software d'edició de núvol de punts Leica Cyclone i realitzar la unió i neteja de punts.

Una vegada obtinguts i netejats els núvols de punts, el següent objectiu és el mallat i modelat dels mateixos. S'obtindrà, aixina, un model 3D per cada cotxe, per a la posterior comparació amb la realitat.

La fase final del projecte consisteix en aplicar enginyeria inversa sobre les malles obtingudes, és a dir, redissenyar els vehicles mitjançant l'ajuda de software com Fusion 360 o Rhinoceros, per a tindre models més nets i lliures d'imperficcions. Finalment, els models s'imprimiràn a una impressora 3D per a comprovar la similitud amb els vehicles reals, realitzant-se també una anàlisi dimensional comparativa entre el model obtingut i el model real.

Abstract

This project consists in the study of the technique of laser scanning for the measurement of industrial elements through the modeling 3D of three competition vehicles from Formula Student UPV team. It will be described its processing, initially like point cloud and finally like a solid model, and its printing on a 3D printer.

In first place, the obtaining of the points cloud will be performed by a laser scanner, for each one of the cars. The measurement and performing of the points cloud will be done by a laser scanner Trimble TX6, to later work with the points cloud editor software Leica Cyclone and perform the points join and cleaning.

Once we obtain the points clouds and have the vehicles cleaned, the next objective is meshing and modeling them. It will be obtained a 3D model for each car, for its later comparison with the real model.

The final phase of the project is about aplying reverse engineering on the meshes, i.e., redesigning the vehicles by means of software like Fusion 360 or Rhinoceros, in order to obtain cleaner models. Finally, the models will be printed in a 3D printer to check its similarity with the real models, performing also a comparative dimensional analysis between the new model and the original model.

Índice general

Agradecimientos	III
Resumen	V
Índice de figuras	XIII
Índice de tablas	XIX
1 Introducción	1
2 Instrumentación: láser escáner	3
2.1 El láser escáner	3
2.2 Trimble TX6	7
3 Descripción de los objetos de estudio	11
3.1 Formula Student	12
3.1.1 FSUPV-01	14
3.1.2 FSUPV-02	15

3.1.3 FSUPV-03	16
3.1.4 FSUPV-04 y FSUPV-05	17
4 Proceso de toma de datos y escaneo	19
4.1 Software e interfaz del Trimble TX6	20
4.2 Espacio de trabajo y primer análisis	22
4.3 Procedimiento de medida	24
5 Tratamiento de la nube de puntos	27
5.1 Procesado inicial con Trimble Realworks	28
5.2 Tratamiento de nube de puntos con Leica Cyclone.	29
5.3 Limpieza de puntos	39
6 Modelado 3D	47
6.1 Creación y edición de la malla en software 3DReshaper	48
6.2 Edición de la malla con el software Meshmixer	51
7 Ingeniería inversa mediante Fusion 360	57
7.1 Ingeniería inversa y aplicaciones	58
7.2 Obtención del nuevo modelo del FUSPV-02 mediante software de modelado	60
7.2.1 Diseño de la carrocería con Rhinoceros	60
7.2.2 Diseño del alerón delantero	62
7.2.3 Diseño de elementos laterales	63
7.2.4 Diseño del ala trasera.	65
7.2.5 Detalles y resultado final.	67
7.3 Modelado de los vehículos FSUPV-01 y FSUPV-03	68
8 Impresión 3D	73
8.1 Preparación de modelos para la impresión	74
8.2 Impresora y material empleado.	75
8.3 Proceso de impresión	76

9	Análisis dimensional y resultados	81
10	Presupuestos	85
10.1	Costes de material	85
10.2	Costes humanos	86
10.3	Costes de software	87
10.4	Costes totales del proyecto	87
11	Conclusiones	89
12	Bibliografía	91
A	Especificaciones técnicas del láser escáner	93
B	Resultados estadísticos de las uniones de puntos	95

Índice de figuras

2.1. Ejemplo de un láser escáner	4
2.2. Posición de un punto en coordenadas esféricas	5
2.3. Ejemplos de aplicación del láser escáner	6
2.4. Trimble TX6	8
2.5. Vistas con detalle del láser escáner Trimble TX6	8
2.6. Compartimento del Trimble TX6	9
2.7. Tabla de niveles de precisión de los que dispone el Trimble TX6	10
3.1. Distribución de las competiciones de Formula Student/SAE . .	12
3.2. Prototipo FSUPV-01	14
3.3. Prototipo FSUPV-02	15
3.4. Prototipo FSUPV-03	16
3.5. Prototipo FSUPV-04	17
3.6. Prototipo FSUPV-05	18

4.1. Menú principal del TX6	20
4.2. Objetos de estudio almacenados en el Laboratorio Pedro Duque (UPV)	22
4.3. Primer boceto de la distribución de los escaneos	24
4.4. Configuración del primer escaneo	25
4.5. Esquema de los estacionamientos con distancias reales	25
5.1. Visualización en Trimble Realworks del estacionamiento número 7 en blanco y negro	28
5.2. Visualización en Trimble Realworks del estacionamiento número 7 en color	29
5.3. Visualización en Trimble Realworks del lateral del FSUPV-02 en blanco y negro	29
5.4. Visualización en Trimble Realworks del lateral del FSUPV-02 en color	30
5.5. Visualización en Trimble Realworks del lateral del FSUPV-03 en blanco y negro	30
5.6. Visualización en Trimble Realworks del lateral del FSUPV-03 en color	31
5.7. Carpeta con la nube de puntos de cada escaneo	32
5.8. Detalle de la unión de puntos de los escaneos 1 y 2 usando como puntos comunes la ventana de la fachada	32
5.9. Vista en planta de la unión de los escaneos 2 y 3	34
5.10. Datos sobre las 4 primeras uniones	34
5.11. Vista en planta de la unión de los 5 primeros escaneos	35
5.12. Error debido al mal alineamiento de los escaneos	35
5.13. Datos de las primeras 4 uniones con error	36
5.14. Uso del alerón delantero para la selección de los puntos comunes	36

5.15. Vista en planta de los escaneos del 1 al 5 por separado	37
5.16. Vista de la unión de los escaneos del 1 al 5	37
5.17. Vista de la unión de los escaneos del 1 al 5 con los datos tomados por la cámara	38
5.19. Ubicación del archivo ModelSpace Bruto	38
5.18. Detalle de la unión de los escaneos 5 y 6	39
5.20. Vistas del conjunto de todas las uniones en bruto	39
5.21. Vista desde lejos del conjunto de uniones en bruto	40
5.22. Vista con fotografía y con posiciones y números de estacionamiento	40
5.23. Vista tras la primera limpieza con los tres coches aislados	41
5.24. Vista de los tres coches separados para su tratamiento individual	41
5.25. Vista de la superficie inferior del vehículo	42
5.26. Detalle de la limpieza de puntos exteriores en la zona entre la carrocería y la rueda	43
5.27. Detalle de la limpieza de puntos de la parte inferior del vehículo	43
5.28. Nube de puntos del FSUPV-01 después de la limpieza	44
5.29. Nube de puntos del FSUPV-03 después de la limpieza	45
5.30. Cambio de origen del sistema de coordenadas	45
6.1. Vista de la nube de puntos del coche 02 en 3DReshaper	48
6.2. Parámetros de creación de la primera malla del coche 02	49
6.3. Resultados de la primera malla del coche 02	50
6.4. Malla del coche 02 sin motor y suavizada	51
6.5. Aspecto de la malla del motor	52
6.6. Procedimiento de relleno de agujeros 1	53
6.7. Procedimiento de relleno de agujeros 2	53

6.8. Aspecto de la malla antes y después de realizar el suavizado . . .	54
6.9. Aspecto de la malla antes y después de realizar la eliminación de superficies falsas	54
6.10. Extremo derecho del alerón trasero con puntos en zigzag	55
7.1. Escaneo del automóvil mediante el láser escáner Space Spider .	59
7.2. Resultados del modelo de un Ford Eifel obtenidos mediante es- caneo 3D	59
7.3. Sketch de la planta de la carrocería del FSUPV-02	60
7.4. Combinación de los dos perfiles y extrusión	61
7.5. Vistas del modelo de la carrocería del FSUPV-02	61
7.6. Malla original con el extremo del alerón extruido	62
7.7. Aspecto del alerón creado mediante extrusiones	63
7.8. Sección oblicua para obtener el perfil de la carcasa derecha . . .	63
7.9. Sketch como conjunto de circunferencias (Izquierda), aspecto final del Sketch (Derecha)	64
7.10. Modelo con alerón delantero y carcasas laterales	64
7.11. Comprobación de que la curvatura del perfil es constante me- diante cuatro cortes transversales	65
7.12. Sketch del perfil del ala trasera con y sin malla	66
7.13. Conjunto de Sketches de los perfiles del ala trasera	66
7.14. Resultados del rediseño del FSUPV-02 con la malla original . .	67
7.15. Resultados del rediseño del FSUPV-02 sin malla	68
7.16. Contornos para generar el modelo de la carrocería del FSUPV-03	69
7.17. Vista del conjunto de Sketches del FSUPV-03	69
7.18. Aspecto final del FSUPV-03 con y sin malla	70

7.19. Contorno del extremo del alerón trasero mediante la utilización de Spline	71
7.20. Aspecto final del FSUPV-01 sin el diseño de la carrocería . . .	71
8.1. Versión del FSUPV-03 con modificaciones para su impresión . .	74
8.2. Versión del FSUPV-02 con modificaciones para su impresión . .	75
8.3. Base y tronco del modelo de FSUPV-03 en Simplify3D	77
8.4. Modelo del FSUPV-03 listo para imprimir	78
8.5. Resultados de la impresión del FSUPV-03	78
8.6. Resultados de la impresión del FSUPV-02 y FSUPV-03	79
9.1. Medidas realizadas al FSUPV-02	83
A.1. Ficha técnica del láser escáner Trimble TX6	94

Índice de tablas

8.1. Especificaciones de la impresora Prusa i3 MK3S	75
8.2. Datos obtenidos de la impresión del FSUPV-03	77
9.1. Comparación de medidas entre el modelo real y el obtenido por el levantamiento	83
10.1. Costes totales derivados del material utilizado	86
10.2. Costes totales derivados de las personas implicadas	86
10.3. Costes totales derivados del software utilizado	87
10.4. Costes totales del proyecto con y sin IVA	87

Capítulo 1

Introducción

El presente proyecto se basa en el análisis de la técnica de escaneado mediante láser escáner aplicada a la industria. Para ello se realizará el levantamiento industrial de tres vehículos de competición del equipo Formula Student de la Universitat Politècnica de València, partiendo del escaneo de los vehículos y llegando hasta un modelo CAD de ellos, finalizando el proyecto con la impresión en 3D de dos de ellos y su análisis dimensional.

La tecnología de escaneo en 3D es una técnica muy usada en diferentes ámbitos, es por ello que en este proyecto se quiere verificar la utilidad de esta técnica, orientada al campo industrial. En el siguiente capítulo se explica en qué consiste la tecnología del escaneado láser, los tipos de escáneres que existen y sus posibles aplicaciones a diferentes campos, así como las especificaciones del láser escáner que se va usar, el Trimble TX6.

En el tercer capítulo se realiza una descripción de los objetos que se van a estudiar, se explica en qué consiste el equipo Formula Student UPV y los logros que se han conseguido con los vehículos a estudiar.

El cuarto capítulo da comienzo a la descripción de la parte práctica del estudio, explicando los análisis iniciales y el espacio de trabajo que se va a emplear. En él también se detalla todo lo relativo al procedimiento de medida.

En los capítulos quinto y sexto se explica el proceso de tratamiento de la nube de puntos creada en la medida, desde que se importan los datos hasta que se obtiene la malla para generar un modelo sólido. Se describen las funciones más importantes del software utilizado y se extraen conclusiones.

Posteriormente, en el capítulo siete surge la necesidad de realizar ingeniería inversa, por lo que se desarrolla el concepto y se indican los pasos seguidos para el rediseño de los tres vehículos, con el objetivo de su impresión 3D, explicado en el capítulo ocho.

Una vez realizada la impresión, en el capítulo nueve se realiza un breve análisis geométrico comparando algunas dimensiones de los modelos obtenidos con los modelos reales.

Finalmente, el décimo capítulo hace una estimación de los presupuestos previstos para la hipotética realización del estudio, y en el capítulo once se extraen las principales conclusiones del trabajo, y de si se han cumplido los objetivos que se deseaban.

A su vez, el trabajo cuenta con dos anexos, uno con algunas especificaciones técnicas del material utilizado y otro con una lista de datos estadísticos del estudio, explicados en capítulos posteriores.

Los principales objetivos del trabajo son:

- Comprobar el buen funcionamiento del escaneo láser aplicado a la industria con el levantamiento de tres coches de competición.
- Aprender el concepto de ingeniería inversa, qué es y qué aplicaciones tiene, y aplicarlo al proyecto
- Estudiar posibles soluciones o alternativas en caso de que el método utilizado no sea lo suficientemente correcto o preciso.
- Relacionar el uso de la tecnología de escaneo láser con el ámbito aeroespacial, y las ventajas que puede suponer.

Instrumentación: láser escáner

En el presente capítulo se describirá el sistema que se va a emplear para la primera parte del proyecto: el láser escáner. Además, se indicarán los diferentes tipos de escáneres láser que existen y las aplicaciones a las que están destinados.

Posteriormente, el capítulo se centrará en el instrumento que se va a usar, el Trimble TX6, describiendo sus características y especificaciones más importantes.

2.1 El láser escáner

Un láser es un sistema que emite un haz de luz con coherencia espacio-temporal, es decir, transmitiéndose con tamaños pequeños en un espectro muy pequeño. Los sistemas láser tienen un gran número de aplicaciones en múltiples ámbitos: medicina, comunicaciones, sistemas de impresión, etcétera, aunque una de las aplicaciones más importantes es la topografía.

El objetivo de la topografía es el estudio y análisis de la superficie del terreno, y a lo largo de los años las técnicas para su desarrollo han ido mejorando. El láser escáner es una herramienta que en los últimos años ha tomado un papel crucial para múltiples aplicaciones de la topografía, convirtiéndose en uno de los sistemas de medida con más importancia en este ámbito. Su funcionamiento se basa en la realización de un barrido sobre una superficie, de la cual se obtiene una gran cantidad de información en cuanto a la posición de

los elementos situados en ella. Esto hace que se logre un gran realismo debido a la gran cantidad de puntos que se pueden medir en una sola superficie.



Figura 2.1: Ejemplo de un láser escáner

Un sistema de escaneo se puede clasificar en activo o pasivo, según el comportamiento que tiene con respecto a su entorno. Los escáneres **pasivos** consisten en el análisis de la radiación producida en el entorno y su posterior representación. Pueden detectar tanto la luz como otros tipos de radiación tales como la ultravioleta o los infrarrojos. Entre estos sistemas destacan, por ejemplo, los basados en la esteoscopia o en el análisis de siluetas.

Los escáneres **activos**, en cambio, se basan en la emisión de una señal para estudiar cómo se comporta y obtener de esa manera información sobre el entorno. El láser escáner se incluye dentro de los escáneres 3D activos, ya que su principio de funcionamiento es la detección de la distancia a la que se encuentra un punto, en función del tiempo que tarda la onda en rebotar. Para la obtención de un solo punto, se multiplica el tiempo de respuesta por la velocidad del láser, que viene predeterminada, y se obtiene la posición exacta del punto.

El láser utiliza un sistema de coordenadas esférico, es decir, depende del ángulo con respecto al eje vertical del escáner (ϕ), del ángulo con respecto al eje horizontal (θ) y una distancia r . Los ángulos vendrán determinados por la dirección en la que esté posicionado el láser, y la distancia radial será función del tiempo de reflexión de la onda, llamado *time of flight*. Este sistema tiene como origen de coordenadas el propio láser.

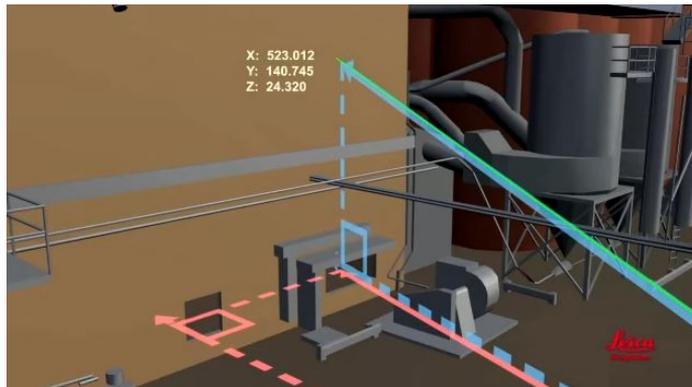


Figura 2.2: Posición de un punto en coordenadas esféricas

Una vez determinadas las coordenadas esféricas del punto, se convierten a coordenadas cartesianas (x, y, z) , como se ve en la Figura 2.2, y se guardan para el posterior procesado.

Este sería el procedimiento para la medida de un solo punto, pero la característica principal del láser escáner es que puede medir cantidades muy grandes de puntos en tiempos relativamente bajos. Esto es posible gracias a un espejo situado debajo del láser, el cual rota a velocidades altas, permitiendo realizar un barrido de todos los puntos situados en un mismo ángulo respecto al eje horizontal. Cuando ha registrado todos los puntos verticalmente gira respecto a su eje vertical y vuelve a realizar un barrido. Finalmente, se obtiene una nube de puntos obtenidos en todas las direcciones desde donde esté situado el escáner.

Esta es la ventaja más importante de los sistemas láser escáner, al tener registrada la posición exacta de todos los puntos se diferencia de una cámara común en que lo que se obtiene es la geometría idéntica del cuerpo a medir, lo cual permite su tratamiento posterior con las dimensiones reales o escaladas.

Los parámetros principales a tener en cuenta en un sistema láser escáner son la velocidad con la que mide, la precisión de los puntos medidos y su alcance máximo.

La **velocidad** de adquisición de datos puede variar según el modelo, desde valores de alrededor de 50000 puntos por segundo (Leica Scanstation C10) hasta altas velocidades de más de un millón de puntos por segundo.

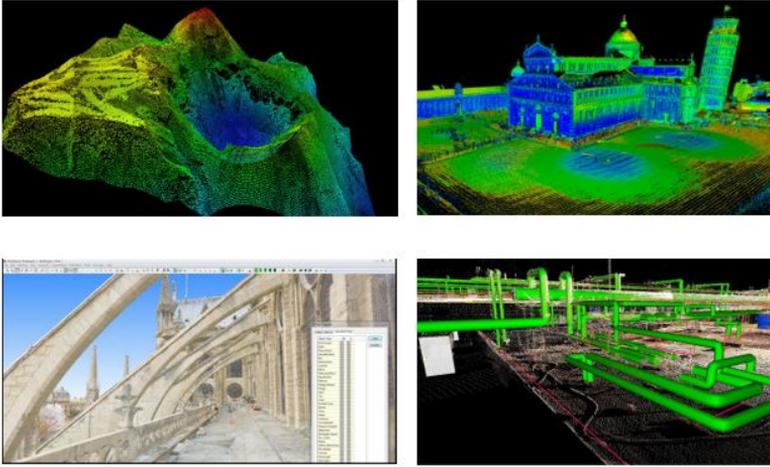


Figura 2.3: Ejemplos de aplicación del láser escáner

El **alcance** es otro parámetro interesante a la hora de escoger un sistema. Algunos de ellos pueden llegar a registrar puntos a incluso 2 km de distancia, aunque lo común es un alcance de alrededor de 100 a 200 metros.

La **densidad** o precisión del sistema indica la separación entre puntos a cierta distancia, y en cada sistema suele haber varios niveles en función de la densidad que se desea obtener en una medida. La precisión de los sistemas láser escáner puede variar desde centímetros hasta centésimas de milímetro.

Adicionalmente, la mayoría de estos sistemas llevan incorporada una cámara que realiza una fotografía panorámica 360 con el objetivo de poder asociar la textura correspondiente a cada cuerpo medido, que se traduce en un resultado con un aspecto más similar al real.

En la actualidad, el láser escáner se ha convertido en una herramienta con aplicaciones muy importantes en una amplia variedad de ámbitos, desde la industria hasta la conservación del patrimonio histórico. Algunas de ellas se pueden ver en la Figura 2.3.

Debido a la gran precisión que aporta el sistema, la medida de piezas industriales es otra de las aplicaciones más importantes, ya que permite realizar un control geométrico y dimensional de las piezas para posteriormente compararlas con el modelo teórico, y controlar la producción o realizar estudios sobre defectos de fabricación, entre otros.

Además de la industria, con un láser escáner se pueden medir también objetos de gran tamaño como edificios, lo cual hace que también tenga una aplicación importante en el ámbito de la documentación arquitectónica. La utilización de sistemas láser escáner ha ayudado a la documentación de grandes edificios, como catedrales, o el modelado digital de obras de arte históricas.

Otra aplicación puede ser el entretenimiento. A la hora de mostrar un objeto real en una película o videojuego, se suele recurrir al escaneo 3D para evitar el modelado desde cero del cuerpo, el cual es mucho más costoso y puede resultar más complejo.

Finalmente, otra aplicación destacable, como se ha mencionado anteriormente, es la enfocada a la topografía. Un sistema láser escáner puede ser usado para el análisis de la elevación de un terreno, lo cual puede suponer una alternativa clara a la fotogrametría, siendo el escaneo más rápido y más resistente a las condiciones meteorológicas adversas.

En cuanto al futuro, se espera que estos instrumentos se hagan más sencillos y mejoren parámetros como el tiempo de adquisición de datos. También se puede innovar en el campo de los materiales, es decir, obteniéndose información del material escaneado.

2.2 Trimble TX6

En nuestro caso se ha usado un láser escáner Trimble TX6 (Figura 2.4). Este modelo tiene unas características aceptables para el estudio que se desea realizar, las cuales se resumen a continuación.

El equipo tiene unas dimensiones de 335mm de ancho por 386 mm de alto y 242 mm de largo, y pesa 10,7 kg sin batería y 11,2 kg con batería. Funciona con una batería de 72 W, con un tiempo de funcionamiento de alrededor de 2 horas por cada batería. En cuanto a las condiciones de funcionamiento, puede trabajar en un rango de temperaturas de 0 a 40C, además de que puede operar a cualquier nivel de luminosidad, ya que, al tratarse de láser, no es necesario ningún nivel de luz ambiente. En caso de medir con niveles de luminosidad bajos, sí que afectará la calidad de la captura de imágenes.

El escáner se basa en un espejo rotativo vertical, el cual rota respecto a la base, ofreciendo un campo de visión de 360 horizontalmente y 317 en vertical, ya que deja una zona de sombra debida a la imposibilidad de escanear la parte de debajo del láser.



Figura 2.4: Trimble TX6

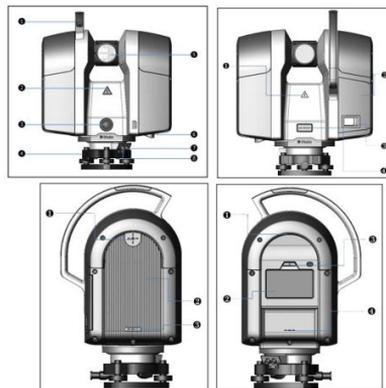


Figura 2.5: Vistas con detalle del láser escáner rimble TX6

Como se puede ver en la Figura 2.5, en la parte frontal del equipo se puede distinguir el espejo rotativo en la parte superior, y el objetivo de la cámara en la parte inferior. En la parte derecha es donde se encuentra la pantalla táctil. En la parte trasera se encuentra el compartimento de la Figura 2.6, donde se puede distinguir la entrada para la batería y el puerto USB.

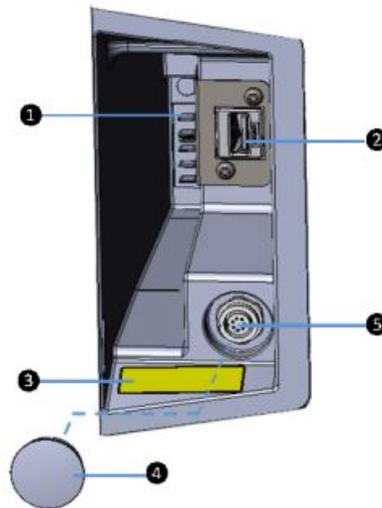


Figura 2.6: Compartimento del Trimble TX6

En cuanto a la velocidad de adquisición de puntos, el TX6 puede adquirir hasta 500.000 puntos por segundo, y tiene un alcance máximo de 120 metros, más que suficiente para la aplicación en la que se desea usar, además un alcance mínimo de 60 centímetros, dato que se debe tener en cuenta a la hora de realizar la distribución de las medidas.

Existen diferentes niveles en función de la densidad que se quiera obtener, siendo los niveles superiores más precisos, pero también adquieren un número mucho mayor de puntos, lo cual aumenta la cantidad de información y el tamaño del archivo, y puede suponer un problema en el posterior tratamiento de la nube de puntos. En la tabla se detallan las especificaciones en función del nivel en el que opera el láser. En nuestro caso, todos los escaneos se realizan en Nivel 1, ya que los objetos a medir están situados a una distancia pequeña del láser escáner, por lo que no es necesaria alta precisión a grandes distancias, además de que se busca obtener archivos lo más ligeros posibles, debido que se van a realizar varios escaneos y la nube de puntos va a ser densa.

Parámetros de escaneo	Vista preliminar	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
Alcance Máx. ¹	80/120 m	80/120 m	80/120 m	80/120 m
Duración del escaneado (minutos) ³	02:00	03:00	05:00	19:00
Espaciamiento entre puntos a 10 m	15,1 mm	—	—	—
Espaciamiento entre puntos a 30 m	—	22,6 mm	11,3 mm	5,7 mm
Espaciamiento entre puntos a 300 m	—	—	—	—
Número de puntos	8,7 Mpts	34 Mpts	138 Mpts	555 Mpts

Figura 2.7: Tabla de niveles de precisión de los que dispone el Trimble TX6

El láser escáner cuenta con una cámara HDR de 10 megapíxeles que realiza una foto de todo el campo de visión antes de realizar el escaneado. La opción de captura HDR realiza seis imágenes a seis niveles de exposición diferentes, por lo que ajusta cada imagen a la exposición que mejor se adapte.

Capítulo 3

Descripción de los objetos de estudio

Antes de comenzar a describir el proceso, es importante conocer los objetos que se van a medir. Estos son, como se ha mencionado anteriormente, tres vehículos de competición de la organización Formula Student UPV. Estos vehículos han conseguido alcanzar muy buenas posiciones en importantes competiciones a nivel mundial.

