

## MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA MECÁNICA

# TRABAJO FIN DE MÁSTER

## *DESARROLLO DE APLICACIÓN SW PARA EL DISEÑO DE SOLUCIONES FOTOGRAMÉTRICAS*

**Estudiante**  
**Directora**  
**Departamento**  
**Curso académico**

Pérez, Vigiola, Asier  
Ortega, Rodríguez, Naiara  
Ingeniería Mecánica  
2020-2021

Bilbao, 9, septiembre, 2021

## Resumen trilingüe (castellano/euskera/inglés) + palabras clave

**Resumen.** La fotogrametría es un sistema de medición óptico basado en la adquisición de imágenes, que se caracteriza por la facilidad y rapidez con la que se pueden recopilar y procesar los datos. Actualmente, no existen *softwares* comerciales (VSTARS, Phox) que combinen la mayoría de las configuraciones fotogramétricas (mono-cámara, estéreo o multi-cámara) y que permitan realizar simulaciones virtuales con un enfoque industrial. Por ello, una solución más personalizada consiste en el uso de librerías de Matlab junto con la programación propia.

En este Trabajo Fin de Máster, se reúne y se homogeneiza los modelos fotogramétricos existentes en Tekniker en una única herramienta *software* para disponer de un entorno de simulación/diseño parametrizable y que permita analizar de manera ágil la viabilidad de distintas configuraciones fotogramétricas. Para la ejecución de este proyecto, se emplea la librería de Matlab *Computer Vision Toolbox* y las librerías propias desarrolladas previamente por Tekniker en diversos proyectos.

Por último, se recoge en un manual de usuario las instrucciones necesarias para que cualquier usuario pueda usar correctamente la aplicación y en el que se incluyen las diversas funcionalidades implementadas.

**Laburpena.** Fotogrametria irudiak eskuratzean oinarritutako neurketa optikoko sistema bat da, eta datuak biltzeko eta prozesatzeko erraztasuna eta azkartasuna ditu ezaugarri. Gaur egun, ez dago konfigurazio fotogrametriko gehienak konbinatzen dituen software komertzialik (VSTARS, Phox) ezta simulazio birtualak ikuspegi industrial batekin egitea ahalbidetzen duenik. Horregatik, irtenbide pertsonalizatuago bat Matlabeko liburu-denden erabilera da, programazio propioarekin batera.

Master Amaierako Lan honetan, Teknikerren dauden eredu fotogrametrikoak bildu eta homogeneizatzen dira software tresna bakar batean, simulazio/diseinu parametrizagarriko ingurune bat izateko eta konfigurazio fotogrametrikoen bideragarritasuna modu arinean aztertzeko. Proiektu hau gauzatzeko, Matlab Computer Vision Toolboxen liburu-denda eta Teknikerrek aurretik hainbat proiektutan garatutako liburu-denda propioak erabiltzen dira.

Azkenik, erabiltzailearen eskuliburu batean, edozein erabiltzailek aplikazioa behar bezala erabili ahal izateko beharrezkoak diren jarraibideak jasotzen dira, eta inplementatutako funtzionalitateak jasotzen dira.

**Summary.** Photogrammetry is an optical measurement system based on image acquisition, characterized by the ease and speed with which data can be collected and processed. Currently, there is no commercial software (VSTARS, Phox) that combines most of the photogrammetric configurations (single-camera, stereo or multi-camera) and allows virtual simulations with an industrial approach. Therefore, a more customized solution consists in the use of Matlab libraries together in conjunction with the own programming.

In this Master Thesis, the existing photogrammetric models in Tekniker are gathered and homogenized in a single software tool to provide a simulation/design environment that can be parameterized and that allows to analyze in an agile way the viability of different photogrammetric configurations. For the execution of this project, the Matlab Computer Vision Toolbox library and the own libraries previously developed by Tekniker in various projects are used.

Finally, a user manual contains the necessary instructions for any user to be able to use the application correctly and includes the different functionalities implemented.

## Palabras clave

Fotogrametría; *Software*; Simulación; Datos sintéticos; Matlab; Parametrización; Calibración intrínseca; Calibración extrínseca; Resección espacial; Medición; Triangulación; Multiresección; Error píxel; Incertidumbre de uso;

## ÍNDICE

<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>13</b>
<b>2. CONTEXTO</b>	<b>15</b>
2.1. METROLOGÍA DIMENSIONAL A GRAN ESCALA	17
2.1.1. CLASIFICACIÓN DE LOS PRINCIPALES SISTEMAS DE MEDICIÓN	18
2.2. <i>DIGITAL TWIN</i>	22
2.2.1. JERARQUÍA DE CAPACIDADES	24
2.2.2. GESTIÓN DEL CICLO DE VIDA DEL PRODUCTO	24
2.3. CENTRO TECNOLÓGICO TEKNIKER	27
<b>3. OBJETIVOS Y ALCANCE DEL TRABAJO</b>	<b>28</b>
<b>4. BENEFICIOS QUE APORTA EL TRABAJO</b>	<b>29</b>
<b>5. ALTERNATIVAS</b>	<b>30</b>
5.1. TECNOLOGÍA	30
5.1.1. CMM	30
5.1.2. LÁSER TRACKER	31
5.1.3. LÁSER RADAR	33
5.1.4. LÁSER ESCÁNER	35
5.1.5. iGPS	36
5.1.6. FOTOGRAMETRÍA	37
5.1.7. COMPARATIVA DE TECNOLOGÍAS	41
5.2. <i>SOFTWARES</i>	48
5.2.1. COMERCIALES	48
5.2.2. DESARROLLO PROPIO	62
5.3. PATRONES DE CALIBRACIÓN	67
<b>6. FUNDAMENTOS DE LA FOTOGRAMETRÍA</b>	<b>71</b>
6.1. ECUACIONES DE COLINEALIDAD	71
6.2. ERROR PÍXEL	71
6.3. CONFIGURACIÓN DE LA CÁMARA Y DE LA LENTE	72
6.4. CALIBRACIÓN DE LAS CÁMARAS	73
6.4.1. CALIBRACIÓN INTRÍNSECA	73

---

6.4.2. CALIBRACIÓN EXTRÍNSECA	77
6.5. MEDICIÓN	79
<b>7. METODOLOGÍA Y DESCRIPCIÓN DE LA SOLUCIÓN</b>	<b>81</b>
7.1. SOFTWARE	82
7.1.1. CONFIGURACIÓN ÓPTICA-CÁMARA	83
7.1.2. CALIBRACIÓN	84
7.1.2.1. CALIBRACIÓN INTRÍNSECA	84
7.1.2.2. CALIBRACIÓN EXTRÍNSECA	89
7.1.2.3. EDICIÓN DE LOS PARÁMETROS INTRÍNSECOS Y EXTRÍNSECOS	95
7.1.3. MEDICIÓN	96
7.2. VALIDACIÓN DE LA APLICACIÓN	105
7.2.1. CALIBRACIÓN INTRÍNSECA	105
7.2.2. CALIBRACIÓN EXTRÍNSECA	111
7.2.3. MEDICIÓN DE PUNTOS (TRIANGULACIÓN)	119
7.3. ESTIMACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE	122
7.4. ERRORES E INCERTIDUMBRES CONSIDERADOS EN LA SIMULACIÓN	124
7.4.1. CALIBRACIÓN INTRÍNSECA	125
7.4.2. CALIBRACIÓN EXTRÍNSECA	125
7.4.3. MEDICIÓN	126
<b>8. TAREAS</b>	<b>128</b>
8.1. HITOS	130
<b>9. PRESUPUESTO</b>	<b>133</b>
9.1. COSTES DIRECTOS	133
9.2. PRESUPUESTO TOTAL DEL TFM	134
<b>10. CONCLUSIONES</b>	<b>135</b>
<b>11. BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>139</b>
<b>12. ANEXO I: SELECCIÓN CÁMARA YLENTE</b>	<b>149</b>
<b>13. ANEXO II: MANUAL DE USUARIO</b>	<b>152</b>

## Lista de tablas, ilustraciones, gráficas y acrónimo

### Lista de tablas

Tabla 5.1. Categorías y criterios para analizar. _____	41
Tabla 5.2. Calificación y valor (5 niveles). _____	41
Tabla 5.3. Calificación y valor (3 niveles). _____	42
Tabla 5.4. Rendimiento. Criterio: preparación de la medición. _____	42
Tabla 5.5. Rendimiento. Criterio: precisión e incertidumbre (tamaño de pieza: 1 m). _____	42
Tabla 5.6. Rendimiento. Criterio: velocidad de inspección. _____	43
Tabla 5.7. Condiciones de trabajo. Criterio: preparación de la medición. _____	43
Tabla 5.8. Condiciones de trabajo. Criterio: acabado superficial. _____	43
Tabla 5.9. Condiciones de trabajo. Criterio: factores de entorno. _____	44
Tabla 5.10. Condiciones de uso. Criterio: coste medio. _____	44
Tabla 5.11. Condiciones de uso. Criterio: rango de medición. _____	44
Tabla 5.12. Condiciones de uso. Criterio: ergonomía. _____	45
Tabla 5.13. Condiciones de uso. Criterio: capacidad de automatización. _____	45
Tabla 5.14. Condiciones de uso. Criterio: complejidad tecnológica. _____	45
Tabla 5.15. Comparación de características entre diferentes tecnologías de medición de largo alcance. _____	46
Tabla 5.16. Ponderación de las tecnologías de medición a gran escala. _____	47
Tabla 5.17. Alcance y limitaciones del <i>software</i> SA-VSTARS. _____	61
Tabla 5.18. Alcance y limitaciones del <i>software</i> PhoX. _____	61
Tabla 5.19. Alcance y limitaciones de la herramienta MetroVisionLab. _____	61
Tabla 5.20. Alcance y limitaciones de las aplicaciones Camera Calibrator y Stereo Camera Calibrator. _____	62
Tabla 5.21. Alcance y limitaciones de la aplicación GUIDE. _____	65
Tabla 5.22. Alcance y limitaciones de la aplicación App Designer. _____	65
Tabla 5.23. Alcance y limitaciones de la aplicación Java Swing. _____	65
Tabla 5.24. Calificación de los criterios correspondientes para cada <i>software</i> . _____	66
Tabla 5.25. Ponderación de los <i>softwares</i> de creación de Apps. _____	66
Tabla 5.26. Clasificación de los patrones de calibración. _____	69
Tabla 5.27. Comparación de características entre diferentes patrones de calibración bidimensional. _____	70
Tabla 6.1. Datos e incógnitas a resolver en cada etapa. _____	80
Tabla 7.1. Resultados de la calibración intrínseca. _____	105
Tabla 7.2. Estimación de la incertidumbre de los parámetros intrínsecos. _____	106
Tabla 7.3. Error píxel medio global en magnitud y descompuesto en X e Y. _____	106
Tabla 7.4. Error relativo cometido en los parámetros intrínsecos y porcentual absoluto. _____	110
Tabla 7.5. Error relativo cometido en las incertidumbres y porcentual absoluto. _____	111
Tabla 7.6. Error relativo cometido en el error píxel y en el porcentual absoluto. _____	111
Tabla 7.7. Coordenadas de los puntos de referencia usados en la calibración extrínseca. _____	112
Tabla 7.8. Resultados de las poses obtenidas tras la calibración extrínseca. _____	112

Tabla 7.9. Error considerado en las poses de las cámaras para el método de resección conjunta.	112
Tabla 7.10. Coordenadas de los puntos medidos por triangulación.	119
Tabla 7.11. Errores e incertidumbres considerados en la simulación.	124
Tabla 9.1. Gastos de personal.	133
Tabla 9.2. Amortizaciones.	133
Tabla 9.3. Material fungible.	134
Tabla 9.4. Validación del <i>software</i> .	134
Tabla 12.1. Poses iniciales de las cámaras.	150

### **Lista de ilustraciones**

Figura 2.1. Evolución a lo largo del tiempo de los sistemas de medición a gran escala y su precisión relativa [1].	15
Figura 2.2. a) Cámara de gran formato GSI CRC-1 (1986), b) Comparador digital de imagen Rollei RS-1 (1988) [3].	16
Figura 2.3. Cámaras de vídeo CCD [3].	16
Figura 2.4. Sistema PHIDIAS Phocad (1991) [3].	16
Figura 2.5. Relación entre la dimensión nominal del objeto y la tolerancia [4].	17
Figura 2.6. Clasificación de la metrología a gran escala [4].	18
Figura 2.7. Diseño clásico de un sistema distribuido [5].	18
Figura 2.8. Clasificación de los métodos de medición ópticos [5].	19
Figura 2.9. Cinemática en serie. a) Medición de un engranaje en una CMM [6], b) Inspección de un tren de aterrizaje principal mediante un brazo robot [7].	19
Figura 2.10. Coordenadas esféricas del láser tracker y del láser radar [5].	20
Figura 2.11. Principio de funcionamiento de la trilateración en 2D [5].	20
Figura 2.12. Principio de funcionamiento de la multiangulación. a) iGPS [8], b) Fotogrametría [9].	21
Figura 2.13. Medición de la deformación del fuselaje de un avión [4].	21
Figura 2.14. Concepto de <i>Digital Twin</i> [11].	23
Figura 2.15. Elementos de Digital Twin [13].	23
Figura 2.16. Jerarquía de capacidades del gemelo digital [14].	24
Figura 2.17. Uso del gemelo digital en la gestión del ciclo de vida del producto [12].	25
Figura 2.18. Modelo “W” para la implementación del gemelo digital [14].	25
Figura 2.19. Representación de los componentes básicos para los cinco niveles del gemelo digital. (P/T: gemelo físico, V&V: verificación y validación) [14].	26
Figura 5.1. Máquinas de medir por coordenadas (CMM). a) Tipo pórtico [18], b) Tipo brazo horizontal [19].	30
Figura 5.2. Integración de un escáner láser en una CMM [19].	31
Figura 5.3. Láser tracker FARO [24].	31
Figura 5.4. Medición con objetivo retrorreflectante [26].	32
Figura 5.5. Verificación volumétrica de Máquina Herramienta mediante multilateración [29].	33
Figura 5.6. Calibración de un brazo robot [30].	33

Figura 5.7. Láser Radar Nikon [31].	33
Figura 5.8. Medición de antena parabólica [33].	34
Figura 5.9. Inspección en línea con láser radar [35].	34
Figura 5.10. Inspección de materiales compuestos [33].	34
Figura 5.11. Láser escáner FARO [39].	35
Figura 5.12. Rotación vertical y horizontal del láser [42].	35
Figura 5.13. Supervisión y control. a) Excavaciones, b) Construcción de puentes [40].	36
Figura 5.14. Transmisor y sensor iGPs [46].	36
Figura 5.15. Manipulador móvil [45].	37
Figura 5.16. Aplicaciones del sistema iGPS. a) Ensamblaje de aviones [46], b) Medición hidrodinámica de barcos [48].	37
Figura 5.17. Evaluación del error de medición de longitud (LME) según VDI / VDE2634 [3].	38
Figura 5.18. Equipamiento portable [50].	38
Figura 5.19. Integración de la fotogrametría en una cadena de montaje [52].	39
Figura 5.20. Colocación de objetivos en una carcasa de válvula [53].	39
Figura 5.21. Movimiento de la cámara alrededor de un vehículo [54].	40
Figura 5.22. Iluminación sobre el fuselaje de una aeronave [3].	40
Figura 5.23. Selección del sistema virtual en SA [56].	48
Figura 5.24. Configuración de la red de cámaras en VSATARS [56].	49
Figura 5.25. Líneas de proyección y puntos de medición [56].	49
Figura 5.26. Parámetros de la cámara [56].	50
Figura 5.27. Obtención de la incertidumbre de los puntos medidos [56].	50
Figura 5.28. Integración virtual del entorno de trabajo con los instrumentos [58].	51
Figura 5.29. Parámetros intrínsecos correspondientes a la lente [59].	52
Figura 5.30. Parámetros intrínsecos correspondientes a la distorsión de la lente [6].	52
Figura 5.31. Calibración extrínseca mediante Resección Espacial [7].	53
Figura 5.32. Modificación interactiva de los datos de orientación y posición en la simulación [59].	54
Figura 5.33. Propagación de incertidumbre mediante la simulación de MonteCarlo [59].	54
Figura 5.34. Visualización de la simulación. a) Visión 3D [59], b) Visión VRML [60].	55
Figura 5.35. Resultados [60]. a) Histograma, b) Distribución de los puntos de la imagen.	55
Figura 5.36. Interfaz principal de MetroVisionLab [61].	56
Figura 5.37. Muestra de resultados de calibración [61].	57
Figura 5.38. Errores de reconstrucción para los puntos de calibración en las coordenadas imagen (u, v) y global (X, Y, Z) [61].	57
Figura 5.39. Interfaz de usuario de la aplicación <i>Stereo Camera Calibrator</i> [62].	58
Figura 5.40. Requisitos de la adquisición de imágenes [62].	59
Figura 5.41. Puntos detectados y reproyectados [62].	59
Figura 5.42. Error de reproyección medio y general [62].	60
Figura 5.43. Vista centrada: a) en la cámara, b) en el patrón [62].	60
Figura 5.44. <i>GUIDE</i> . Entorno de diseño de interfaz.	62
Figura 5.45. <i>GUIDE</i> . Entorno de programación.	63
Figura 5.46. <i>App Designer</i> . Entorno de diseño.	64

Figura 5.47. <i>App Designer</i> . Entorno de programación. _____	64
Figura 5.48. Java Swing. Entorno de diseño.Tabla 5.23	65
Figura 5.49. Entorno de programación.	65
Figura 5.50. Patrón de calibración basado en líneas [66]. _____	67
Figura 5.51. Patrón bidimensional. a) Matriz de círculos negros [68], b) Matriz de cuadrados blancos [66]. _____	67
Figura 5.52. Patrón de tablero de ajedrez ( <i>chessboard</i> ) [69]. _____	68
Figura 5.53. Patrón de matriz de círculos con puntos codificados [70]. _____	68
Figura 5.54. Patrón tablero de ajedrez con líneas radiales [71]. _____	69
Figura 5.55. Método de combinar colores [72]. a) Colores resultantes, b) Configuración estéreo. _____	69
Figura 6.1. Plano de la imagen. Error pixel. _____	72
Figura 6.2. Campo de visión de la cámara (FOV) [73]. _____	72
Figura 6.3. Profundidad de campo (DOF) [74]. _____	73
Figura 6.4. Calibración intrínseca de la cámara [75]. _____	74
Figura 6.5. Parámetros intrínsecos de una cámara [76]. _____	74
Figura 6.6. Coordenadas del punto principal en el plano de la imagen [76]. _____	75
Figura 6.7. Distorsión radial: sin distorsión ( <i>no distorsion</i> ), positiva ( <i>barrel distorsion</i> ) y negativa ( <i>pincushion distorsion</i> ) [77]. _____	75
Figura 6.8. Distorsión tangencial: sin distorsión ( <i>zero tangential distorsion</i> ) y con distorsión ( <i>tangential distorsion</i> ) [62]. _____	76
Figura 6.9. Desplazamiento de la reproyección del punto P en el plano de la imagen. p: posición ideal, p': posición real [76]. _____	76
Figura 6.10. <i>Skew</i> [78]. _____	77
Figura 6.11. Pose de una cámara respecto a un sistema de coordenadas global. _____	78
Figura 6.12. Resección espacial de "n" cámaras [79]. _____	78
Figura 6.13. Triangulación espacial. a) Triangulación estéreo de un punto [80], b) Triangulación multivista y multipunto [81]. _____	79
Figura 6.14. Obtención de la pose de un sistema de palpado mediante multiresección [82]. _____	80
Figura 7.1. Barra de herramientas de la interfaz. _____	82
Figura 7.2. Ítem Cargar datos" de la pestaña "Config óptica-cámara. _____	83
Figura 7.3. Parámetros de entrada. a) Lente, b) Cámara. _____	83
Figura 7.4. Cálculo de la profundidad de campo (DOF). _____	84
Figura 7.5. Panel "Menú Calibración". _____	84
Figura 7.6. Parámetros intrínsecos adicionales: coeficientes de distorsión radial, tangencial y <i>skew</i> . _____	85
Figura 7.7. Definición del patrón de calibración. _____	85
Figura 7.8. Nube de puntos sintéticos de las poses patrón generadas. _____	86
Figura 7.9. Generar poses patrón y reproyección. _____	86
Figura 7.10. Identificación de puntos no visibles. Pose Patrón 1. _____	87
Figura 7.11. Resultados de la calibración intrínseca. _____	88
Figura 7.12. Escenario de calibración intrínseca. _____	88
Figura 7.13. Error de reproyección promedio [píxel]. _____	89

Figura 7.14. Cálculo de tres coeficientes de distorsión radial, de la distorsión tangencial y del skew.	89
Figura 7.15. Generar puntos de referencia. a) Manualmente, b) Importar desde archivo, c) Red de puntos.	90
Figura 7.16. Posición de los puntos de referencia.	90
Figura 7.17. Aplicación de la incertidumbre del instrumento de medición.	90
Figura 7.18. Preparación de las cámaras.	91
Figura 7.19. Escena de calibración extrínseca.	91
Figura 7.20. Puntos no detectados por la cámara 1. a) Identificación de los puntos, b) visualización de los puntos (color rojo).	92
Figura 7.21. Guardado de los puntos de referencia a usar en la calibración extrínseca.	92
Figura 7.22. ID de la cámara que no visualiza el punto ID 17.	92
Figura 7.23. Selección del método de cálculo de la calibración extrínseca y número de iteraciones.	93
Figura 7.24. Resultados de la calibración extrínseca. Valores medios de las poses de las cámaras.	93
Figura 7.25. Resultados de la calibración extrínseca. Incertidumbre de uso de las poses de las cámaras.	93
Figura 7.26. Verificación de la calibración extrínseca. Corrección media de los puntos de referencia.	94
Figura 7.27. Verificación de la calibración extrínseca. Escenario de calibración.	94
Figura 7.28. Histogramas de la corrección media de los puntos de referencia [mm]. a) Magnitud, b) Corrección en X, c) Corrección en Y, d) Corrección en Z.	94
Figura 7.29. Verificación de la calibración extrínseca. Error de reproyección media por cámara y global.	95
Figura 7.30. Acceso a la edición de los parámetros intrínsecos y extrínsecos.	95
Figura 7.31. Edición de los parámetros intrínsecos y sus incertidumbres.	96
Figura 7.32. Edición de los parámetros extrínsecos y sus incertidumbres.	96
Figura 7.33. Menú de medición.	97
Figura 7.34. Métodos de medición.	97
Figura 7.35. Preparación de los puntos a medir. a) Introducir puntos desde un archivo, b) Generar manualmente.	98
Figura 7.36. Representación de los puntos.	98
Figura 7.37. Aplicación de error a los puntos de control en multiresección [ $\mu\text{m}$ ].	98
Figura 7.38. Preparación de la medición por triangulación.	99
Figura 7.39. Representación del escenario de medición.	99
Figura 7.40. Desactivación de los conos de visión de la cámara 1 y cámara 3.	99
Figura 7.41. Posición media de los puntos medidos y sus incertidumbres de uso.	100
Figura 7.42. Escenario de medición por triangulación.	100
Figura 7.43. Histogramas de la corrección media de los puntos medidos por triangulación [mm]. a) Magnitud, b) Corrección en X, c) Corrección en Y, d) Corrección en Z.	101
Figura 7.44. Cargar poses del objeto.	101
Figura 7.45. Transformación de los puntos de control al sistema de coordenadas global.	101

Figura 7.46. Guardado de los puntos a medir. _____	102
Figura 7.47. Preparación de las poses del objeto a medir. _____	102
Figura 7.48. Medición de las poses de un objeto. _____	103
Figura 7.49. Incertidumbre de uso de las poses de un objeto. _____	103
Figura 7.50. Representación de las poses 1 y 2 nominales y medidos. _____	103
Figura 7.51. Histogramas de la corrección media de la posición medida del objeto [mm]. a) Magnitud, b) Corrección en X, c) Corrección en Y, d) Corrección en Z. _____	104
Figura 7.52. Histogramas de la corrección media de la orientación medida del objeto [°]. a) Magnitud, b) Corrección en X, c) Corrección en Y, d) Corrección en Z. _____	104
Figura 7.53. Error píxel medio de cada imagen y el global. _____	106
Figura 7.54. Escenario de la calibración intrínseca. _____	106
Figura 7.55. Comprobación de la correcta implementación de las funciones de la calibración intrínseca. a) Valores medios de los parámetros intrínsecos, b) Incertidumbre asociada. ____	107
Figura 7.56. Comprobación de la correcta implementación de las funciones de la calibración intrínseca. a) Error de reproyección medio por cada imagen y el global, b) Escenario de la calibración intrínseca. _____	107
Figura 7.57. Configuración óptica-cámara. a) Datos del sensor digital, b) Datos de la lente. _	108
Figura 7.58. Preparación de la simulación de la calibración intrínseca. a) Dimensiones del patrón y posición de la cámara, b) Generación de las poses del patrón y visibilidad de los puntos. _____	108
Figura 7.59. Visualización de los puntos sintéticos de las poses del patrón. _____	109
Figura 7.60. Simulación de la calibración intrínseca: a) Parámetros intrínsecos, b) Incertidumbre. _____	109
Figura 7.61. Simulación de la calibración intrínseca. a) Error de reproyección medio por pose del patrón y global, b) escenario de simulación. _____	110
Figura 7.62. Edición de los parámetros intrínsecos. _____	111
Figura 7.63. Preparación de los puntos de referencia en la simulación de la calibración extrínseca. a) Coordenadas de los puntos de referencia, b) Incertidumbre. _____	112
Figura 7.64. Preparación de los puntos de referencia en la simulación de la calibración extrínseca. c) Distribución de los puntos. _____	113
Figura 7.65. Preparación de las cámaras en la simulación de la calibración extrínseca. ____	113
Figura 7.66. Identificación de los puntos no detectados por las cámaras. _____	113
Figura 7.67. Visualización del escenario de simulación de la calibración extrínseca. _____	114
Figura 7.68. Poses de las cámaras obtenidas en la simulación de la calibración extrínseca mediante resección conjunta. _____	114
Figura 7.69. Incertidumbre de uso asociado a la simulación de la calibración extrínseca mediante resección conjunta. _____	114
Figura 7.70. Poses de las cámaras obtenidas en la simulación de la calibración extrínseca mediante resección individual. _____	114
Figura 7.71. Incertidumbre de uso asociado a la simulación de la calibración extrínseca mediante resección individual. _____	115
Figura 7.72. Comprobación de los resultados obtenidos en la simulación de la calibración extrínseca mediante resección conjunta. _____	115

Figura 7.73. Histograma de la corrección media de los puntos de referencia y desviación estándar mediante resección conjunta. a) Magnitud, b) En la dirección X, c) En la dirección Y, d) En la dirección Z.	116
Figura 7.74. Comprobación de los resultados obtenidos en la simulación de la calibración extrínseca mediante resección individual.	116
Figura 7.75. Histograma de la corrección media de los puntos de referencia y desviación estándar mediante resección individual. a) Magnitud, b) En la dirección X, c) En la dirección Y, d) En la dirección Z.	117
Figura 7.76. Visualización de las poses de las cámaras simuladas y de la posición de los puntos de referencia nominales y medidos.	117
Figura 7.77. Error de reproyección medio de cada cámara y el global mediante resección conjunta.	118
Figura 7.78. Error de reproyección medio de cada cámara y el global mediante resección individual.	118
Figura 7.79. Visualización de las poses de las cámaras simuladas (resección individual y conjunta) de la posición de los puntos de referencia nominales y medidos.	118
Figura 7.80. Preparación de la medición simulada de los puntos por triangulación.	119
Figura 7.81. Distribución de los puntos sintéticos a medir por triangulación.	119
Figura 7.82. Comprobación de la detección de los puntos por ambas cámaras en la simulación.	120
Figura 7.83. Visualización del escenario de medición.	120
Figura 7.84. Medida simulada de los puntos sintéticos mediante triangulación.	120
Figura 7.85. Histograma de la corrección media de los puntos medidos junto con la desviación estándar [mm]: a) Magnitud, b) En la dirección X, c) En la dirección Y, d) En la dirección Z.	121
Figura 7.86. Visualización de las cámaras, de los puntos nominales y de los puntos medidos por simulación.	121
Figura 7.87. Ejemplo. Histograma de 1.000 valores generados aleatoriamente con una distribución normal mediante la función "randn" de Matlab.	124
Figura 7.88. Esquema de los errores considerados en la calibración intrínseca.	125
Figura 7.89. Esquema de los errores e incertidumbres considerados en la resección individual.	126
Figura 7.90. Esquema de los errores e incertidumbres considerados en la resección conjunta.	126
Figura 7.91. Esquema de los errores e incertidumbres considerados en la medición por triangulación.	127
Figura 7.92. Esquema de los errores e incertidumbres considerados en la medición por multiresección.	127
Figura 12.1. Rangos de medida del escenario de medición (FOV).	149
Figura 12.2. Determinación de la distancia de trabajo.	149
Figura 12.3. Escenario de medición a partir de la selección cámara y lente.	151

## 1. INTRODUCCIÓN

Este Trabajo Fin de Máster se centra en el desarrollo de un *software* de simulación de fotogrametría lo más flexible posible, que permita al usuario crear un entorno de diseño/simulación para cualquier configuración fotogramétrica (mono-cámara, estéreo o multi-cámara), como etapa previa a la preparación real de un equipo de fotogrametría (diseño de solución). De esta manera, se puede generar una gran cantidad de escenarios virtuales, para obtener una aproximación del rendimiento real del sistema de medición, comparar las metodologías de medición y seleccionar la configuración más adecuada para cada aplicación. Se lleva a cabo en el Centro Tecnológico Tekniker (Eibar, Gipuzkoa), formando parte de la Unidad de Mecánica.

El trabajo está estructurado de la siguiente manera: en el apartado 2, como parte introductoria, se menciona brevemente la evolución de la metrología a gran escala y en específico de la fotogrametría. Luego, se centra en dos aspectos: el primero, consiste en clasificar las tecnologías de medición en función del diseño de la configuración, el tipo de interacción y el principio de funcionamiento; el segundo, se basa en explicar el concepto de *Digital Twin*, sus diferentes niveles y cómo se implementa en un producto, que en este caso podría extrapolarse al desarrollo de una aplicación de simulación fotogramétrica. En el apartado 3, se describen los objetivos principales y el alcance de este TFM y los hitos necesarios para completarlos. En el apartado 4, se presentan los beneficios tecnológicos y económicos que aporta la realización de este TFM. En el apartado 5, se enfoca en describir las siguientes alternativas: tecnologías de medición empleadas en la metrología de largo alcance (mencionadas en el apartado 2), *softwares* de simulación fotogramétricos y patrones utilizados en la calibración. Se plantean las características principales de cada tecnología y sus aplicaciones, finalizando con una tabla comparativa a modo de resumen y una tabla ponderada, con la que se selecciona la mejor opción de entre todas ellas. Después, se exponen los *softwares* de simulación disponibles en el mercado, y aplicaciones que permiten el desarrollo propio de una interfaz de usuario (GUI). Por último, se comentan los tipos de patrones de calibración más empleados en fotogrametría y las diferentes variantes que existen. En el apartado 6, se explican los fundamentos básicos de la fotogrametría con el fin de facilitar la comprensión de algunos conceptos empleados en el *software* de simulación. Se enfoca en la calibración, tanto intrínseca como extrínseca y en la medición. En el apartado 7, se detalla la metodología llevada a cabo en el desarrollo del *software* y se describen las funcionalidades del mismo. También, se muestran los resultados que se obtienen a lo largo de la simulación y las validaciones realizadas para comprobar el funcionamiento correcto de la aplicación. En el apartado 8, se detallan las tareas y los hitos que se han realizado para completar este trabajo, junto con un diagrama de Gantt. En el apartado 9, se desglosan los costes implicados en la realización del proyecto. En el apartado 10, se exponen las conclusiones finales, recogiendo los aspectos más importantes en el desarrollo de la aplicación y las líneas a futuro. En el apartado 11, se indican las referencias bibliográficas consultadas. Por último, en el Anexo I, se muestra un ejemplo de cómo se selecciona una configuración

fotogramétrica. En el Anexo II, se recoge el manual de usuario del *software*, explicando sus funcionalidades con más detalle y los pasos a seguir para un correcto uso.

## 2. CONTEXTO

A principios de los años cincuenta, la metrología a gran escala se aplicaba solamente a métodos de topografía, donde los instrumentos más empleados eran cintas, cables, sistemas de alineación óptica y teodolitos [1]. Comenzaron a aparecer los primeros instrumentos basados en interferometría láser como método de alineación y de medición de longitud. Sin embargo, el gran cambio surgió a comienzos de la década de 1980 con la creación del láser tracker, dando lugar a una nueva generación de sistemas de medición (Figura 2.1). En los últimos años, ha habido avances significativos en tecnologías como la interferometría láser, los sistemas de medición de distancia absoluta y las cámaras CCD. Se ha mejorado en la velocidad de adquisición de datos con ordenadores y *software* más potentes y en la precisión y flexibilidad de los sistemas de medición. En la actualidad, se ha generalizado el uso de sistemas ópticos como por ejemplo, láser tracker, láser radar, iGPS (*indoor Global Positioning System*), láser escáner y fotogrametría.

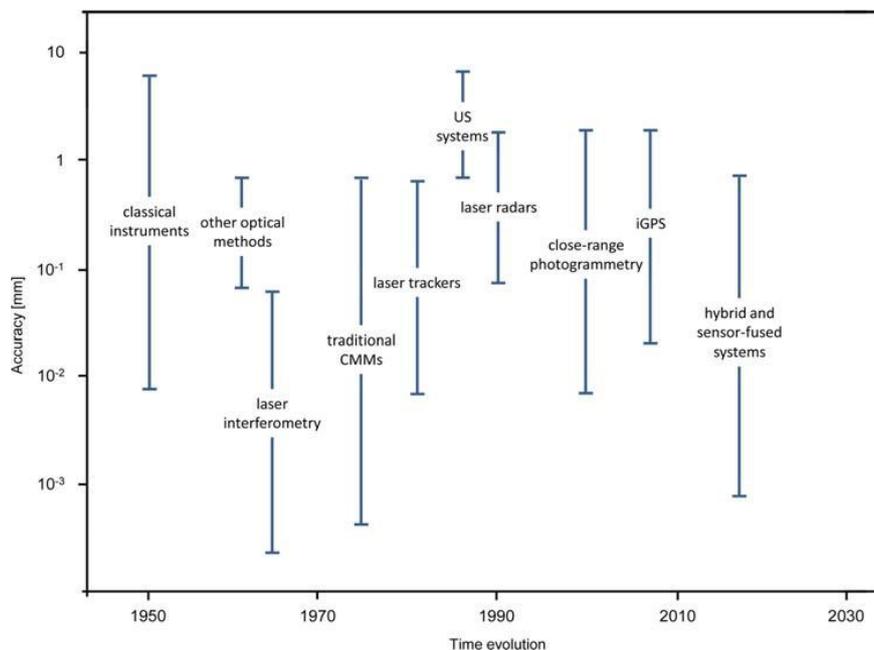


Figura 2.1. Evolución a lo largo del tiempo de los sistemas de medición a gran escala y su precisión relativa [1].

La fotogrametría industrial comenzó a mediados de la década de 1980 con el avance de las primeras mediciones 3D de alta precisión. Se basaban en cámaras analógicas de gran formato y comparadores digitales de imagen con las que se conseguían una precisión de 1:500, respecto a la dimensión más grande del objeto [2].



Figura 2.2. a) Cámara de gran formato GSI CRC-1 (1986), b) Comparador digital de imagen Rollei RS-1 (1988) [3].

Más tarde, aparecieron las cámaras digitales con las que se podían tener acceso directo a los datos, de manera que la fotogrametría se convirtió en un método de medición 3D para tareas complejas.



Figura 2.3. Cámaras de vídeo CCD [3].

En los años 90, se diseñaron *softwares* interactivos para el procesamiento de múltiples imágenes (PHIDIAS Photocad) y operadores de medición de puntos de imagen de subpíxeles, que en combinación con objetivos retrorreflectantes o codificados, permitieron la medición de objetos en pocos minutos [3].

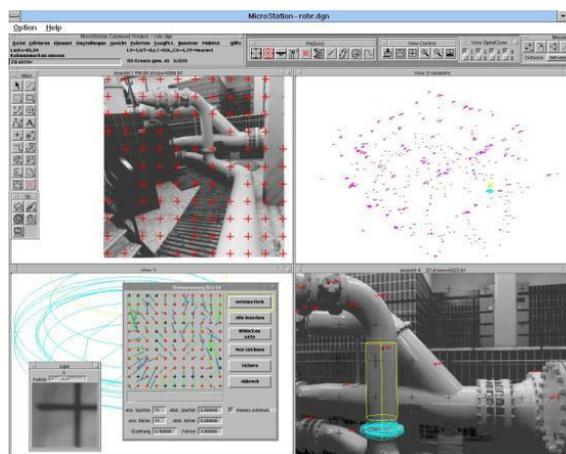


Figura 2.4. Sistema PHIDIAS Phocad (1991) [3].

Hoy en día, con la llegada de la Industria 4.0 a la metrología industrial, se ha convertido en una alternativa a considerar entre otras tecnologías de medición a gran escala debido a su flexibilidad y escalabilidad, y a sus mediciones multipuntos rápidos y precisos sin contacto. También, tiene la capacidad de realizar medidas dinámicas en tiempo real, gracias a las actuales cámaras de alta resolución y de alta velocidad. Destaca por su empleo en las líneas de producción para realizar tareas de inspección o de ensamblaje asistido y por combinarse con otros accesorios de medición como palpadores de contacto o sistemas ópticos como el láser escáner [3].

## 2.1. METROLOGÍA DIMENSIONAL A GRAN ESCALA

La metrología dimensional a gran escala se define como los procesos de medición que se utilizan en la inspección geométrica, según las especificaciones geométricas del producto (GPS) para objetos de gran tamaño (Figura 2.5). De manera aproximada, las dimensiones de los objetos oscilan entre 1 metro y cientos de metros [4] y las precisiones obtenidas suelen encontrarse alrededor de 0,1 mm y 100 mm [5].

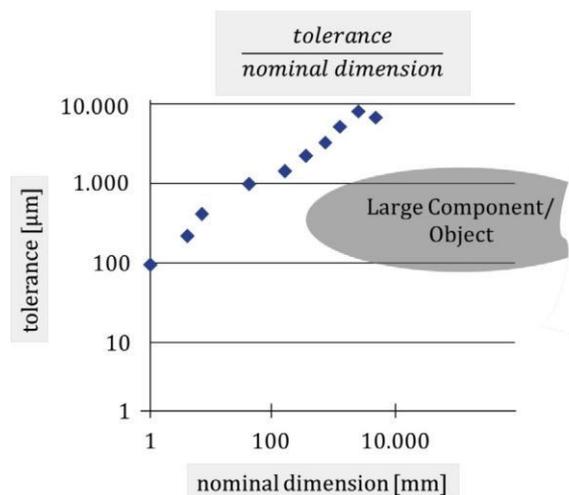


Figura 2.5. Relación entre la dimensión nominal del objeto y la tolerancia [4].

El principal inconveniente de la metrología a gran escala es trasladar el sistema de medición al lugar del objeto a medir, lo que conlleva un gran coste económico. También, los objetos presentan zonas ocultas o de difícil acceso, donde el empleo del sistema de medición no es tan directo.

Por otro lado, las mediciones están influenciadas por factores externos (humedad, temperatura y presión del aire), que sufren variaciones significativas durante el procedimiento de medición, ya que no se puede realizar en un entorno controlado. Además, el objeto se puede deformar por la actuación de su propio peso y, como consecuencia, se pueden producir variaciones geométricas y estructurales. A pesar de ello, se exigen tolerancias muy ajustadas, y como la producción de los lotes es pequeña, no se permiten rechazar piezas.

### 2.1.1. CLASIFICACIÓN DE LOS PRINCIPALES SISTEMAS DE MEDICIÓN

Los instrumentos de metrología dimensional a gran escala se pueden clasificar (Figura 2.6) en función de las propiedades del diseño del sistema de medición, del tipo de contacto y de su principio de funcionamiento [5].

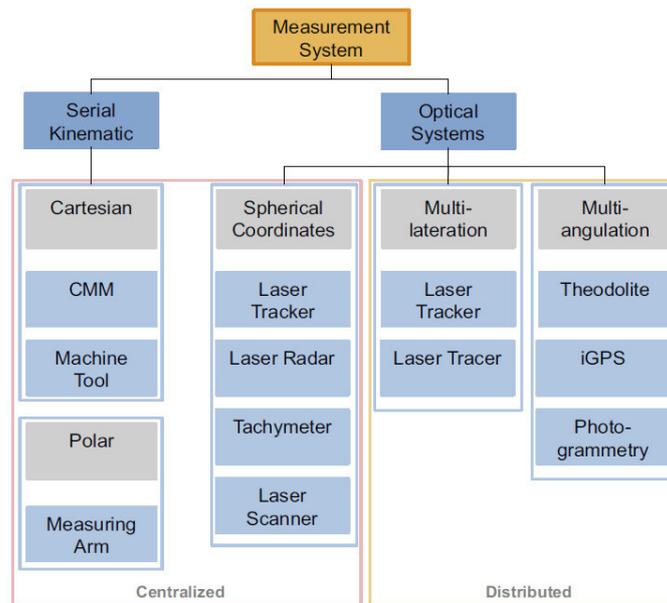


Figura 2.6. Clasificación de la metrología a gran escala [4].