A continuación, se hará una breve explicación del objetivo de esta organización, su historia y sus logros conseguidos hasta la actualidad, centrándose en la trayectoria de los tres vehículos de carreras escogidos para su escaneo, modelado y posterior análisis.

3.1 Formula Student

La competición **Formula Student** (o Formula SAE) consiste en el desarrollo y la construcción de un vehículo de competición monoplace, mediante el cual se desarrollan prácticamente todos los aspectos de la ingeniería, desde los más técnicos, como la aplicación de todo lo aprendido en los estudios al diseño de un vehículo real, hasta cualidades transversales que conlleva el mundo ingenieril, tales como la gestión, el análisis de costes o el trabajo en equipo.

Los equipos, formados por estudiantes de diferentes especialidades de una universidad, tienen como objetivo fabricar un producto como si lo hicieran para una empresa real. Es por ello que la fabricación conlleva numerosas pruebas y ensayos en los que tienen que cumplir cierta normativa. Además, deben contar con un piloto que realizará pruebas adicionales en circuito que evalúen parámetros del vehículo como su aceleración o su consumo. Los resultados finales dependerán de la buena gestión del proyecto, de los resultados de las pruebas y del potencial e innovación tecnológica del vehículo.



Figura 3.1: Distribución de las competiciones de Formula Student/SAE

El proyecto comienza en 1981, cuando un profesor de la Universidad de Texas, Ron Matthews, contacta con la SAE (Society of Automotive Engineers) con el propósito de crear una competición que promoviera el desarrollo de la ingeniería entre los alumnos. Así surge la primera competición, en Austin, que cuenta con la presencia de 6 equipos y 40 participantes. 17 años más tarde, en Warwickshire, Reino Unido, se celebra la primera competición en Europa, donde se le da por primera vez el nombre de Formula Student. En esta competición participan 4 equipos y un total de 40 alumnos. Desde entonces, una gran cantidad de equipos y competiciones de todas las partes del mundo surgen siguiendo su ejemplo, tales como Formula Student Germany, FSAE Michigan o Formula Student Netherlands. Algunos de estos equipos se pueden ver en el mapa de la Figura 3.1.

En España, en 2010 se organiza por primera vez el evento de **Formula Student Spain**, el cual tiene lugar en el circuito de Montmeló, en Barcelona. Desde entonces hasta la actualidad se ha celebrado anualmente reuniendo a equipos de todas las partes de España, además de equipos extranjeros.

Es en 2014 cuando surge en la Universitat Politècnica de València el equipo **FSUPV**, formado por más de 20 alumnos y alumnas de diferentes grados. Actualmente está formado por 34 alumnos, y ha evolucionado cada año incluyendo mejoras que han aprendido gracias a la experiencia de los veteranos y las aportaciones de nuevos integrantes.

El equipo está subdividido en varias disciplinas, las cuales son Diseño, Comunicación y Marketing, Aerodinámica, Dinámica, Unidad de Potencia, Electrónica y Chasis. En sus 5 años de historia han desarrollado varios prototipos, los cuales han competido en diferentes competiciones internacionales, y 3 de los cuales son el objeto de estudio en este proyecto.

3.1.1 FSUPV-01

Pese a ser el primer vehículo diseñado por Formula Student UPV, el FSUPV-01 posee una combinación de características que hace que se le reconozca como el mejor coche de primer año, lo cual supone que se convierta en un modelo a seguir para los futuros prototipos. Este vehículo compite tanto en Formula Student Spain como en Formula Student Germany, quedando en el puesto 18° de 25 en España y 65° de 74 en Alemania.



Figura 3.2: Prototipo FSUPV-01

3.1.2 FSUPV-02

Un año más tarde, en 2015, el segundo prototipo de FSUPV incluye mejoras con respecto a su predecesor, y compite en las mismas competiciones. La ligereza de este vehículo, entre otras características, hace que alcance resultados notablemente mejores, 7° de 28 en España y 14° de 71 en Alemania, además de convertirse en el mejor equipo español de la edición, y el equipo ganador más joven en la historia, lo cual supone todo un logro, sobre todo tratándose del segundo prototipo diseñado y construido por el equipo.



Figura 3.3: Prototipo FSUPV-02

3.1.3 FSUPV-03

El tercer prototipo también participa en las competiciones alemana y española, alcanzando también notables resultados, 16° de 36 en España y 37° de 73 en Alemania.



Figura 3.4: Prototipo FSUPV-03

3.1.4 FSUPV-04 y FSUPV-05

A pesar de que estos dos últimos vehículos no son objeto de estudio en este proyecto, es relevante comentar brevemente su trayectoria, ya que han supuesto una notable mejora en los resultados y logros de Formula Student UPV.

Durante los años 2018 y 2019, los prototipos FSUPV-04 y FSUPV-05 han competido en más competiciones internacionales que los anteriores, como Formula Student Netherlands o Formula SAE Michigan. En estas últimas ediciones se han conseguido logros muy importantes para el equipo, como en el caso del FSUPV-04, que alcanza el tercer puesto entre 116 equipos en la competición de Michigan, donde también se logró el primer puesto en eficiencia y el tercer puesto en Skidpad; el segundo puesto entre 64 equipos en la prueba de aceleración de la competición alemana, quedando globalmente en el puesto 25, y 8° de 31 en Formula Student Spain. En la competición holandesa se convirtió en el ganador, obteniendo el primer puesto entre un total de 31 equipos.



Figura 3.5: Prototipo FSUPV-04

En cuanto al FSUPV-05, también consiguió posiciones importantes como por ejemplo obtener en el último año un décimo puesto en Alemania y un quinto puesto en España, ganando además el premio a mejor equipo español.



Figura 3.6: Prototipo FSUPV-05

Capítulo 4

Proceso de toma de datos y escaneo

Una vez explicado el contexto teórico del proyecto, comienza la descripción de la parte práctica del mismo. En este capítulo se describe el proceso principal de toma de datos para el proyecto. En concreto, la descripción del lugar de trabajo, el análisis previo a la medida y el procedimiento de escaneo, así como las conclusiones extraídas de cara al futuro tratamiento de datos.

4.1 Software e interfaz del Trimble TX6

Antes de explicar con detalle el procedimiento de medida, es interesante describir los comandos y funciones del software que lleva integrados el láser escáner incorporado, a pesar de que sea un software sencillo e intuitivo. Antes, cabe diferenciar entre los conceptos de proyecto, estacionamiento y escaneo. En este caso habrá un solo proyecto que englobe los tres coches, compuesto por varios estacionamientos. Un estacionamiento se trata de una posición del láser escáner, desde donde se pueden realizar varios escaneos, por ejemplo, variando la precisión.

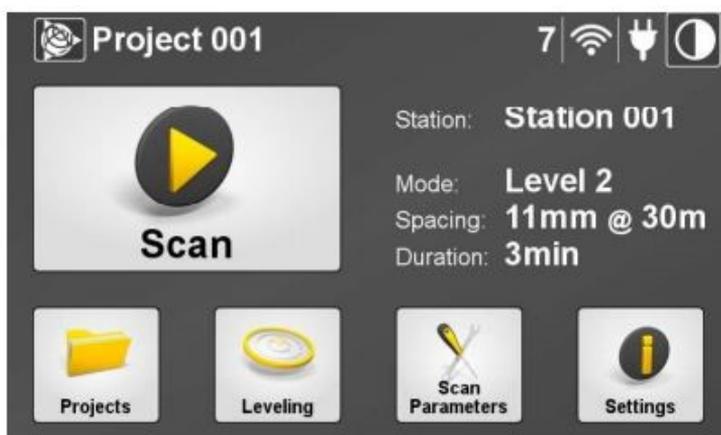


Figura 4.1: Menú principal del TX6

En la Figura 4.1 se puede observar la pantalla principal, dividida en diferentes espacios:

- En la parte superior, de izquierda a derecha se puede leer: el nombre del proyecto actual, el número de escaneos que pueden realizarse con ese dispositivo de almacenamiento, la señal Wifi (en caso de que esté activa la conexión WLAN), el nivel de batería restante y el icono de alto contraste.
- En la zona central se encuentra la opción de realizar el escaneo, además de información sobre los parámetros de escaneo actuales, los cuales son el número de estación, el nivel de precisión con su correspondiente valor y el tiempo aproximado de duración del escaneo, que varía según el nivel de precisión empleado.

- En la parte inferior se encuentran varios submenús:
 - La carpeta **Projects** permite ver, editar y crear los proyectos que se almacenan en el dispositivo USB. Cuando se realiza un escaneo, automáticamente se guarda un archivo de software Realworks y un archivo RWP en la carpeta que se haya seleccionado. Desde esta carpeta se puede cambiar los nombres de cada proyecto.
 - La carpeta **Leveling** es desde la que se puede comprobar que un escaneo está nivelado y, en caso de que no, nivelarlo.
 - En **Scan Parameters** se configuran los modos de escaneo, así como parámetros como la captura de imágenes. Se pueden cambiar las opciones de captura de imagen, en la opción **Color Acquisition**.

El primer estacionamiento es el que se puede ver en la Figura 4.1, y antes de realizar el escaneo se procede a nivelar el láser, ya que un nivelado incorrecto puede traducirse en posteriores errores en la unión. Para nivelarlo, simplemente se ajustan las patas del trípode hasta que el nivel situado en la parte inferior indica que se encuentra nivelado. En la opción Leveling se muestra en la pantalla cuándo está el láser nivelado.

Antes de iniciar la medida se selecciona la opción Projects y se crea un nuevo proyecto (**Create New Project**), al que se le da el nombre de **fsupv**. Una vez creado el proyecto, aparece en la carpeta junto con información como la fecha de creación y el número de escaneos que contiene. Después de cada escaneo, automáticamente se crea una carpeta llamada Station 001, donde se guardan los datos del primer escaneo. Además de esta carpeta, se crea un archivo de tipo TZF y se guarda en la carpeta del Software Realworks. Si no existe esta carpeta, se crea automáticamente.

En cuanto a las opciones de escaneo, como se ha comentado en apartados anteriores, el nivel escogido para los escaneos es Nivel 1, con un espaciado de 22 mm a 30 metros, valores suficientes, ya que los objetos a medir se encuentran a una distancia mucho menor. Por lo tanto, se selecciona este nivel en la carpeta **Scan Parameters**.

4.2 Espacio de trabajo y primer análisis

Antes de realizar la medida, se realiza un estudio sobre dónde colocar los objetos de estudio, así como cuántos escaneos realizar y en qué posiciones colocar el láser. El principal objetivo es obtener la mayor cantidad de información sobre los cuerpos a medir, a la vez que usar el mínimo número de escaneos, ya que si este se tratara de un proyecto real el tiempo de medida tendría su coste asociado tanto a la máquina como al técnico encargado de su uso, y habría que optimizarlo.

También tiene mucha importancia a la hora de realizar la medida la posición de los coches, como se ha dicho anteriormente. El láser escáner captura información de 360°, por lo que hay que tener cuidado si hay objetos que puedan cambiar de posición durante el escaneo. De este problema se hablará posteriormente, ya que cobra importancia a la hora de realizar las diferentes uniones entre escaneos, obteniéndose más error cuando hay objetos en posiciones diferentes entre dos escaneos, como, por ejemplo, la rama de un árbol movida por el viento.



Figura 4.2: Objetos de estudio almacenados en el Laboratorio Pedro Duque (UPV)

En nuestro caso el objetivo es situar los vehículos en la explanada exterior del Laboratorio Pedro Duque, ya que estos se encuentran dentro del laboratorio almacenados, tal como se ve en la Figura 4.2. El lugar escogido es este debido

a que se trata de un gran espacio abierto donde apenas hay vegetación, lo cual permite colocar los coches con cierta separación suficiente para poder escanearlos los tres a la vez, a la vez que no existen posibles obstáculos que puedan dificultar la posterior medida.

En cuanto a la cantidad de estacionamientos, se quiere obtener información desde todos los ángulos para poder crear un modelo lo más similar a la realidad, pero tras la primera toma de contacto con los vehículos surge un primer problema: las dificultades para obtener información de la parte inferior del coche. Esto se convierte en el primer obstáculo del proyecto, para la solución del cual se plantean algunas ideas. La más coherente consiste en la colocación de los tres coches en alguna clase de plataforma elevada, para lo que se piensa en situar las ruedas sobre dos mesas y así poder realizar también escaneos de la parte inferior. A pesar de ser una buena solución, finalmente es descartada por la probabilidad de que los vehículos sufran daños estructurales durante el montaje. Por lo tanto, finalmente se llega a la conclusión de que se realizará una simplificación en el posterior modelado de datos, la cual consistirá en considerar las partes que no pueden ser medidas (debido a que están en contacto con el suelo), como superficies planas.

Una vez tratado el problema de la superficie inferior, se estudia el número de estacionamientos que se desea realizar para obtener toda la información de la parte exterior de los vehículos. La idea consiste en colocar los tres coches de forma paralela formando una fila, y se quiere realizar un escaneo de la parte delantera, trasera y los dos laterales de cada uno de ellos, con lo que se tendrían ya 12 escaneos, además de uno en cada esquina, lo cual sumaría un total de 16 escaneos. Debido a que los coches están situados a distancias cercanas entre ellos y en un escaneo por ejemplo del coche FSUPV-01 se obtendrá información también del FSUPV-02 y FSUPV-03, se decide simplificar usando escaneos que cubran la esquina izquierda de un coche al mismo tiempo que la esquina derecha del coche contiguo. Con esto se consigue una reducción de 2 estacionamientos, con lo que la medida consta de 14 estacionamientos finalmente, una cifra aceptable, sobre todo tratándose de la medida de tres objetos simultáneamente.

Finalmente, de la primera observación se extraen las conclusiones comentadas en los párrafos anteriores, para así poder realizar el escaneo de forma más ágil y rápida. Similarmente ocurre en un caso real, donde el día del escaneo deben estar todos los estacionamientos perfectamente numerados y con su posición especificada para agilizar el proceso. En la Figura 4.3 se puede ver un primer boceto de la futura colocación de los láseres.

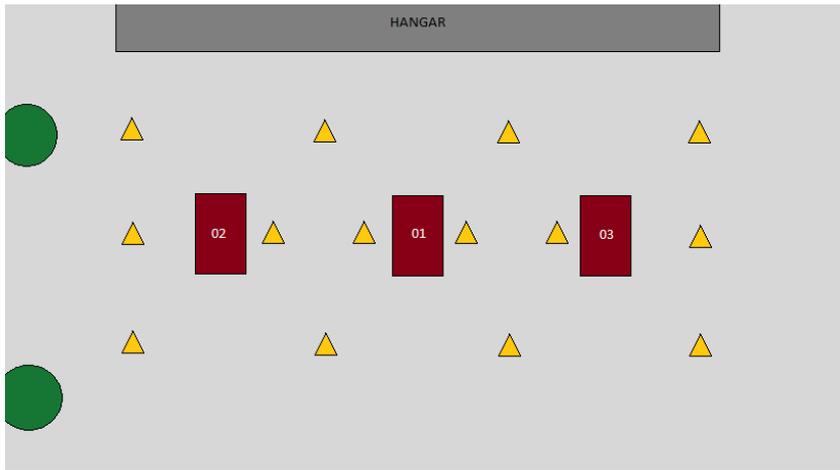


Figura 4.3: Primer boceto de la distribución de los escaneos

4.3 Procedimiento de medida

Una vez realizado el análisis previo, tiene lugar la medida en sí. Los materiales utilizados para la medida son, como se ha explicado, el láser escáner Trimble TX6, que cuenta con un trípode para poder realizar escaneos a cierta altura del suelo, y así medir tanto partes laterales de los objetos como partes superiores. Además, el equipo de medida incluye dos dianas. Las dianas son superficies con formas geométricas que facilitan la posterior unión entre escaneos, ya que se pueden usar como puntos comunes. En este caso, como se ha explicado anteriormente, el espacio de medida no tiene elementos que puedan dificultar la unión de puntos, por lo que no se utilizan las dianas.

Para la medida se colocan los tres coches como se había establecido, y se procede a iniciar los escaneos. Los datos se guardan directamente en un dispositivo USB de alta capacidad (1 TB), desde el cual se pasarán al ordenador para el procesado posterior. Es importante asegurarse de que el Láser esté apagado para conectar la unidad USB.

El orden que se sigue es el indicado anteriormente y, una vez realizados todos los escaneos, se puede obtener un plano con las medidas reales de cada estacionamiento, que es similar al planteado aunque con algunas diferencias. Se puede ver en la Figura 4.5, donde las circunferencias son estacionamientos y los rectángulos son los vehículos, y las distancias están dadas en metros.



Figura 4.4: Configuración del primer escaneo

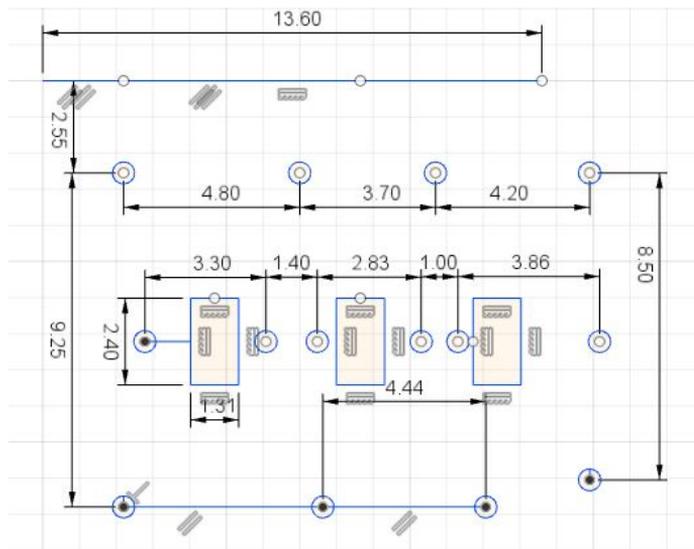


Figura 4.5: Esquema de los estacionamientos con distancias reales

Capítulo 5

Tratamiento de la nube de puntos

El objetivo de este capítulo es la descripción del procesado de la nube de puntos, desde su importación desde el láser escáner hasta la limpieza, pasando por el proceso de unión de escaneos.

5.1 Procesado inicial con Trimble Realworks

Una vez realizado el escaneo, el siguiente paso consiste en importar los datos a un equipo para su procesado. En este caso, el procesado de la nube de puntos se va a realizar mediante el software Leica Cyclone, pero al haberse realizado la medición con un láser de la casa Trimble, es necesario en primer lugar la importación de los datos al software Trimble Realworks.

Se abre el programa y se selecciona la opción import. Se busca la ubicación del archivo y se seleccionan todos los archivos de tipo .tzc de los escaneos, teniendo un total de 14 archivos. Este tipo de formato es el que usa la marca Trimble, y el software de Leica no lo lee, por lo que es necesario convertirlos a un tipo de archivo admitido por el software de Cyclone. Este formato es **.ptx**.

Antes de realizar la conversión es necesario hacer una copia de seguridad, ya que, si se produce un fallo durante el proceso, los datos se borrarían y perderían, por lo que hay que tener cuidado. Además, se realiza la copia para poder visualizar los escaneos en el Trimble Realworks, ya que al convertirlos a formato ptx se borra el archivo que va adjunto .tzc y no se puede volver a trabajar en Realworks.

Aunque, como se ha dicho, no se va a trabajar en Realworks, debido a que la experiencia en este software es inferior a la de Cyclone, sí que se puede usar el programa para una primera visualización de los escaneos. La previsualización en Realworks permite comprobar que los escaneos se han realizado correctamente a simple vista. En las Figuras 5.1, 5.2 o 5.5 se pueden ver las vistas previas de algunos de los escaneos.



Figura 5.1: Visualización en Trimble Realworks del estacionamiento número 7 en blanco y negro



Figura 5.2: Visualización en Trimble Realworks del estacionamiento número 7 en color

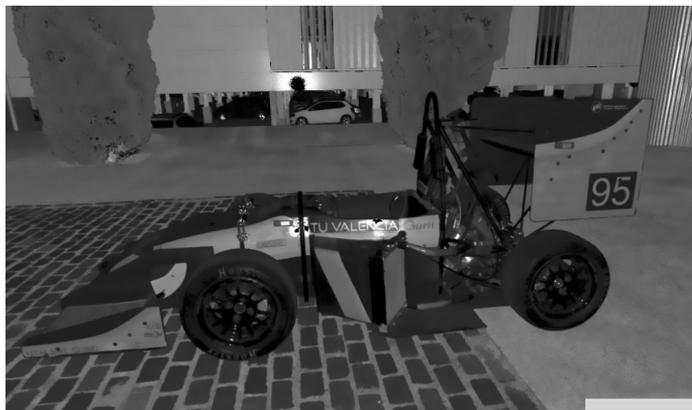


Figura 5.3: Visualización en Trimble Realworks del lateral del FSUPV-02 en blanco y negro

Como se ha dicho, tanto la unión de escaneos como la posterior limpieza se realizarán con Leica Cyclone, por lo que, una vez previsualizados los escaneos y convertidos los archivos, el trabajo con Realworks ha acabado.

5.2 Tratamiento de nube de puntos con Leica Cyclone

El software Leica Cyclone es una herramienta que permite la visualización y tratamiento de nubes de puntos medidas con sistemas láser escáner. Ofrece una amplia variedad de opciones que hacen que sea el más indicado para el trabajo que se desea realizar.



Figura 5.4: Visualización en Trimble Realworks del lateral del FSUPV-02 en color



Figura 5.5: Visualización en Trimble Realworks del lateral del FSUPV-03 en blanco y negro



Figura 5.6: Visualización en Trimble Realworks del lateral del FSUPV-03 en color

Para comenzar con el post-procesado, se crea un nuevo proyecto: en la carpeta Servers, con click derecho se selecciona la opción Databases. . . , se crea una nueva base de datos y se le da el nombre de Fsupv. Entonces se crea un proyecto que será el lugar de trabajo. Es en este proyecto donde importamos la carpeta donde están todos los archivos de los escaneos. Se suben los 14 escaneos y aparecen numerados en esta carpeta, como se puede ver en la Figura 5.7.

El siguiente paso consiste en crear un ScanWorld, es decir, un espacio donde realizar las diferentes uniones y su posterior registro. Para ello se crea y automáticamente también se crea un archivo de tipo unión, desde donde se pueden editar y crear las uniones. Una vez dentro de este archivo, se abre una ventana con tres pestañas: ScanWorld's Constraints, Constraint List y ModelSpaces.

En primer lugar, se realiza la unión de los 5 primeros escaneos, por lo que habrá que realizar las siguientes uniones:

1-2, 2-3, 3-4, 4-5

Después de realizar estas uniones, se hará un registro general para que se creen automáticamente las uniones de todas las combinaciones restantes, y así con el resto de escaneos.

Para las uniones se añaden los 5 escaneos con la opción Add Scanworld, y entonces aparecen los 5 archivos que se quieren unir. En la pestaña ModelSpaces se pueden seleccionar 2 escaneos, en el primer caso el 1 y el 2, y se pueden visualizar en las dos ventanas de la parte inferior. La unión de puntos se rea-

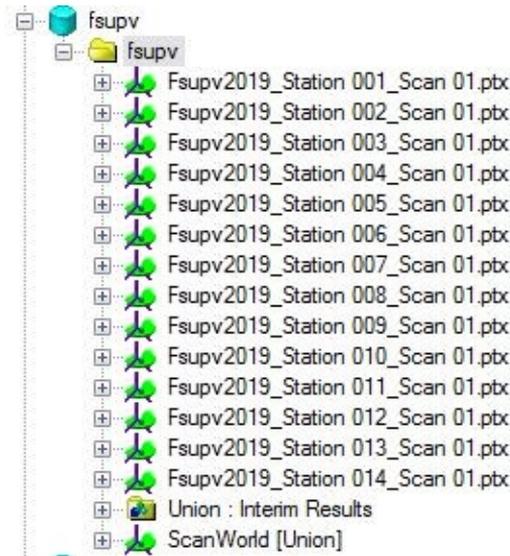


Figura 5.7: Carpeta con la nube de puntos de cada escaneo

liza de manera manual, para minimizar el error, por lo que el procedimiento consiste en seleccionar puntos comunes a los dos escaneos.

Los puntos que se seleccionen deben ser puntos fáciles de identificar, como por ejemplo esquinas o vértices. Es importante que todos los puntos que se seleccionen no estén contenidos en un mismo plano, ya que se puede dar el error de que el programa realice la unión invirtiendo uno de los escaneos.

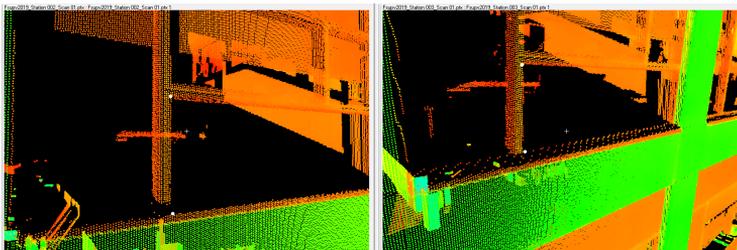


Figura 5.8: Detalle de la unión de puntos de los escaneos 1 y 2 usando como puntos comunes la ventana de la fachada

En un primer momento, se emplean puntos situados en los edificios de al lado de los coches, para comprobar si el resultado es bueno. La primera unión se

intenta realizar uniendo puntos de la ventana de la ETSID (situados en planos diferentes), como se puede ver en la Figura 5.8, y se obtienen unos resultados buenos pero mejorables. Debido a que el error no es el mínimo posible, se intenta con los vértices del alerón trasero de uno de los coches. El resultado es mucho mejor, por lo que a partir de entonces para la mayoría de las uniones se escogen puntos de los mismos coches, ya que tienen la geometría muy bien definida, y pueden ser fáciles de identificar. Es por esto que no se ha necesitado el uso de dianas, como se ha comentado en los capítulos anteriores.

Cuando se tienen los mismos puntos seleccionados en los dos escaneos, se selecciona la opción **Add Cloud Constraint**, que usa los puntos seleccionados para detectar más puntos comunes y realizar la unión de todos los que encuentre, creando una unión más fiable. Cuando se crea la unión, en la pestaña Constraint List aparece automáticamente, y si se selecciona la opción **Optimize Cloud Aligment** se realiza el ajuste para la unión de la pareja, el cual es un proceso iterativo que se muestra en pantalla junto al error medio cuadrático.