#### Diseño del sistema de medición

Cuando un sistema funciona de manera independiente para obtener la medición se le conoce como sistema centralizado. Existen situaciones en las que se usan varios sistemas centralizados simultáneamente para mejorar la precisión (varios láseres trackers). En cambio, un sistema distribuido consiste en una serie de unidades individuales, cuya información se recoge por separado y se procesa conjuntamente para determinar la medición (Figura 2.7). Las unidades individuales por sí solas no pueden proporcionar ninguna medida.

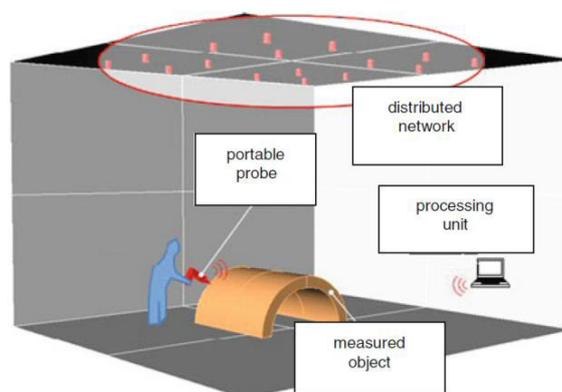


Figura 2.7 Diseño clásico de un sistema distribuido [5].

### Tipo de interacción

En el sistema con contacto, se mide al palpar el objeto con una sonda, la cual se puede mover de manera manual, por un brazo robótico o por la propia cinemática de la máquina; mientras que, en el sistema sin contacto, se usan diversas tecnologías ópticas (Figura 2.8).

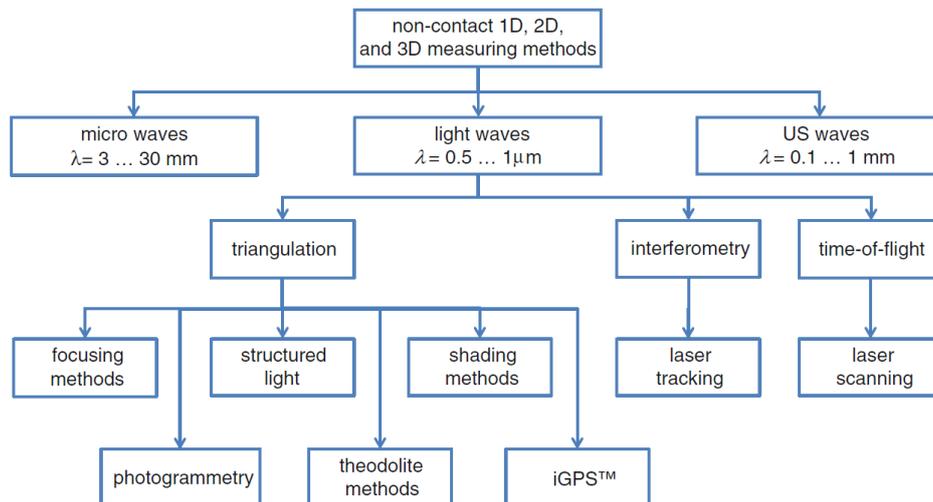


Figura 2.8. Clasificación de los métodos de medición ópticos [5].

### Principio de funcionamiento

Por un lado, los enfoques clásicos consisten en emplear máquinas voluminosas, cuya cinemática en serie, permite trasladar el dispositivo de medición (sondas de contacto ó escáneres 3D) en diferentes ejes para medir de acuerdo con un sistema de coordenadas cartesiano como la CMM o con un sistema de coordenadas polar como el brazo robot (Figura 2.9).



a)



b)

Figura 2.9. Cinemática en serie. a) Medición de un engranaje en una CMM [6], b) Inspección de un tren de aterrizaje principal mediante un brazo robot [7].

Por otro lado, el principio de funcionamiento de los sistemas de medición ópticos se puede basar en la determinación de dos ángulos y una longitud (sistema de coordenadas esféricas), en multilateración o en triangulación.

La mayoría de estos sistemas se evalúa en un sistema de coordenadas esféricas para posteriormente, transformarlo en coordenadas cartesianas. Los ángulos ( $\theta$ ,  $\varphi$ ) se determinan mediante *encoders* angulares y la longitud ( $\rho$ ) se puede calcular utilizando un Interferómetro láser de He-Ne (IFM) como en el láser tracker, un sistema ADM (*Absolute Distance Measure*) como en el Láser escáner o una combinación de ambas (actuales láser trackers). También, existe la tecnología láser radar coherente de frecuencia modulada (FM CLR) usada en el láser radar.

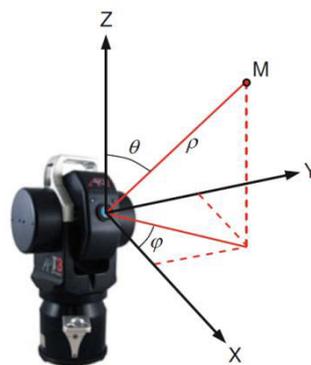


Figura 2.10. Coordenadas esféricas del láser tracker y del láser radar [5].

Otros sistemas se basan en multilateración (Figura 2.11) como los sistemas con Interferómetros láser o con ADM. Utilizan las ubicaciones conocidas de tres o más puntos de referencia ( $V_1$ ,  $V_2$ ,  $V_3$ ) y la distancia medida entre el punto que se va a localizar y cada punto de referencia ( $d_1$ ,  $d_2$ ,  $d_3$ ).

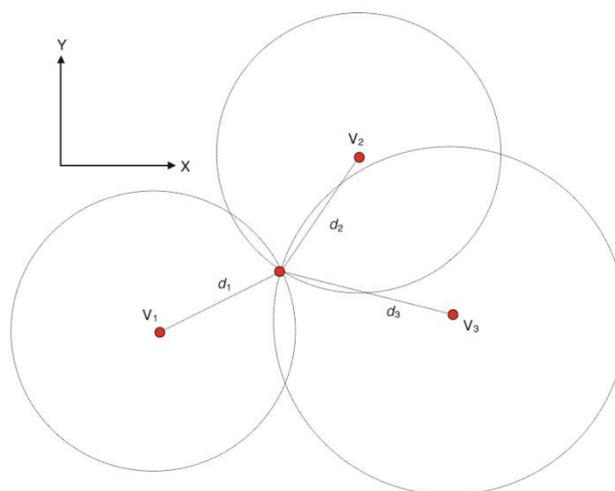


Figura 2.11. Principio de funcionamiento de la trilateración en 2D [5].

El resto de los sistemas ópticos usan la multiangulación basada en algoritmos de triangulación (Figura 2.12). Los sistemas iGPS determinan la posición de un punto a partir de la intersección del haz de dos o más transmisores, cuyos ángulos horizontal y vertical ( $\varphi$ ,  $\theta$ ) son conocidos. En fotogrametría, se debe conocer las características técnicas de dos o más cámaras, sus ubicaciones y sus ángulos de orientación.

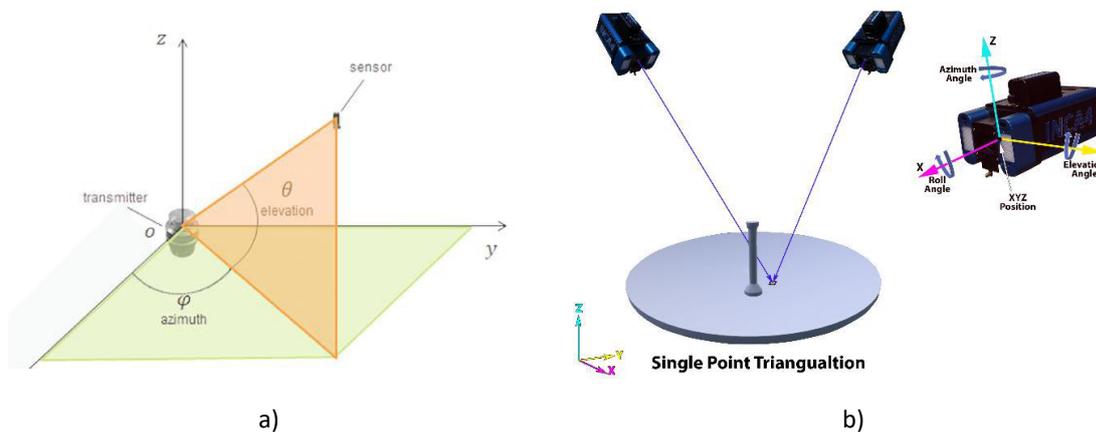


Figura 2.12. Principio de funcionamiento de la multiangulación. a) iGPS [8], b) Fotogrametría [9].

Por último, cabe destacar que se pueden integrar dos tecnologías de medición en un solo sistema, por ejemplo, fotogrametría–láser escáner, fotogrametría–láser tracker, iGPS–láser tracker (Figura 2.13). En la ingeniería inversa, se combina luz estructurada con el láser escáner o con la fotogrametría para aumentar la densidad de puntos y mejorar en la velocidad de adquisición de datos, aunque la precisión es menor que otros sistemas y se limita el volumen y la superficie a medir [1].

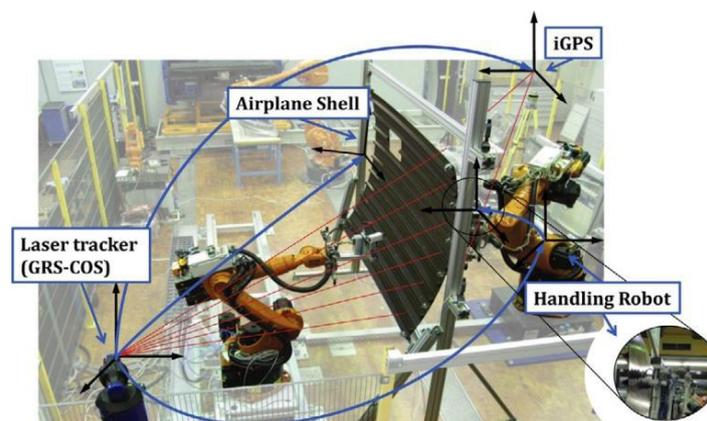


Figura 2.13. Medición de la deformación del fuselaje de un avión [4].

Para concluir, tras la revisión general de la metrología a gran escala, se observa que decantarse entre un sistema centralizado y uno distribuido no es tan clara. A continuación, se describe las ventajas y desventajas más destacadas de la utilización de los sistemas distribuidos [5].

La principal ventaja de los sistemas distribuidos es la flexibilidad y la escalabilidad que proporciona durante la configuración del sistema de medición. Se puede añadir o eliminar unidades individuales en función de la geometría y de la tarea de medición, al igual que elegir las posiciones alrededor del objeto para cubrir todo el volumen de medición y para adaptarse al tamaño y a la forma del objeto. Además, la implementación de *software* de simulación ayuda a optimizar esta fase de diseño. Estos tipos de sistemas se caracterizan habitualmente por ser redundantes; es decir, se emplean más unidades individuales de lo estrictamente necesario para la medición. Esto implica mejorar la precisión del sistema e incluso permite realizar verificaciones en tiempo real. A su vez, les convierte en sistemas más fiables, ya que si algún dispositivo no funciona correctamente, se podrá prescindir de él. Otros tipos de herramientas de medición como sondas portátiles o escáneres se pueden implementar dentro de la configuración del sistema al mismo tiempo. También, durante el proceso de medición, se pueden usar sensores que monitoreen las condiciones del volumen de trabajo como la temperatura, humedad, vibraciones.

Sin embargo, a diferencia de los sistemas centralizados, se necesita un usuario más experimentado durante el proceso de configuración y coordinar la adquisición de datos de las diferentes unidades. La fase de configuración es más compleja de realizar, ya que las condiciones ambientales afectan negativamente en la precisión, y depende más del operario, debido a que no está totalmente automatizada. Por tanto, si no se realiza correctamente, al tener más unidades individuales se introducirá mayor error en el sistema. Otros factores como la posición relativa en el volumen de trabajo de los puntos a medir y los parámetros de la configuración, también influyen en los resultados. Por último, las técnicas de verificación y validación de algunas tecnologías están limitadas, ya que se tratan de sistemas relativamente nuevos.

## 2.2. **DIGITAL TWIN**

La dificultad de contemplar todos los factores de influencia en la metrología a gran escala genera la necesidad de crear modelos virtuales para optimizarlas estrategias de medición y evaluar su rendimiento.

El concepto *Digital Twin* (Gemelo Digital) fue presentado por primera vez a principios del año 2000, pero se tardó una década hasta que la Industria 4.0 experimentó los avances necesarios para implementarlo de forma funcional (Figura 2.14). La evolución en *Machine Learning*, *Internet of Things* y en *Big Data* han contribuido enormemente a las mejoras de este modelo [10].

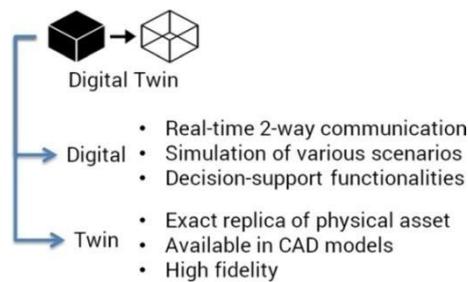


Figura 2.14. Concepto de *Digital Twin* [11].

*Digital Twin* es una representación virtual de un producto físico, activo, proceso, sistema o servicio, cuyo objetivo es comprender, predecir y optimizar su comportamiento futuro [12]. El modelo consta de tres elementos principales: sistema físico en entorno real, sistema virtual en entorno virtual y la conexión entre ellos (Figura 2.15). La integración del sistema real con su réplica virtual se realiza a través del empleo de modelos, sensores, datos y *software*, que ayudan a monitorear y analizar el sistema físico, prácticamente en tiempo real.

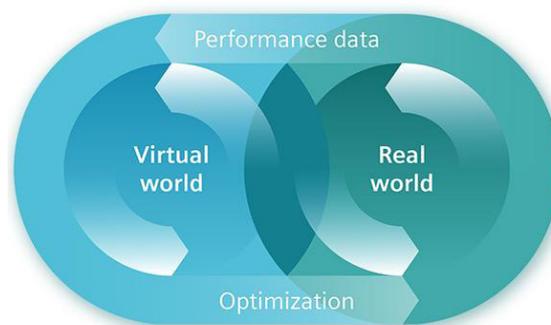


Figura 2.15. Elementos de Digital Twin [13].

El gemelo digital permite reducir costes, tiempo y recursos, ya que no es necesario desarrollar prototipos físicos, ni realizar pruebas en laboratorios o externas. Se optimiza la fase de diseño al identificar los defectos mediante la generación de multitud de escenarios. La predicción del comportamiento del sistema ayuda a anticipar posibles fallos y conocer qué elementos pueden causar problemas antes de que suceda [10].

Sin embargo, se requieren elevadas inversiones para desarrollar modelos que sean fieles a la realidad, sabiendo que todavía es un modelo nuevo de negocio y la implementación de bienes y servicios digitales resulta difícil para muchas empresas. También, puede ser costoso si la vida útil y la duración de un proyecto son pequeñas.

La tarea de implementar un gemelo digital conlleva a una serie de retos que todavía quedan sin resolver como por ejemplo, crear una metodología estándar detallada, recopilar y almacenar una gran cantidad de datos, garantizar la seguridad de los datos...

### 2.2.1. JERARQUÍA DE CAPACIDADES

Las capacidades de un gemelo digital se pueden representar como una jerarquía de niveles, donde cada nivel incorpora todas las características anteriores. En este caso, se definen 5 niveles (Figura 2.16), aunque se puede añadir niveles más altos de aprendizaje e inteligencia, a través de técnicas de inteligencia artificial.

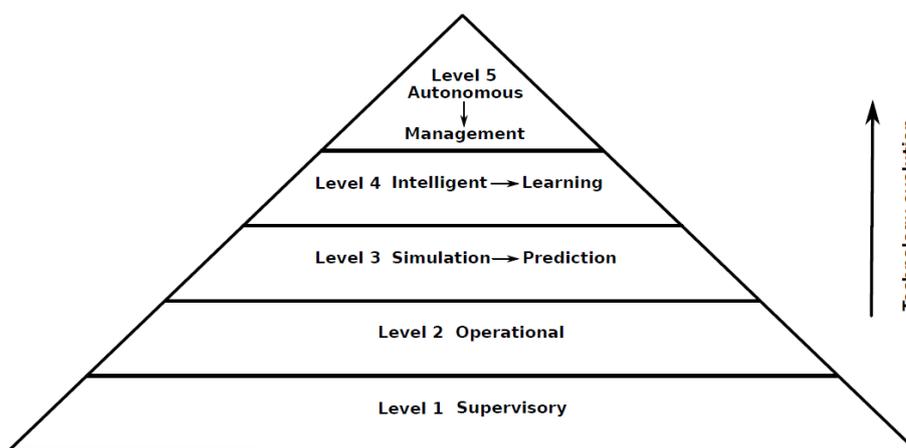


Figura 2.16. Jerarquía de capacidades del gemelo digital [14].

Los niveles de supervisión y de operación (Nivel 1 y Nivel 2, respectivamente) son los más básicos y se encuentran establecidos desde hace tiempo en las plantas de producción. Se supervisan los procesos, y las decisiones operativas se toman en función de información relevante.

El Nivel 3 agrega la capacidad de simular el gemelo digital basándose en modelos y datos. Se realizan predicciones para respaldar el diseño y las decisiones operativas y se visualiza el gemelo físico en gráficas. El requisito más importante de un gemelo digital de simulación es la de proporcionar al usuario una cuantificación de la incertidumbre y del nivel de confianza en cada predicción. En base a ello, el usuario es responsable de todas las decisiones y del manejo del gemelo físico.

Los dos niveles siguientes se corresponden con los retos actuales del gemelo digital. El Nivel 4 le aporta inteligencia mediante el aprendizaje automático a partir de los datos. Se consigue mayor planificación de escenarios y soporte en las decisiones. El último nivel le confiere autonomía para la toma de decisiones, dentro de unos parámetros preestablecidos, y para administrar el activo con una mínima intervención humana.

### 2.2.2. GESTIÓN DEL CICLO DE VIDA DEL PRODUCTO

Un aspecto importante del gemelo digital es su comportamiento dinámico con el ciclo de vida del producto o proceso; es decir, el modelo cambia a lo largo de las siguientes fases: diseño, producción, operación y eliminación (Figura 2.17). La implementación de las dos primeras fases se muestra en la Figura 2.18.

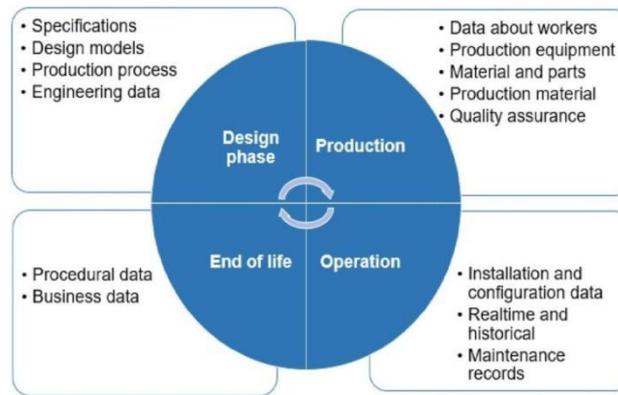


Figura 2.17. Uso del gemelo digital en la gestión del ciclo de vida del producto [12].

### Fase de diseño

La fase de diseño comienza con la comprensión de los requisitos del cliente y el planteamiento de los subsistemas y componentes. Partiendo de este diseño conceptual, se modela el entorno virtual y se verifica su correcto funcionamiento para consolidar un prototipo virtual. El prototipo virtual se valida, mediante diversas simulaciones, con el fin de determinar si cumple con las exigencias del cliente.

### Fase de producción

La fase de producción consiste en fabricar un entorno físico a partir de las especificaciones de diseño y enviar sus datos al prototipo virtual para crear una representación virtual exacta de ese sistema físico. Una vez generado el gemelo digital, también se verifica y se valida comenzando con datos de prueba a nivel de componente, de subsistema y finalmente a nivel del sistema completo hasta que se realiza la puesta en servicio. Tras esta primera etapa, el gemelo digital deberá ser validado periódicamente a lo largo de su vida, a fin de garantizar su buen funcionamiento.

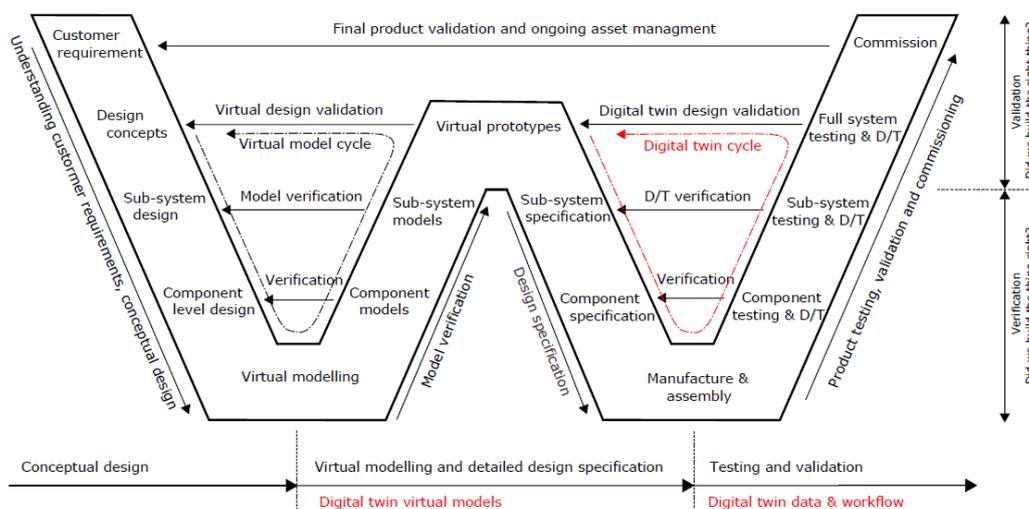


Figura 2.18. Modelo “W” para la implementación del gemelo digital [14].

Una vez sintetizado el gemelo digital, se selecciona su capacidad requerida, que normalmente se sitúa en los niveles 3, 4 ó 5. Dependiendo de las funcionalidades necesarias, se escogen los elementos esenciales para alcanzar los objetivos del gemelo digital y se crea una matriz de bloques. A modo de ejemplo, en la Figura 2.19, se muestra una matriz en el que se incluyen todos los niveles. Los niveles aumentan de izquierda a derecha y cada bloque incorpora la funcionalidad del bloque anterior. Las flechas negras indican las nuevas funcionalidades incorporadas, mientras que las flechas blancas indican que no hay cambios.

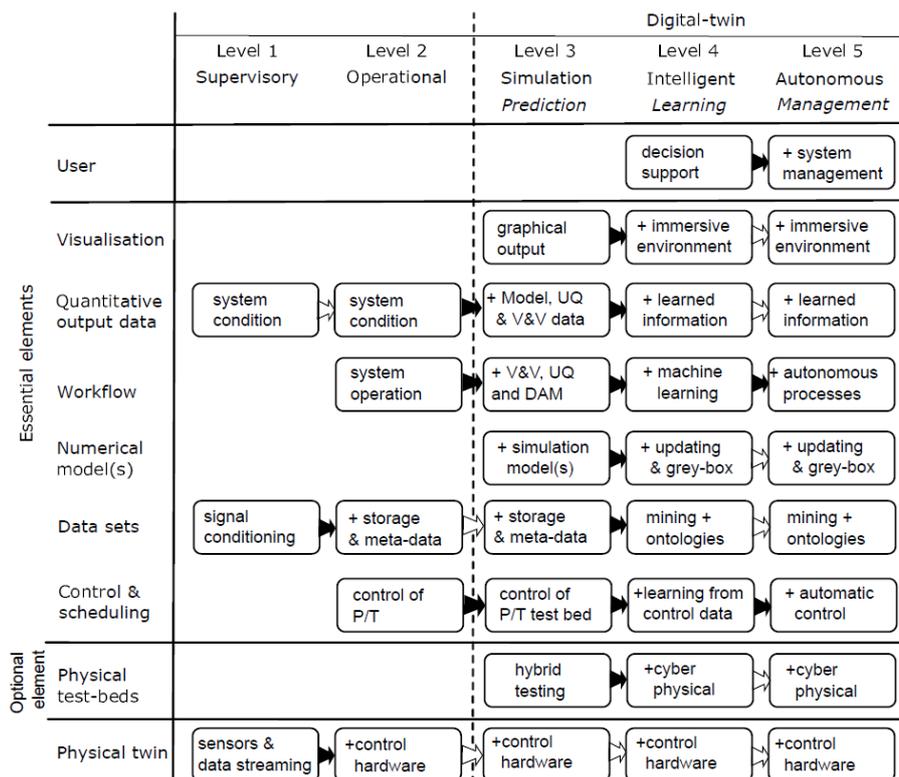


Figura 2.19. Representación de los componentes básicos para los cinco niveles del gemelo digital. (P/T: gemelo físico, V&V: verificación y validación) [14].

### Fase operativa

En la fase operativa, el sistema real y el virtual permanecen conectados de manera bidireccional; es decir, a medida que se produzcan cambios en el sistema real, se capturan los nuevos datos en el entorno virtual para conocer la configuración exacta de cada sistema. Además, se puede utilizar la información del sistema virtual para predecir el rendimiento del entorno físico.

### Fase de eliminación

Por último, el ciclo de vida termina con la retirada y eliminación del sistema. A veces, es importante guardar información sobre el comportamiento del sistema para proyectos futuros o sobre su diseño de construcción para deshacerse correctamente de los componentes del sistema físico y minimizar el impacto medio ambiental.

### 2.3. CENTRO TECNOLÓGICO TEKNIKER

El centro tecnológico Tekniker cuenta con más de 35 años de experiencia en la investigación en tecnología aplicada y en su transferencia a la empresa, alcanzando un alto grado de especialización en cuatro grandes áreas (Fabricación Avanzada, Ingeniería de Superficies, Ingeniería de Producto y TICs para fabricación), lo que le permite poner su tecnología de vanguardia al servicio de las necesidades de los clientes. Su misión es aportar crecimiento y bienestar a través de la I+D+i al conjunto de la sociedad, contribuyendo de manera sostenible a la competitividad del tejido empresarial [15].

En relación al ámbito de la Metrología, Tekniker ofrece soluciones de inspección y medida basadas en la ingeniería de precisión, la integración y desarrollos de soluciones metrológicas y en procedimientos de medición específicos, adaptados a los requisitos de cada aplicación [16].

Los servicios de metrología abarcan las necesidades de medición y calibración de todo tipo de sectores productivos como por ejemplo, el aeroespacial, la automoción, la construcción naval, generación de energía, industria ferroviaria, de precisión y pesada. También, se trabaja con procedimientos de medición avanzados de piezas, *software* de metrología avanzada y sistemas portátiles de medición que buscan introducir en el mercado nuevas soluciones de simulación, verificación y asistencia al montaje [17].

### 3. OBJETIVOS Y ALCANCE DEL TRABAJO

El objetivo de este Trabajo Fin de Máster consiste en desarrollar una aplicación (*software*) para el diseño de soluciones fotogramétricas mediante la librería de Matlab *Computer Vision Toolbox* y librerías propias desarrolladas por Tekniker (algoritmos, estructuras de datos, estrategias tipo Montecarlo). En el mercado, no existen *softwares* comerciales que combinen la mayoría de las configuraciones y tampoco son flexibles, ni se pueden editar (cajas negras). Como consecuencia, se llevan a cabo simulaciones con modelos específicos de fotogrametría en función de la aplicación del proyecto, para buscar el mejor diseño en términos de precisión, costes derivados y uso de los sistemas. Por tanto, en este TFM se pretende reunir y homogeneizar los modelos fotogramétricos existentes en una herramienta de simulación fotogramétrica para disponer de un entorno de simulación/diseño ágil y parametrizable, capaz de analizar la viabilidad de distintas configuraciones fotogramétricas, cubriendo aspectos como el rango de medida, visibilidad de los puntos de control, selección de los componentes de medición, incertidumbre y procedimiento de medición.

Como punto de partida, se dispone de librerías de otros proyectos creadas previamente por Tekniker, las cuales permiten realizar simulaciones fotogramétricas. La siguiente fase, que se aborda en este TFM, consiste en implementar dichas librerías en un *software*, cuya funcionalidad sea abarcar todas las configuraciones posibles de fotogrametría. Por último, en esta herramienta se integra un sistema de medición 3D basada en visión y se materializa ambos modelos en un activo tangible, que es capaz de simular escenarios de medida con datos sintéticos y reales y de editar los parámetros intrínsecos y extrínsecos obtenidos en la calibración de las cámaras.

Para completar los objetivos generales se establecen los siguientes hitos en un flujo secuencial:

1. Recopilación de referencias y revisión del estado del arte de fotogrametría.
2. Recopilación de soluciones tecnológicas existentes, análisis de su funcionamiento y alcance (E/S).
  - 2.1. Modelos de calibración.
  - 2.2. Modelos medición 3D.
3. Análisis de las metodologías de programación en Matlab
4. Selección de configuraciones (modelos) a integrar en la App (análisis viabilidad).
5. Desarrollo de plataforma de simulación y sus funcionalidades.
6. Validación de la aplicación con medios externos.
7. Documentación del desarrollo (manual de usuario).

## 4. BENEFICIOS QUE APORTA EL TRABAJO

El *software* de simulación fotogramétrico desarrollado en este TFM conlleva una serie de beneficios tanto tecnológicos como económicos que se describen a continuación.

En el aspecto tecnológico, se avanza en el empleo de datos sintéticos para realizar simulaciones virtuales de fotogrametría, ya que actualmente, existen pocos *software* comerciales que se dediquen a ello y con un enfoque industrial (VSTARS, Phox). La herramienta desarrollada proporciona mayor flexibilidad al reunir en una sola aplicación la mayoría de las configuraciones fotogramétricas así como su parametrización flexible, sin estar limitado por la aplicación del proyecto y sin necesidad de crear soluciones personalizadas. Además, se evita la combinación de varios *software* que pueden causar problemas de incompatibilidad durante su funcionamiento o que limiten el control de las mismas (cajas negras). Las simulaciones permiten previsualizar y optimizar el diseño y el proceso de adquisición de imágenes en términos de número de cámaras, colocación de las cámaras y distribución de los puntos de control. Ayuda a comprender y predecir el comportamiento del sistema ante diferentes condiciones de trabajo y analizar cómo influye la variación de los parámetros y de los modelos fotogramétricos empleados en los resultados. La estimación de la incertidumbre de la calibración aporta una idea aproximada de la precisión del proceso de medición simulado. Por último, el *software* permite implementar actualizaciones a medida que vayan surgiendo nuevos avances en la fotogrametría, como por ejemplo, nuevos modelos de calibración o de medición y de funciones de procesamiento necesarias. Por tanto, puede convertirse a futuro en una plataforma que resuelva la implementación real de las soluciones de medición.

En el aspecto económico, como se trata de un *software* de desarrollo propio, la empresa se evita la compra de licencias que rondan entre los 10.000 € y 20.000 € e incluso otras compañías podrán beneficiarse del servicio prestado. Por otro lado, se produce una importante reducción en los costes de montaje y de pruebas internas de hasta 500 €/h y de entre 800 €/día y 1.000 €/día en trabajos con clientes, al no ser necesario realizar tantos ensayos reales hasta alcanzar el rendimiento deseado. Una consecuencia directa de ello, es el ahorro de tiempo, el menor desgaste que sufre el equipo de fotogrametría, los desplazamientos innecesarios al lugar de medición y el menor gasto de personal para las tareas de preparación. También, se evita comprar equipamiento prescindible o excesivamente caro; es decir, se ayuda a ajustar el presupuesto para la tarea específica, ya que las simulaciones solamente requieren de las especificaciones técnicas del equipo, las cuales se pueden consultar al proveedor. Por ejemplo, un equipo de alta gama de VSTARS ronda los 30.000€, mientras que otros de media gama entre los 10.000 € y 15.000 €.

En resumen, este Trabajo Fin de Máster aporta un nuevo enfoque en el desarrollo de *softwares* fotogramétricos al englobar en una sola aplicación un entorno de diseño y simulación de múltiples configuraciones, lo que implica un enorme ahorro de tiempo, recursos y de costes.

## 5. ALTERNATIVAS

A la hora de seleccionar un sistema de medición, el usuario debe prestar atención a los requisitos técnicos, económicos y logísticos asociados con las mediciones deseadas. La diversidad de tecnologías disponibles en el mercado, tal y como se ha descrito en el apartado 2.CONTEXTO, dificulta la selección del instrumento adecuado según dichos requisitos. También, el equipamiento y el *software* asociados al sistema elegido son igual de relevantes. Por tanto, en este apartado se analizan las características más relevantes en los tres ámbitos.

### 5.1. TECNOLOGÍA

A continuación, se describen las principales características de las tecnologías de medición más empleadas en metrología de largo alcance: máquina de medir por coordenadas (CMM), láser tracker, laser radar, laser escáner, iGPs y fotogrametría.

#### 5.1.1. CMM

Las máquinas de medición por coordenadas (CMM) de tipo pórtico y de brazo horizontal son los sistemas de medición de cinemática en serie más empleados en aplicaciones de largo alcance (Figura 5.1). Se consiguen altas precisiones y permiten medir características de difícil acceso. Ofrecen la capacidad de realizar mediciones dimensionales, posicionales y de superficie en un solo sistema. Se pueden combinar y cambiar rápidamente diferentes sondas de contacto y escáneres láser en la misma tarea de inspección.



Figura 5.1. Máquinas de medir por coordenadas (CMM). a) Tipo pórtico [18], b) Tipo brazo horizontal [19].

Como se trata de un sistema centralizado, el principal inconveniente es la imposibilidad de trasladar la MMC al objeto de medición y la falta de libertad de movimiento del cabezal en el volumen de trabajo sin colisionar con el objeto. También, es necesario alinear manualmente el objeto. Además, son sistemas sensibles a las variaciones de temperatura [20], [1].

Las de tipo pórtico son las más precisas ( $7 \mu\text{m} + L/250 \mu\text{m}$ ) y disponen de un volumen de trabajo de hasta  $5 \text{ m} \times 11 \text{ m} \times 3,5 \text{ m}$  [4], pero el precio alcanza los 450.000 € [21]. En cambio,

las de tipo brazo horizontal, son susceptibles a deformarse debido a su diseño en voladizo, por lo que la precisión es de  $10 \mu\text{m} + L/200 \mu\text{m}$  [22], pero tienen mayor accesibilidad con un brazo móvil de 25 metros de campo de medida.

La integración de escáneres láser (Figura 5.2), permite mediciones de altas densidades de puntos de hasta 200.000 puntos/segundo y con una precisión de  $6 \mu\text{m} + L/350 \text{mm}$  [23]. La posibilidad de automatizar el escaneo y de aplicarse en múltiples materiales y superficies brillantes, sin necesidad de tratamientos superficiales aumentan la productividad [1], [21], [4].



Figura 5.2. Integración de un escáner láser en una CMM [19].

Los principales sectores industriales donde se utilizan las CMM son la automoción, aeroespacial, telecomunicaciones, de generación de energía y estampación. Permiten inspeccionar paneles y carrocerías, moldes, carcasas y piezas fundidas, componentes de motores del sector naval y ferroviario [20].

### 5.1.2. LÁSER TRACKER

El láser tracker es un sistema óptico basado en láser, que mide en coordenadas esféricas (Figura 5.3). Para determinar la distancia, el láser se emite desde el cabezal y se refleja en un retrorreflector, como por ejemplo, los de montaje esférico (SMR). Los sensores del tracker detectan la posición del láser devuelto y corrigen los dos ángulos del cabezal para que el láser alcance el centro del SMR. El coste del equipo se sitúa entre los 80.000 € y los 150.000 € [1].



Figura 5.3. Láser tracker FARO [24].

Antes de proceder con la medición, se prepara el escenario colocando los objetivos manualmente en la zona de inspección. Esta tecnología no puede medir múltiples puntos simultáneamente [25], por lo que el proceso es lento y en caso de realizar mediciones dinámicas, la velocidad de medición depende de la capacidad de mover los objetivos por parte del operario (Figura 5.4). Normalmente, se necesitan dos operarios: uno para controlar el SMR y otro el ordenador. Como consecuencia, la capacidad de automatización es limitada.



Figura 5.4. Medición con objetivo retrorreflectante [26].

Actualmente, el láser tracker puede combinar la tecnología IFM y ADM. Se alcanzan precisiones de distancia de  $16 \mu\text{m} + 0,8 \mu\text{m}/\text{m}$  en ADM y de  $4 \mu\text{m} + 0,8 \mu\text{m}/\text{m}$  en IFM. La precisión angular es de  $20 \mu\text{m} + 5 \mu\text{m}/\text{m}$  [27] y con un alcance de hasta 160 metros [28], pero la capacidad de cubrir volúmenes de diferentes tamaños y formas es baja. Cabe destacar que la precisión depende de la colocación del objetivo y de las condiciones ambientales (presión, humedad relativa, temperatura), ya que afectan al índice de refracción del aire, y por tanto, se modifica la longitud de onda del haz. Por ello, el operario debe tener un mayor nivel de habilidad y de conocimiento durante el empleo del equipo.

Esta tecnología se aplica en sectores industriales [24] como la automoción, la aeroespacial, la eólica y la hidráulica, la construcción, la naval, la metalúrgica y la ferroviaria y transporte. Principalmente, se trata de una solución para realizar calibraciones de las CMM, mediante la multilateración (Figura 5.5), u otros dispositivos de medida de menor precisión y para caracterizar la precisión, repetición y rendimiento dinámico de robots (Figura 5.6), mediante el monitoreo continuo durante la fabricación. También, se inspeccionan piezas y ensamblajes y se controla el desgaste de moldes, matrices y herramientas.

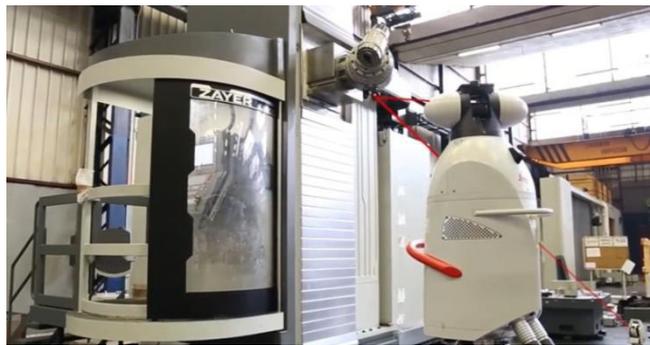


Figura 5.5. Verificación volumétrica de Máquina Herramienta mediante multilateración [29].

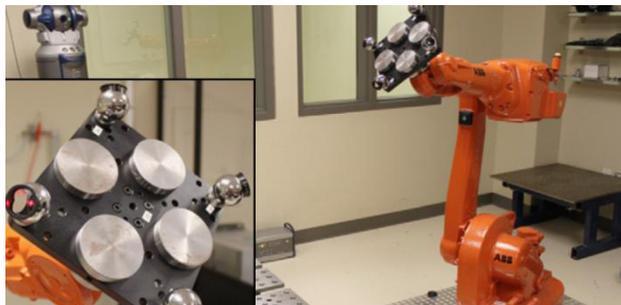


Figura 5.6. Calibración de un brazo robot [30].

### 5.1.3. LÁSER RADAR

El láser radar es otro sistema óptico basado en tecnología láser, que mide en coordenadas esféricas (Figura 5.7). A diferencia del láser tracker, es capaz de realizar mediciones automatizadas y sin supervisión, reduciéndose así, los costes de operación y de mano de obra. La distancia al objeto se determina mediante láser radar coherente de frecuencia modulada (FM CLR) sin necesidad de objetivos y con un rango de trabajo de 0,5 metros a 50 metros.



Figura 5.7. Láser Radar Nikon [31].

La precisión de distancia suele ser de  $20 \mu\text{m} + 5 \mu\text{m}/\text{m}$ , la precisión angular de  $13,6 \mu\text{m}/\text{m}$  y la velocidad de inspección alcanza los 2.000 puntos/segundos [32], por lo que es adecuado para medir tanto características como escanear superficies frágiles (Figura 5.8), incluyendo paneles altamente reflectantes, brillantes y oscuros. El coste del equipo es el más caro, siendo de 400.000€ a 500.000€ [1].



Figura 5.8. Medición de antena parabólica [33].

Las aplicaciones donde más se emplea esta tecnología son la inspección de ensamblajes en las líneas de producción de automoción (Figura 5.9) y en la ingeniería inversa. Las inspecciones en línea [34] consisten en integrar el láser radar en brazos robóticos de 6 ejes para reubicarlo automáticamente y así, pueda inspeccionar áreas que estaban ocultas de la línea de visión.

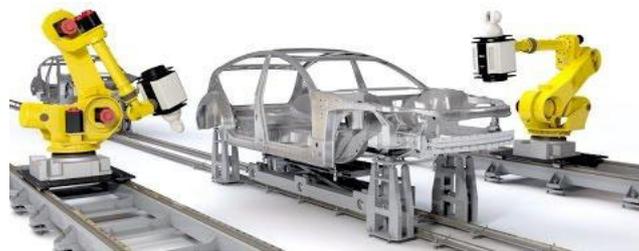


Figura 5.9. Inspección en línea con láser radar [35].

En la industria de las energías renovables, se implementa para la alineación y posicionamiento de reflectores solares y para la optimización de las geometrías de los álabes de las turbinas eólicas. En la industria siderúrgica, permite medir superficies a muy altas temperaturas y controlar la calidad del proceso desde el alto horno hasta la producción de las chapas metálicas. También, se integra en métodos de fabricación de materiales compuestos y de moldes (Figura 5.10), los cuales se emplean en aeronáutica.