El error medio cuadrático que se debe obtener no debería ser mayor de 10mm, ya que sobrepasarlo puede llevar a errores visibles e importantes. Con la unión realizada usando puntos de la fachada del edificio, el error obtenido es de 12mm, con lo cual se realiza otra unión usando puntos de los coches y se obtiene un error de 4mm, el mínimo error con el que mide el láser usado. El resultado, por lo tanto, es muy bueno, y se sigue usando el mismo procedimiento con las demás parejas.

En la Figura 5.9 se puede ver gráficamente los resultados del escaneo de la estación 2 y la estación 3, y las zonas de sombra donde se ve claramente que no se ha medido ningún punto.

Este proceso se repite hasta tener cuatro uniones de los cinco primeros escaneos, comprobando que el error en cada unión sea inferior a 10mm. En la Figura se pueden ver los resultados de estas primeras uniones, observándose que el error casi siempre se mantiene en el valor mínimo, exceptuando en la unión 4-5, que aun así tiene unos resultados muy buenos.

En el panel también se puede ver el número de puntos comunes de cada unión, valores también muy aceptables, ya que el valor mínimo aceptable es de unos 10.000 puntos, y se ve que en todos los escaneos el número de puntos comunes captados es superior a 2 millones.

Una vez realizadas todas las uniones por parejas, se realiza la unión de los 5 escaneos mediante la opción **Registration**, seleccionando **Register**, y se

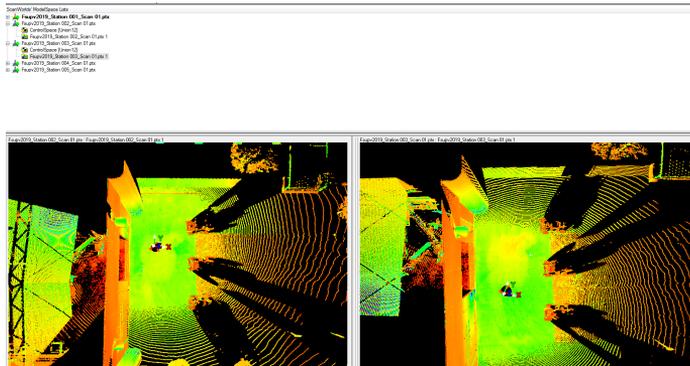


Figura 5.9: Vista en planta de la unión de los escaneos 2 y 3

Constraint	Scanworld	Scanworld	Function Value (sq m)	RMS (m)	Avg (m)	Min (m)	Max (m)	Point Count	Status
Cloud/Mesh 4	Fsupv2019_Station 004_Scan 01.ptx	Fsupv2019_Station 005_Scan 01.ptx	0.00000631	0.006	0.003	0.000	0.094	2074000	Aligned
Cloud/Mesh 3	Fsupv2019_Station 003_Scan 01.ptx	Fsupv2019_Station 004_Scan 01.ptx	0.00000460	0.004	0.002	0.000	0.096	2533133	Aligned
Cloud/Mesh 2	Fsupv2019_Station 002_Scan 01.ptx	Fsupv2019_Station 003_Scan 01.ptx	0.00000447	0.004	0.002	0.000	0.092	2533900	Aligned
Cloud/Mesh 1	Fsupv2019_Station 001_Scan 01.ptx	Fsupv2019_Station 002_Scan 01.ptx	0.00000495	0.004	0.002	0.000	0.095	2345900	Aligned

Figura 5.10: Datos sobre las 4 primeras uniones

crea la unión de los escaneos del 1 al 5. El resultado de esta unión se puede ver en la Figura 5.11, donde se diferencian claramente los cinco estacionamientos.

A continuación, se sigue el mismo procedimiento con los estacionamientos del 5 al 9. En este punto surge un error al unir el escaneo 6 con el 7, ya que no se alinea bien y se obtiene un error de más de 7 metros. Cuando se intentan unir con los escaneos ya unidos anteriormente, todos los anteriores se desalinean y el resultado es incorrecto (Figura 5.12)

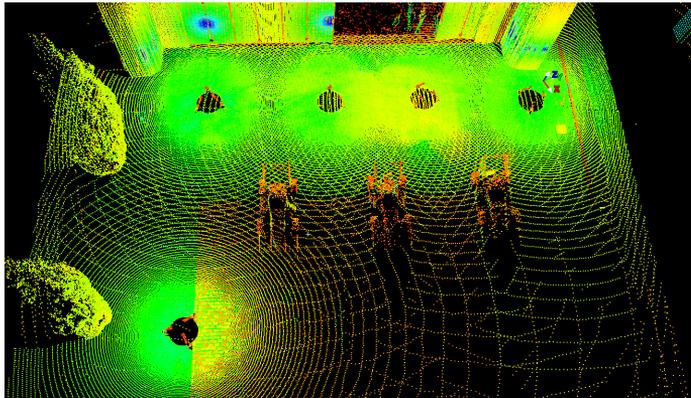


Figura 5.11: Vista en planta de la unión de los 5 primeros escaneos

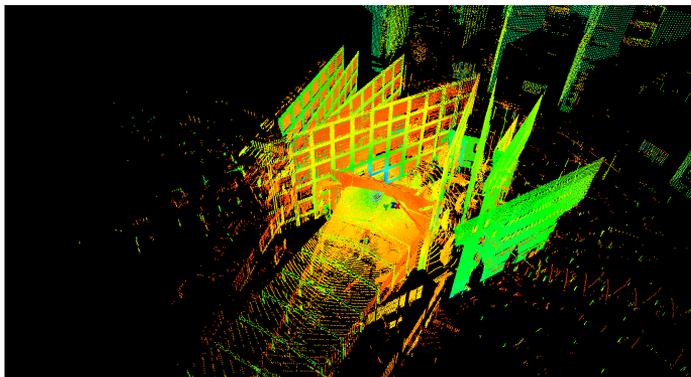


Figura 5.12: Error debido al mal alineamiento de los escaneos

En la Figura 5.13 se puede ver el error obtenido al intentar realizar la unión 6-7, se aprecia que hay un error de 7.903m. Ese error se refiere a la distancia al origen de ese escaneo, con lo cual es normal que sea tan grande. Por lo tanto, la solución consiste en realizar un registro de todo, mediante el cual se alinean y el error se hace 0. Los resultados de la Figura 5.12 aparecen de esa manera porque se está usando la opción View Interim Results antes de realizar el registro de todo, lo que hace que todavía no estén alineados los escaneos.

Siguiendo con el proceso, se continúa con la unión de los escaneos del 5 al 9, ahora ya sin el error anterior, siguiendo el mismo procedimiento que para

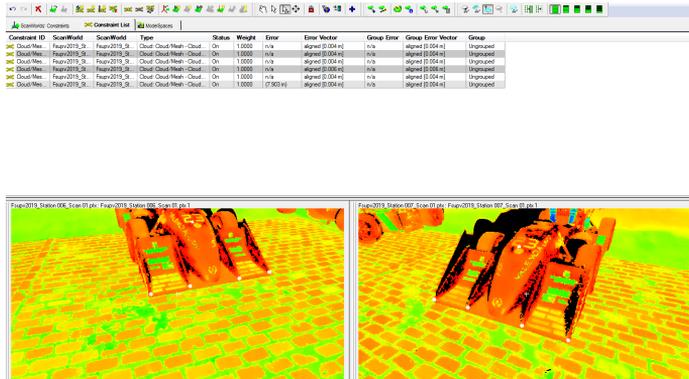


Figura 5.13: Datos de las primeras 4 uniones con error

los anteriores. Como se ha comentado, para todas estas uniones se usan como puntos comunes partes de los coches (Figura 5.14)

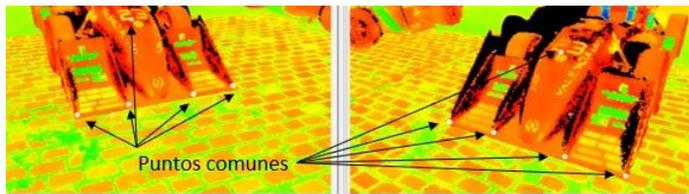


Figura 5.14: Uso del alerón delantero para la selección de los puntos comunes

En las siguientes figuras se pueden ver algunas capturas de la realización de las siguientes uniones, así como de la unión general de los escaneos 5-9.

Una vez realizada la unión por grupos de los 14 escaneos, se procede a hacer el registro de todos, lo cual consiste en generar una nube de puntos con todas las uniones juntas, incluyendo uniones entre todas las combinaciones posibles entre estacionamientos, lo cual vienen a ser un total de 91 uniones.

Para previsualizar de manera temporal la unión final de todo, se selecciona la opción **Create ScanWorld/Freeze Registration** y muestra los resultados. Para crear finalmente el modelo con todo unido, se selecciona **Create ModelSpace View** y se crea un nuevo archivo en la carpeta ModelSpace, que contiene la unión de todos los escaneos. Este archivo se guarda con el nombre de ModelSpace Bruto.

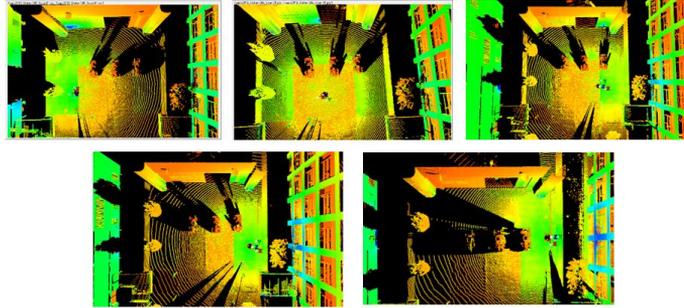


Figura 5.15: Vista en planta de los escaneos del 1 al 5 por separado

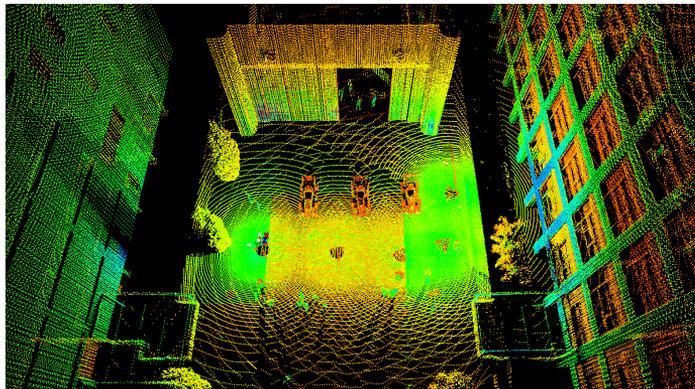


Figura 5.16: Vista de la unión de los escaneos del 1 al 5

Para evitar la pérdida de datos durante la limpieza, se crea una copia del modelo en bruto para trabajar sobre ella y poder reutilizar los datos en bruto cuando se quiera.



Figura 5.17: Vista de la unión de los escaneos del 1 al 5 con los datos tomados por la cámara

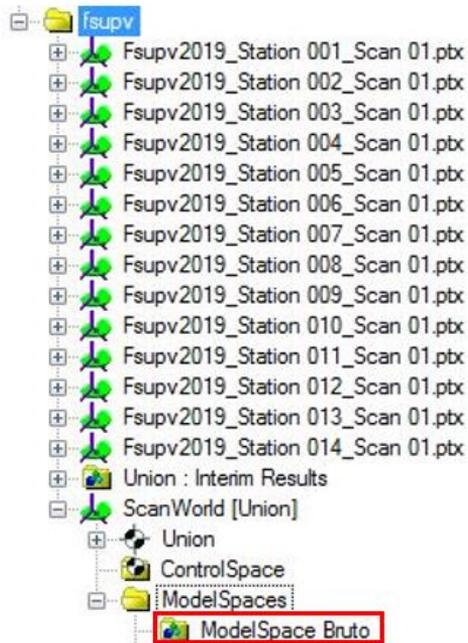


Figura 5.19: Ubicación del archivo ModelSpace Bruto

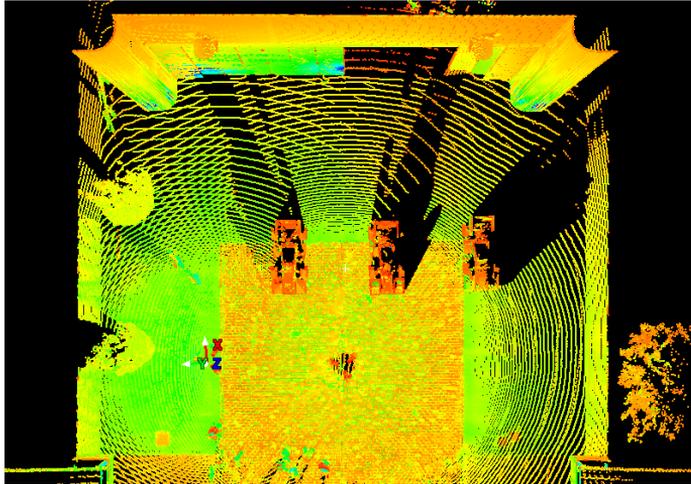


Figura 5.18: Detalle de la unión de los escaneos 5 y 6

5.3 Limpieza de puntos

La limpieza de puntos consiste en eliminar del modelo todos los datos que no sean relevantes para el estudio. En este caso habrá que dividir el modelo en tres modelos diferentes, siendo cada uno un vehículo. Se parte del modelo en bruto obtenido anteriormente, el cual se puede ver en la Figura 5.20. En la Figura 5.21 se ve una vista más alejada del modelo en bruto, donde se aprecia el gran alcance al que puede llegar el instrumento, captando hasta parte de la pista de atletismo del otro lado de la carretera.

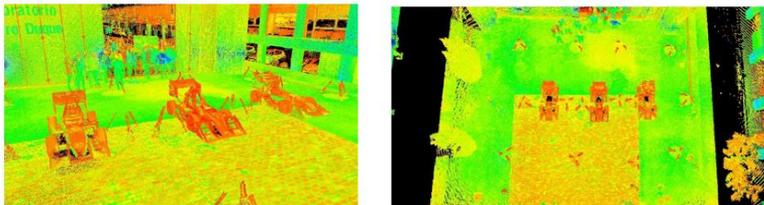


Figura 5.20: Vistas del conjunto de todas las uniones en bruto

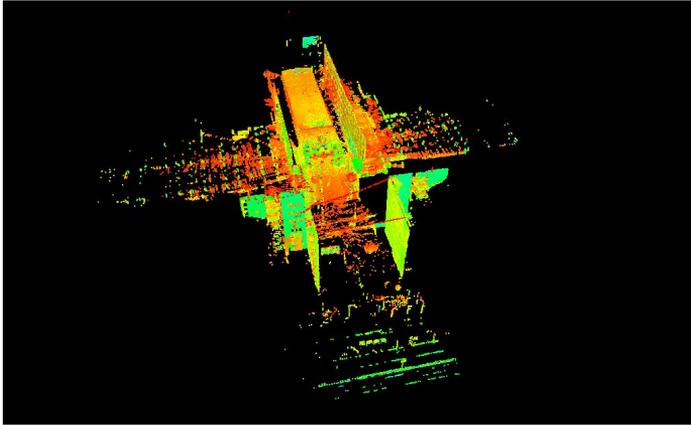


Figura 5.21: Vista desde lejos del conjunto de uniones en bruto

En la Figura 5.22 se pueden visualizar los estacionamientos con su correspondiente número de estación, además, también se pueden ver los resultados combinados con la fotografía tomada por la imagen de cada escaneo.



Figura 5.22: Vista con fotografía y con posiciones y números de estacionamiento

Partiendo del modelo en bruto, el primer paso es eliminar todos los elementos muy alejados de los coches, y crear un nuevo modelo donde estén solamente los tres vehículos. En este modelo todavía no están separados, y evidentemente hay puntos no deseados en los mismos coches, pero se elimina ya una gran cantidad de información al quedarse el modelo en un área mucho más reducida. Esto hace también que el tratamiento funcione con mucha más rapidez, al haber eliminado un amplio porcentaje de información no útil.

Para recortar un área concreta, en la copia del ModelSpace Bruto dibujamos un rectángulo encerrando el área que queremos conservar y usamos la opción **Delete Outside**, que elimina todos los puntos que se encuentren en su exterior. En la Figura 5.23 se puede ver la primera limpieza, con los tres coches ya aislados de su entorno. Se pueden apreciar los perfiles trípode del láser escáner, información también inútil que se eliminará posteriormente.

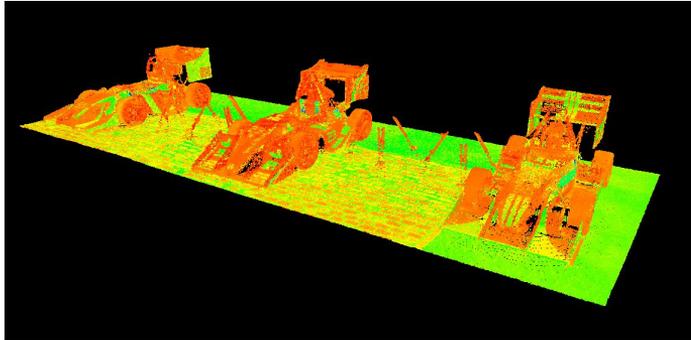


Figura 5.23: Vista tras la primera limpieza con los tres coches aislados

En este momento, el espacio de trabajo se divide en tres áreas, una por cada coche, y a partir de ahora la limpieza se realiza por separado en cada una de ellas.



Figura 5.24: Vista de los tres coches separados para su tratamiento individual

Se va a explicar con más detalle el procedimiento de limpieza de puntos para el primer vehículo, ya que para los otros dos el proceso a seguir es análogo. Como se ha dicho, se crea otra copia del ModelSpace que incluya solamente este coche, llamada **Limpieza ModelSpace Coche 1**, y se empieza a limpiar con detalle el mismo.

El primer elemento que se desea eliminar es el suelo, ya que la intención es dejar el coche con la máxima información que se pueda, incluso por debajo. En este punto comienzan a surgir los primeros problemas, siendo este un problema del que ya se ha hablado anteriormente y que se sabía que iba a ocurrir: al estar los vehículos estacionados en el suelo, va a ser complicado, prácticamente imposible, obtener información de la parte inferior del vehículo. En la Figura 5.25 se puede ver el aspecto de la zona inferior del vehículo. La solución es eliminar las partes visibles de suelo y ver cómo se han escaneado las partes inferiores del coche.

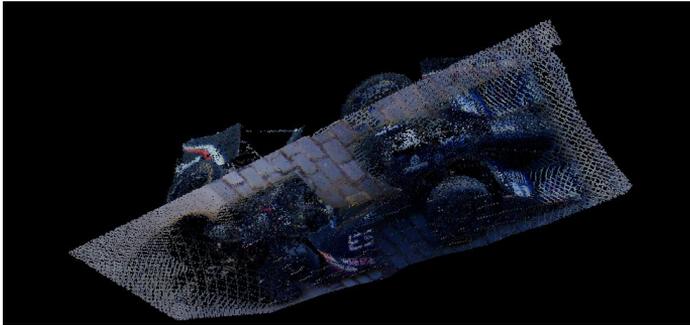


Figura 5.25: Vista de la superficie inferior del vehículo

Después de eliminar el suelo se hace un barrido para ver las zonas del vehículo con puntos anómalos. Aquí surge otro problema que marcará el rumbo del proyecto: los vehículos objeto de estudio tienen partes con geometrías muy complejas, a diferencia de otros vehículos como pueden ser un avión o un helicóptero, o edificios, que tienen las superficies muy diferenciadas. Los coches, en cambio, tienen zonas donde, por muchos escaneos que se realicen, la geometría es tan compleja que no se puede obtener un buen modelo. Un claro ejemplo de esto es la parte trasera del vehículo, donde se ubica el motor. El motor del coche se encuentra al descubierto, y está compuesto por una gran cantidad de elementos de muy pequeño tamaño, además de un conjunto de cables enrevesados que complican aún más la modelización.

En un primer momento, el motor es el principal foco de imperfecciones, pero posteriormente se ve que otras zonas como las uniones entre las ruedas y la carrocería, o la unión entre el alerón trasero y el asiento también pueden ser complejas a la hora de hacer el modelo sólido.

Una vez estudiada la nube de puntos, se empiezan a eliminar zonas con puntos ajenos al coche, o puntos muy alejados que puedan dificultar la posterior creación de la malla. El procedimiento es siempre el mismo, seleccionar manualmente áreas y eliminar los puntos de su interior (Figuras 5.26 y 5.27).

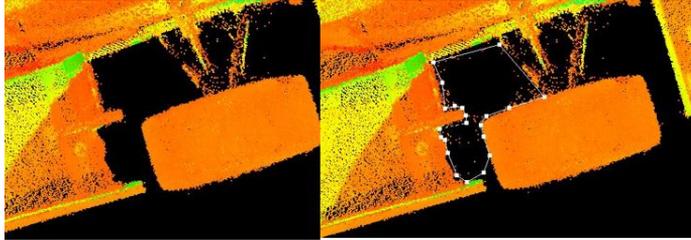


Figura 5.26: Detalle de la limpieza de puntos exteriores en la zona entre la carrocería y la rueda

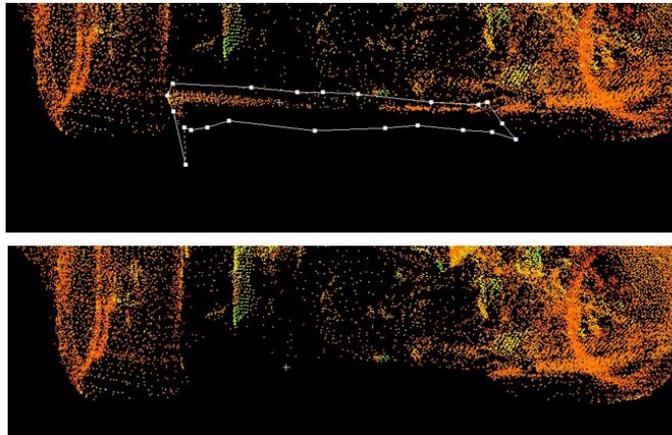


Figura 5.27: Detalle de la limpieza de puntos de la parte inferior del vehículo

Con este procedimiento se consigue eliminar gran parte de los puntos alejados de la superficie del coche. Para asegurarse de que se elimina el mayor número posible de puntos, es necesario comprobar rotando el cuerpo para verlo desde todos los ángulos posibles, ya que desde una sola vista se pueden quedar puntos sin ver. Los resultados de la limpieza del FSUPV-01 y el FSUPV-03 se pueden ver en las Figuras 5.28 y 5.29.

Una vez se han eliminado todos los puntos anómalos posibles, el siguiente paso es cambiar el origen del sistema de coordenadas, ya que anteriormente



Figura 5.28: Nube de puntos del FSUPV-01 después de la limpieza

estaba situado en el lugar donde se realizó el primer escaneo. Se crea una línea en la arista delantera del alerón y se sitúa el nuevo origen en el punto medio de esa línea, como se aprecia en la Figura 5.30. Después, se determina la dirección de la línea creada como eje Y del sistema de coordenadas.

Finalmente, mediante la opción **Unify** se crea un modelo definitivo para el Coche 1. Es importante recordar que este modelo continúa siendo una nube de puntos, ya que estos puntos no están unidos entre ellos y no forman un sólido como tal. Este proceso se repite de igual manera con los otros dos vehículos. Una vez realizado con los tres coches, el proceso de limpieza de la nube de puntos se da por finalizado, y el siguiente paso es obtener un modelo sólido de los tres objetos.



Figura 5.29: Nube de puntos del FSUPV-03 después de la limpieza

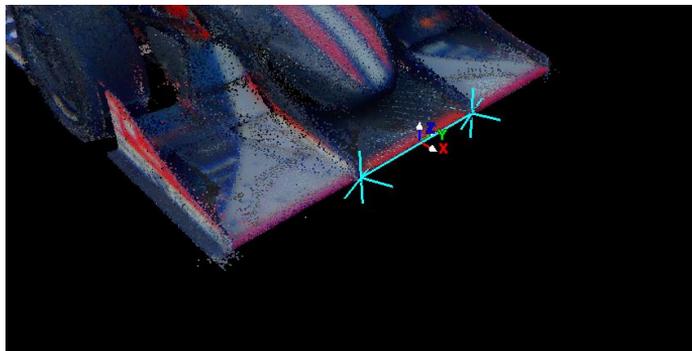


Figura 5.30: Cambio de origen del sistema de coordenadas

Capítulo 6

Modelado 3D

En este capítulo se explica la transformación de la nube de puntos en una superficie, es decir, en una malla. A partir de la correcta obtención de esta malla se podrá tratar el objeto como un cuerpo sólido, para poder compararlo con el modelo real.

6.1 Creación y edición de la malla en software 3DReshaper

En primer lugar, es interesante explicar el software que se va a utilizar para la conversión de la nube de puntos a malla. El 3DReshaper es un programa con el que se pueden tanto editar nubes de puntos como transformarlas a mallas, además de que permite la edición de estas mallas.

Anteriormente se han exportado las tres nubes de puntos ya limpias a formato **pts**, por lo que se importan de una en una al 3DReshaper mediante la opción **Import Cloud**. En ese momento aparece en pantalla la nube de puntos limpia, como se puede apreciar en la Figura 6.1.



Figura 6.1: Vista de la nube de puntos del coche 02 en 3DReshaper

Se puede ver que, una vez importados los puntos a este Software, se sigue viendo una gran cantidad de puntos anómalos. Esto es debido a que la resolución del programa es mejor y, al haber geometrías tan complejas, es muy complicado la total eliminación de estos puntos. En un primer momento se decide realizar la malla para ver qué modelo se obtiene.

Seleccionando todos los puntos, se usa la opción **3D Mesh**, y aparece un panel con los parámetros del mallado a escoger (Figura 6.2). Lo primero que indica es el número de puntos de la nube, en el caso del coche 02 un total de 3886658 puntos. En la parte inferior se pueden escoger dos opciones para reducir el ruido: malla en dos pasos o muestreo normal. Finalmente, en el

último panel se escoge la forma de tratamiento de los orificios, que puede ser detectándolos, manteniendo el borde externo o creando una malla estanca.

The image shows three panels of settings for creating a mesh:

- Propiedad de nube de puntos:** N.º de puntos: 3886658
- Reducción de ruido:** Mallas en dos pasos, Muestreo normal. Distancia promedio entre puntos: 0.0146075
- Gestión de orificios:** Detección de orificios. Tamaño del triángulo: 0.0438224. Intentar mantener solo el borde externo. Intentar crear una malla estanca

Figura 6.2: Parámetros de creación de la primera malla del coche 02

En este caso realizamos muestreo normal, con la separación que viene predefinida, y para los orificios seleccionamos detección, con un tamaño de triángulos que viene también predefinido, es decir, es el valor medio para la malla que se ha importado.