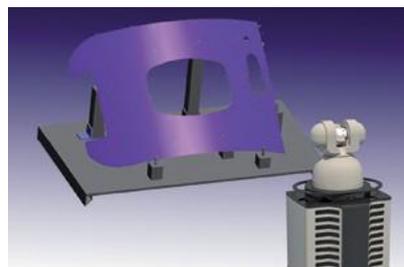


Figura 5.10. Inspección de materiales compuestos [33].

#### 5.1.4. LÁSER ESCÁNER

El láser escáner es otro sistema óptico basada en tecnología láser ADM, que mide en coordenadas esféricas. Se diferencia de los dos anteriores por la producción de un modelo digital formado por un conjunto de millones de puntos de medición 3D, sin necesidad de operarios especializados y completamente automatizado [36]. El precio ronda entre los 35.000€ y 70.000€ [37], aunque generalmente es necesario actualizar el equipo con mayor frecuencia [38].



Figura 5.11. Láser escáner FARO [39].

Emite un haz desde un espejo giratorio hacia el área a escanear y por reflexión en los objetos, regresa para calcular el tiempo de vuelo de regreso (Figura 5.12). También, puede disponer de GPS y de una cámara integrada con la función HDR, que proporciona superposiciones de color de las nubes de puntos escaneadas, para mejorar la visualización de importantes detalles en el lugar [40]. Sin embargo, las superficies texturizadas o reflectantes provocan que la nube de puntos sea difusa. El alcance de medición es el mayor de todos, situándose en 330 metros, pero la precisión disminuye considerablemente, siendo de 3,5mm + 0,1mm/m y la precisión angular de 19" [41].



Figura 5.12. Rotación vertical y horizontal del láser [42].

En cuanto a la velocidad de adquisición de datos, se sitúa en 1.000.000 puntos/segundo [36], por lo que el escaneo de objetos extremadamente grandes aumenta considerablemente el tiempo de post-procesamiento y consume una gran cantidad de recursos. Además, una vez completado el escaneo, no se puede extraer información adicional del objeto a menos que se realice un nuevo escaneo con una mayor resolución [43]. Sectores como la topografía,

construcción e ingeniería civil lo emplean para supervisar estrictamente cada una de las fases de los proyectos de excavaciones, de minas a cielo abierto, construcciones de puentes, de carreteras, y para controlar las alteraciones estructurales (Figura 5.13). En la industria naval, se usa para ayudar al montaje y asistir a las actividades de reparación y modificación y a la digitalización de cascos y componentes navales (palas de rotor, turbinas, hélices). En las refinerías, plantas eléctricas y centros de producción requieren datos 3D exactos de CAD para su reparación o ampliación o para crear simulaciones de las instalaciones.



Figura 5.13. Supervisión y control. a) Excavaciones, b) Construcción de puentes [40].

#### 5.1.5. iGPS

La tecnología iGPS es un sistema de medición óptico, recientemente desarrollado, que utiliza una red de transmisores situados alrededor del volumen de medición para determinar la posición de sensores (Figura 5.14). Los transmisores emiten un haz a través del cabezal giratorio y una luz estroboscópica, para determinar la posición 3D del sensor mediante triangulación [44]. El alcance máximo es de 55 metros con una precisión uniforme en todo el volumen de medición de  $200 \mu\text{m} + 1 \mu\text{m}/\text{m}$  [45].



Figura 5.14. Transmisor y sensor iGPS [46].

Dentro del recinto, se puede medir las posiciones o seguir el movimiento de un número ilimitado de dispositivos (Figura 5.15) como AGVs, robots, palpadores de medición o accesorios de seguimiento equipados con sensores [46]. De esta manera, se corrige continuamente las trayectorias y se aseguran que los sistemas de mecanizado automatizados estén en la ubicación correcta. El coste supera los 150.000€, suponiendo el mínimo número de unidades [1].

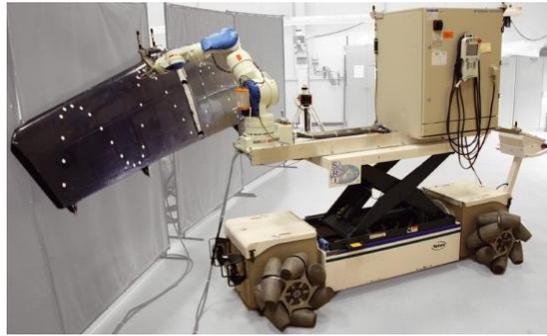
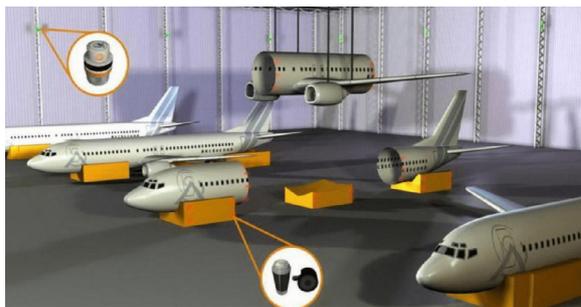


Figura 5.15. Manipulador móvil [45].

Las mediciones de iGPS se integran en las fases de producción y ensamblaje de las secciones del fuselaje y de las alas de un avión, realizando un proceso de montaje asistido por metrología en tiempo real (Figura 5.16). También, permiten supervisar los sistemas de mecanizado robótico de taladrado y remachado y medir la hidrodinámica de prototipos de barcos en grandes tanques de agua [47].



a)



b)

Figura 5.16. Aplicaciones del sistema iGPS. a) Ensamblaje de aviones [46], b) Medición hidrodinámica de barcos [48].

### 5.1.6. FOTOGRAMETRÍA

La fotogrametría es un sistema de medición óptico basado en la adquisición de imágenes, que se caracteriza por la facilidad y rapidez con la que se pueden recopilar y procesar los datos. La posición de los puntos se determina por triangulación. Los sistemas fotogramétricos offline, basados en la medición previa de objetivos, alcanzan los niveles más altos de precisión y de exactitud. El alcance máximo es de 200 metros y la precisión de la medición de los puntos de las imágenes puede ser de hasta 0,02 píxeles, lo que implica una precisión relativa de 1: 200.000 [2].

La nueva directriz VDI / VDE2634 propone procedimientos para la aceptación y verificación de sistemas de medición óptica en 3D en los que se incluye los sistemas fotogramétricos (Figura 5.17). También, en el momento de la medición y bajo las condiciones ambientales que existen (temperatura, humedad, etc.), la fotogrametría dispone de la autocalibración para eliminar los errores presentes en el sistema y garantizar la fiabilidad de los datos [9].

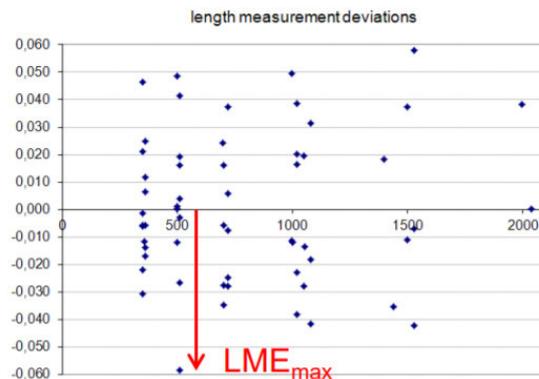
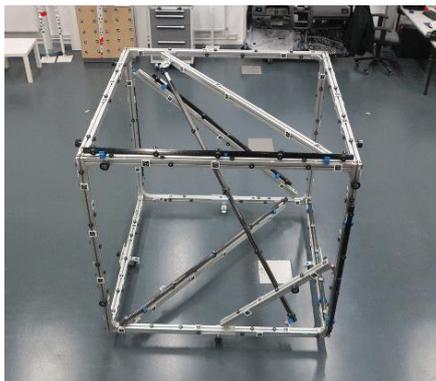


Figura 5.17. Evaluación del error de medición de longitud (LME) según VDI / VDE2634 [3].

La rápida obtención de información conlleva a poder realizar análisis dinámicos y estáticos y permite realizar mediciones multipunto, de superficie, de estructuras o mediciones simultáneas de múltiples características. Incluso operarios con baja formación pueden usar estos sistemas gracias a la existencia de *software* fotogramétricos completamente automatizados y robustos (VSTARS®, GOM®, AICON 3D®). Además, se trata de una solución mucho más económica dentro de su rango de aplicación (de 20.000 € a 100.000 €) [1], y su rendimiento es más estable en entornos de medición severos con vibraciones y variaciones de temperatura [49].

Otra característica importante es la flexibilidad que ofrece durante el diseño de la configuración fotogramétrica, según las necesidades de la aplicación. Dependiendo de la colocación de las cámaras, la distancia de trabajo, el ángulo de intersección entre cámaras y el tamaño de los objetivos, se pueden conseguir distintas resoluciones y volúmenes de medición con un mismo sistema (cámara, lente y sensor). También, la portabilidad del equipo favorece esta cantidad de combinaciones (Figura 5.18).



Figura 5.18. Equipamiento portable [50].

La integración de la fotogrametría no solo en el control de calidad sino también en los procesos de fabricación es cada vez más común, ya que permite adquirir información en tiempo real con la que se puede mejorar la producción. Un ejemplo de ello (Figura 5.19), es el ensamblaje asistido por medición (MAA). Además, los modelos 3D obtenidos se pueden

exportar a *softwares* de diseño, fabricación e ingeniería asistido por ordenador (CAD-CAM-CAE) para su posterior procesamiento y análisis [51].



Figura 5.19. Integración de la fotogrametría en una cadena de montaje [52].

La principal desventaja es la necesidad de emplear objetivos artificiales como puntos de referencia para realizar mediciones, definir el escalado y para obtener resultados precisos (Figura 5.20). Los objetivos deben estar visibles y distribuidos aleatoriamente para garantizar una identificación robusta y varias imágenes consecutivas deben compartir un número mínimo de ellos. En el caso de geometrías complejas, se requieren de adaptadores especiales. Como consecuencia, se incrementa el tiempo de preparación del objeto a medir y el número de imágenes adquiridas. También, surgen tareas añadidas [9] como por ejemplo, asegurar un buen mantenimiento para evitar que se despeguen o que se ensucien y retirarlos tras terminar las mediciones. El desafío sigue siendo desarrollar un método para la medición directa de características.



Figura 5.20. Colocación de objetivos en una carcasa de válvula [53].

La precisión de los sistemas online suelen ser menores que la de los sistemas offline debido al número limitado de imágenes y la autocalibración resulta ser más complicada. Por tanto, la precisión de las mediciones en tiempo real se encuentra en el orden de 0,2 a 0,5 mm en objetos de 2 metros de tamaño [2].

No existe gran variedad de herramientas de simulación industrial que permitan diseñar un entorno de simulación, en el cual, se pueda optimizar las configuraciones fotogramétricas (número de cámaras, poses y colocación de objetivos). Actualmente, se suelen combinar dos *softwares* industriales, Spatial Analyzer (SA©) y VSTARS©. Una solución más personalizada consiste en el uso de librerías de Matlab junto con la programación propia y desde un punto de vista académico está disponible Phox©. En ningún caso, se puede estimar la incertidumbre de los parámetros intrínsecos y extrínsecos, procedentes de la calibración, lo que afecta a la precisión de los resultados.

Otro aspecto negativo es la falta de automatización cuando la cámara se tiene que mover alrededor del objeto cada cierto ángulo y desde diferentes alturas para adquirir las imágenes, sobre todo en el caso de geometrías grandes (Figura 5.21).



Figura 5.21. Movimiento de la cámara alrededor de un vehículo [54].

El factor ambiental que más influye es la iluminación y sobre todo el acabado superficial de las piezas, ya que puede favorecer la aparición de reflejos (Figura 5.22). Por ello, se debe garantizar que la luz sea constante desde todas las perspectivas de las cámaras y que haya un contraste adecuado de los objetivos.



Figura 5.22. Iluminación sobre el fuselaje de una aeronave [3].

### 5.1.7. COMPARATIVA DE TECNOLOGÍAS

En este apartado, se va realizar una comparación de las tecnologías descritas anteriormente (Tabla 5.15) mediante el análisis de diversos criterios agrupados en cuatro categorías principales: estructura, rendimiento, condiciones de trabajo y condiciones de uso (Tabla 5.1).

A cada categoría se le asigna un peso (excepto al bloque estructura), que se reparte entre los criterios correspondientes. En los criterios, se aplica una calificación, de 3 ó 5 niveles, dependiendo de cuál se adapta mejor al criterio correspondiente, junto con un valor (Tabla 5.2 y Tabla 5.3) y una breve descripción. Después, se realiza la ponderación de las tecnologías, calculándolo a partir de la expresión [5.1], para conocer cuál de ellas predomina en la medición de largo alcance. De la Tabla 5.16 se concluye que la fotogrametría es la mejor alternativa de entre las demás opciones con un valor ponderado de 2,4 sobre 3.

$$\text{Ponderación} = \frac{1}{\sum P_j} \cdot \sum_{j=1}^3 \sum_{i=1}^{11} (p_{ij} \cdot v_{ij}) \quad [5.1]$$

Se considera que los bloques condiciones de uso y condiciones de trabajo tengan mayor importancia, ya que, el desafío actual en la medición gran escala es diseñar y producir sistemas de bajo costo, portátiles y fáciles de usar, con un nivel adecuado de precisión [5].

Tabla 5.1. Categorías y criterios para analizar.

Categoría	Peso total (P <sub>j</sub> )	Criterios (i)	Peso (p <sub>i</sub> )
1. Estructura	-	Diseño	-
		Interacción con el objeto medido	-
		Principio de medición	-
2. Rendimiento	27	Preparación de la medición	10
		Precisión e incertidumbre	8
		Velocidad de inspección	9
3. Condiciones de trabajo	33	Accesibilidad	11
		Acabado superficial	9
		Factores del entorno	13
4. Condiciones de uso	40	Coste	10
		Rango	5
		Ergonomía	10
		Capacidad de automatización	8
	Complejidad tecnológica	7	
$\sum P_j$	100		

Tabla 5.2. Calificación y valor (5 niveles).

Calificación	Muy Baja	Baja	Media	Alta	Muy Alta
Valor	1	1,5	2	2,5	3

Tabla 5.3. Calificación y valor (3 niveles).

Calificación	Baja	Media	Alta
Valor	1	2	3

## 1. Estructura

Permite clasificar todos los sistemas desde el punto de vista de la forma de implementación, el tipo de interacción con el objeto medido y la tecnología predominante.

- Diseño: centralizado (C) ó distribuido (D).
- Interacción con el objeto medido: con contacto (CC), sin contacto (SC) ó sin contacto con objetivos (SCO).
- Principio de medición: cinemático, medición absoluta de distancia (ADM), interferometría láser (IFM), radar coherente de frecuencia modulada (FM CLR), multilateración (ML) ó multiangulación basado en triangulación (MA).

## 2. Rendimiento

- Se considera las principales características de la metrología a gran escala: preparación de la medición, precisión e incertidumbre y velocidad de inspección (Tabla 5.4, Tabla 5.5 y Tabla 5.6).
- Preparación de la medición: tiempo necesario para la gestión del instrumento. En algunos casos, la colocación y retirada de objetivos o sensores es lo que más tiempo consume, mientras que en otros, es su calibración.

Tabla 5.4. Rendimiento. Criterio: preparación de la medición.

Criterio	Peso		
Preparación medición	10		
Calificación	Bajo	Medio	Alto
Descripción [h]	< 1	1 ÷ 4	> 4
Valor	3	2	1

- Precisión e incertidumbre: determina la calidad de una medición y del comportamiento del sistema en todo el espacio de medición, cuando se aplica un procedimiento de medición específico.

Tabla 5.5. Rendimiento. Criterio: precisión e incertidumbre (tamaño de pieza: 1 m).

Criterio	Peso				
Precisión	8				
Calificación	Muy Bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy Alto
Descripción [ $\mu\text{m}$ ]	>300	200 ÷ 100	100 ÷ 50	50 ÷ 20	< 20
Valor	1	1,5	2	2,5	3

- Velocidad de inspección: cantidad de puntos que se adquiere por segundo.

Tabla 5.6. Rendimiento. Criterio: velocidad de inspección.

<b>Criterio</b>	<b>Peso</b>				
Velocidad inspección	9				
<b>Calificación</b>	<b>Muy bajo</b>	<b>Bajo</b>	<b>Medio</b>	<b>Alto</b>	<b>Muy alto</b>
<b>Descripción [puntos/segundo]</b>	< 50	50 ÷ 5.000	5.000 ÷ 50.000	50.000 ÷ 500.000	> 500.000
<b>Valor</b>	1	1,5	2	2,5	3

### 3. Condiciones de trabajo

Una gran limitación son las características geométricas y superficiales del objeto a medir, además del entorno en el que se realizan las mediciones (Tabla 5.7, Tabla 5.8 y Tabla 5.9).

- Accesibilidad: capacidad de medir puntos en zonas de difícil acceso, dependiendo de la geometría.

Tabla 5.7. Condiciones de trabajo. Criterio: preparación de la medición.

<b>Criterio</b>	<b>Peso</b>		
Accesibilidad	11		
<b>Calificación</b>	<b>Bajo</b>	<b>Medio</b>	<b>Alto</b>
<b>Descripción</b>	Necesitan una línea de visión directa	Combinación de sistemas ópticos y de contacto, pero hay riesgo de colisión	Un subconjunto de unidades debe estar en la línea de visión. Combinación de sistemas ópticos y de contacto
<b>Valor</b>	1	2	3

- Acabado superficial: frecuencia con la que las superficies del objeto deben tratarse con recubrimientos específicos antes de la medición para evitar reflejos debido a la iluminación.

Tabla 5.8. Condiciones de trabajo. Criterio: acabado superficial.

<b>Criterio</b>	<b>Peso</b>		
Acabado superficial	9		
<b>Calificación</b>	<b>Bajo</b>	<b>Medio</b>	<b>Alto</b>
<b>Descripción</b>	No necesitan tratamiento superficial	Dependiendo de la zona, necesitan recubrimientos específicos	Necesitan con frecuencia tratamiento superficial
<b>Valor</b>	3	2	1

- Factores del entorno: influencia de las condiciones ambientales (temperatura, humedad, presión, vibraciones) en el instrumento y si se puede utilizar en condiciones no estándar.

Tabla 5.9. Condiciones de trabajo. Criterio: factores de entorno.

Criterio		Peso		
Factores entorno		13		
Calificación	Bajo	Medio	Alto	
Descripción	Influye poco las condiciones ambientales	Influye algo las condiciones ambientales	Influye mucho las condiciones ambientales y se debe emplear en un lugar controlado	
Valor	3	2	1	

#### 4. Condiciones de uso

Se mencionan los criterios relacionados con la adquisición y aplicación del sistema, como el coste medio, el rango de aplicación, la ergonomía y la capacidad de automatización (Tabla 5.10, Tabla 5.11, Tabla 5.12, Tabla 5.13 y Tabla 5.14).

- Coste: coste medio del equipo necesario para realizar la medición.

Tabla 5.10. Condiciones de uso. Criterio: coste medio.

Criterio		Peso		
Coste medio		10		
Calificación	Bajo	Medio	Alto	
Descripción [€]	< 60.000	60.000÷150.000	150.000÷500.000	
Valor	3	2	1	

- Rango: alcance máximo de medición.

Tabla 5.11. Condiciones de uso. Criterio: rango de medición.

Criterio		Peso		
Rango		5		
Calificación	Bajo	Medio	Alto	
Descripción [m]	< 55	55÷200	200÷330	
Valor	1	2	3	

- Ergonomía [1]: cualidad que engloba la facilidad de moverse dentro del entorno de trabajo (portabilidad), la capacidad de aplicarse en distintos entornos y de realizar diversas tareas de medición (flexibilidad), la facilidad de instalación y de uso (practicidad) y la capacidad de cubrir volúmenes de diferentes tamaños y formas (escalabilidad).

Tabla 5.12. Condiciones de uso. Criterio: ergonomía.

<b>Criterio</b>	<b>Peso</b>		
Ergonomía	10		
<b>Calificación</b>	<b>Bajo</b>	<b>Medio</b>	<b>Alto</b>
<b>Descripción</b>	No cumple con muchas de las cualidades	Cumple con algunas de las cualidades	Cumple con muchas de las cualidades
<b>Valor</b>	1	2	3

- Capacidad de automatización: se refiere si es necesario la intervención del operario durante la medición.

Tabla 5.13. Condiciones de uso. Criterio: capacidad de automatización.

<b>Criterio</b>	<b>Peso</b>		
Capacidad de automatización	8		
<b>Calificación</b>	<b>Bajo</b>	<b>Medio</b>	<b>Alto</b>
<b>Descripción</b>	No automatizable	Parcialmente automatizable	Completamente automatizable
<b>Valor</b>	1	2	3

- Complejidad tecnológica: dificultad en la reparación y el mantenimiento, en la configuración y en el uso.

Tabla 5.14. Condiciones de uso. Criterio: complejidad tecnológica.

<b>Criterio</b>	<b>Peso</b>		
Complejidad tecnológica	7		
<b>Calificación</b>	<b>Bajo</b>	<b>Medio</b>	<b>Alto</b>
<b>Descripción</b>	Operarios no cualificados	En algunas tareas se necesita de operarios cualificados	Operarios cualificados
<b>Valor</b>	3	2	1

En la tabla siguiente (Tabla 5.15), se resumen los criterios de cada tecnología y en la Tabla 5.16 se asignan los valores correspondientes a las calificaciones y se calcula la ponderación.

Tabla 5.15. Comparación de características entre diferentes tecnologías de medición de largo alcance.

Categoría	Criterio	CMM	Láser tracker	Láser radar	Láser escáner	iGPs	Fotogrametría
1. Estructura	Diseño	C	C, D	C	C	D	D
	Interacción	CC, SC	SCO	SC	SC	SCO	SCO
	Principio de medición	Cinemático	ADM/IFM, ML	FM CLR	ADM	MA	MA
2. Rendimiento	Preparación medición	Alta	Media	<u>Baja</u>	<u>Baja</u>	Media	Alta
	Precisión (distancia)	7 $\mu\text{m}$ + L/250 $\mu\text{m}$	<u>4 <math>\mu\text{m}</math> + 0,8 <math>\mu\text{m}/\text{m}</math></u>	20 $\mu\text{m}$ + 5 $\mu\text{m}/\text{m}$	3,5 mm + 0,1 mm/m	200 $\mu\text{m}$ + 1 $\mu\text{m}/\text{m}$	1:200.000
	Velocidad de inspección	Alta	Muy baja	Baja	<u>Muy alta</u>	Baja	Media
3. Condiciones de trabajo	Accesibilidad	<u>Alta</u>	Baja	Baja	Baja	Media	<u>Alta</u>
	Acabado superficial	Media	<u>Baja</u>	<u>Baja</u>	Alta	Baja	Media
	Factores del entorno	Alta	Alta	Media	Media	<u>Baja</u>	<u>Baja</u>
4. Condiciones de uso	Coste [€]	450.000	80.000 ÷ 150.000	400.000 ÷ 500.000	<u>35.000 ÷ 70.000</u>	> 150.000	20.000 ÷ 100.000
	Rango [m]	5 x 11 x 3,5	160	50	<u>330</u>	55	200
	Ergonomía	Baja	Media	Media	Media	<u>Alta</u>	<u>Alta</u>
	Capacidad de automatización	<u>Alta</u>	Media	<u>Alta</u>	Media	Media	Baja
	Complejidad tecnológica	Media	Alta	<u>Baja</u>	<u>Baja</u>	Media	<u>Baja</u>

Tabla 5.16. Ponderación de las tecnologías de medición a gran escala.

Bloque	Criterio	PESO	CMM	Láser tracker	Láser radar	Láser escáner	iGPs	Fotogrametría
2. Rendimiento	Preparación medición	10	1	2	3	3	2	1
	Precisión (distancia)	8	3	3	2,5	1	1,5	2,5
	Velocidad de inspección	9	2,5	1	1,5	3	1,5	2
3. Condiciones de trabajo	Accesibilidad	11	3	1	1	1	2	3
	Acabado superficial	9	2	3	3	1	3	2
	Factores del entorno	13	1	1	2	2	3	3
4. Condiciones de uso	Coste	10	1	2	1	3	2	3
	Rango	5	1	2	1	3	1	2
	Ergonomía	10	1	2	2	2	3	3
	Capacidad de automatización	8	3	2	3	2	2	1
	Complejidad tecnológica	7	2	1	3	3	2	3
		$\sum_{j=1}^3 \sum_{i=1}^{11} (p_{ij} \cdot v_{ij})$	172,5	177	207,5	213	218,5	237
		<b>PONDERACIÓN</b>	1,7	1,7	2,1	2,1	2,2	<b>2,4</b>

## 5.2. SOFTWARES

Los *softwares* de simulación fotogramétricos disponibles se clasifican en comerciales y de desarrollo propio. A continuación, se describen las características más importantes de cada uno de ellos.

### 5.2.1. COMERCIALES

Los *softwares* comerciales suelen ser herramientas, cuyo funcionamiento se limita a que el usuario introduzca los datos de entrada y obtenga automáticamente los resultados.

#### SA-VSTARS

SA-VSTARS es una herramienta de simulación industrial que resulta de la combinación de dos *softwares* comerciales: Spatial Analyzer (SA©) y VSTARS©. La visualización de red de cámaras y de puntos se lleva a cabo en SA (Figura 5.23), mientras que en VSTARS [55] se controla la configuración fotogramétrica (número de cámaras, posiciones y orientaciones, parámetros de las cámaras) y se estima la incertidumbre de cada punto (Figura 5.24).

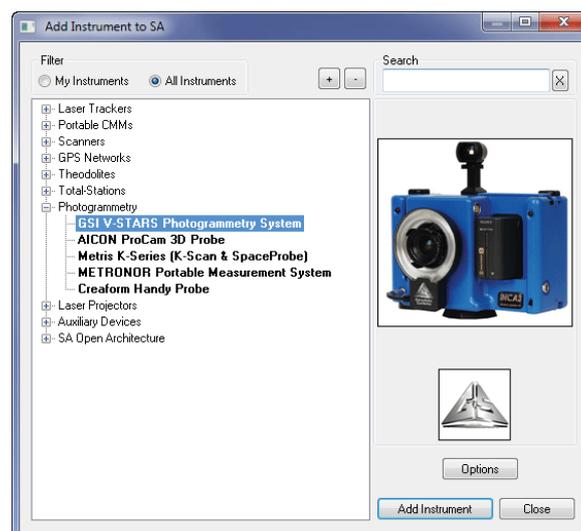


Figura 5.23. Selección del sistema virtual en SA [56].

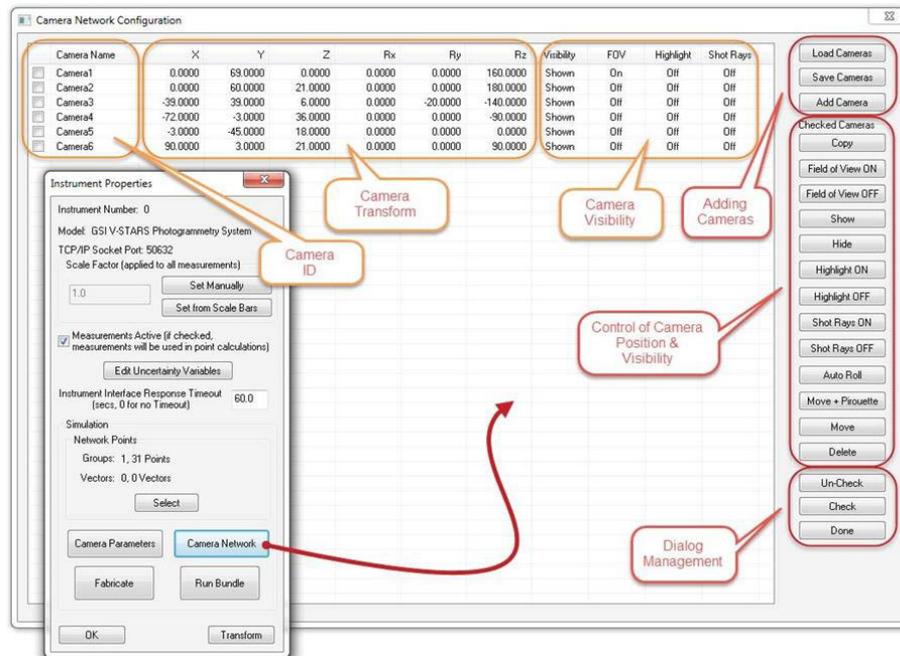


Figura 5.24. Configuración de la red de cámaras en VSATARS [56].

Los datos 3D, tales como la posición y orientación de las cámaras, de los objetivos o de la nube de puntos, se extraen a partir del procesamiento de imágenes digitales o de entornos CAD como *Solid Works*. Por tanto, permite realizar un prediseño del proceso de medición y visualizar los puntos y las líneas de proyección (Figura 5.25). Gracias a ello, se puede aprender el funcionamiento de una interfaz de un instrumento, minimizar el tiempo de medición, y simplificar el proceso [57].

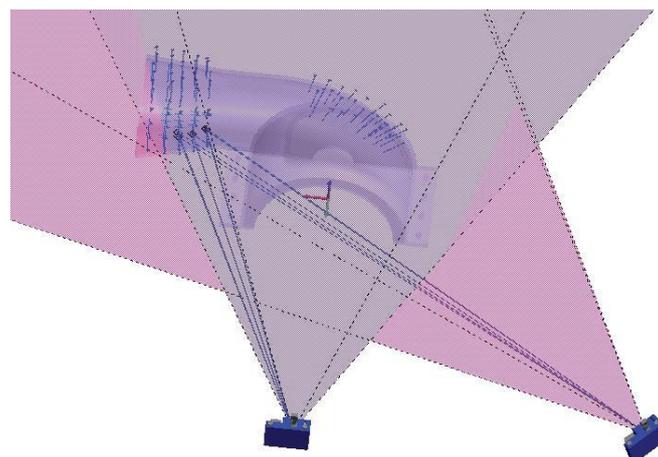


Figura 5.25. Líneas de proyección y puntos de medición [56].

La configuración de los parámetros de la cámara [56] consiste en establecer el campo de visión (ángulo del área visible y el rango de enfoque) a través de la distancia focal, el tamaño del sensor CCD y el alcance máximo y mínimo de enfoque, además de indicar el ángulo de incidencia (Figura 5.26).

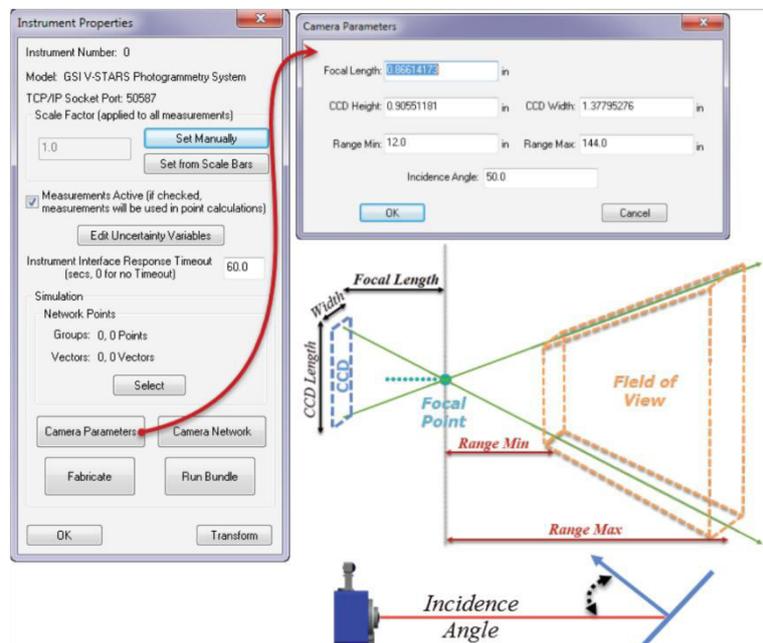


Figura 5.26. Parámetros de la cámara [56].

Pulsando en *Fabricate*, SA evalúa qué puntos están dentro del campo de visión establecido, y no oscurecidos por ninguna superficie en el archivo de trabajo, para incluirlos en el análisis y construir las mediciones mediante *Bundle Adjustment*. Una vez generadas las mediciones, se visualiza la nube de incertidumbre alrededor de dichos puntos (Figura 5.27) basado en el método de Montecarlo.

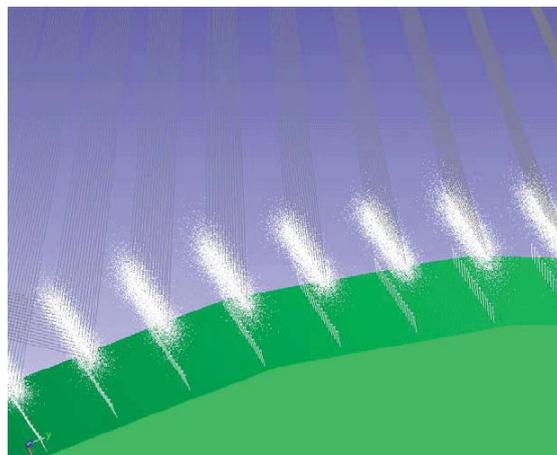


Figura 5.27. Obtención de la incertidumbre de los puntos medidos [56].

Otro aspecto importante de la simulación es la capacidad de unir modelos de la instalación con los instrumentos y las mediciones para determinar las restricciones de la línea de visión [58] y determinar dónde se pueden tomar las mediciones (Figura 5.28).

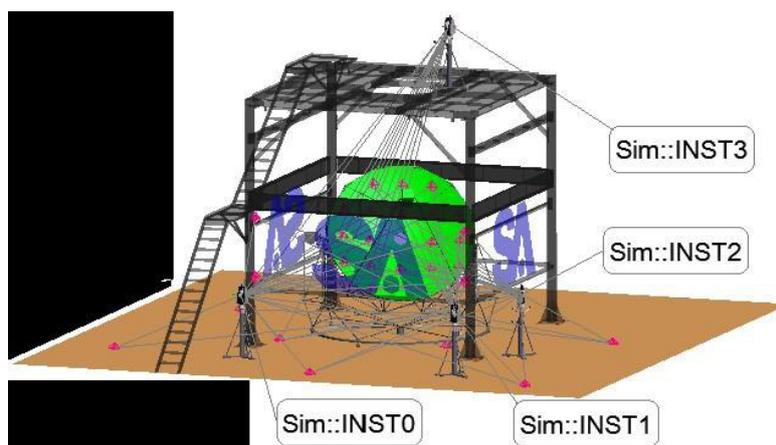


Figura 5.28. Integración virtual del entorno de trabajo con los instrumentos [58].

En cuanto a las limitaciones, no se tiene en cuenta el error de los parámetros de calibración de las cámaras, sino que el *software* introduce solamente un error que engloba todo, incluido el error de reproyección. Por tanto, la incertidumbre que se obtiene tras la simulación, es una aproximación inicial en términos de orden magnitud.

Por otro lado, durante la configuración fotogramétrica, el número mínimo de cámaras que admite para empezar con el proceso es de 6 cámaras. Como consecuencia, si se quiere usar menos cámaras, se deberán colocar las restantes cámaras de forma que la simulación no se vea afectada. Además, los instrumentos virtuales que se pueden asignar pertenecen a las cámaras métricas de VSATRS (INCA 4 ó DynaMo).

Por último, se trata de sistemas automatizados en los que los pasos internos de procesamiento están ocultos para el usuario (caja negra), por lo que no permite un análisis profundo de los efectos y resultados

### PhoX

PhoX es un *software* de medición y análisis fotogramétrico, pero a diferencia de SA-VSTARS, tiene un enfoque más didáctico y se suele usar en proyectos de investigación. Su objetivo es ayudar a comprender el significado de las matrices de rotación, de la calibración, de los datos de orientación y de los parámetros de transformación. Las funcionalidades que ofrece son: medición, procesamiento de imágenes (aéreas, digitales y de corto alcance), métodos de cálculo, funciones de análisis gráfico y simulaciones, pero no admite configuración estéreo. Además de las imágenes, se admite un número ilimitado de objetos 3D formado por nubes de puntos.

En la calibración intrínseca, los parámetros ópticos se dividen en parámetros de la lente, de enfoque, de exposición, de resolución de la imagen y de ángulo (Figura 5.29). Parámetros como la distancia focal, la profundidad de campo, la apertura, la escala, el tiempo de exposición, entre otros, se pueden modificar y calcular. Los resultados se muestran a escala en un gráfico simplificado de la lente.

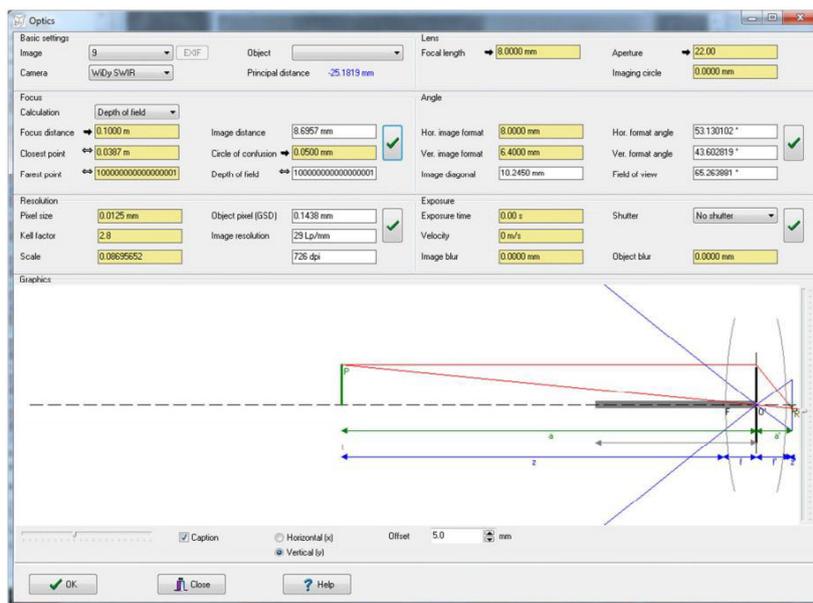


Figura 5.29. Parámetros intrínsecos correspondientes a la lente [59].

Los parámetros de la distorsión de la lente; es decir, la distorsión radial ( $A_1, A_2...A_7$ ) y la tangencial ( $B_1, B_2$ ), se definen mediante el modelo de Brown, a partir de la distancia principal y las coordenadas del punto principal (Figura 5.30).

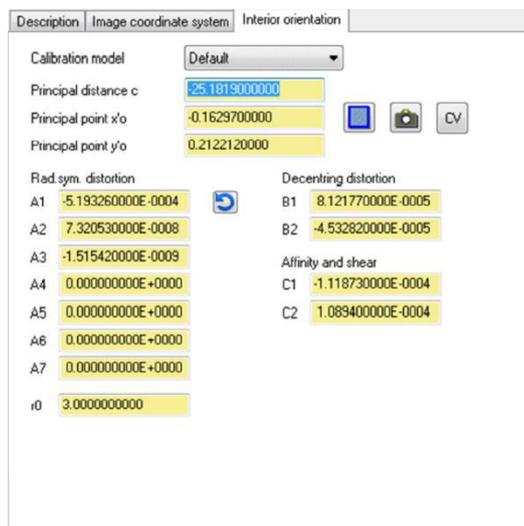


Figura 5.30. Parámetros intrínsecos correspondientes a la distorsión de la lente [6].

La calibración extrínseca se puede realizar mediante el método de resección espacial (Figura 5.31) o mediante el método lineal DLT. Ambas funciones se basan en el ajuste por mínimos cuadrados. Sin embargo, el *software* no tiene implementado la autocalibración por *Bundle Adjustment*.

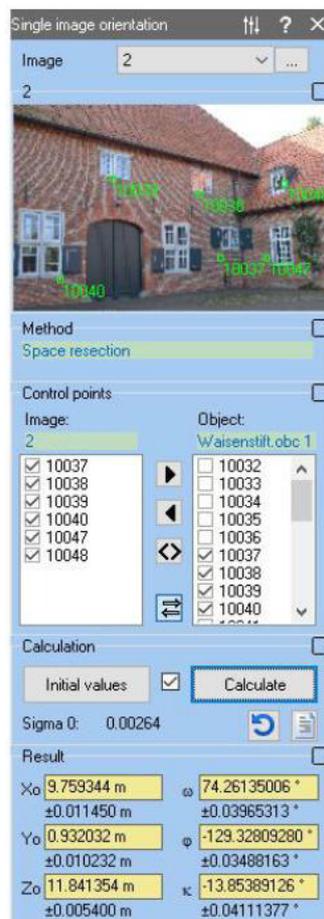


Figura 5.31. Calibración extrínseca mediante Resección Espacial [7].

Estas funciones necesitan de un número mínimo de puntos de control, en concreto, la resección espacial requiere por lo menos de cuatro puntos y el método DLT de seis puntos distribuidos espacialmente. También, el primer método necesita de valores iniciales que se pueden obtener con el botón *Initial values*, aunque no se especifica qué procedimiento emplea para calcularlos. Como resultados, se muestran los parámetros de calibración junto con sus incertidumbres (excepto con el método DLT).

Por otro lado, en la simulación, permite la modificación de parámetros individuales y la visualización 3D de su efecto en la imagen o en el objeto. Por ejemplo, si se modifican los parámetros intrínsecos y extrínsecos, se observa la posición espacial en el espacio y la proyección de los puntos del objeto en la imagen (Figura 5.32).