Una vez realizado el mallado se obtienen los resultados de la Figura 6.3. A simple vista ya se aprecia que la malla obtenida es de muy baja calidad, tanto por las irregularidades en las superficies como en la presencia de anomalías notables, como orificios o caras invertidas. Estas últimas se pueden ver claramente en color azul, e indican que se ha considerado que la superficie consta de una sola cara y por lo tanto está orientada hacia el otro lado. Esto ocurre en tres de las cuatro ruedas, además de en buena parte del alerón delantero y el extremo del alerón trasero.

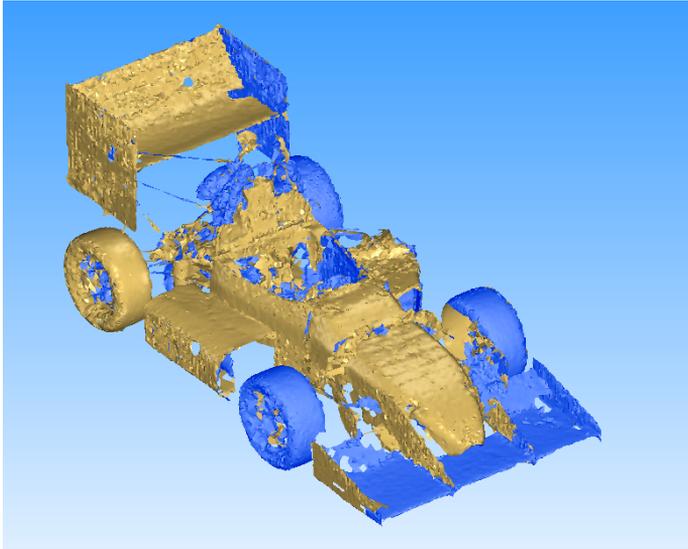


Figura 6.3: Resultados de la primera malla del coche 02

Una primera solución consiste en realizar otros mallados cambiando tanto el método de mallado como los otros parámetros. No obstante, las mallas obtenidas son de igual o peor calidad que la inicial. Es por ello que se decide intentar trabajar con esta malla inicial, usando herramientas para solucionar sus imperfecciones. El primer paso consiste en realizar un **Suavizado** de la malla. Es importante tener en cuenta que un suavizado muy fuerte puede alterar la geometría del objeto, por lo que se selecciona la opción **Conservar Geometría**. Una vez realizado el suavizado, se procede a eliminar la parte del vehículo que tiene más imperfecciones: el motor.

La decisión de eliminar el motor viene dada por varios factores. El factor principal es la imposibilidad de poder llegar a obtener una malla bien definida de esta zona del vehículo, ya que el láser, que tiene un error de 4 mm, como se ha comentado, no consigue diferenciar entre elementos que están a distancias más pequeñas que ese error, creando uniones inexistentes entre puntos y obteniéndose una malla totalmente inválida.

Otro motivo por que se decide eliminar el motor es que, si finalmente se realiza un análisis aerodinámico del modelo, la presencia del motor detrás del asiento del piloto tiene poca relevancia con respecto a la corriente de aire

incidente, ya que el flujo interfiere con la carrocería del coche antes que con el motor.

Después de realizar el suavizado y eliminar toda la zona del motor se obtiene la malla de la Figura 6.4

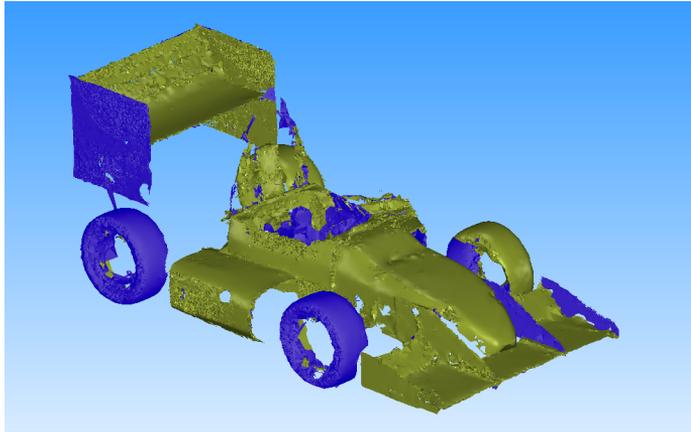


Figura 6.4: Malla del coche 02 sin motor y suavizada

Esta malla tiene un número considerablemente menor de irregularidades, sobre todo en la parte superior de la carrocería, aunque todavía se pueden ver irregularidades en algunas zonas como el alerón trasero o los laterales del vehículo. Este mallado todavía no es correcto para la obtención de un modelo, por lo que es necesario continuar con su edición en otro software más adecuado, Meshmixer.

6.2 Edición de la malla con el software Meshmixer

Meshmixer es un software de Autodesk que permite la edición avanzada de mallas, orientada para aplicaciones como principalmente la impresión 3D. Este programa permite crear superficies a partir de una malla, reparar imperfecciones u orificios y preparar la malla para su conversión a un objeto sólido, entre otras funciones. El uso que se le quiere dar es, como se ha comentado, solucionar las anomalías de las mallas y crear un modelo sólido decente para su posible impresión 3D.

Con tal de agilizar el proyecto, el procedimiento de edición de malla se realiza únicamente con el coche FSUPV-02. Una vez se haya realizado se comprobará si la malla es válida para crear un modelo apto para impresión, y en caso afirmativo se repetirá el proceso con los otros 2 coches.

En primer lugar, se importan los archivos de tipo obj al software, donde ya se puede ver las mallas creadas anteriormente. A modo de visualización, se importa también una versión inicial de la malla con el motor para que se aprecien los resultados del mallado (Figura 6.5). Como se ve, el correcto modelado con estos resultados es totalmente inviable.

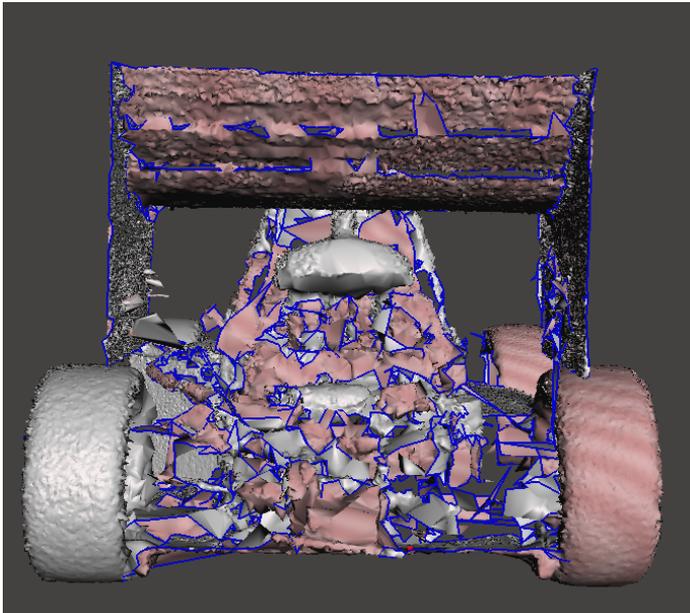


Figura 6.5: Aspecto de la malla del motor

Trabajando ya con el modelo suavizado y sin motor, el primer paso es el tratamiento de los orificios, que se quieren rellenar para tener superficies continuas, como se puede ver en las Figuras 6.6 y 6.7.

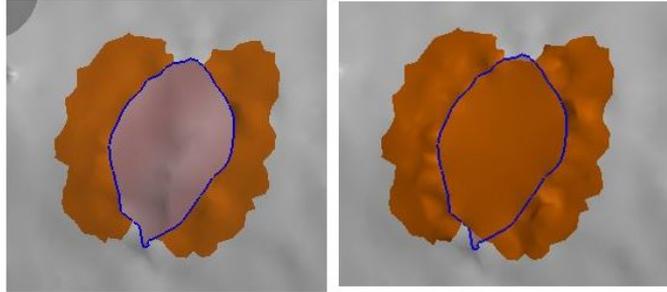


Figura 6.6: Procedimiento de relleno de agujeros 1

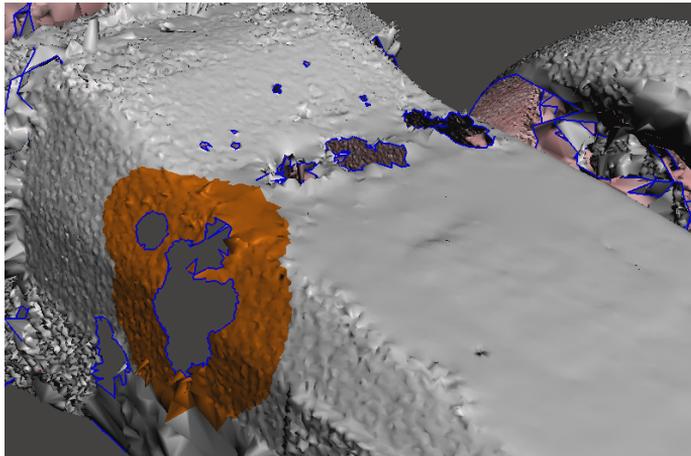


Figura 6.7: Procedimiento de relleno de agujeros 2

El problema surge cuando se intenta rellenar una superficie con un orificio donde el contorno del orificio se encuentra de forma rugosa. La solución entonces es realizar un suavizado previo al relleno del agujero. Esto se lleva a cabo en el menú **Sculpt** mediante el pincel **Robust Smooth**, que realiza un suavizado en el punto que queremos. En la Figura 6.8 se puede ver el aspecto después de realizar este suavizado, la malla obtenida tiene un número ligeramente menor de imperfecciones.

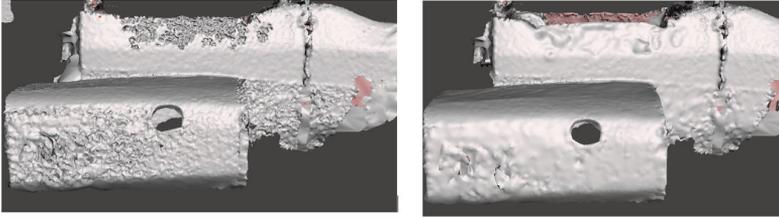


Figura 6.8: Aspecto de la malla antes y después de realizar el suavizado

En algunas zonas del objeto también ocurre que algunos puntos se han unido incorrectamente, generando superficies que no existen en el caso real. Esto ocurre sobre todo en zonas donde hay superficies cercanas entre sí pero con un vacío entre ellas, como por ejemplo las placas verticales del alerón delantero con la carrocería del coche. Mediante el uso de la opción **Discard** se eliminan estas superficies, y se obtiene el resultado de la Figura 6.9

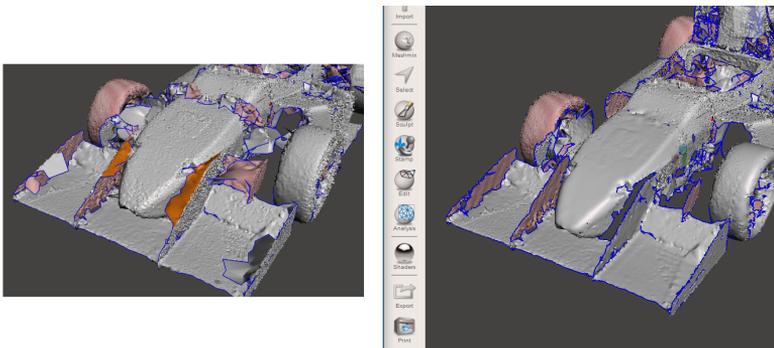


Figura 6.9: Aspecto de la malla antes y después de realizar la eliminación de superficies falsas

Tras realizar una serie de operaciones como las anteriormente mencionadas, se obtiene una malla más limpia pero todavía con defectos. Cabe destacar las zonas con espesor pequeño, como los extremos del alerón trasero, por ejemplo. Al ser un vehículo de tamaño relativamente pequeño, está compuesto por partes que incluyen piezas con geometrías muy pequeñas. Esto se traduce en que la malla obtenida tenga deficiencias como la que se puede ver en la Figura 6.10, donde el software de 3D Reshaper no llega a distinguir el espesor del alerón y crea una malla en zigzag que no se corresponde con la pieza real.

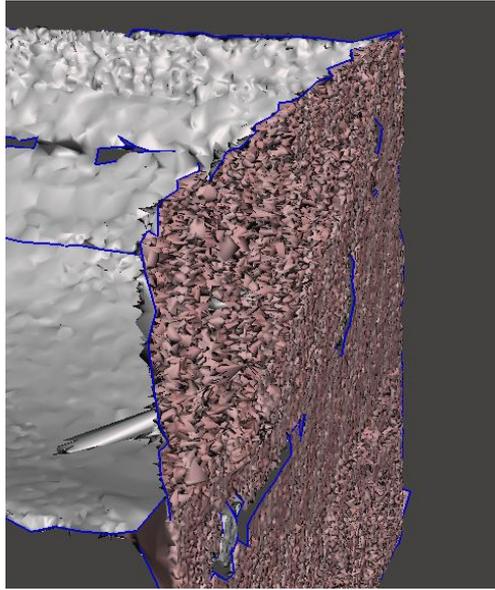


Figura 6.10: Extremo derecho del alerón trasero con puntos en zigzag

La aparición de las anteriores irregularidades puede deberse a un mallado incorrecto, o a un error en la limpieza de puntos, pero el hecho de que una superficie en su totalidad aparezca con esa textura da los primeros indicios de que tal vez el láser escáner utilizado no sea la herramienta más indicada para el estudio que se desea analizar, lo cual es importante a la hora de tomar conclusiones del proyecto.

Todo lo explicado anteriormente hace que la malla obtenida sea una malla inválida para trabajar con ella en aplicaciones como impresión 3D, lo cual lleva a tomar una decisión importante con respecto al rumbo del proyecto. Debido a que no se puede usar esta malla como tal para la impresión del modelo, y la imposibilidad por los recursos proporcionados de repetir las medidas con otro instrumento más indicado, la solución consiste en utilizar las tres mallas obtenidas para crear un modelo desde cero con un software de diseño por ordenador, es decir, emplear la ingeniería inversa.

Esto significa que los modelos obtenidos únicamente se podrán emplear para realizar ingeniería inversa sobre ellos y poder obtener así unos nuevos modelos limpios, sin imperfecciones, y no para realizar impresión 3D sobre ellos directamente como se tenía previsto inicialmente.

Capítulo 7

Ingeniería inversa mediante Fusion 360

En el presente capítulo se pretende partir de las mallas anteriormente obtenidas para realizar un rediseño completo de los tres vehículos con tal de obtener nuevos modelos limpios y sin imperfecciones.

En un primer lugar se hará una explicación de en qué consiste la ingeniería inversa y de las posibles aplicaciones que se le puede dar, poniendo algún ejemplo de casos reales donde se haya aplicado.

Posteriormente, se explicará paso a paso el proceso de creación del nuevo modelo usando el software Fusion 360.

7.1 Ingeniería inversa y aplicaciones

El concepto de ingeniería inversa tiene sus orígenes en la Segunda Guerra Mundial, cuando los dos grandes bandos robaba tecnología del otro bando con el objetivo de estudiarla y encontrar defectos en ella.

Así como la ingeniería tiene como principal objetivo la aplicación de la investigación en cualquier rama con tal de crear y desarrollar inventos que cubran las necesidades de la sociedad o resuelvan problema, la ingeniería inversa, como su nombre indica, se trata de todo lo contrario. Esta técnica busca descubrir, a partir de un objeto ya creado, su funcionamiento y sus principios realizando suposiciones a partir del modelo dado, lo cual supone el estudio en detalle del mismo.

Una rama importante de la ingeniería inversa es la aplicación en el software, que se basa en el mismo principio: partir de un código de programación o similar para estudiar su comportamiento y poder generar un código sin disponer de su código fuente. Aunque en el proyecto esta rama no es relevante, es interesante mencionarla por diferenciarla de la otra gran rama: la ingeniería inversa de producto, anteriormente mencionada, que es la cual se va a llevar a cabo.

Sin embargo, la aplicación que interesa en el proyecto es la relacionada con el escaneo láser. Una de los principales usos del láser escáner es precisamente la ingeniería inversa. La exportación de los datos de un escaneo a un programa de edición tipo CAD permiten un tratamiento y estudio posterior de los datos en detalle, pudiendo obtener gran cantidad de información de la pieza u objeto que se esté midiendo.

El tratamiento de datos obtenidos directamente por un escaneo permite agilizar el trabajo, y obtener por ejemplo datos geométricos del modelo real, para poder compararlos con los planos del modelo y ver sus diferencias.



Figura 7.1: Escaneo del automóvil mediante el láser escáner Space Spider

Como ejemplo, en el Centro de Innovación de la Universidad Técnica de Munich se realizó un escaneo sobre un vehículo Ford Eifel de 1937 para realizar ingeniería inversa sobre él y obtener un modelo CAD. El estudio se realizó mediante dos láseres de la marca Artec, Space Spider y Artec Eva. Estos escáneres tienen un alcance mucho menor que el Trimble TX6, pero su ventaja es que cuentan con una precisión de 0,1 mm y 0,05 mm respectivamente. Otra ventaja es que son más ligeros y sencillos de llevar, como se puede ver en la Figura 7.1. El valor de precisión es 40 y 80 veces mejor que la precisión usada para el escaneo de los vehículos, por lo que los resultados son de mucha mejor calidad que los obtenidos en este proyecto, pudiéndose usar la misma malla como modelo CAD. El modelo obtenido se puede ver en la Figura 7.2, donde se puede apreciar la mejor calidad de los resultados.

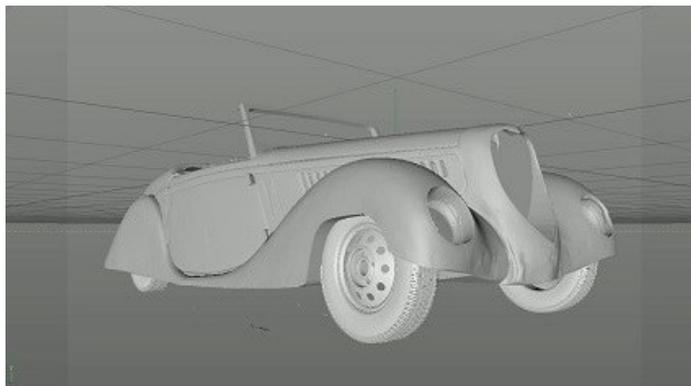


Figura 7.2: Resultados del modelo de un Ford Eifel obtenidos mediante escaneo 3D

7.2 Obtención del nuevo modelo del FUSPV-02 mediante software de modelado

Después de realizar una breve explicación del concepto de la ingeniería inversa y sus posibles aplicaciones, el objetivo de esta sección es aplicarla al rediseño de los tres vehículos. Como se ha visto en la sección anterior, un escaneo de alta precisión permite obtener un modelo directamente de la malla. En el presente caso no es así, debido a que, como se ha visto, la malla presenta tantos defectos que es inviable su tratamiento como modelo. La solución es, por lo tanto, partir de la malla defectuosa para crear un nuevo diseño.

El principal software que se va a emplear es Autodesk **Fusion 360**. Este programa es el elegido debido a que se tienen conocimientos sobre él, aprendidos en asignaturas como Fabricación Aeroespacial o Diseño Aeroespacial Asistido por Ordenador. Sin embargo, para el diseño de algunas partes con geometrías más complejas se utilizará **Rhinceros**, debido a su mayor precisión para estos casos.

Los vehículos se pueden dividir principalmente en varias partes: carrocería, alerón delantero y ala trasera, elementos laterales y ruedas. A continuación, se explicará paso a paso el diseño del primer vehículo, el FSUPV-02

7.2.1 Diseño de la carrocería con Rhinceros

La carrocería del coche es el cuerpo con la geometría más complicada de diseñar. El primer paso consiste en partir de la malla inicial y realizar Sketches de su planta y perfil, para obtener una estimación de la forma en 3D. Una vez creados, se extruyen cada uno en su dirección y se combinan mediante la opción **Intersect**. El proceso se puede ver en las Figuras 7.3 y 7.4.

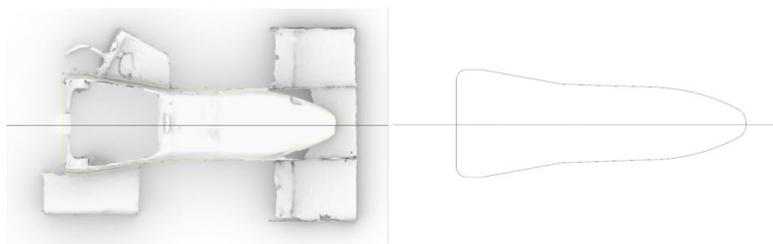


Figura 7.3: Sketch de la planta de la carrocería del FSUPV-02

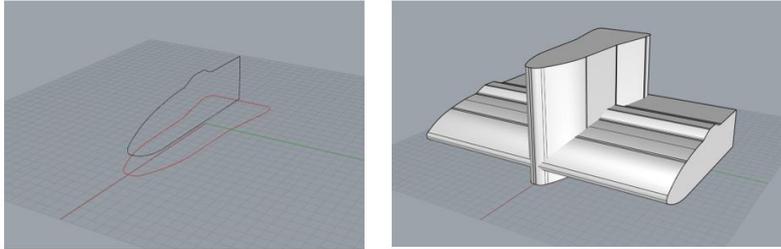


Figura 7.4: Combinación de los dos perfiles y extrusión

El siguiente paso consiste en redondear las esquinas del cuerpo obtenido para que queden idénticas a la forma del modelo real, comparándolas con la malla, además de dibujar otro sketch para la cavidad del asiento. Los resultados finales se ven en la Figura 7.7.

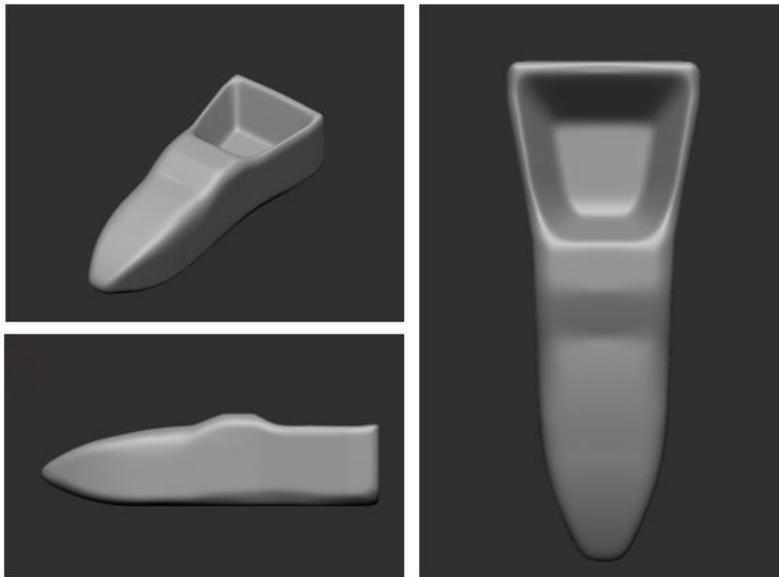


Figura 7.5: Vistas del modelo de la carrocería del FSUPV-02

7.2.2 Diseño del alerón delantero

Una vez creado el modelo de la carrocería, el resto de pasos se realizan ya con Fusion 360. En primer lugar se crea una nueva carpeta y se importan dos archivos: la malla original y la carrocería. El procedimiento va a ser similar siempre: obtener perfiles del objeto que se quiere crear y realizar extrusiones.

Un paso importante al principio es comprobar que el origen del sistema de coordenadas esté situado en el centro del vehículo para así poder realizar simetrías en algunas piezas.

Se comienza con el alerón delantero, concretamente con la superficie horizontal inferior. Como es complicado obtener el perfil a simple vista, la solución consiste en realizar un corte mediante la opción **Section Analysis**, que muestra una vista del modelo cortado por el plano escogido. Esto permite dibujar el perfil de esta superficie con exactitud.

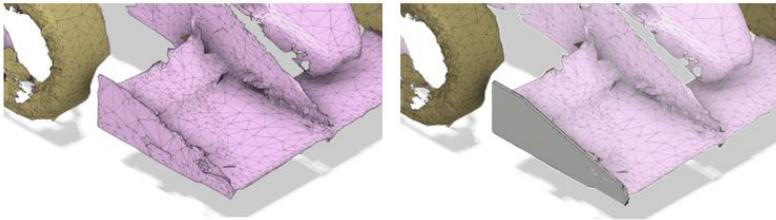


Figura 7.6: Malla original con el extremo del alerón extruido

Una vez realizada, se continúa creando las partes verticales de igual manera, dibujando los contornos y extruyendo el resultado, siempre comparando los datos sobre la malla original para que coincidan. En la Figura 7.6 se pueden ver los resultados de la extrusión, y en la Figura 7.7 el alerón delantero completo.