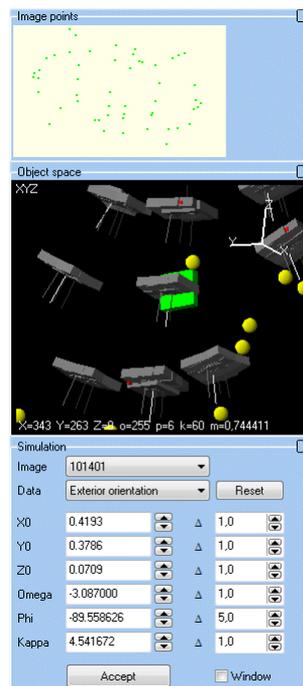


Figura 5.32. Modificación interactiva de los datos de orientación y posición en la simulación [59].

También, se pueden generar imágenes artificiales para crear imágenes de referencia o sin errores de las que se conocen todos los parámetros y proporciona una amplia gama de patrones de imágenes sintéticas (tablero de ajedrez, cuadrículas...).

Por otro lado, se integra el método de Montecarlo como herramienta de propagación de errores estadísticos (Figura 5.33). De esta manera, se analiza la precisión de los cálculos de calibración y de las mediciones. Otra alternativa es aplicar ruido estadístico a las coordenadas de la imagen.

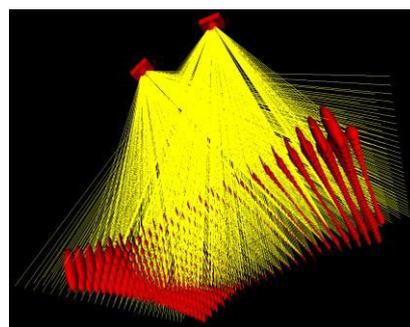


Figura 5.33. Propagación de incertidumbre mediante la simulación de MonteCarlo [59].

En la visualización 3D, se muestra las posiciones de las cámaras, puntos de objetos, los haces de la imagen y superficies. Además, los mismos datos pueden exportarse a VRML para su manipulación externa (Figura 5.34).

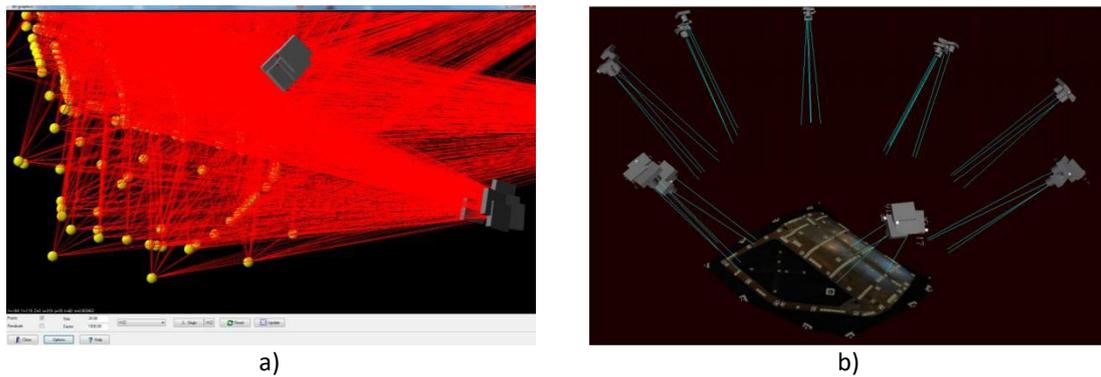


Figura 5.34. Visualización de la simulación. a) Visión 3D [59], b) Visión VRML [60].

La distribución de los puntos, el histograma y la distribución de los residuos de la imagen y del objeto, los errores de medición de la longitud, etc., pueden visualizarse en diagramas (Figura 5.35) y exportarse a Excel.

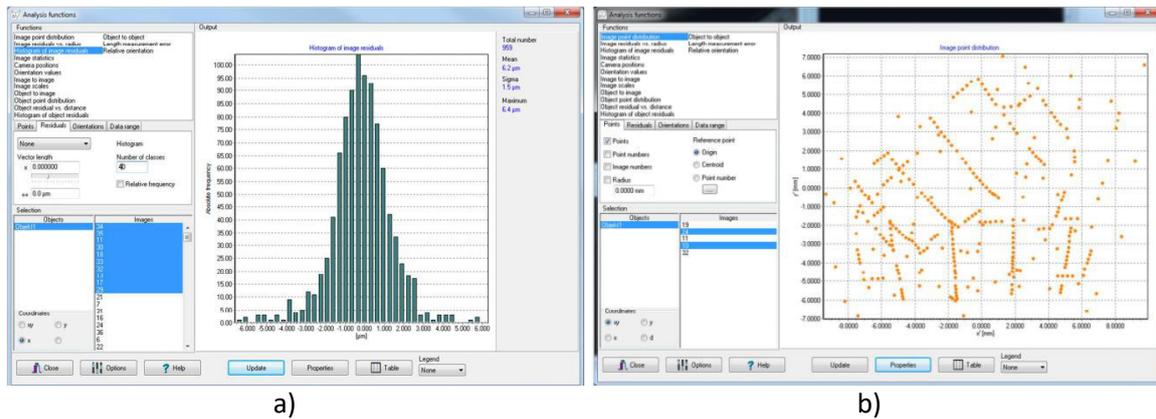


Figura 5.35. Resultados [60]. a) Histograma, b) Distribución de los puntos de la imagen.

### MetroVisionLab

MetroVisionLab es una herramienta desarrollada por el Instituto de Investigación en Ingeniería de Aragón [61], cuyos objetivos son comprobar con datos reales o sintéticos el efecto de emplear distintos métodos de calibración de cámaras y usarlo en la visión por ordenador y en metrología dimensional (Figura 5.36).

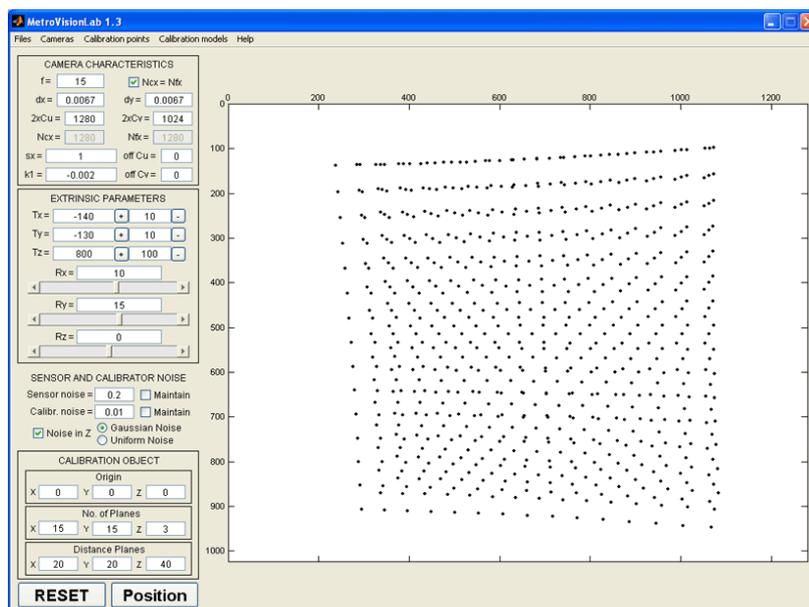


Figura 5.36. Interfaz principal de MetroVisionLab [61].

El patrón de calibración puede ser plano del tipo tablero de ajedrez o una red de puntos, siendo los siguientes parámetros dimensionales configurables: definición del origen y de la posición y orientación del sistema de coordenadas global, número de puntos en las tres direcciones y distancia entre ellos. También, se puede introducir un ruido en las coordenadas de los puntos, incluido en la dirección Z y en el sensor de las cámaras (error píxel). La aleatoriedad en la asignación del ruido puede seguir una distribución gaussiana o uniforme.

En cuanto a las características de las cámaras, es posible modificar sus parámetros intrínsecos como, por ejemplo, la distancia focal, el número de elementos y de píxeles del sensor, el factor de escala, el coeficiente de distorsión radial, el desplazamiento del punto principal, entre otros, además de los extrínsecos. Otra opción es usar unos modelos de cámaras predefinidos.

Los puntos introducidos se visualizan en una figura (Figura 5.36) en función de los valores establecidos en los parámetros de configuración, mientras que los resultados de calibración se muestran en un menú (Figura 5.37) y se representan gráficamente los errores asociados a la reconstrucción de los puntos de calibración (Figura 5.38).

De esta forma, se puede comparar la precisión a través de diversas técnicas de calibración en función de varios parámetros de influencia o mecanismos de error.

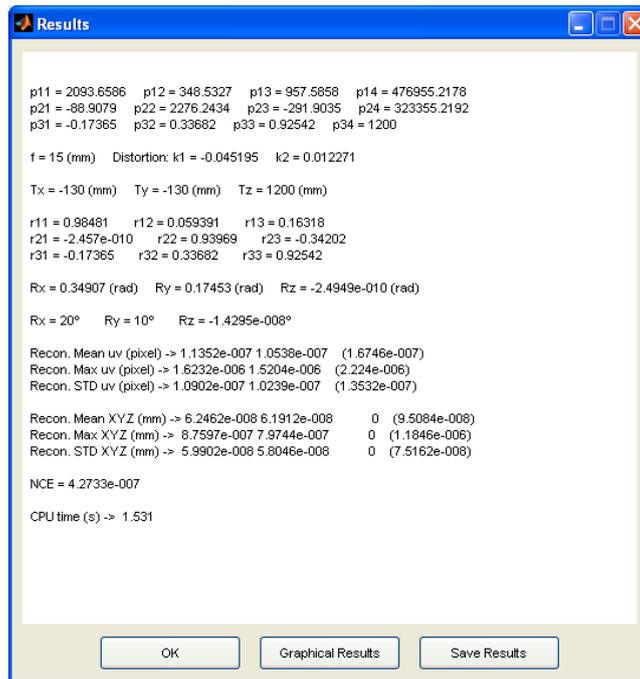


Figura 5.37. Muestra de resultados de calibración [61].

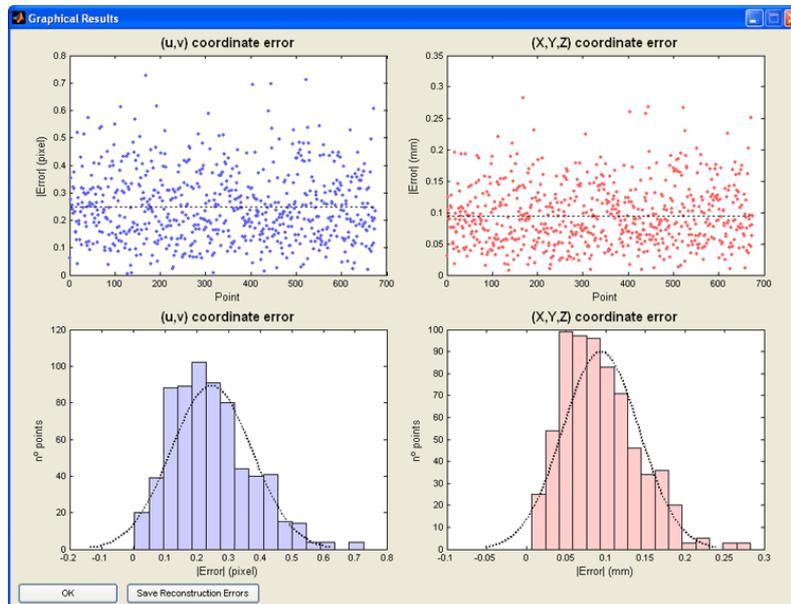


Figura 5.38. Errores de reconstrucción para los puntos de calibración en las coordenadas imagen (u, v) y global (X, Y, Z) [61].

## Matlab: Camera Calibrator y Stereo Camera Calibrator

Matlab dispone de una librería, denominada *Computer Vision Toolbox™*, que contiene algoritmos, funciones y aplicaciones para diseñar y probar sistemas de procesamiento de video, visión 3D y visión por ordenador [62]. También es capaz de detectar y seguir el movimiento de objetos, extraer y comparar características y la reconstrucción 3D. Los algoritmos de *Toolbox* admiten la generación de código C / C ++ para integrarse con el código existente, la creación de prototipos de escritorio y la implementación del sistema de visión integrado.

Las aplicaciones *Camera Calibrator* y *Stereo Camera Calibrator* automatizan los flujos de trabajo de calibración de cámaras individuales y estéreo (Figura 5.39). En ambas aplicaciones, se emplean entre 10 y 20 imágenes de tablero de ajedrez rectangulares como patrones de calibración.

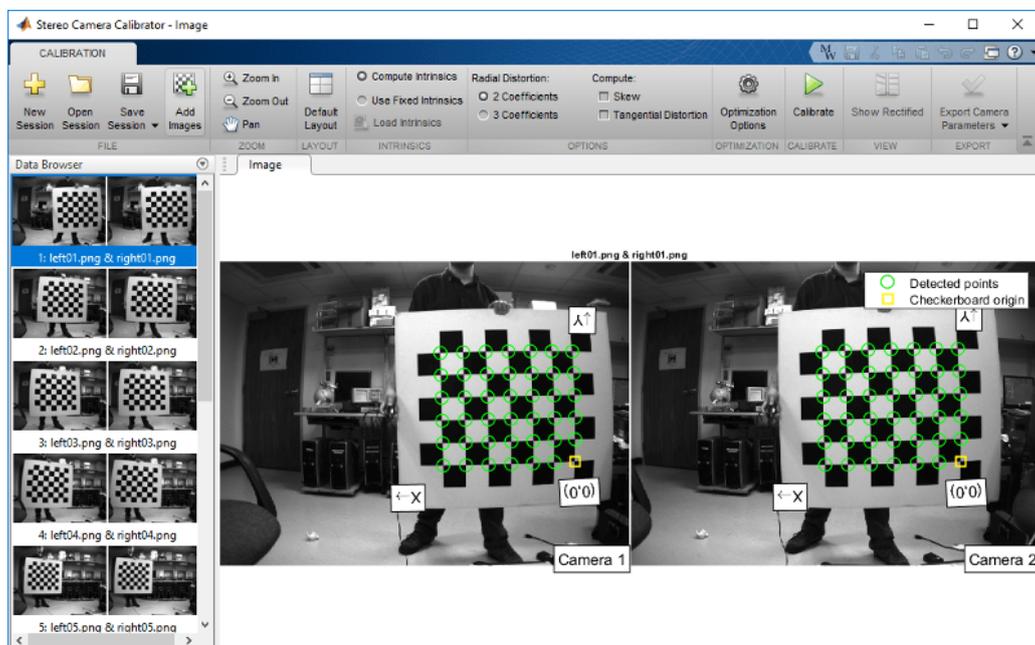


Figura 5.39. Interfaz de usuario de la aplicación *Stereo Camera Calibrator* [62].

Las imágenes capturadas del patrón deben cumplir los siguientes requisitos (Figura 5.40): ocupar el 20% de la imagen, estar en un ángulo inferior a 45° con respecto al plano de la cámara y aparecer cerca de los bordes de las imágenes para caracterizar la distorsión radial de la lente.

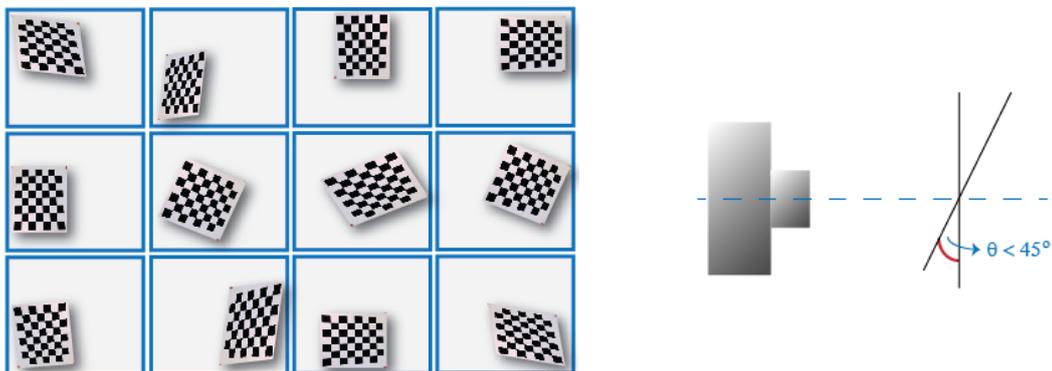


Figura 5.40. Requisitos de la adquisición de imágenes [62].

A partir de la detección de los puntos característicos, se resuelve la calibración en dos etapas [62]. En la primera etapa, se calcula como estimación inicial, la calibración intrínseca (distancia focal y coordenadas del punto principal) y extrínseca (posición y orientación de las cámaras), suponiendo que la distorsión de la lente es cero. También, se pueden establecer manualmente como datos de partida. En la segunda, se calculan todos los parámetros simultáneamente, incluidos los coeficientes de distorsión (radial y tangencial), utilizando la minimización de mínimos cuadrados no lineales (algoritmo de Levenberg-Marquardt).

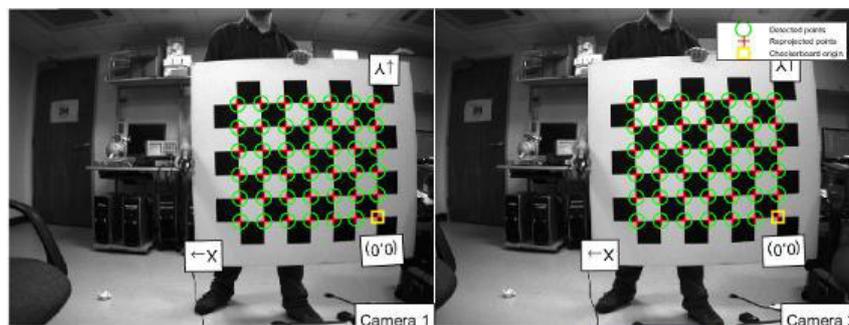


Figura 5.41. Puntos detectados y reproyectados [62].

Tras completar el proceso de calibración, se estima la incertidumbre de los anteriores parámetros y se muestra en un gráfico de barras (Figura 5.42), el error de reproyección medio de cada imagen y el error medio general, lo que permite conocer la precisión de calibración. Por tanto, ayuda a identificar qué imágenes contribuyen negativamente a la calibración.

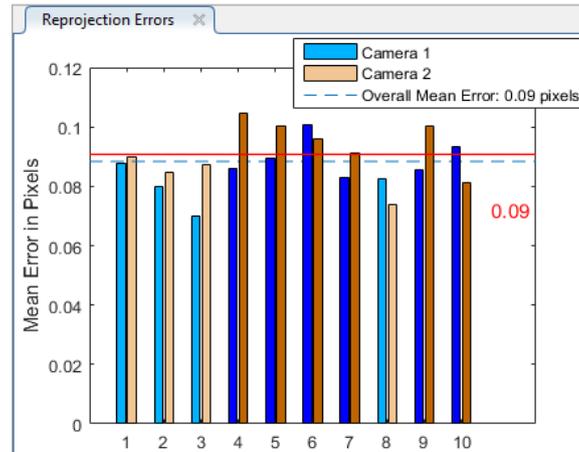


Figura 5.42. Error de reproyección medio y general [62].

Además, se visualiza las posiciones del patrón y de la cámara para determinar si coinciden con lo esperado, a través de una vista centrada en la cámara o en el patrón, dependiendo de cuál de ellos sea el sistema de referencia (Figura 5.43).

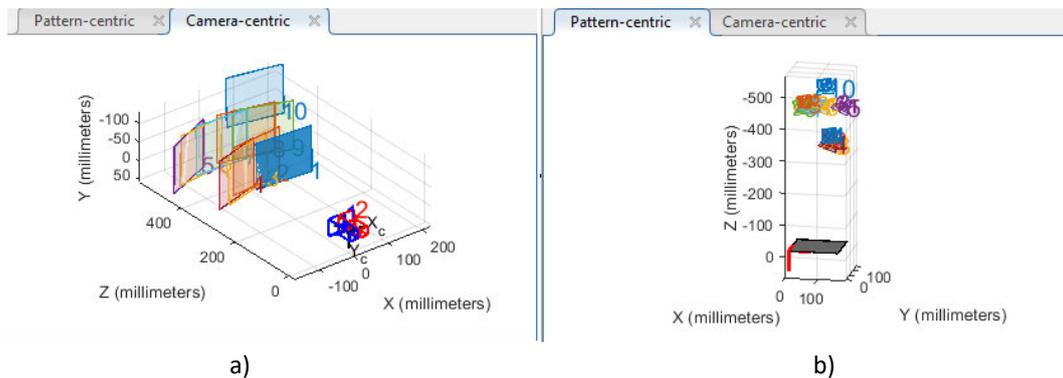


Figura 5.43. Vista centrada: a) en la cámara, b) en el patrón [62].