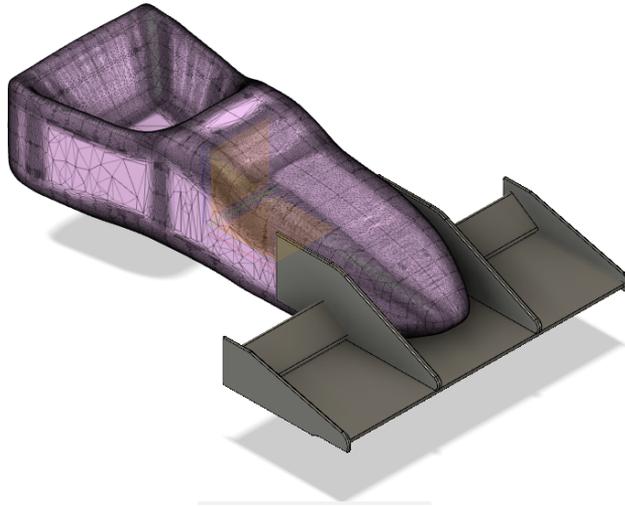


Figura 7.7: Aspecto del alerón creado mediante extrusiones

7.2.3 *Diseño de elementos laterales*

El siguiente objetivo es diseñar las carcasas que tiene el vehículo a cada lateral. Estos elementos tienen algo más de complicación, debido a que no están en posición vertical u horizontal, sino que tienen forma oblicua. El procedimiento que se sigue es generar una sección oblicua con el ángulo de inclinación de la carcasa (Figura 7.8) y dibujar el perfil, que se puede considerar como una intersección de varias circunferencias (Figura 7.9)

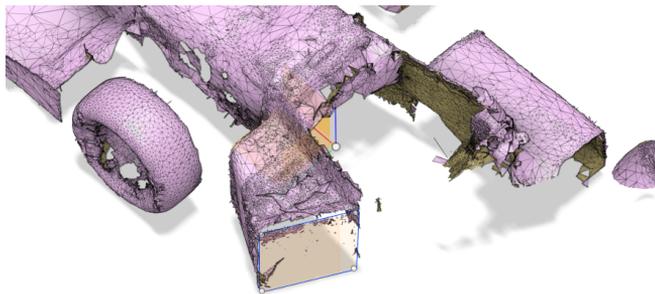


Figura 7.8: Sección oblicua para obtener el perfil de la carcasa derecha

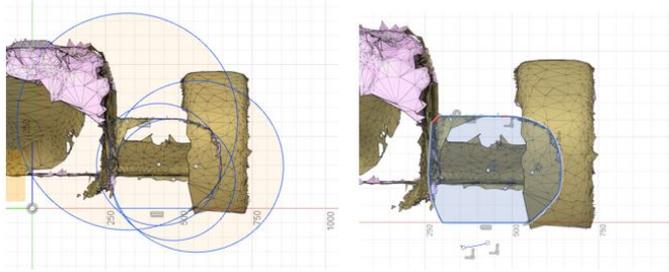


Figura 7.9: Sketch como conjunto de circunferencias (Izquierda), aspecto final del Sketch (Derecha)

Se realiza el mismo procedimiento para obtener el otro extremo de la carcasa derecha, que tiene otro perfil diferente. Mediante la opción **Loft** se unen estos dos perfiles y se crea el modelo de la carcasa. Finalmente, se usa la opción **Fillet** para redondear las aristas y darles un aspecto más similar al real.

Así se obtiene el modelo de la carcasa derecha, y análogamente se crea el de la carcasa izquierda, obteniéndose los resultados de la Figura 7.10.

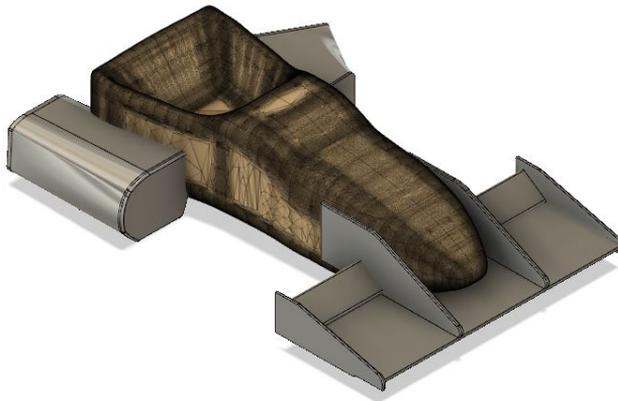


Figura 7.10: Modelo con alerón delantero y carcasas laterales

7.2.4 Diseño del ala trasera

Para esta parte tiene especial importancia el correcto diseño del perfil horizontal, ya que es una geometría aerodinámicamente relevante. Para comprobar que la curvatura es igual a lo largo del perfil se realizan varios cortes verticales a diferentes distancias, y se comprueba que la forma del perfil no varía con la distancia, como se aprecia en la Figura 7.11.

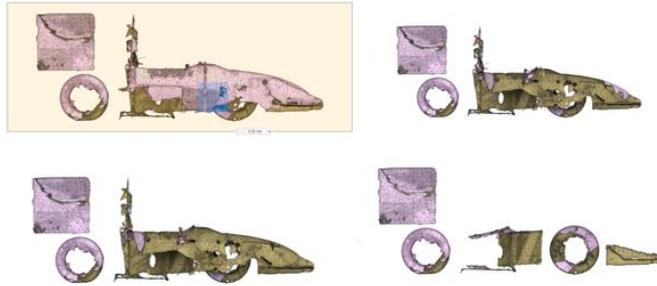


Figura 7.11: Comprobación de que la curvatura del perfil es constante mediante cuatro cortes transversales

Una vez comprobado que la geometría es constante, se procede a realizar otro sketch con los contornos de los perfiles, también como unión de circunferencias. Debido a que el láser no ha podido escanear bien la superficie inferior del perfil, se completa siguiendo la dirección de las curvas conocidas y uniéndola con la parte superior. El proceso se puede ver en la Figura 7.12.

Para los perfiles superiores se repite el proceso, y se obtiene finalmente el Sketch de la Figura 7.13. Este perfil se extruye simétricamente desde el centro, y para las superficies verticales también se dibuja el perfil, más sencillo que el anterior, y se extruyen con un espesor definido por los puntos de la malla.

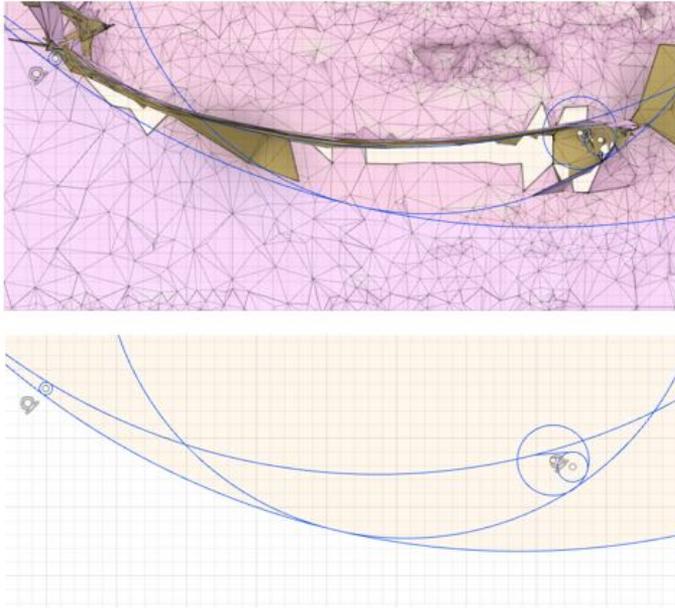


Figura 7.12: Sketch del perfil del ala trasera con y sin malla

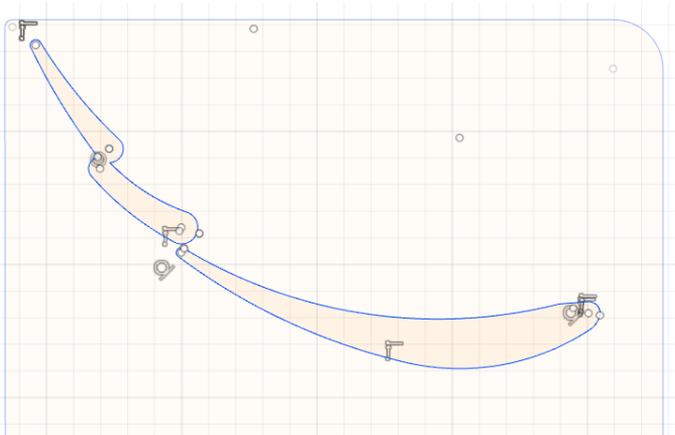


Figura 7.13: Conjunto de Sketches de los perfiles del ala trasera

7.2.5 Detalles y resultado final

Una vez diseñadas todas las piezas principales, los últimos detalles consisten en crear algunas piezas más sencillas, como los neumáticos, y quedaría finalizado el proceso de rediseño del vehículo FSUPV-02.

Los neumáticos se obtienen como la unión entre dos circunferencias, y después se crea un perfil interior con el diámetro interior para eliminarlo de la extrusión. Finalmente se redondean los bordes para que queden idénticos al modelo real.

Finalmente, en las Figuras 7.14 y 7.15 se pueden ver los resultados finales del modelo, superpuesto con la malla y sin malla.

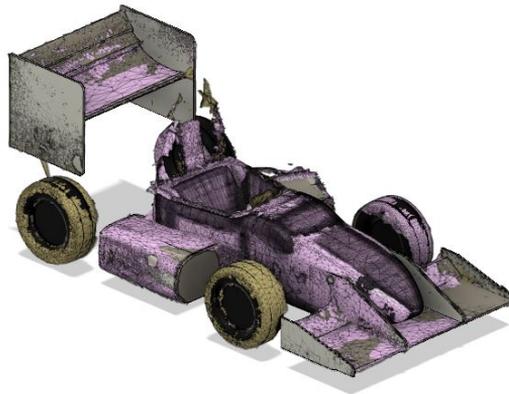


Figura 7.14: Resultados del rediseño del FSUPV-02 con la malla original

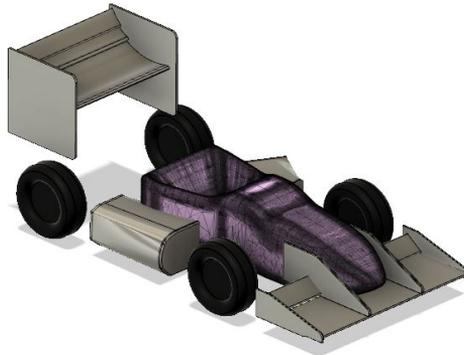


Figura 7.15: Resultados del rediseño del FSUPV-02 sin malla

7.3 Modelado de los vehículos FSUPV-01 y FSUPV-03

Al igual que con el FSUPV-02, también se quiere llegar a un modelo limpio de los otros dos vehículos a partir de la malla. Debido a que ya se ha explicado con detalle el procedimiento de diseño del coche anterior, en esta sección únicamente se van a explicar los métodos que no se hayan empleado anteriormente, o los procedimientos llevados a cabo de alguna manera diferente.

Comenzando con el FSUPV-03, a la hora de diseñar la carrocería aparece la primera diferencia, ya que se realiza de manera diferente que en el anterior vehículo. También se diseña con el software Rhinoceros, pero en este caso una vez se tienen las curvas del perfil se crea el volumen automáticamente uniéndolas de tres en tres. Esto se puede entender mejor gráficamente, en la Figura 7.16. Una vez creadas todas las superficies se obtiene un modelo muy similar al real y de manera más sencilla y rápida que con la técnica anterior. Para el resto del modelado se sigue el mismo procedimiento que el realizado con el FSUPV-02.

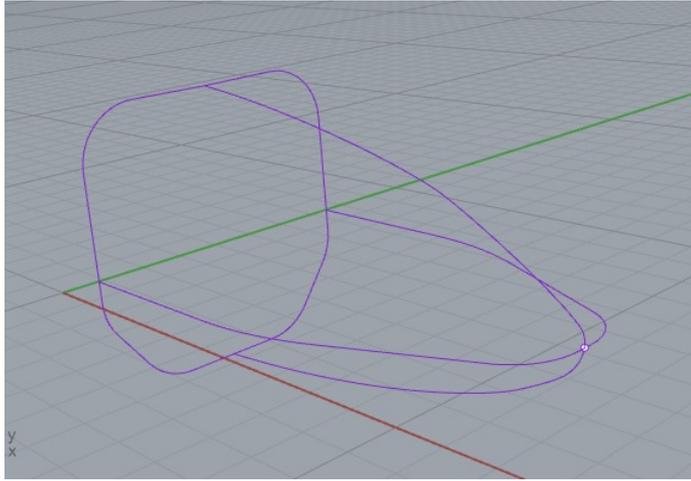


Figura 7.16: Contornos para generar el modelo de la carrocería del FSUPV-03

Además, es interesante ver en la Figura 7.18 la vista lateral del modelo con el conjunto de Sketches creados para cada uno de los elementos. El aspecto modelo final en Rhinoceros (Figura 7.18) es muy similar al modelo real eliminando las imperfecciones.

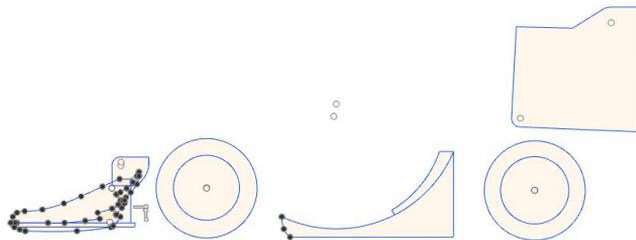


Figura 7.17: Vista del conjunto de Sketches del FSUPV-03

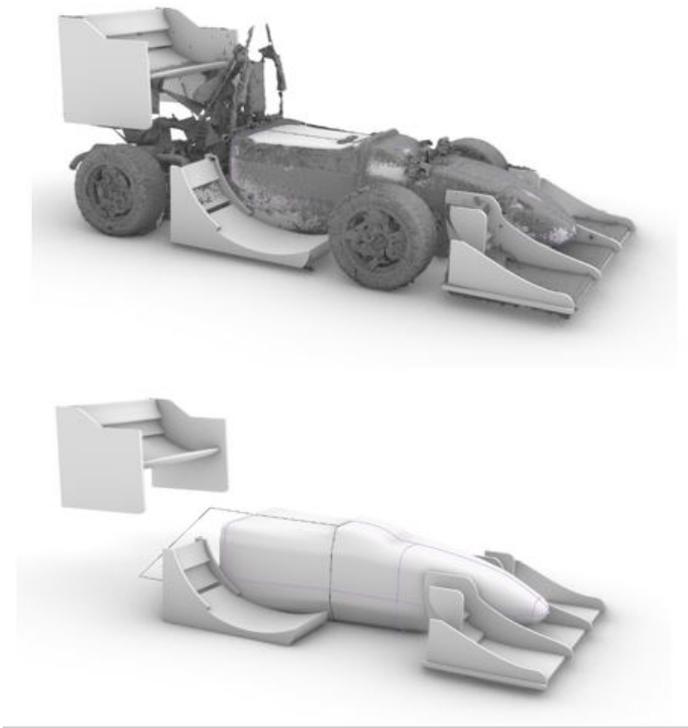


Figura 7.18: Aspecto final del FSUPV-03 con y sin malla

En cuanto al FSUPV-01, también se trata de un vehículo similar al realizado en primer lugar. El cambio más notable es que en lugar de tener carcasas en los laterales tiene unos pequeños alerones, lo que significa que son más sencillos de modelar.

A la hora de dibujar los perfiles de las piezas se usa una herramienta previamente no usada, **Fit Point Spline**, que crea una curva que pasa por los puntos que se seleccionen. Esta herramienta ayuda a conseguir gran similitud con la malla en geometrías que con otras técnicas son más complicadas de lograr. Además, es mucho más sencilla que la técnica utilizada anteriormente de intersectar circunferencias. En la Figura 7.19 se puede ver el uso de esta herramienta para el diseño del contorno del alerón trasero.

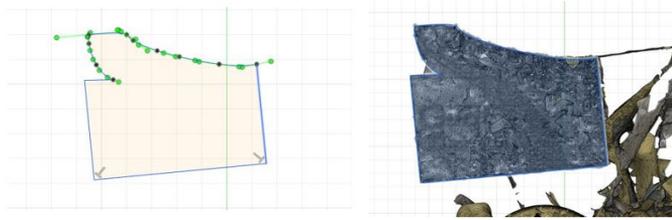


Figura 7.19: Contorno del extremo del alerón trasero mediante la utilización de Spline

Debido a que el proyecto consiste en la comprobación de la técnica de escaneo láser para la creación de modelos de vehículos, se toma la decisión de que basta con la obtención de dos de los tres modelos para su impresión 3D, por motivos de ahorro de material. Es por ello que la carrocería del FSUPV-01 no se llega a rediseñar, obteniéndose finalmente el modelo de la Figura 7.20.

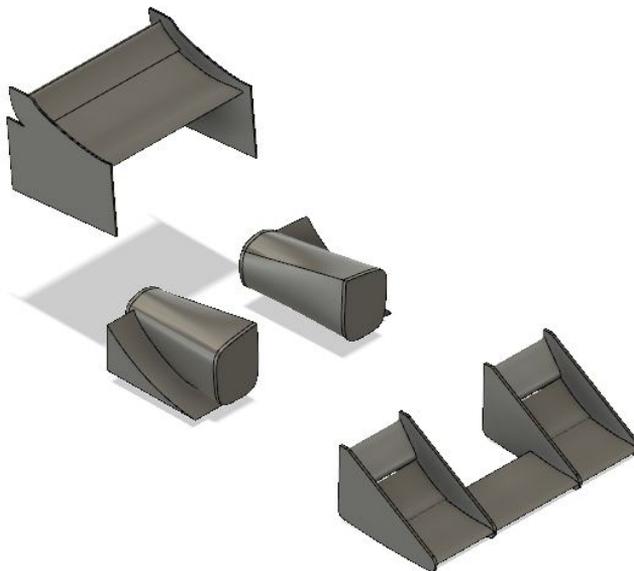


Figura 7.20: Aspecto final del FSUPV-01 sin el diseño de la carrocería

Una vez diseñado el FSUPV-03 queda por finalizada la fase de ingeniería inversa, y el siguiente paso es la impresión en 3D de los modelos.

Capítulo 8

Impresión 3D

En este breve capítulo se explicará el procedimiento llevado a cabo para la impresión en 3D de los modelos FSUPV-02 y FSUPV-03. En primer lugar, se indicarán las modificaciones realizadas a los modelos para su correcta impresión. Después se describirán los parámetros y especificaciones técnicas de la impresora, así como los resultados de la impresión.

8.1 Preparación de modelos para la impresión

Antes de imprimir los modelos hay que asegurarse de que la impresión no vaya a presentar ningún problema, y para ello es necesario comprobar las geometrías de los modelos.

Con respecto al FSUPV-03, en primer lugar se decide imprimir por separado el alerón trasero y el resto del vehículo, para no someter al modelo durante la impresión a posiciones en las que se pueda romper. También se imprimen en otro momento los neumáticos.

Además, es necesario diseñar ciertos elementos para poder juntar todo el modelo al final, ya que, por ejemplo, la unión del alerón trasero y el cuerpo del vehículo en el caso real consiste en dos barras de un tamaño demasiado pequeño para su impresión y que no han sido modeladas. La solución es diseñar unas superficies de tamaño no muy grande para que no alteren mucho la forma del vehículo pero que puedan sostener el alerón trasero.

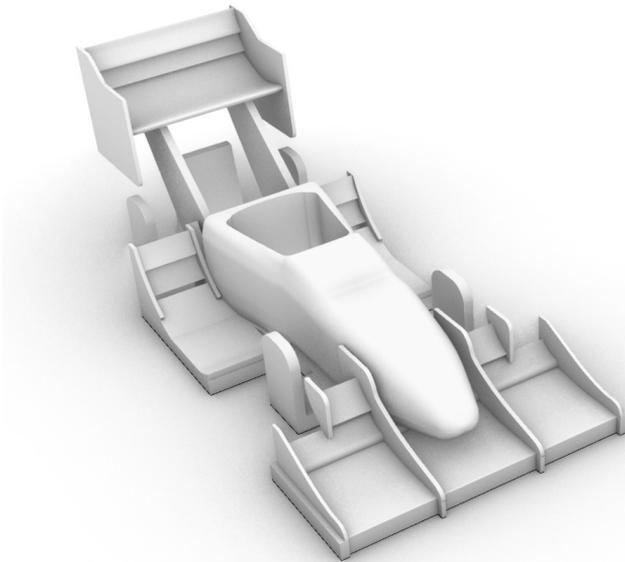


Figura 8.1: Versión del FSUPV-03 con modificaciones para su impresión

Con los neumáticos ocurre lo mismo, se tienen que diseñar cuatro soportes para que posteriormente se puedan pegar. El diseño final, con soportes para el alerón y para los neumáticos, se puede ver en la Figura 8.1. También se puede apreciar que se ha aumentado verticalmente la sección inferior, esto se hace para que, a la hora de imprimir, el objeto adquiera cierta rigidez estructural y resista los esfuerzos, aunque haya que sacrificar cierta semejanza geométrica.

En cuanto al FSUPV-02, se decide imprimir sin ruedas por simplificación, y por posible estudio aerodinámico futuro. El modelo preimpresión se puede ver en la Figura ??.

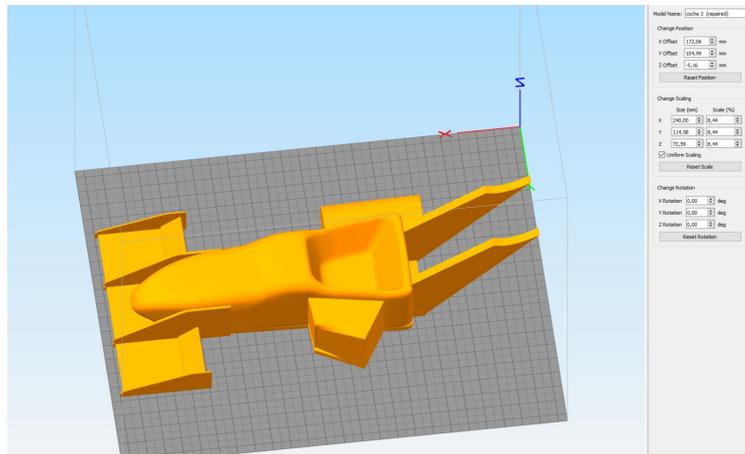


Figura 8.2: Versión del FSUPV-02 con modificaciones para su impresión

8.2 Impresora y material empleado

El modelo de impresora utilizado es **Prusa i3 MK3S**. Las principales características se pueden ver en la Tabla 8.1.

Volumen de trabajo	25x21x21cm
Altura de capas	0.05 mm
Tamaño de boquilla	0.4 mm

Tabla 8.1: Especificaciones de la impresora Prusa i3 MK3S

Para la impresión se ha utilizado PLA (Ácido Poliláctico) como material. Este es uno de los materiales más usados actualmente en el mercado, y tiene como principales ventajas las siguientes:

- Es de origen prácticamente natural, por lo que al desecharse se biodegrada.
- Tiene una gran facilidad de uso y permite un gran margen de error
- Es resistente y fácil de manipular, ya sea por ejemplo taladrar o cortar.
- Sencillo de pigmentar, por lo que está disponible en una gran variedad de colores
- No necesita impresión en cama caliente debido a que su temperatura de impresión es baja.

Esta última ventaja está relacionada con su principal desventaja, la cual es que tiene temperaturas de fusión relativamente bajas, por lo que hay que tener cuidado a la hora de manipularlo.

8.3 Proceso de impresión

Para imprimir los objetos se emplea el software **Simplify3D**, donde se importan los modelos ya modificados para su impresión. Un paso importante antes de realizar la impresión es asegurarse de que el interior del modelo esté vacío, ya que en algunos casos se quedan intersecciones de piezas que dificultan la impresión.

Para el interior escogemos que se rellene con un 10% de material, cifra asequible para el modelo que se desea imprimir. Además, se ordena que dibuje un perímetro de seguridad alrededor de la forma de la base para hacerla con más precisión. En la Figura 8.3 se ve la base del FSUPV-03.

Una vez finalizada la impresión, la impresora muestra los datos, resumidos en la Tabla 8.2.

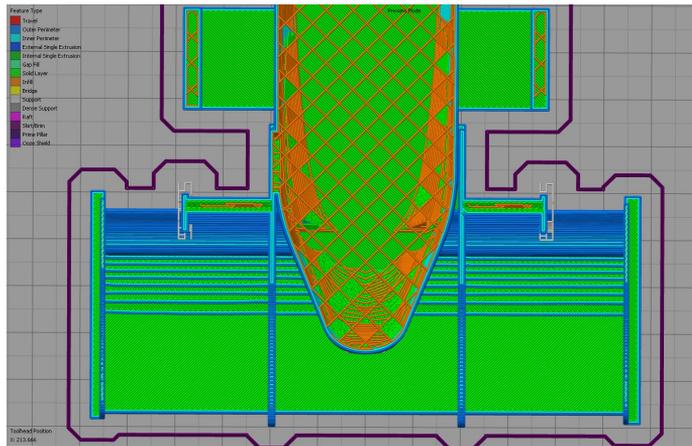


Figura 8.3: Base y tronco del modelo de FSUPV-03 en Simplify3D

Tiempo de impresión	7h 50min
Longitud de filamento usada	42305.3 mm
Masa de plástico	127.2 g
Coste de material	5.85 €

Tabla 8.2: Datos obtenidos de la impresión del FSUPV-03

Hay que tener en cuenta que este modelo se imprime sin el alerón ni las ruedas, ya que los cuales se imprimen posteriormente y se pegan con una soldadura. Finalmente, por no ser del todo relevantes, se decide no imprimir los neumáticos con tal de ahorrar tiempo y material. Los resultados de la impresión del modelo se pueden ver en la Figura 8.5.

Los resultados de los dos modelos tras la impresión del FSUPV-02 se ven en la Figura 8.6.

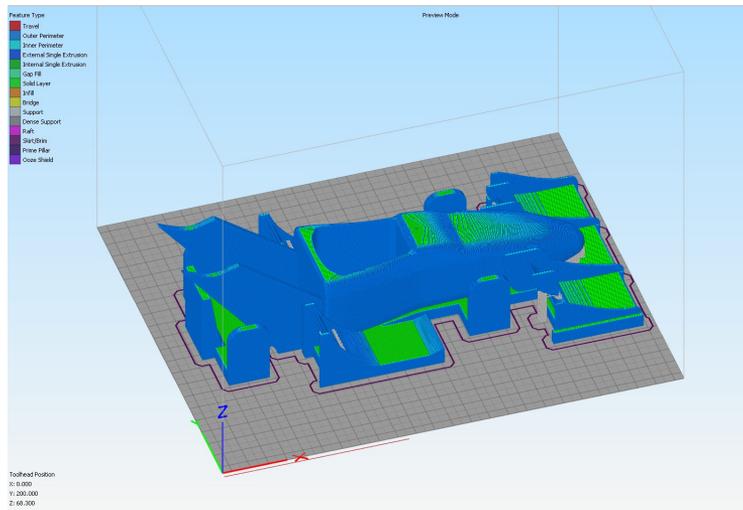


Figura 8.4: Modelo del FSUPV-03 listo para imprimir



Figura 8.5: Resultados de la impresión del FSUPV-03



Figura 8.6: Resultados de la impresión del FSUPV-02 y FSUPV-03

Capítulo 9

Análisis dimensional y resultados

En el presente capítulo se realizan una serie de medidas a uno de los vehículos, el FSUPV-02, y al modelo que ha sido impreso, con el objetivo de calcular el error generado por el proceso de escaneo e ingeniería inversa, lo cual permitirá obtener conclusiones sobre si la técnica empleada es correcta para el dimensionado de los objetos.

Una vez impresos los modelos del FSUPV-02 y FSUPV-03, el objetivo es comprobar la precisión del estudio mediante el dimensionado del modelo real y el impreso. Como el procedimiento para la obtención de los dos vehículos ha sido el mismo, el análisis dimensional se realiza únicamente sobre el vehículo FSUPV-02, por razones de disponibilidad.

Antes de realizar las medidas es importante saber a qué escala se ha impreso el modelo. En los parámetros de impresión se ha seleccionado un tamaño del 8'44% del original de la malla, lo cual se traduce en una escala de, aproximando a la centésima, **1:11,85**. Por lo tanto, las medidas tomadas del modelo deberán ser multiplicadas por la escala para obtener el valor teórico.

El siguiente paso consiste en seleccionar las dimensiones que se quieren medir. Se quiere ver resultados en superficies bien definidas, por lo que se seleccionan aristas o lados rectos para más precisión de la medida. Los lados medidos en el modelo se pueden ver en la Figura 9.1, y son los siguientes:

- Anchura del alerón delantero (1).
- Anchura de la parte central del alerón delantero (2).
- Anchura de la parte lateral del alerón delantero (3).
- Longitud de la superficie horizontal del alerón delantero (4).
- Anchura de la parte posterior del asiento (5).
- Anchura del alerón trasero (6).
- Longitud del alerón trasero (7).
- Altura del alerón trasero (8).

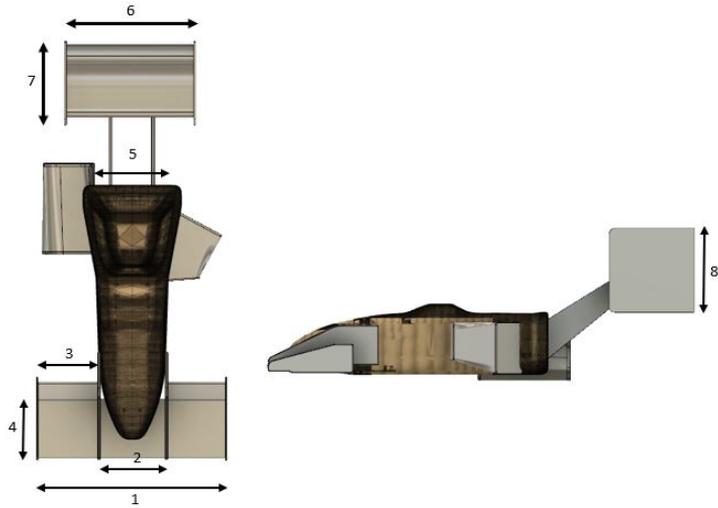


Figura 9.1: Medidas realizadas al FSUPV-02

En la Tabla 9.1 se muestran los valores de cada medida en el modelo real, en el modelo impreso a escala y el valor del modelo impreso multiplicado por la escala, es decir, la medida teórica del modelo impreso a tamaño real. Además, se muestra el error absoluto y el relativo.

Medida	Valor (cm)	Modelo escala (cm)	Modelo tamaño real (cm)	E. Abs. (cm)	E. Rel. (%)
1	135,7	11,35	134,5	1,203	0,89 %
2	50	4,15	49,18	0,823	1,65 %
3	42,70	3,70	43,84	1,145	2,68 %
4	43,60	3,49	41,35	2,25	5,16 %
5	62	4,65	55,10	6,89	11,12 %
6	93	7,85	93,02	0,02	0,02 %
7	60,60	5,10	60,44	0,17	0,27 %
8	61,30	5,17	61,27	0,03	0,05 %

Tabla 9.1: Comparación de medidas entre el modelo real y el obtenido por el levantamiento

De los valores del error relativo de la Tabla 9.1 se pueden extraer varias conclusiones. En primer lugar, existe un rango de valores de error muy alto, con valores inferiores al 0,1 % hasta valores mayores de 10 %. Los errores más altos surgen en zonas con geometría más complicada, como la anchura de la parte posterior del asiento, con un 11,12 %, o la longitud de la superficie horizontal del alerón delantero, con un 5,16 %. Esto puede ser debido a varias razones:

- Deficiencias de la malla que provoquen valores incorrectos del modelo obtenido mediante ingeniería inversa.
- Errores en la medida por tratarse de zonas complicadas de medir con exactitud.
- Inexactitud a la hora de la unión de los estacionamientos, que provoca dimensiones erróneas.

Por otra parte, existen medidas donde el error relativo obtenido tiene un valor aceptable, como la anchura, altura y longitud del alerón trasero, que tienen los menores valores de error, o la anchura del alerón delantero. Estos valores obtenidos del modelo son más precisos debido a que son geometrías muy bien definidas y que no dan lugar a confusión a la hora de la realización del nuevo modelo.

Cabe decir que no se han mostrado los resultados de distancias más pequeñas, como, por ejemplo, el espesor de algunas chapas, debido a los altos valores de error obtenidos. Estos valores se deben a la baja precisión que tiene el láser para superficies tan pequeñas, por lo que en esos casos el escaneado láser mediante el instrumento usado no sería la opción ideal.

En general, los resultados obtenidos permiten crear una idea de lo que será la conclusión del trabajo: el estudio realizado puede tener relevancia a la hora de estudiar la geometría del cuerpo a grandes rasgos y de manera aproximada, aunque para realizar, por ejemplo, un análisis aerodinámico no sería suficiente debido a los cambios en la geometría causados por los errores en las medidas del modelo.

Capítulo 10

Presupuestos

En el presente capítulo se explicarán en detalle los costes que supondría la realización de este proyecto, para lo cual estos se van a dividir en diferentes ámbitos: costes de material, costes humanos y costes de software. Esto permitirá obtener una estimación del coste total necesario para la realización del estudio.

10.1 Costes de material

En primer lugar se van a calcular los costes totales del material empleado. En el proyecto se han empleado las siguientes herramientas:

- Láser escáner Trimble TX6
- Impresora Original Prusa i3 MK3
- Material PLA para impresión

Inicialmente, se considera que un año tiene 225 días laborables, a 8 horas laborables por cada día, por lo que el número de horas consideradas por año es de 1800. Esto se tendrá en cuenta para la evaluación de la fracción de tiempo empleada en el uso de un instrumento.

Antes de mostrar la tabla con los presupuestos, cabe explicar que el precio mostrado es por tiempo, por lo que el coste total será el producto del coste por el tiempo de empleo. Se considera que el Trimble TX6 tiene un precio de alquiler de 600€ al día, y la impresora tiene un precio de compra de 700€. Además el material PLA de la marca *SmartFill* tiene un precio de 17'95€ cada kilogramo, por lo que dependerá de la masa empleada. En la Tabla 10.1 se puede ver el coste total de material empleado.

Producto	Precio	Tiempo de uso	Material utilizado	Coste Total
Láser escáner	600 €/día	1 día	-	600€
Impresora	700€/1 año	15 h	-	5'83€
Material	17'95€/kg	-	0'5 kg	8.97€
Total	-	-	-	614'81€

Tabla 10.1: Costes totales derivados del material utilizado

10.2 Costes humanos

Un factor muy importante a considerar es el hecho de que el proyecto se va a realizar por profesionales, como bien pueden ser ingenieros o técnicos. Se va a considerar, por lo tanto, que el proyecto es realizado por un ingeniero mediante la supervisión de un ingeniero jefe (el tutor). Se considera que el ingeniero cobra un sueldo de 16€/hora y el supervisor de 20€/hora, y que el ingeniero ha trabajado un mes (160 horas) y el supervisor un total de 25 horas. En la Tabla 10.2 se ven los costes de esta parte del presupuesto.

Concepto	Coste	Tiempo	Coste total
Ingeniero	16€/hora	160 h	2560€
Supervisor (Tutor)	20€/h	25 h	500€
Total	-	-	3060€

Tabla 10.2: Costes totales derivados de las personas implicadas

10.3 Costes de software

Finalmente, durante el desarrollo del proyecto se ha utilizado una gran cantidad de software diferente, algunos de ellos gratuitos pero otros con una licencia asociada, por lo que una parte importante del presupuesto total del proyecto es precisamente el dinero invertido en licencias de programas.

El precio de las licencias abarca un año de uso, por lo que se considera que tiene 1800 horas laborables. Además, es necesario añadir el coste de uso del mismo equipo computacional, que se considera de 1 mes. Los costes totales debidos al software están detallados en la Table 10.3.

Software	Precio de licencia	Tiempo de uso	Coste Total
Equipo informático	1000€/2 años	160 h	44'44€
Trimble Realworks	1800€/año	3 h	3€
Leica Cyclone	1840€/año	100 h	102'20€
3DReshaper	1820€/año	20 h	20'20€
Meshmixer	0€	5 h	0€
Rhinoceros	495€/2 años	5 h	0'69€
Fusion 360	0€	30 h	0€
Total	-	-	170'53€

Tabla 10.3: Costes totales derivados del software utilizado

10.4 Costes totales del proyecto

Antes de calcular los costes del proyecto, cabe decir que se considera un IVA del 21 % en los costes derivados tanto del software como del material empleado. El coste final con y sin IVA se puede ver resumido en la Tabla 10.4.

Concepto	Coste sin IVA	IVA	Coste con IVA
Costes de material	614'81€	170'11€	743'92€
Costes humanos	3060€	0€	3060€
Costes de software	170'53€	35'81€	206'34€
Costes Totales	3845'34€	205'92€	4010'26€

Tabla 10.4: Costes totales del proyecto con y sin IVA

Capítulo 11

Conclusiones

Tras haberse realizado correctamente todo el desarrollo del proyecto, el último capítulo consiste en extraer las conclusiones derivadas de su realización, así como justificar si se han cumplido los objetivos del trabajo y el por qué.

En primer lugar, se han aprendido los aspectos fundamentales y prácticos de la técnica del láser escáner. Además de comprender teóricamente los principios de funcionamiento, el trabajo de campo ha implicado la comprensión tanto teórica como práctica del desarrollo de esta técnica, aplicándola en un campo concreto como puede ser la industria. Podría haberse mejorado la medida situando los vehículos en una posición elevada para permitir el correcto escaneo de la parte inferior, pero finalmente se ha solucionado considerando superficie plana.

Los resultados obtenidos del escaneo hacen pensar que tal vez el láser escáner empleado no sea la solución ideal para el escaneo de elementos con piezas o bien pequeñas, o bien con geometrías muy complejas, ya que una precisión de 4 mm en muchas ocasiones puede suponer la aparición de errores significantes. Como se ha visto, usando instrumentos con mayor precisión se habría obtenido una malla mucho más definida, y no habría sido necesario el proceso de ingeniería inversa y rediseño del modelo. El láser escáner empleado es de alta calidad en aplicaciones a gran escala, como puede ser el escaneo de

un terreno o la fachada de un edificio, pero a la hora de escanear elementos industriales de menor tamaño surgen imperfecciones debido a su precisión.

A su vez, el software usado para la transformación de la nube de puntos en malla también está orientado al ámbito de la topografía, es decir, el procesamiento de paisajes, terrenos u objetos a gran escala que no presentan dificultad geométrica. Una solución podría ser usar otro software de creación de mallas, como la variante de 3DReshaper *Meteor*, empleada en el ámbito de la automoción y aeroespacial, aunque, por falta de recursos, finalmente se ha optado por el 3DReshaper.

Cabe decir que la realización de ingeniería inversa sobre la malla ha sido una buena solución ante el problema ya mencionado, ya que nos ha permitido crear un modelo mucho más simplificado y libre de impurezas. Sin embargo, este modelo sigue sin ser más que una aproximación, ya que está basado en datos obtenidos mediante un láser escáner con precisión excesivamente baja para algunas partes.

En conclusión, la medición de los objetos mediante láser escáner ha servido para obtener modelos de los tres vehículos e imprimir dos de ellos, aunque no se ha obtenido un resultado suficientemente preciso para llegar a realizar un análisis aerodinámico con resultados coherentes. Esto se traduce en que esta técnica puede ser precisa para obtener geometrías relativamente simples y de gran tamaño, como pueden ser las dimensiones del coche y de las partes más grandes, pero a la hora de usarse para geometrías más complejas no es la técnica más indicada actualmente. Como alternativa podría proponerse el uso de un láser escáner de triangulación, como el mencionado en la Sección 7.1, que, a pesar de que tener un alcance mucho menor, el aumento en la precisión habría permitido ahorrar el proceso de ingeniería inversa.

Con esto no se pretende decir que el escaneo láser sea una técnica incorrecta, ya que, aunque actualmente todavía no, puede ser usada en el campo aeroespacial para la medida de grandes superficies, como aeronaves o vehículos espaciales. En un futuro mejorará la precisión de estos sistemas, y probablemente sea posible el uso de esta técnica para la obtención de perfiles con una aplicación aerodinámica.

Finalmente, se puede afirmar que este proyecto ha aportado una gran cantidad de conocimientos en varios ámbitos, desde las aplicaciones del escaneo en 3D hasta la utilización de gran cantidad de software, además de haber hecho aplicar conocimientos ya adquiridos durante la trayectoria académica.

Capítulo 12

Bibliografía

- *Priego de los Santos, Enrique. Topografía, instrumentación y observaciones topográficas (2015). Editorial UPV*
- *Priego de los Santos, Enrique. Sistema Láser Escáner. Topografía Industrial.*
- *Brown, Daniel. The future of laser scanning (2009)*
- *Trimble TX6/TX8 3D Scanner Getting Started Guide*
- *Leica Cyclone Userguide*
- *3DReshaper User Manual*
- *Bronchure Formula Student UPV (2019)*
- *www.formulastudent.es*
- *www.formulastudent.de*
- *<https://www.artec3d.com/es/cases/f1-car-central-scanning>*
- *<https://www.3dhub.es/escaneado-digitalizado-3d/>*

Anexo A

Especificaciones técnicas del láser escáner

ESCÁNER LÁSER TRIMBLE TX6

RENDIMIENTO

Visión general

Principio de escaneado Espejo rotativo vertical sobre una base rotativa horizontal
 Principio de alcance Tiempo de vuelo ultra rápido impulsado por la tecnología Trimble LightTring
 Velocidad de escaneado¹ 500.000 puntos por segundo
 Alcance máximo 80 m en la mayoría de las superficies con actualización opcional de 120 m
 Ruido del alcance² <2 mm en la mayoría de las superficies

Medición del alcance

Clase de láser 1, con protección de los ojos de conformidad con IEC EN60825-1
 Longitud de onda láser 1,5 µm, invisible
 Diámetro del rayo láser 6-10-34 mm a 10-30-100m
 Alcance mínimo 0,6 m
 Alcance estándar máx 80 m en superficies reflectantes 18-90%
 Extensión del alcance³ 120 m en superficies reflectantes 18-90%
 Ruido del alcance⁴ <2 mm en superficies muy poco reflectantes (5%)
 <2 mm en 2 m a 80 m en superficies reflectantes 18-90% en modo estándar
 <2 mm en 2 m a 120 m en superficies reflectantes 18-90% en modo de extensión del alcance

Error sistemático del alcance⁵ <2 mm

Escaneado

Campo de visión 360° x 317°
 Precisión angular⁶ 80 µrad

Parámetros de escaneo	Vista preliminar	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
Alcance Máx. ¹	80/120 m	80/120 m	80/120 m	80/120 m
Duración del escaneado (minutos) ²	02:00	03:00	05:00	19:00
Espaciamiento entre puntos a 10 m	15,1 mm	—	—	—
Espaciamiento entre puntos a 30 m	—	22,6 mm	11,3 mm	5,7 mm
Espaciamiento entre puntos a 300 m	—	—	—	—
Número de puntos	8,7 Mpts	34 Mpts	138 Mpts	555 Mpts

ADQUISICIÓN DE IMÁGENES

Cámara HDR integrada 10 megapíxeles de resolución, campo de vision completo
 Duración de la captura de imagen 1 para Estándar, 2 min para HDR
 Kits de cámara externa disponibles para imágenes HDR y de alta resolución

OTRAS

Pantalla táctil TFT-LCD a color de 24 bits
 Tamaño (mm) 93 (H) x 55,8 (V), equivalente a 4,3" diagonal
 Resolución 800 x 480 (WVGA)
 Resolución de luminancia 8 bits
 Nivelación Burbuja externa, burbuja electrónica integrada
 Compensador de doble eje Seleccionable Sí/No
 Resolución 0,3"
 Alcance ±5'
 Precisión⁶ 1"
 Almacenamiento de datos USB 3.0 Flash
 Control remoto Operar con una tableta de Trimble u otro dispositivo móvil con WLAN, o con una PC o tableta con Windows 7 o superior mediante conexión de cable USB⁸

ESPECIFICACIONES FÍSICAS

Dimensiones 335 mm de ancho x 386 mm de alto x 242 mm de profundidad
 Peso 10,7 kg con plataforma nivelante y sin batería; 11,2 kg con plataforma nivelante y con batería
 Suministro de alimentación eléctrica 76 mm de ancho x 43 mm de alto x 130 mm de profundidad; Peso: 0,66 kg
 Dimensiones de la batería 89,2 mm de ancho x 20,1 mm de alto x 149,1 mm de profundidad
 Peso de la batería 0,46 kg
 Consumo de potencia 72 W
 Tiempo de escaneado por batería >2 horas
 Carcasa del instrumento 500 mm de ancho x 366 mm de alto x 625 mm de profundidad

ESPECIFICACIONES MEDIOAMBIENTALES

Rango de temperatura de funcionamiento -0 °C a +40 °C (sin condensación atmosférica)
 Temperatura de almacenamiento -20 °C a +50 °C
 Rango de humedad de funcionamiento Sin condensación
 Condiciones de luminosidad Todas las condiciones interiores y exteriores en todo el alcance del escáner láser (sin limitaciones de luminosidad)
 Clase de protección IP54



Figura A.1: Ficha técnica del láser escáner Trimble TX6

Resultados estadísticos de las uniones de puntos

En este anexo se muestran los datos de los resultados obtenidos mediante el software Leica Cyclone para cada una de las uniones entre estacionamientos. En estos datos se incluyen el número de iteraciones realizado, el número de puntos comunes encontrados, el error medio, además de la traslación y rotación que han sufrido los escaneos. Existen un total de 91 combinaciones de estacionamientos. Finalmente, se muestran los datos de los 14 escaneos individualmente.

```
Cloud/Mesh 1 [Fsupv2019_Station 001_scan 01.ptx : Fsupv2019_Station 002_scan 01.ptx]
Objective Function value: 4.84209e-06 sq m
Iterations: 63
Overlap Point Count: 2301066
Overlap Error Statistics
  RMS: 0.00386595 m
  AVG: 0.00199692 m
  MIN: 9.64794e-09 m
  MAX: 0.0874012 m
Overlap Center: (-0.236, -2.537, 1.545) m
Error after global registration: 1.33136e-07 sq m
Translation: (-1.910, -3.783, -0.001) m
Rotation: (0.0330, -0.0289, -0.9990):27.333 deg
```

```
Cloud/Mesh 2 [Fsupv2019_Station 002_Scan 01.ptx : Fsupv2019_Station 003_Scan 01.ptx]
Objective Function Value: 4.90213e-06 sq m
Iterations: 56
Overlap Point Count: 2492133
Overlap Error Statistics
  RMS: 0.00370615 m
  AVG: 0.0018388 m
  MIN: 5.15353e-08 m
  MAX: 0.0958701 m
Overlap Center: (0.575, -1.675, 1.724) m
Error after global registration: 6.04769e-08 sq m
Translation: (0.247, -3.599, 0.083) m
Rotation: (0.1545, 0.1243, 0.9801):-15.187 deg
```

```
Cloud/Mesh 3 [Fsupv2019_Station 003_Scan 01.ptx : Fsupv2019_Station 004_Scan 01.ptx]
Objective Function Value: 5.3314e-06 sq m
Iterations: 42
Overlap Point Count: 2512200
Overlap Error Statistics
  RMS: 0.00407886 m
  AVG: 0.00197036 m
  MIN: 3.66435e-08 m
  MAX: 0.0876993 m
Overlap Center: (1.069, -1.919, 1.337) m
Error after global registration: 2.54573e-07 sq m
Translation: (1.476, -4.531, -0.173) m
Rotation: (0.2214, 0.5380, 0.8134):4.497 deg
```

```
Cloud/Mesh 4 [Fsupv2019_Station 004_Scan 01.ptx : Fsupv2019_Station 005_Scan 01.ptx]
Objective Function Value: 7.88096e-06 sq m
Iterations: 34
Overlap Point Count: 2004366
Overlap Error Statistics
  RMS: 0.00580777 m
  AVG: 0.0025793 m
  MIN: 3.18268e-09 m
  MAX: 0.0940817 m
Overlap Center: (3.527, 1.420, 2.314) m
Error after global registration: 1.53117e-07 sq m
Translation: (8.970, 1.802, 0.023) m
Rotation: (0.0003, 0.0000, -1.0000):159.502 deg
```

```
Cloud/Mesh 5 [Fsupv2019_Station 005_Scan 01.ptx : Fsupv2019_Station 006_Scan 01.ptx]
Objective Function Value: 9.16604e-06 sq m
Iterations: 87
Overlap Point Count: 2113166
Overlap Error Statistics
  RMS: 0.004345 m
  AVG: 0.0024741 m
  MIN: 8.12853e-08 m
  MAX: 0.0860241 m
Overlap Center: (0.036, -3.029, 1.846) m
Error after global registration: 4.18687e-07 sq m
Translation: (-0.784, -5.393, 0.021) m
Rotation: (0.0000, 0.0004, 1.0000):104.674 deg
```

Cloud/Mesh 6 [Fsupv2019_station 006_scan 01.ptx : Fsupv2019_station 007_scan 01.ptx]
Objective Function Value: 6.51888e-06 sq m
Iterations: 78
Overlap Point Count: 2184500
Overlap Error Statistics
RMS: 0.00403746 m
AVG: 0.00220654 m
MIN: 1.06194e-07 m
MAX: 0.0890237 m
Overlap Center: (-2.438, 0.445, 1.818) m
Error after global registration: 1.95246e-07 sq m
Translation: (-4.237, 1.849, -0.021) m
Rotation: (-0.0003, 0.0002, 1.0000):137.480 deg

Cloud/Mesh 7 [Fsupv2019_station 007_scan 01.ptx : Fsupv2019_station 008_scan 01.ptx]
Objective Function Value: 5.48639e-06 sq m
Iterations: 44
Overlap Point Count: 2293200
Overlap Error Statistics
RMS: 0.00415966 m
AVG: 0.00192989 m
MIN: 3.53792e-08 m
MAX: 0.0981423 m
Overlap Center: (0.971, 1.518, 1.818) m
Error after global registration: 9.48763e-08 sq m
Translation: (2.665, 1.954, -0.010) m
Rotation: (-0.0011, -0.0023, 1.0000):-19.447 deg

Cloud/Mesh 8 [Fsupv2019_station 008_scan 01.ptx : Fsupv2019_station 009_scan 01.ptx]
Objective Function Value: 4.27863e-06 sq m
Iterations: 73
Overlap Point Count: 2188733
Overlap Error Statistics
RMS: 0.00435826 m
AVG: 0.00193584 m
MIN: 3.49888e-08 m
MAX: 0.0924009 m
Overlap Center: (-1.725, 2.220, 1.969) m
Error after global registration: 7.34369e-08 sq m
Translation: (-2.132, 3.892, -0.027) m
Rotation: (0.0011, -0.0006, -1.0000):43.867 deg

Cloud/Mesh 9 [Fsupv2019_station 009_scan 01.ptx : Fsupv2019_station 010_scan 01.ptx]
Objective Function Value: 7.49891e-06 sq m
Iterations: 63
Overlap Point Count: 1683633
Overlap Error Statistics
RMS: 0.00488906 m
AVG: 0.00223309 m
MIN: 4.23077e-09 m
MAX: 0.0916973 m
Overlap Center: (-0.310, -1.795, 2.794) m
Error after global registration: 2.33765e-08 sq m
Translation: (-0.165, -4.275, 0.014) m
Rotation: (0.0007, -0.0007, -1.0000):-59.796 deg

```
Cloud/Mesh 10 [Fsupv2019_Station 010_Scan 01.ptx : Fsupv2019_Station 011_Scan 01.ptx]
Objective Function Value: 7.07819e-06 sq m
Iterations: 57
Overlap Point Count: 2017233
Overlap Error Statistics
  RMS: 0.00394151 m
  AVG: 0.00188902 m
  MIN: 4.04569e-08 m
  MAX: 0.0973807 m
Overlap Center: (-0.480, 0.068, 1.548) m
Error after global registration: 6.58376e-09 sq m
Translation: (-1.174, -0.536, 0.004) m
Rotation: (-0.0020, -0.0120, 0.9999):3.556 deg
```

```
Cloud/Mesh 11 [Fsupv2019_Station 011_Scan 01.ptx : Fsupv2019_Station 012_Scan 01.ptx]
Objective Function Value: 8.63242e-06 sq m
Iterations: 31
Overlap Point Count: 1787000
Overlap Error Statistics
  RMS: 0.00570718 m
  AVG: 0.00257116 m
  MIN: 2.41087e-09 m
  MAX: 0.0927924 m
Overlap Center: (-0.943, -0.846, 3.276) m
Error after global registration: 1.76444e-08 sq m
Translation: (-2.397, -1.505, 0.021) m
Rotation: (0.0358, -0.0108, -0.9993):-32.098 deg
```

```
Cloud/Mesh 12 [Fsupv2019_Station 012_Scan 01.ptx : Fsupv2019_Station 013_Scan 01.ptx]
Objective Function Value: 5.37341e-06 sq m
Iterations: 59
Overlap Point Count: 2189066
Overlap Error Statistics
  RMS: 0.0039311 m
  AVG: 0.00196869 m
  MIN: 8.47722e-09 m
  MAX: 0.0873432 m
Overlap Center: (-0.542, 0.290, 2.057) m
Error after global registration: 1.68859e-08 sq m
Translation: (-1.212, 0.471, -0.010) m
Rotation: (-0.0087, 0.0168, -0.9998):-62.992 deg
```

```
Cloud/Mesh 13 [Fsupv2019_Station 013_Scan 01.ptx : Fsupv2019_Station 014_Scan 01.ptx]
Objective Function Value: 1.31244e-05 sq m
Iterations: 100
Overlap Point Count: 666233
Overlap Error Statistics
  RMS: 0.00496507 m
  AVG: 0.00253919 m
  MIN: 1.67895e-07 m
  MAX: 0.0882909 m
Overlap Center: (0.336, 0.531, 0.302) m
Error after global registration: 3.18771e-07 sq m
Translation: (-1.111, 3.237, -0.022) m
Rotation: (-0.0008, -0.0005, 1.0000):63.016 deg
```

Cloud/Mesh 14 [Fsupv2019_Station 001_scan 01.ptx : Fsupv2019_Station 003_scan 01.ptx]
Objective Function Value: 6.12909e-06 sq m
Iterations: 39
Overlap Point Count: 2073100
Overlap Error Statistics
RMS: 0.00489187 m
AVG: 0.00240835 m
MIN: 6.42031e-08 m
MAX: 0.0922342 m
Overlap Center: (-0.918, -4.100, 1.910) m
Error after global registration: 2.34052e-07 sq m
Translation: (-3.342, -7.095, 0.018) m
Rotation: (0.0417, 0.0468, 0.9980):-42.298 deg

Cloud/Mesh 15 [Fsupv2019_Station 001_scan 01.ptx : Fsupv2019_Station 004_scan 01.ptx]
Objective Function Value: 9.32059e-06 sq m
Iterations: 47
Overlap Point Count: 1483166
Overlap Error Statistics
RMS: 0.00643299 m
AVG: 0.00327408 m
MIN: 1.85121e-07 m
MAX: 0.096567 m
Overlap Center: (-1.799, -6.169, 2.922) m
Error after global registration: 2.0494e-07 sq m
Translation: (-5.291, -11.445, -0.021) m
Rotation: (-0.0006, -0.0004, 1.0000):-38.565 deg

Cloud/Mesh 16 [Fsupv2019_Station 001_scan 01.ptx : Fsupv2019_Station 005_scan 01.ptx]
Objective Function Value: 1.82507e-05 sq m
Iterations: 45
Overlap Point Count: 987666
Overlap Error Statistics
RMS: 0.00772111 m
AVG: 0.00406691 m
MIN: 9.52081e-08 m
MAX: 0.0951389 m
Overlap Center: (1.538, -5.518, 5.016) m
Error after global registration: 4.00478e-07 sq m
Translation: (2.846, -15.627, -0.003) m
Rotation: (-0.0002, -0.0002, 1.0000):161.933 deg

Cloud/Mesh 17 [Fsupv2019_Station 001_scan 01.ptx : Fsupv2019_Station 006_scan 01.ptx]
Objective Function Value: 9.2555e-06 sq m
Iterations: 41
Overlap Point Count: 1265133
Overlap Error Statistics
RMS: 0.0063318 m
AVG: 0.00318747 m
MIN: 8.6238e-08 m
MAX: 0.092874 m
Overlap Center: (1.979, -3.632, 4.321) m
Error after global registration: 1.50782e-07 sq m
Translation: (5.263, -10.745, 0.020) m
Rotation: (-0.0006, 0.0001, 1.0000):-93.391 deg

```
Cloud/Mesh 18 [Fsupv2019_Station 001_Scan 01.ptx : Fsupv2019_Station 007_Scan 01.ptx]
Objective Function Value: 6.4208e-06 sq m
Iterations: 37
Overlap Point Count: 1753633
Overlap Error Statistics
  RMS: 0.00590189 m
  AVG: 0.00262332 m
  MIN: 2.65384e-08 m
  MAX: 0.0970914 m
Overlap Center: (3.049, -2.219, 3.330) m
Error after global registration: 4.96764e-08 sq m
Translation: (7.359, -6.625, 0.004) m
Rotation: (0.0001, 0.0001, -1.0000):-44.089 deg
```

```
Cloud/Mesh 19 [Fsupv2019_Station 001_Scan 01.ptx : Fsupv2019_Station 008_Scan 01.ptx]
Objective Function Value: 5.58695e-06 sq m
Iterations: 40
Overlap Point Count: 1996400
Overlap Error Statistics
  RMS: 0.00500703 m
  AVG: 0.00229885 m
  MIN: 1.13076e-08 m
  MAX: 0.0963318 m
Overlap Center: (3.528, -1.332, 2.483) m
Error after global registration: 7.388e-08 sq m
Translation: (7.913, -3.368, -0.007) m
Rotation: (-0.0003, 0.0018, 1.0000):24.642 deg
```

```
Cloud/Mesh 20 [Fsupv2019_Station 001_Scan 01.ptx : Fsupv2019_Station 009_Scan 01.ptx]
Objective Function Value: 4.39064e-06 sq m
Iterations: 58
Overlap Point Count: 2384633
Overlap Error Statistics
  RMS: 0.00425613 m
  AVG: 0.0019416 m
  MIN: 9.21552e-09 m
  MAX: 0.091683 m
Overlap Center: (2.032, -0.318, 1.812) m
Error after global registration: 1.66134e-07 sq m
Translation: (4.354, -0.720, -0.031) m
Rotation: (0.0013, 0.0006, -1.0000):19.226 deg
```

```
Cloud/Mesh 21 [Fsupv2019_Station 001_Scan 01.ptx : Fsupv2019_Station 010_Scan 01.ptx]
Objective Function Value: 6.32448e-06 sq m
Iterations: 32
Overlap Point Count: 1598500
Overlap Error Statistics
  RMS: 0.00584502 m
  AVG: 0.00258869 m
  MIN: 7.83835e-08 m
  MAX: 0.0956275 m
Overlap Center: (1.645, -2.409, 3.352) m
Error after global registration: 1.27685e-07 sq m
Translation: (2.790, -4.701, -0.018) m
Rotation: (0.0000, -0.0012, -1.0000):-40.570 deg
```

Cloud/Mesh 22 [Fsupv2019_Station 001_Scan 01.ptx : Fsupv2019_Station 011_Scan 01.ptx]
Objective Function Value: 6.03849e-06 sq m
Iterations: 44
Overlap Point Count: 1969600
Overlap Error Statistics
RMS: 0.00510247 m
AVG: 0.00242118 m
MIN: 2.02746e-08 m
MAX: 0.0915025 m
Overlap Center: (1.239, -2.621, 2.467) m
Error after global registration: 1.67482e-07 sq m
Translation: (2.247, -5.873, -0.014) m
Rotation: (-0.0001, 0.0000, -1.0000):-44.125 deg

Cloud/Mesh 23 [Fsupv2019_Station 001_Scan 01.ptx : Fsupv2019_Station 012_Scan 01.ptx]
Objective Function Value: 1.11975e-05 sq m
Iterations: 25
Overlap Point Count: 1369633
Overlap Error Statistics
RMS: 0.00701916 m
AVG: 0.00320587 m
MIN: 2.84315e-08 m
MAX: 0.0978483 m
Overlap Center: (1.389, -3.708, 4.313) m
Error after global registration: 3.16777e-08 sq m
Translation: (1.574, -8.622, 0.007) m
Rotation: (-0.0165, -0.0016, 0.9999):76.210 deg

Cloud/Mesh 24 [Fsupv2019_Station 001_Scan 01.ptx : Fsupv2019_Station 013_Scan 01.ptx]
Objective Function Value: 1.02989e-05 sq m
Iterations: 24
Overlap Point Count: 1351100
Overlap Error Statistics
RMS: 0.0079917 m
AVG: 0.00360819 m
MIN: 6.82883e-08 m
MAX: 0.0980975 m
Overlap Center: (0.925, -4.639, 4.182) m
Error after global registration: 7.61721e-08 sq m
Translation: (0.827, -9.686, 0.003) m
Rotation: (0.0002, -0.0004, -1.0000):-139.184 deg

Cloud/Mesh 25 [Fsupv2019_Station 001_Scan 01.ptx : Fsupv2019_Station 014_Scan 01.ptx]
Objective Function Value: 1.27564e-05 sq m
Iterations: 48
Overlap Point Count: 1060300
Overlap Error Statistics
RMS: 0.00730894 m
AVG: 0.0038223 m
MIN: 3.43343e-07 m
MAX: 0.0961958 m
Overlap Center: (0.578, -5.434, 4.870) m
Error after global registration: 1.5297e-07 sq m
Translation: (-0.447, -12.861, -0.018) m
Rotation: (0.0000, 0.0001, -1.0000):157.798 deg

Cloud/Mesh 26 [Fsupv2019_Station 002_Scan 01.ptx : Fsupv2019_Station 004_Scan 01.ptx]
Objective Function Value: 5.63208e-06 sq m
Iterations: 32
Overlap Point Count: 2158533
Overlap Error Statistics
RMS: 0.0047434 m
AVG: 0.00228673 m
MIN: 1.28057e-07 m
MAX: 0.0845257 m
Overlap Center: (0.843, -3.959, 1.997) m
Error after global registration: 2.78627e-07 sq m
Translation: (0.512, -8.359, 0.130) m
Rotation: (0.0967, -0.0408, 0.9945):-11.319 deg

Cloud/Mesh 27 [Fsupv2019_Station 002_Scan 01.ptx : Fsupv2019_Station 005_Scan 01.ptx]
Objective Function Value: 1.14929e-05 sq m
Iterations: 40
Overlap Point Count: 1219133
Overlap Error Statistics
RMS: 0.00642527 m
AVG: 0.00313834 m
MIN: 1.06163e-07 m
MAX: 0.0983979 m
Overlap Center: (4.379, -2.658, 4.181) m
Error after global registration: 2.68099e-07 sq m
Translation: (9.660, -8.342, 0.060) m
Rotation: (0.0054, 0.0087, 0.9999):-170.760 deg

Cloud/Mesh 28 [Fsupv2019_Station 002_Scan 01.ptx : Fsupv2019_Station 006_Scan 01.ptx]
Objective Function Value: 8.47641e-06 sq m
Iterations: 25
Overlap Point Count: 1500866
Overlap Error Statistics
RMS: 0.00629731 m
AVG: 0.00282581 m
MIN: 1.34301e-07 m
MAX: 0.0996761 m
Overlap Center: (4.211, -0.813, 3.955) m
Error after global registration: 1.62632e-07 sq m
Translation: (9.568, -2.895, -0.016) m
Rotation: (0.0182, 0.0019, 0.9998):-66.093 deg

Cloud/Mesh 29 [Fsupv2019_Station 002_Scan 01.ptx : Fsupv2019_Station 007_Scan 01.ptx]
Objective Function Value: 5.77183e-06 sq m
Iterations: 35
Overlap Point Count: 1723133
Overlap Error Statistics
RMS: 0.005117 m
AVG: 0.00237069 m
MIN: 3.34338e-08 m
MAX: 0.0923043 m
Overlap Center: (4.656, 0.893, 3.030) m
Error after global registration: 3.63477e-08 sq m
Translation: (9.539, 1.725, -0.118) m
Rotation: (0.0082, -0.0158, -0.9998):-71.404 deg

Cloud/Mesh 30 [Fsupv2019_Station 002_Scan 01.ptx : Fsupv2019_Station 008_Scan 01.ptx]
Objective Function Value: 6.61813e-06 sq m
Iterations: 29
Overlap Point Count: 1454066
Overlap Error Statistics
RMS: 0.00637813 m
AVG: 0.00274249 m
MIN: 5.33799e-08 m
MAX: 0.0976998 m
Overlap Center: (4.237, 2.133, 3.806) m
Error after global registration: 5.11371e-08 sq m
Translation: (8.537, 4.874, -0.178) m
Rotation: (-0.0145, 0.0200, 0.9997):51.962 deg

Cloud/Mesh 31 [Fsupv2019_Station 002_Scan 01.ptx : Fsupv2019_Station 009_Scan 01.ptx]
Objective Function Value: 4.97337e-06 sq m
Iterations: 59
Overlap Point Count: 2004533
Overlap Error Statistics
RMS: 0.00478596 m
AVG: 0.00214481 m
MIN: 3.96578e-08 m
MAX: 0.0962897 m
Overlap Center: (2.428, 2.531, 2.038) m
Error after global registration: 2.12086e-07 sq m
Translation: (4.159, 5.594, -0.173) m
Rotation: (-0.1217, 0.0784, 0.9895):8.168 deg

Cloud/Mesh 32 [Fsupv2019_Station 002_Scan 01.ptx : Fsupv2019_Station 010_Scan 01.ptx]
Objective Function Value: 5.53356e-06 sq m
Iterations: 52
Overlap Point Count: 2183666
Overlap Error Statistics
RMS: 0.00539312 m
AVG: 0.0023433 m
MIN: 1.14828e-08 m
MAX: 0.0953618 m
Overlap Center: (2.294, 0.528, 2.065) m
Error after global registration: 4.22285e-08 sq m
Translation: (4.597, 1.339, -0.086) m
Rotation: (0.0092, -0.0170, -0.9998):-67.886 deg

Cloud/Mesh 33 [Fsupv2019_Station 002_Scan 01.ptx : Fsupv2019_Station 011_Scan 01.ptx]
Objective Function Value: 5.2861e-06 sq m
Iterations: 40
Overlap Point Count: 2207800
Overlap Error Statistics
RMS: 0.00479748 m
AVG: 0.00220999 m
MIN: 7.70936e-08 m
MAX: 0.0987929 m
Overlap Center: (2.385, 0.192, 2.037) m
Error after global registration: 9.58056e-08 sq m
Translation: (4.652, 0.049, -0.058) m
Rotation: (0.0080, -0.0159, -0.9998):-71.441 deg

```
Cloud/Mesh 34 [Fsupv2019_Station 002_Scan 01.ptx : Fsupv2019_Station 012_Scan 01.ptx]
Objective Function Value: 6.55922e-06 sq m
Iterations: 49
Overlap Point Count: 1667966
Overlap Error Statistics
  RMS: 0.00553932 m
  AVG: 0.00258598 m
  MIN: 1.97412e-07 m
  MAX: 0.0927275 m
Overlap Center: (2.956, -1.178, 3.046) m
Error after global registration: 4.81345e-08 sq m
Translation: (5.315, -2.701, 0.007) m
Rotation: (-0.0149, 0.0088, 0.9999):103.530 deg
```

```
Cloud/Mesh 35 [Fsupv2019_Station 002_Scan 01.ptx : Fsupv2019_Station 013_Scan 01.ptx]
Objective Function Value: 6.08793e-06 sq m
Iterations: 47
Overlap Point Count: 1964733
Overlap Error Statistics
  RMS: 0.00499413 m
  AVG: 0.00241717 m
  MIN: 1.58319e-08 m
  MAX: 0.0870675 m
Overlap Center: (2.672, -1.536, 2.260) m
Error after global registration: 1.3371e-07 sq m
Translation: (5.140, -3.990, 0.028) m
Rotation: (-0.0033, -0.0102, -0.9999):-166.493 deg
```

```
Cloud/Mesh 36 [Fsupv2019_Station 002_Scan 01.ptx : Fsupv2019_Station 014_Scan 01.ptx]
Objective Function Value: 8.41662e-06 sq m
Iterations: 30
Overlap Point Count: 1258833
Overlap Error Statistics
  RMS: 0.0068766 m
  AVG: 0.00309579 m
  MIN: 5.09623e-08 m
  MAX: 0.0982273 m
Overlap Center: (3.566, -3.143, 4.379) m
Error after global registration: 9.22816e-08 sq m
Translation: (5.465, -7.395, 0.069) m
Rotation: (-0.0091, -0.0069, -0.9999):130.494 deg
```

```
Cloud/Mesh 37 [Fsupv2019_Station 003_Scan 01.ptx : Fsupv2019_Station 005_Scan 01.ptx]
Objective Function Value: 8.09121e-06 sq m
Iterations: 40
Overlap Point Count: 1356300
Overlap Error Statistics
  RMS: 0.00635095 m
  AVG: 0.00295725 m
  MIN: 2.16237e-07 m
  MAX: 0.0952094 m
Overlap Center: (4.295, -0.236, 3.627) m
Error after global registration: 1.38427e-07 sq m
Translation: (10.306, -2.157, -0.492) m
Rotation: (-0.0194, 0.0126, -0.9997):155.850 deg
```

Cloud/Mesh 38 [Fsupv2019_Station 003_Scan 01.ptx : Fsupv2019_Station 006_Scan 01.ptx]
Objective Function Value: 6.79111e-06 sq m
Iterations: 33
Overlap Point Count: 1808700
Overlap Error Statistics
RMS: 0.00545907 m
AVG: 0.00263073 m
MIN: 1.02663e-07 m
MAX: 0.0909013 m
Overlap Center: (4.034, 1.712, 2.748) m
Error after global registration: 9.20448e-09 sq m
Translation: (8.819, 3.082, -0.322) m
Rotation: (-0.0036, 0.0522, -0.9986):51.231 deg

Cloud/Mesh 39 [Fsupv2019_Station 003_Scan 01.ptx : Fsupv2019_Station 007_Scan 01.ptx]
Objective Function Value: 7.37048e-06 sq m
Iterations: 32
Overlap Point Count: 1327133
Overlap Error Statistics
RMS: 0.00578327 m
AVG: 0.00270278 m
MIN: 1.53284e-08 m
MAX: 0.0871173 m
Overlap Center: (3.608, 3.615, 4.117) m
Error after global registration: 2.33436e-07 sq m
Translation: (7.604, 7.540, -0.218) m
Rotation: (0.0296, 0.0147, 0.9995):86.342 deg

Cloud/Mesh 40 [Fsupv2019_Station 003_Scan 01.ptx : Fsupv2019_Station 008_Scan 01.ptx]
Objective Function Value: 6.61363e-06 sq m
Iterations: 40
Overlap Point Count: 1372366
Overlap Error Statistics
RMS: 0.0059881 m
AVG: 0.00269941 m
MIN: 4.39617e-08 m
MAX: 0.0931382 m
Overlap Center: (3.176, 4.758, 3.801) m
Error after global registration: 5.43354e-08 sq m
Translation: (5.827, 10.324, -0.109) m
Rotation: (-0.0328, -0.0248, -0.9992):-66.910 deg

Cloud/Mesh 41 [Fsupv2019_Station 003_Scan 01.ptx : Fsupv2019_Station 009_Scan 01.ptx]
Objective Function Value: 5.98382e-06 sq m
Iterations: 55
Overlap Point Count: 1409800
Overlap Error Statistics
RMS: 0.00498482 m
AVG: 0.00240637 m
MIN: 1.48129e-08 m
MAX: 0.0847987 m
Overlap Center: (1.186, 4.811, 3.400) m
Error after global registration: 5.71376e-08 sq m
Translation: (1.414, 9.892, 0.048) m
Rotation: (-0.0605, -0.0966, -0.9935):-23.144 deg

```
Cloud/Mesh 42 [Fsupv2019_Station 003_Scan 01.ptx : Fsupv2019_Station 010_Scan 01.ptx]
Objective Function Value: 5.71767e-06 sq m
Iterations: 52
Overlap Point Count: 1964700
Overlap Error Statistics
  RMS: 0.00516681 m
  AVG: 0.00236233 m
  MIN: 1.35358e-08 m
  MAX: 0.0979588 m
Overlap Center: (1.743, 2.890, 2.215) m
Error after global registration: 4.62751e-08 sq m
Translation: (2.930, 5.893, -0.067) m
Rotation: (0.0299, 0.0166, 0.9994):86.826 deg
```

```
Cloud/Mesh 43 [Fsupv2019_Station 003_Scan 01.ptx : Fsupv2019_Station 011_Scan 01.ptx]
Objective Function Value: 5.91303e-06 sq m
Iterations: 48
Overlap Point Count: 1796733
Overlap Error Statistics
  RMS: 0.00552223 m
  AVG: 0.00245192 m
  MIN: 1.7308e-09 m
  MAX: 0.0966953 m
Overlap Center: (1.752, 2.676, 2.592) m
Error after global registration: 3.96798e-08 sq m
Translation: (3.314, 4.661, -0.098) m
Rotation: (0.0297, 0.0147, 0.9995):86.379 deg
```

```
Cloud/Mesh 44 [Fsupv2019_Station 003_Scan 01.ptx : Fsupv2019_Station 012_Scan 01.ptx]
Objective Function Value: 6.03667e-06 sq m
Iterations: 58
Overlap Point Count: 2168266
Overlap Error Statistics
  RMS: 0.00520176 m
  AVG: 0.0023913 m
  MIN: 2.08755e-08 m
  MAX: 0.0903236 m
Overlap Center: (2.319, 1.199, 1.888) m
Error after global registration: 6.86083e-08 sq m
Translation: (4.663, 2.174, -0.174) m
Rotation: (-0.0152, 0.0007, -0.9999):-118.423 deg
```

```
Cloud/Mesh 45 [Fsupv2019_Station 003_Scan 01.ptx : Fsupv2019_Station 013_Scan 01.ptx]
Objective Function Value: 5.78036e-06 sq m
Iterations: 52
Overlap Point Count: 2210033
Overlap Error Statistics
  RMS: 0.00519229 m
  AVG: 0.00237212 m
  MIN: 5.36953e-08 m
  MAX: 0.0941444 m
Overlap Center: (2.298, 0.893, 1.893) m
Error after global registration: 9.16776e-08 sq m
Translation: (4.825, 0.884, -0.206) m
Rotation: (0.0207, -0.0079, 0.9998):-178.592 deg
```

Cloud/Mesh 46 [Fsupv2019_Station 003_Scan 01.ptx : Fsupv2019_Station 014_Scan 01.ptx]
Objective Function Value: 6.5306e-06 sq m
Iterations: 40
Overlap Point Count: 1842366
Overlap Error Statistics
RMS: 0.00566567 m
AVG: 0.00257006 m
MIN: 3.84498e-08 m
MAX: 0.097822 m
Overlap Center: (3.006, -0.755, 2.340) m
Error after global registration: 1.23618e-07 sq m
Translation: (6.012, -2.323, -0.327) m
Rotation: (0.0162, -0.0213, 0.9996):-115.595 deg

Cloud/Mesh 47 [Fsupv2019_Station 004_Scan 01.ptx : Fsupv2019_Station 006_Scan 01.ptx]
Objective Function Value: 8.71735e-06 sq m
Iterations: 47
Overlap Point Count: 1388866
Overlap Error Statistics
RMS: 0.00559574 m
AVG: 0.00278831 m
MIN: 6.34062e-08 m
MAX: 0.0856941 m
Overlap Center: (2.704, 3.380, 3.612) m
Error after global registration: 1.26542e-07 sq m
Translation: (7.816, 7.127, 0.042) m
Rotation: (0.0008, -0.0005, -1.0000):54.829 deg

Cloud/Mesh 48 [Fsupv2019_Station 004_Scan 01.ptx : Fsupv2019_Station 007_Scan 01.ptx]
Objective Function Value: 9.68147e-06 sq m
Iterations: 60
Overlap Point Count: 1170266
Overlap Error Statistics
RMS: 0.00590231 m
AVG: 0.00304015 m
MIN: 7.74391e-08 m
MAX: 0.0897998 m
Overlap Center: (2.068, 5.004, 4.201) m
Error after global registration: 1.89698e-07 sq m
Translation: (6.886, 11.654, 0.022) m
Rotation: (-0.0005, -0.0001, 1.0000):82.652 deg

Cloud/Mesh 49 [Fsupv2019_Station 004_Scan 01.ptx : Fsupv2019_Station 008_Scan 01.ptx]
Objective Function Value: 1.12284e-05 sq m
Iterations: 61
Overlap Point Count: 1063633
Overlap Error Statistics
RMS: 0.0066157 m
AVG: 0.00334918 m
MIN: 1.57812e-08 m
MAX: 0.0952561 m
Overlap Center: (1.874, 5.929, 4.637) m
Error after global registration: 3.91577e-07 sq m
Translation: (5.289, 14.546, 0.010) m
Rotation: (0.0009, -0.0006, -1.0000):-63.205 deg

```
Cloud/Mesh 50 [Fsupv2019_Station 004_Scan 01.ptx : Fsupv2019_Station 009_Scan 01.ptx]
Objective Function Value: 1.0591e-05 sq m
Iterations: 63
Overlap Point Count: 1103533
Overlap Error Statistics
  RMS: 0.00617006 m
  AVG: 0.00316327 m
  MIN: 2.50887e-07 m
  MAX: 0.0822105 m
Overlap Center: (0.345, 6.830, 4.257) m
Error after global registration: 3.63226e-07 sq m
Translation: (0.854, 14.397, -0.015) m
Rotation: (0.0005, -0.0006, -1.0000):-19.339 deg
```

```
Cloud/Mesh 51 [Fsupv2019_Station 004_Scan 01.ptx : Fsupv2019_Station 010_Scan 01.ptx]
Objective Function Value: 9.31987e-06 sq m
Iterations: 44
Overlap Point Count: 1381400
Overlap Error Statistics
  RMS: 0.00683254 m
  AVG: 0.003217 m
  MIN: 1.19331e-08 m
  MAX: 0.0977112 m
Overlap Center: (0.766, 5.053, 3.751) m
Error after global registration: 8.38834e-08 sq m
Translation: (2.113, 10.309, 0.000) m
Rotation: (-0.0006, 0.0006, 1.0000):79.133 deg
```

```
Cloud/Mesh 52 [Fsupv2019_Station 004_Scan 01.ptx : Fsupv2019_Station 011_Scan 01.ptx]
Objective Function Value: 1.05717e-05 sq m
Iterations: 40
Overlap Point Count: 1240733
Overlap Error Statistics
  RMS: 0.00648012 m
  AVG: 0.00312879 m
  MIN: 1.46402e-08 m
  MAX: 0.0967145 m
Overlap Center: (1.111, 4.951, 4.213) m
Error after global registration: 3.06641e-07 sq m
Translation: (2.418, 9.055, 0.006) m
Rotation: (-0.0003, 0.0001, 1.0000):82.688 deg
```

```
Cloud/Mesh 53 [Fsupv2019_Station 004_Scan 01.ptx : Fsupv2019_Station 012_Scan 01.ptx]
Objective Function Value: 7.41184e-06 sq m
Iterations: 62
Overlap Point Count: 1764733
Overlap Error Statistics
  RMS: 0.00500552 m
  AVG: 0.00260225 m
  MIN: 1.13487e-08 m
  MAX: 0.0949324 m
Overlap Center: (1.315, 3.301, 2.434) m
Error after global registration: 1.24619e-07 sq m
Translation: (3.607, 6.487, 0.027) m
Rotation: (0.0114, 0.0051, -0.9999):-114.770 deg
```

Cloud/Mesh 54 [Fsupv2019_Station 004_Scan 01.ptx : Fsupv2019_Station 013_Scan 01.ptx]
Objective Function Value: 6.58376e-06 sq m
Iterations: 53
Overlap Point Count: 1546866
Overlap Error Statistics
RMS: 0.00545983 m
AVG: 0.00259668 m
MIN: 3.95889e-08 m
MAX: 0.0945444 m
Overlap Center: (1.576, 3.471, 2.927) m
Error after global registration: 3.92843e-08 sq m
Translation: (3.687, 5.189, 0.023) m
Rotation: (-0.0006, 0.0005, 1.0000):177.749 deg

Cloud/Mesh 55 [Fsupv2019_Station 004_Scan 01.ptx : Fsupv2019_Station 014_Scan 01.ptx]
Objective Function Value: 5.49164e-06 sq m
Iterations: 49
Overlap Point Count: 2257400
Overlap Error Statistics
RMS: 0.00473414 m
AVG: 0.00225474 m
MIN: 9.82369e-09 m
MAX: 0.0901612 m
Overlap Center: (1.950, 1.712, 1.424) m
Error after global registration: 3.96066e-07 sq m
Translation: (4.670, 1.912, 0.005) m
Rotation: (-0.0001, 0.0003, 1.0000):-119.236 deg

Cloud/Mesh 56 [Fsupv2019_Station 005_Scan 01.ptx : Fsupv2019_Station 007_Scan 01.ptx]
Objective Function Value: 8.81571e-06 sq m
Iterations: 27
Overlap Point Count: 1743666
Overlap Error Statistics
RMS: 0.00577487 m
AVG: 0.00296684 m
MIN: 7.02719e-08 m
MAX: 0.0917177 m
Overlap Center: (0.002, -5.353, 3.347) m
Error after global registration: 1.66406e-07 sq m
Translation: (-1.499, -9.959, 0.003) m
Rotation: (-0.0001, -0.0001, 1.0000):-117.846 deg

Cloud/Mesh 57 [Fsupv2019_Station 005_Scan 01.ptx : Fsupv2019_Station 008_Scan 01.ptx]
Objective Function Value: 1.00406e-05 sq m
Iterations: 38
Overlap Point Count: 1428600
Overlap Error Statistics
RMS: 0.00693196 m
AVG: 0.00341617 m
MIN: 3.7713e-08 m
MAX: 0.0964326 m
Overlap Center: (0.353, -7.075, 4.122) m
Error after global registration: 7.17172e-08 sq m
Translation: (-1.016, -13.228, -0.008) m
Rotation: (0.0006, 0.0002, -1.0000):137.292 deg

```
Cloud/Mesh 58 [Fsupv2019_Station 005_Scan 01.ptx : Fsupv2019_Station 009_Scan 01.ptx]
Objective Function Value: 1.27405e-05 sq m
Iterations: 41
Overlap Point Count: 1084600
Overlap Error Statistics
  RMS: 0.00719903 m
  AVG: 0.00362874 m
  MIN: 9.03603e-09 m
  MAX: 0.0918182 m
Overlap Center: (2.181, -7.688, 4.861) m
Error after global registration: 6.77351e-08 sq m
Translation: (3.191, -14.640, -0.033) m
Rotation: (0.0003, -0.0001, -1.0000):-178.841 deg
```

```
Cloud/Mesh 59 [Fsupv2019_Station 005_Scan 01.ptx : Fsupv2019_Station 010_Scan 01.ptx]
Objective Function Value: 1.11266e-05 sq m
Iterations: 44
Overlap Point Count: 1435100
Overlap Error Statistics
  RMS: 0.00732367 m
  AVG: 0.00351385 m
  MIN: 8.37898e-08 m
  MAX: 0.0955304 m
Overlap Center: (1.892, -5.843, 4.021) m
Error after global registration: 5.59776e-08 sq m
Translation: (3.442, -10.370, -0.019) m
Rotation: (-0.0007, -0.0001, 1.0000):-121.364 deg
```

```
Cloud/Mesh 60 [Fsupv2019_Station 005_Scan 01.ptx : Fsupv2019_Station 011_Scan 01.ptx]
Objective Function Value: 8.84287e-06 sq m
Iterations: 38
Overlap Point Count: 1414000
Overlap Error Statistics
  RMS: 0.00635459 m
  AVG: 0.00313383 m
  MIN: 7.15393e-08 m
  MAX: 0.0955071 m
Overlap Center: (1.755, -4.874, 3.901) m
Error after global registration: 1.24826e-07 sq m
Translation: (3.595, -9.089, -0.014) m
Rotation: (-0.0002, 0.0000, 1.0000):-117.808 deg
```

```
Cloud/Mesh 61 [Fsupv2019_Station 005_Scan 01.ptx : Fsupv2019_Station 012_Scan 01.ptx]
Objective Function Value: 7.56745e-06 sq m
Iterations: 38
Overlap Point Count: 1950700
Overlap Error Statistics
  RMS: 0.00590836 m
  AVG: 0.00287521 m
  MIN: 4.08107e-08 m
  MAX: 0.0944349 m
Overlap Center: (1.782, -3.710, 2.574) m
Error after global registration: 8.39017e-08 sq m
Translation: (3.383, -6.267, 0.008) m
Rotation: (-0.0035, 0.0145, -0.9999):85.737 deg
```

Cloud/Mesh 62 [Fsupv2019_Station 005_scan 01.ptx : Fsupv2019_Station 013_scan 01.ptx]
Objective Function Value: 6.80151e-06 sq m
Iterations: 62
Overlap Point Count: 1824766
Overlap Error Statistics
RMS: 0.00517776 m
AVG: 0.00260798 m
MIN: 2.84693e-08 m
MAX: 0.0958782 m
Overlap Center: (1.718, -2.997, 2.537) m
Error after global registration: 6.11413e-08 sq m
Translation: (3.762, -5.023, 0.004) m
Rotation: (-0.0026, -0.0007, 1.0000):-22.749 deg

Cloud/Mesh 63 [Fsupv2019_Station 005_scan 01.ptx : Fsupv2019_Station 014_scan 01.ptx]
Objective Function Value: 5.69234e-06 sq m
Iterations: 53
Overlap Point Count: 2213766
Overlap Error Statistics
RMS: 0.00489405 m
AVG: 0.00232548 m
MIN: 7.05556e-08 m
MAX: 0.0841622 m
Overlap Center: (2.175, -1.788, 1.773) m
Error after global registration: 1.17011e-07 sq m
Translation: (3.989, -1.609, -0.014) m
Rotation: (0.0001, 0.0008, -1.0000):-40.267 deg

Cloud/Mesh 64 [Fsupv2019_Station 006_scan 01.ptx : Fsupv2019_Station 008_scan 01.ptx]
Objective Function Value: 6.57363e-06 sq m
Iterations: 37
Overlap Point Count: 1982366
Overlap Error Statistics
RMS: 0.00510041 m
AVG: 0.00254564 m
MIN: 1.1446e-07 m
MAX: 0.084568 m
Overlap Center: (-3.953, 0.598, 2.555) m
Error after global registration: 2.20459e-07 sq m
Translation: (-7.522, 2.209, -0.033) m
Rotation: (0.0008, -0.0005, -1.0000):-118.034 deg

Cloud/Mesh 65 [Fsupv2019_Station 006_scan 01.ptx : Fsupv2019_Station 009_scan 01.ptx]
Objective Function Value: 7.52527e-06 sq m
Iterations: 41
Overlap Point Count: 1586833
Overlap Error Statistics
RMS: 0.00613699 m
AVG: 0.00289859 m
MIN: 1.6803e-07 m
MAX: 0.0986582 m
Overlap Center: (-5.202, -1.157, 3.491) m
Error after global registration: 9.92763e-08 sq m
Translation: (-9.954, -1.502, -0.056) m
Rotation: (0.0006, -0.0006, -1.0000):-74.166 deg

```
Cloud/Mesh 66 [Fsupv2019_Station 006_Scan 01.ptx : Fsupv2019_Station 010_Scan 01.ptx]
Objective Function Value: 7.27516e-06 sq m
Iterations: 42
Overlap Point Count: 2023533
Overlap Error Statistics
  RMS: 0.00572611 m
  AVG: 0.00276734 m
  MIN: 4.86979e-08 m
  MAX: 0.0959252 m
Overlap Center: (-3.366, -1.447, 2.475) m
Error after global registration: 7.66146e-08 sq m
Translation: (-5.887, -2.827, -0.040) m
Rotation: (-0.0007, 0.0006, 1.0000):133.961 deg
```

```
Cloud/Mesh 67 [Fsupv2019_Station 006_Scan 01.ptx : Fsupv2019_Station 011_Scan 01.ptx]
Objective Function Value: 7.43574e-06 sq m
Iterations: 38
Overlap Point Count: 1941266
Overlap Error Statistics
  RMS: 0.00512865 m
  AVG: 0.00258904 m
  MIN: 5.39835e-09 m
  MAX: 0.0971967 m
Overlap Center: (-2.671, -1.493, 2.539) m
Error after global registration: 7.27929e-08 sq m
Translation: (-4.686, -3.300, -0.035) m
Rotation: (-0.0003, 0.0004, 1.0000):137.517 deg
```

```
Cloud/Mesh 68 [Fsupv2019_Station 006_Scan 01.ptx : Fsupv2019_Station 012_Scan 01.ptx]
Objective Function Value: 6.29217e-06 sq m
Iterations: 49
Overlap Point Count: 2173566
Overlap Error Statistics
  RMS: 0.00477862 m
  AVG: 0.00243595 m
  MIN: 1.17665e-08 m
  MAX: 0.0964102 m
Overlap Center: (-1.316, -2.008, 2.070) m
Error after global registration: 7.23384e-08 sq m
Translation: (-1.902, -3.810, -0.012) m
Rotation: (0.0066, 0.0077, -0.9999):-169.595 deg
```

```
Cloud/Mesh 69 [Fsupv2019_Station 006_Scan 01.ptx : Fsupv2019_Station 013_Scan 01.ptx]
Objective Function Value: 6.34349e-06 sq m
Iterations: 51
Overlap Point Count: 2180500
Overlap Error Statistics
  RMS: 0.0047454 m
  AVG: 0.00244246 m
  MIN: 1.28662e-07 m
  MAX: 0.0933115 m
Overlap Center: (-0.816, -2.304, 2.074) m
Error after global registration: 9.83999e-08 sq m
Translation: (-0.794, -4.492, -0.015) m
Rotation: (-0.0005, 0.0007, 1.0000):-127.423 deg
```

Cloud/Mesh 70 [Fsupv2019_Station 006_Scan 01.ptx : Fsupv2019_Station 014_Scan 01.ptx]
Objective Function Value: 7.06614e-06 sq m
Iterations: 41
Overlap Point Count: 1989833
Overlap Error Statistics
RMS: 0.00524831 m
AVG: 0.00266538 m
MIN: 4.93839e-08 m
MAX: 0.0973645 m
Overlap Center: (0.746, -2.871, 2.329) m
Error after global registration: 2.10524e-07 sq m
Translation: (2.451, -5.576, -0.032) m
Rotation: (0.0006, 0.0008, 1.0000):-64.407 deg

Cloud/Mesh 71 [Fsupv2019_Station 007_Scan 01.ptx : Fsupv2019_Station 009_Scan 01.ptx]
Objective Function Value: 5.06618e-06 sq m
Iterations: 24
Overlap Point Count: 2126900
Overlap Error Statistics
RMS: 0.00548915 m
AVG: 0.00226011 m
MIN: 1.69856e-08 m
MAX: 0.0960889 m
Overlap Center: (0.695, 3.649, 2.219) m
Error after global registration: 2.02508e-07 sq m
Translation: (1.950, 6.334, -0.034) m
Rotation: (-0.0007, -0.0002, 1.0000):-63.315 deg

Cloud/Mesh 72 [Fsupv2019_Station 007_Scan 01.ptx : Fsupv2019_Station 010_Scan 01.ptx]
Objective Function Value: 5.54691e-06 sq m
Iterations: 49
Overlap Point Count: 2184166
Overlap Error Statistics
RMS: 0.00511245 m
AVG: 0.00231949 m
MIN: 6.29859e-09 m
MAX: 0.0928119 m
Overlap Center: (-0.940, 2.568, 2.234) m
Error after global registration: 1.52773e-08 sq m
Translation: (-1.944, 4.561, -0.021) m
Rotation: (0.0071, 0.0132, -0.9999):3.519 deg

Cloud/Mesh 73 [Fsupv2019_Station 007_Scan 01.ptx : Fsupv2019_Station 011_Scan 01.ptx]
Objective Function Value: 5.46912e-06 sq m
Iterations: 52
Overlap Point Count: 2178000
Overlap Error Statistics
RMS: 0.00482733 m
AVG: 0.00227255 m
MIN: 5.83829e-08 m
MAX: 0.0968707 m
Overlap Center: (-1.519, 2.255, 2.124) m
Error after global registration: 5.45178e-08 sq m
Translation: (-3.148, 4.098, -0.017) m
Rotation: (0.4607, 0.0798, 0.8839):0.042 deg

Cloud/Mesh 74 [Fsupv2019_Station 007_Scan 01.ptx : Fsupv2019_Station 012_Scan 01.ptx]
Objective Function Value: 6.07084e-06 sq m
Iterations: 43
Overlap Point Count: 1916766
Overlap Error Statistics
RMS: 0.00491862 m
AVG: 0.00241315 m
MIN: 2.29557e-08 m
MAX: 0.0978403 m
Overlap Center: (-2.518, 1.299, 2.607) m
Error after global registration: 3.58523e-08 sq m
Translation: (-5.545, 2.591, 0.004) m
Rotation: (0.0352, -0.0107, -0.9993):-32.135 deg

Cloud/Mesh 75 [Fsupv2019_Station 007_Scan 01.ptx : Fsupv2019_Station 013_Scan 01.ptx]
Objective Function Value: 7.58104e-06 sq m
Iterations: 24
Overlap Point Count: 2015366
Overlap Error Statistics
RMS: 0.00595399 m
AVG: 0.00273608 m
MIN: 6.11872e-08 m
MAX: 0.0974217 m
Overlap Center: (-3.339, 1.333, 2.708) m
Error after global registration: 6.79093e-08 sq m
Translation: (-6.822, 2.346, 0.000) m
Rotation: (0.0001, 0.0006, 1.0000):95.096 deg

Cloud/Mesh 76 [Fsupv2019_Station 007_Scan 01.ptx : Fsupv2019_Station 014_Scan 01.ptx]
Objective Function Value: 8.20176e-06 sq m
Iterations: 26
Overlap Point Count: 1518600
Overlap Error Statistics
RMS: 0.00614424 m
AVG: 0.00293668 m
MIN: 1.98605e-07 m
MAX: 0.0959582 m
Overlap Center: (-4.371, 0.995, 3.915) m
Error after global registration: 5.47756e-09 sq m
Translation: (-9.946, 0.952, -0.020) m
Rotation: (0.0000, -0.0001, 1.0000):158.112 deg

Cloud/Mesh 77 [Fsupv2019_Station 008_Scan 01.ptx : Fsupv2019_Station 010_Scan 01.ptx]
Objective Function Value: 5.47342e-06 sq m
Iterations: 39
Overlap Point Count: 2031033
Overlap Error Statistics
RMS: 0.00571229 m
AVG: 0.0023832 m
MIN: 1.52295e-08 m
MAX: 0.0996634 m
Overlap Center: (-2.499, 0.317, 2.487) m
Error after global registration: 6.77887e-09 sq m
Translation: (-5.213, 0.924, -0.016) m
Rotation: (0.0001, -0.0002, -1.0000):-15.928 deg

Cloud/Mesh 78 [Fsupv2019_Station 008_scan 01.ptx : Fsupv2019_Station 011_scan 01.ptx]
Objective Function Value: 5.48388e-06 sq m
Iterations: 47
Overlap Point Count: 2030733
Overlap Error Statistics
RMS: 0.00491416 m
AVG: 0.00228553 m
MIN: 2.9376e-08 m
MAX: 0.0930782 m
Overlap Center: (-3.186, 0.014, 2.372) m
Error after global registration: 5.46241e-08 sq m
Translation: (-6.195, 0.086, -0.012) m
Rotation: (0.0001, 0.0020, -1.0000):-19.483 deg

Cloud/Mesh 79 [Fsupv2019_Station 008_scan 01.ptx : Fsupv2019_Station 012_scan 01.ptx]
Objective Function Value: 6.36008e-06 sq m
Iterations: 41
Overlap Point Count: 1673133
Overlap Error Statistics
RMS: 0.00563433 m
AVG: 0.0025757 m
MIN: 5.28912e-08 m
MAX: 0.0916594 m
Overlap Center: (-3.582, -0.914, 3.304) m
Error after global registration: 1.46068e-08 sq m
Translation: (-7.953, -2.132, 0.008) m
Rotation: (-0.0239, 0.0021, 0.9997):51.572 deg

Cloud/Mesh 80 [Fsupv2019_Station 008_scan 01.ptx : Fsupv2019_Station 013_scan 01.ptx]
Objective Function Value: 7.22643e-06 sq m
Iterations: 36
Overlap Point Count: 1587666
Overlap Error Statistics
RMS: 0.00598067 m
AVG: 0.00279845 m
MIN: 1.02867e-08 m
MAX: 0.0962138 m
Overlap Center: (-4.338, -1.292, 3.610) m
Error after global registration: 2.32718e-08 sq m
Translation: (-9.076, -2.789, 0.002) m
Rotation: (0.0006, -0.0003, -1.0000):-114.542 deg

Cloud/Mesh 81 [Fsupv2019_Station 008_scan 01.ptx : Fsupv2019_Station 014_scan 01.ptx]
Objective Function Value: 9.08569e-06 sq m
Iterations: 65
Overlap Point Count: 1185233
Overlap Error Statistics
RMS: 0.00656201 m
AVG: 0.00320801 m
MIN: 9.58098e-08 m
MAX: 0.0906133 m
Overlap Center: (-5.303, -1.807, 4.621) m
Error after global registration: 5.37988e-08 sq m
Translation: (-11.557, -5.143, -0.019) m
Rotation: (0.0004, 0.0000, -1.0000):-177.558 deg

Cloud/Mesh 82 [Fsupv2019_Station 009_Scan 01.ptx : Fsupv2019_Station 011_Scan 01.ptx]
Objective Function Value: 6.37475e-06 sq m
Iterations: 20
Overlap Point Count: 1764233
Overlap Error Statistics
RMS: 0.00593939 m
AVG: 0.00261331 m
MIN: 8.70836e-09 m
MAX: 0.097828 m
Overlap Center: (-0.119, -2.727, 3.059) m
Error after global registration: 2.93601e-08 sq m
Translation: (-0.292, -5.560, 0.020) m
Rotation: (0.0004, 0.0000, -1.0000):-63.351 deg

Cloud/Mesh 83 [Fsupv2019_Station 009_Scan 01.ptx : Fsupv2019_Station 012_Scan 01.ptx]
Objective Function Value: 9.57834e-06 sq m
Iterations: 22
Overlap Point Count: 1277233
Overlap Error Statistics
RMS: 0.00701435 m
AVG: 0.003096 m
MIN: 3.03369e-08 m
MAX: 0.0962514 m
Overlap Center: (0.180, -3.972, 4.660) m
Error after global registration: 3.16409e-09 sq m
Translation: (-0.022, -8.376, 0.042) m
Rotation: (-0.0138, -0.0036, 0.9999):95.433 deg

Cloud/Mesh 84 [Fsupv2019_Station 009_Scan 01.ptx : Fsupv2019_Station 013_Scan 01.ptx]
Objective Function Value: 8.31876e-06 sq m
Iterations: 32
Overlap Point Count: 1164866
Overlap Error Statistics
RMS: 0.00676348 m
AVG: 0.00315327 m
MIN: 5.11658e-09 m
MAX: 0.0914125 m
Overlap Center: (0.024, -4.912, 5.036) m
Error after global registration: 3.06161e-08 sq m
Translation: (-0.377, -9.627, 0.037) m
Rotation: (0.0005, -0.0005, -1.0000):-158.410 deg

Cloud/Mesh 85 [Fsupv2019_Station 009_Scan 01.ptx : Fsupv2019_Station 014_Scan 01.ptx]
Objective Function Value: 1.27771e-05 sq m
Iterations: 27
Overlap Point Count: 989766
Overlap Error Statistics
RMS: 0.00747691 m
AVG: 0.00362192 m
MIN: 1.49026e-07 m
MAX: 0.0932968 m
Overlap Center: (-0.260, -6.059, 5.725) m
Error after global registration: 1.57935e-07 sq m
Translation: (-0.534, -13.045, 0.019) m
Rotation: (0.0001, -0.0002, -1.0000):138.574 deg

Cloud/Mesh 86 `[Fsupv2019_Station 010_Scan 01.ptx : Fsupv2019_Station 012_Scan 01.ptx]
Objective Function Value: 6.63795e-06 sq m
Iterations: 24
Overlap Point Count: 1767300
Overlap Error Statistics
RMS: 0.0059439 m
AVG: 0.00266217 m
MIN: 1.32556e-08 m
MAX: 0.0981669 m
Overlap Center: (-1.396, -0.998, 3.178) m
Error after global registration: 2.03363e-08 sq m
Translation: (-3.473, -2.187, 0.023) m
Rotation: (0.0332, -0.0076, -0.9994):-35.651 deg

Cloud/Mesh 87 `[Fsupv2019_Station 010_Scan 01.ptx : Fsupv2019_Station 013_Scan 01.ptx]
Objective Function Value: 8.13839e-06 sq m
Iterations: 25
Overlap Point Count: 1615800
Overlap Error Statistics
RMS: 0.00671839 m
AVG: 0.00299782 m
MIN: 1.59205e-08 m
MAX: 0.098837 m
Overlap Center: (-2.114, -1.265, 3.553) m
Error after global registration: 3.24936e-09 sq m
Translation: (-4.733, -2.510, 0.018) m
Rotation: (-0.0006, 0.0004, 1.0000):98.615 deg

Cloud/Mesh 88 `[Fsupv2019_Station 010_Scan 01.ptx : Fsupv2019_Station 014_Scan 01.ptx]
Objective Function Value: 8.51102e-06 sq m
Iterations: 47
Overlap Point Count: 1122700
Overlap Error Statistics
RMS: 0.00625105 m
AVG: 0.00309517 m
MIN: 4.03505e-08 m
MAX: 0.0944621 m
Overlap Center: (-2.962, -1.818, 5.036) m
Error after global registration: 2.67302e-08 sq m
Translation: (-7.765, -4.093, -0.004) m
Rotation: (-0.0004, 0.0000, 1.0000):161.631 deg

Cloud/Mesh 89 `[Fsupv2019_Station 011_Scan 01.ptx : Fsupv2019_Station 013_Scan 01.ptx]
Objective Function Value: 7.00745e-06 sq m
Iterations: 20
Overlap Point Count: 1725066
Overlap Error Statistics
RMS: 0.00616559 m
AVG: 0.00277771 m
MIN: 1.44115e-08 m
MAX: 0.0990087 m
Overlap Center: (-1.858, -1.084, 3.281) m
Error after global registration: 5.91716e-08 sq m
Translation: (-3.674, -1.749, 0.017) m
Rotation: (-0.0001, 0.0007, 1.0000):95.059 deg

Cloud/Mesh 90 [Fsupv2019_Station 011_Scan 01.ptx]: Fsupv2019_Station 014_Scan 01.ptx]
Objective Function Value: 8.42941e-06 sq m
Iterations: 45
Overlap Point Count: 1137866
Overlap Error Statistics
RMS: 0.00623926 m
AVG: 0.00303373 m
MIN: 4.066e-08 m
MAX: 0.0950841 m
Overlap Center: (-2.393, -1.638, 4.955) m
Error after global registration: 1.70379e-08 sq m
Translation: (-6.799, -3.142, -0.003) m
Rotation: (0.0000, 0.0000, 1.0000):158.076 deg

Cloud/Mesh 91 [Fsupv2019_Station 012_Scan 01.ptx]: Fsupv2019_Station 014_Scan 01.ptx]
Objective Function Value: 6.91211e-06 sq m
Iterations: 42
Overlap Point Count: 1746033
Overlap Error Statistics
RMS: 0.005557 m
AVG: 0.00266389 m
MIN: 1.03224e-08 m
MAX: 0.0927388 m
Overlap Center: (-1.757, 0.229, 2.915) m
Error after global registration: 7.56867e-08 sq m
Translation: (-4.600, 0.952, -0.059) m
Rotation: (0.0012, 0.0115, -0.9999):-126.001 deg

Fsupv2019_Station 001_Scan 01.ptx
translation: (0.000, 0.000, 0.000) m
rotation: (0.0000, 1.0000, 0.0000):0.000 deg

Fsupv2019_Station 002_Scan 01.ptx
translation: (-1.910, -3.783, -0.001) m
rotation: (0.0332, -0.0289, -0.9990):27.333 deg

Fsupv2019_Station 003_Scan 01.ptx
translation: (-3.342, -7.094, 0.018) m
rotation: (-0.0416, -0.0468, -0.9980):42.299 deg

Fsupv2019_Station 004_Scan 01.ptx
translation: (-5.290, -11.445, -0.021) m
rotation: (0.0007, 0.0004, -1.0000):38.564 deg

Fsupv2019_Station 005_Scan 01.ptx
translation: (2.846, -15.628, -0.002) m
rotation: (-0.0002, -0.0001, 1.0000):161.933 deg

Fsupv2019_Station 006_Scan 01.ptx
translation: (5.264, -10.745, 0.021) m
rotation: (0.0006, -0.0002, -1.0000):93.392 deg

Fsupv2019_Station 007_Scan 01.ptx
translation: (7.359, -6.625, 0.003) m
rotation: (-0.0001, -0.0001, 1.0000):44.088 deg

Fsupv2019_Station 008_Scan 01.ptx
translation: (7.913, -3.367, -0.007) m
rotation: (-0.0002, 0.0018, 1.0000):24.642 deg

Fsupv2019_Station 009_Scan 01.ptx
translation: (4.353, -0.719, -0.032) m
rotation: (0.0014, 0.0010, -1.0000):19.226 deg

Fsupv2019_Station 010_Scan 01.ptx
translation: (2.790, -4.701, -0.019) m
rotation: (0.0000, 0.0012, 1.0000):40.569 deg

Fsupv2019_Station 011_Scan 01.ptx
translation: (2.246, -5.872, -0.014) m
rotation: (0.0002, 0.0001, 1.0000):44.125 deg

Fsupv2019_Station 012_Scan 01.ptx
translation: (1.574, -8.621, 0.007) m
rotation: (-0.0165, -0.0016, 0.9999):76.210 deg

Fsupv2019_Station 014_Scan 01.ptx
translation: (-0.447, -12.861, -0.017) m
rotation: (0.0000, 0.0001, -1.0000):157.799 deg