Para concluir, se recogen en las siguientes tablas un resumen del alcance y de las limitaciones de SA-VSTARS (Tabla 5.17), Phox (Tabla 5.18), MetroVisionLab (Tabla 5.19), y las aplicaciones Camera Calibrator y Stereo Camera Calibrator de Matlab (Tabla 5.20).

Tabla 5.17. Alcance y limitaciones del *software* SA-VSTARS.

<b>SA-VSTARS</b>	
<b>Alcance</b>	<b>Limitaciones</b>
Enfoque industrial	Licencia
Bundle Adjustment	Modelo caja negra
Imágenes reales/virtuales	Sólo cámaras métricas de VSATRS
Distribución estadística: método de Montecarlo	Mínimo 6 cámaras
Integra entorno virtual del lugar de trabajo	No se estiman los errores de calibración
Medición de los puntos simulados y sus incertidumbres	No se calculan los errores de reproyección
Visualización 3D	

Tabla 5.18. Alcance y limitaciones del *software* PhoX.

<b>PhoX</b>	
<b>Alcance</b>	<b>Limitaciones</b>
Enfoque didáctico	No sirve en entorno industrial
Gratis	No usa <i>Bundle Adjustment</i>
Resección espacial o DLT	No está disponible la configuración estéreo
Modelo editable	
Imágenes reales/virtuales	
Distribución estadística: método de Montecarlo	
Estimación de los errores de calibración	
Estimación de los errores de reproyección	
Otros resultados: distribución de puntos, histogramas...	

Tabla 5.19. Alcance y limitaciones de la herramienta MetroVisionLab.

<b>MetroVisionLab</b>	
<b>Alcance</b>	<b>Limitaciones</b>
Enfoque investigación/didáctico	No sirve en entorno industrial
Calibración	No realiza mediciones
Variedad de algoritmos disponibles	Configuración de una cámara
Datos reales/sintéticos	No se visualiza la cámara
Modificación de parámetros intrínsecos y extrínsecos	
Estimación de los errores de calibración	
Estimación de los errores de reconstrucción 2D/3D	
Visualización de los puntos de calibración	

Tabla 5.20. Alcance y limitaciones de las aplicaciones Camera Calibrator y Stereo Camera Calibrator.

Camera Calibrator y Stereo Camera Calibrator	
Alcance	Limitaciones
Enfoque investigación/didáctico	Licencia
Calibración en dos pasos	Modelo caja negra
Imágenes reales	Solo realiza la calibración
Estimación de los errores de calibración	No se emplea ninguna distribución estadística
Estimación de los errores de reproyección	
Visualización de las cámaras respecto al patrón	

### 5.2.2. DESARROLLO PROPIO

Las interfaces gráficas de usuario (*GUI*), también conocidas como aplicaciones, se pueden crear de dos maneras diferentes: de forma interactiva o mediante programación. La primera opción consiste en un entorno interactivo que combina el diseño de los componentes visuales y la programación del comportamiento de la aplicación. Permite moverse rápidamente entre el diseño visual y el código de desarrollo. La segunda alternativa es codificar tanto el diseño como el comportamiento mediante funciones, por lo que es necesaria una mayor cantidad de trabajo y esfuerzo, aunque se tiene un mayor control del proceso.

#### Matlab

Matlab dispone de dos aplicaciones interactivas, *GUIDE* y *App Designer* [63]. En *GUIDE*, la programación (Figura 5.45) y el de diseño de la interfaz (Figura 5.44) se realiza por separado, de manera que aparecen en ventanas diferentes.

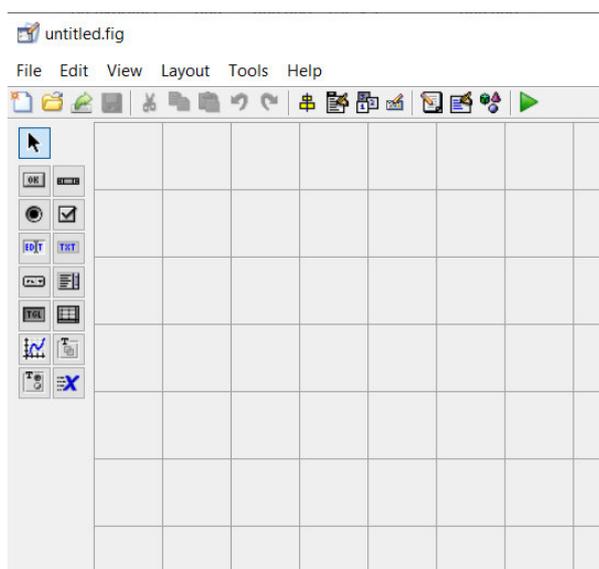


Figura 5.44. *GUIDE*. Entorno de diseño de interfaz.

```
untitled.m x +
45
46
47 % --- Executes just before untitled is made visible.
48 function untitled_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
49 % This function has no output args, see OutputFcn.
50 % hObject    handle to figure
51 % eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
52 % handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
53 % varargin   command line arguments to untitled (see VARARGIN)
54
55 % Choose default command line output for untitled
56 handles.output = hObject;
57 |
58 % Update handles structure
59 guidata(hObject, handles);
60
61 % UIWAIT makes untitled wait for user response (see UIRESUME)
62 % uiwait(handles.figure1);
63
64
65 % --- Outputs from this function are returned to the command line.
66 function varargout = untitled_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
67 % varargout  cell array for returning output args (see VARARGOUT);
68 % hObject    handle to figure
69 % eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
70 % handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
71
72 % Get default command line output from handles structure
73 varargout{1} = handles.output;
```

Figura 5.45. *GUIDE*. Entorno de programación.

En el entorno *GUIDE*, se reduce el tiempo necesario para el desarrollo de GUIs, ya que la programación es menor. Se añaden automáticamente parte del código como la declaración de *callbacks* (llamadas) de los objetos (botones, textos, gráficos) y por tanto el programador solamente tiene que definir el comportamiento de la interfaz. Además, la creación de los objetos (botones, textos, gráficos) y su distribución se realiza arrastrándolos en la ventana de diseño de interfaz, por lo que se facilita la modificación de las propiedades de los objetos [64].

*App Designer* se introdujo en 2016 y a diferencia de *GUIDE*, el entorno de programación (Figura 5.47) y de diseño (Figura 5.46) están más vinculadas, con el objetivo de seguir reduciendo el tiempo requerido de la interfaz. Por tanto, cualquier cambio que se realice en una, afecta a la otra [63]. También, se mejora el acceso a las propiedades de los componentes, la creación de *callbacks* y la forma de compartir información. Sin embargo, la variedad de funciones gráficas, menús y barras de herramientas es menor, aunque posee más objetos interactivos para crear una interfaz más visual [64]. Otra desventaja es que consume más recursos que *GUIDE*.

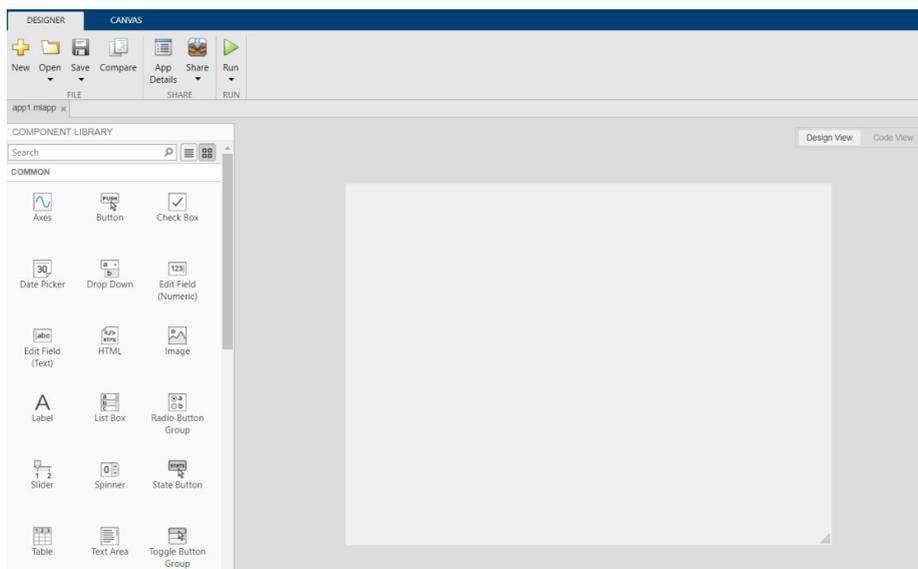


Figura 5.46. *App Designer*. Entorno de diseño.

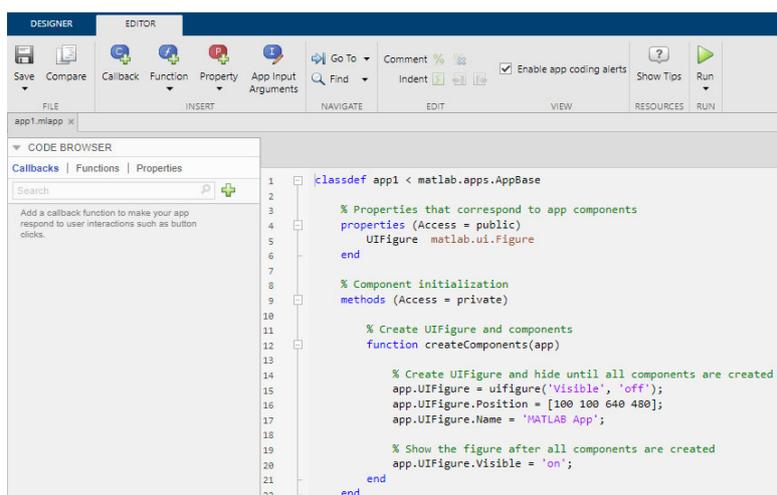


Figura 5.47. *App Designer*. Entorno de programación.

## Java

El lenguaje de programación Java es uno de los más utilizados en los sistemas operativos. La principal ventaja es que puede crear y ejecutar programas en cualquier sistema operativo sin tener que volver a compilar. Java Swing es un conjunto de librerías enfocadas a la construcción de interfaces (Figura 5.48 y Figura 5.49). Se caracteriza por su portabilidad para funcionar en casi cualquier otra plataforma y sistemas, es más robusto y sus componentes pueden tomar la apariencia de otra plataforma, aunque es más complejo de programar que en Matlab.

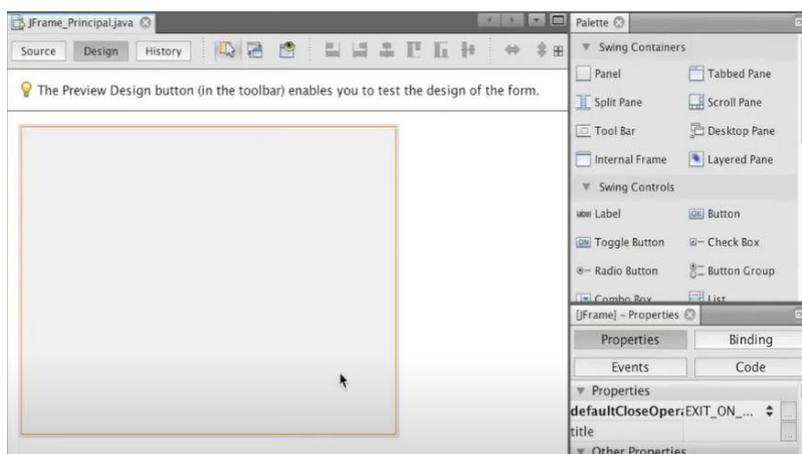


Figura 5.48. Java Swing. Entorno de diseño. Tabla 5.23 Figura 5.49. Entorno de programación.

Para concluir, se recogen en las siguientes tablas un resumen del alcance y de las limitaciones de las aplicaciones para el desarrollo de *software* en Matlab: *GUIDE* (Tabla 5.21) y *App Designer* (Tabla 5.22), y en Java (Tabla 5.23).

Tabla 5.21. Alcance y limitaciones de la aplicación GUIDE.

<b>GUIDE</b>	
<b>Alcance</b>	<b>Limitaciones</b>
Desarrollo de interfaz interactivo	Independiente entre el diseño de interfaz y la programación
Menor programación	Objetos menos atractivos visualmente
Mayor variedad de funciones gráficas, menús y barras de herramientas	
Consumo menos recursos	

Tabla 5.22. Alcance y limitaciones de la aplicación App Designer.

<b>App Designer</b>	
<b>Alcance</b>	<b>Limitaciones</b>
Desarrollo de interfaz interactivo	Consumo más recursos
Dependencia entre el diseño de interfaz y la programación	Menor variedad de funciones, gráficas, menús y barras de herramientas
Menor programación	
Mayor variedad de objetos interactivos	
Mejora en el acceso de objetos	

Tabla 5.23. Alcance y limitaciones de la aplicación Java Swing.

<b>Java Swing</b>	
<b>Alcance</b>	<b>Limitaciones</b>
Lenguaje de programación más utilizado	Complejidad en la programación
Compatible con cualquier sistema operativo	
Portabilidad	

Con el objetivo de seleccionar el *software* más conveniente para el desarrollo de una aplicación fotogramétrica, se realiza de nuevo una ponderación (Tabla 5.25) de cada uno de los criterios. Las características más importantes que debe tener son: bajo consumo de recursos computacional, y que la programación sea poca y sencilla (baja). Lo menos relevante de este tipo de *softwares* es su calidad visual, ya se va a emplear en el ámbito industrial. Por tanto, se distribuyen 100 puntos a los ocho criterios y según esta valoración (Tabla 5.24), GUIDE resulta ser la mejor alternativa (2,3/3).

Tabla 5.24. Calificación de los criterios correspondientes para cada *software*.

Criterios	GUIDE	<i>App Designer</i>	<i>Java Swing</i>
<b>Tipo de interfaz</b>	Interactivo	Interactivo	Interactivo
<b>Programación</b>	Baja	Baja	Media
<b>Dependencia entre interfaz y programación</b>	Alta	Baja	Baja
<b>Uso de recursos</b>	Bajo	Alto	Bajo
<b>Complejidad</b>	Media	Baja	Alta
<b>Variedad de objetos</b>	Media	Alta	Alta
<b>Variedad de funciones</b>	Alta	Baja	Alta
<b>Calidad de visualización</b>	Baja	Alta	Alta

Tabla 5.25. Ponderación de los *softwares* de creación de Apps.

Criterios	Peso	GUIDE	<i>App Designer</i>	<i>Java Swing</i>
<b>Tipo de interfaz</b>	-	Interactivo	Interactivo	Interactivo
<b>Programación</b>	15	3	3	2
<b>Dependencia entre interfaz y programación</b>	10	1	3	3
<b>Uso de recursos</b>	20	3	1	3
<b>Portabilidad</b>	10	2	2	3
<b>Complejidad</b>	20	3	3	1
<b>Variedad de objetos</b>	10	2	3	3
<b>Variedad de funciones</b>	10	3	1	3
<b>Calidad de visualización</b>	5	1	3	3
	$\sum_{i=1}^8 (p_i \cdot v_i)$	230	210	215
	<b>PONDERACIÓN</b>	<b>2,3</b>	2,1	2,15

### 5.3. PATRONES DE CALIBRACIÓN

Los primeros patrones de calibración que se empezaron a utilizar fueron los tridimensionales aunque también se desarrollaron patrones unidimensionales formados por varios puntos en la misma línea o por líneas de fuga (Figura 5.50), pero estos no podían calcular los parámetros extrínsecos ni la focal [65].



Figura 5.50. Patrón de calibración basado en líneas [66].

Actualmente, los patrones de calibración bidimensionales son los más empleados, porque son baratos, fáciles de crear con impresoras láser y aportan la precisión suficiente para la mayoría de las aplicaciones. Estos patrones pueden estar formados con matrices de círculos sobre fondo blanco (Figura 5.51 a)) o viceversa [67], lo que aporta sencillez de binarización, (conversión de la escala de grises a negro y blanco), pero debido a la perspectiva de la cámara se transforman en elipses y además se produce una distorsión de ellos debido a los defectos desconocidos de la lente. Otros consisten en una matriz de cuadrados que no se tocan (Figura 5.51 b)), donde dos de ellos tienen un cuadrado interior claro para determinar la esquina superior izquierda [65].

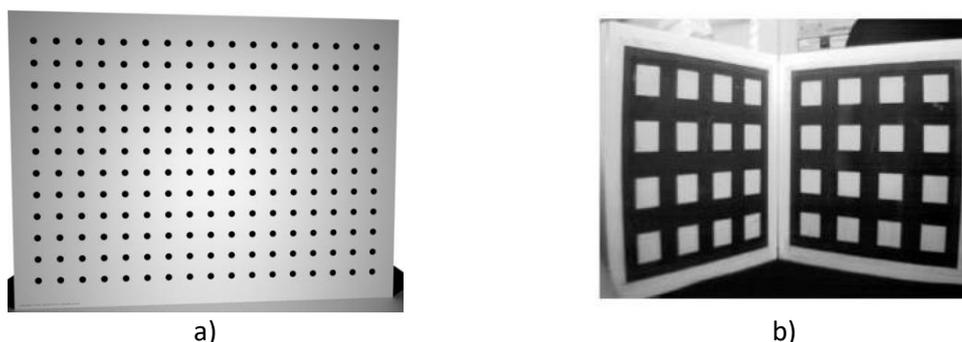


Figura 5.51. Patrón bidimensional. a) Matriz de círculos negros [68], b) Matriz de cuadrados blancos [66].

Otro tipo de patrón es el que tiene aspecto de tablero de ajedrez (*chessboard*), que debido a la alternancia de zonas claras y oscuras favorece la detección de las esquinas de los elementos del tablero (Figura 5.52). Un aspecto importante de este tipo de patrón es que, para eliminar la

ambigüedad de rotación de 180 grados, el número de cuadrados a lo largo de un lado debe ser par y en el otro impar.

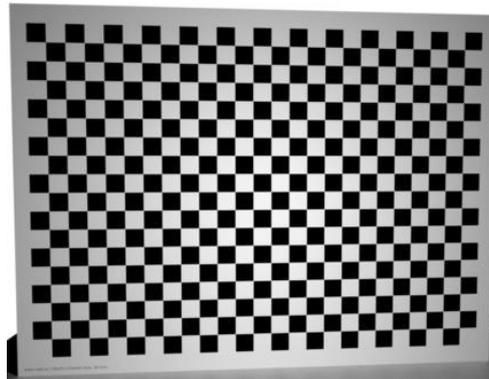


Figura 5.52. Patrón de tablero de ajedrez (*chessboard*) [69].

Por otro lado, se están estudiando otro tipo de patrones cuyos puntos tengan un código único que ayuden a su detección y clasificación automáticamente, como por ejemplo elementos codificados (círculos con código en los puntos internos o en la corona circular). Esto implica que incluso las imágenes de cámara no ideales se pueden utilizar para la calibración (Figura 5.53).

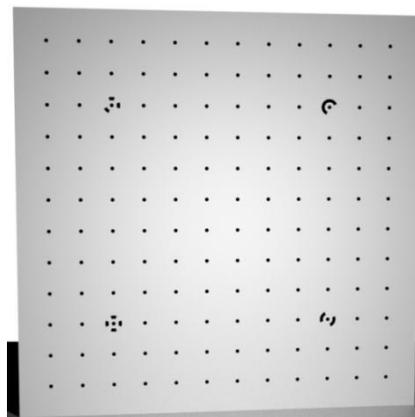


Figura 5.53. Patrón de matriz de círculos con puntos codificados [70].

Una variante del tablero de ajedrez es añadir tres círculos en su centro [65], lo que permite una referencia absoluta incluso con vistas parciales (Figura 5.54), siempre y cuando los círculos se vean en todas las imágenes o añadir líneas radiales cuyo punto de intersección sea el origen del plano de referencia [69].

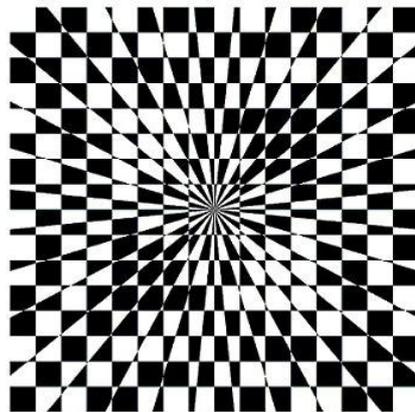


Figura 5.54. Patrón tablero de ajedrez con líneas radiales [71].

En [72] se diseñó un patrón de tablero de ajedrez combinando diferentes colores para una configuración estéreo formada por una cámara gran angular (ojo de pez) y una cámara convencional de ángulo estrecho (Figura 5.55 b)). El patrón más grande estaba diseñado con rojo-azul y el más pequeño de negro-verde. La mezcla de estos colores da lugar a un patrón secundario de color rojo-amarillo, azul y cian dentro del patrón exterior (Figura 5.55 a)).

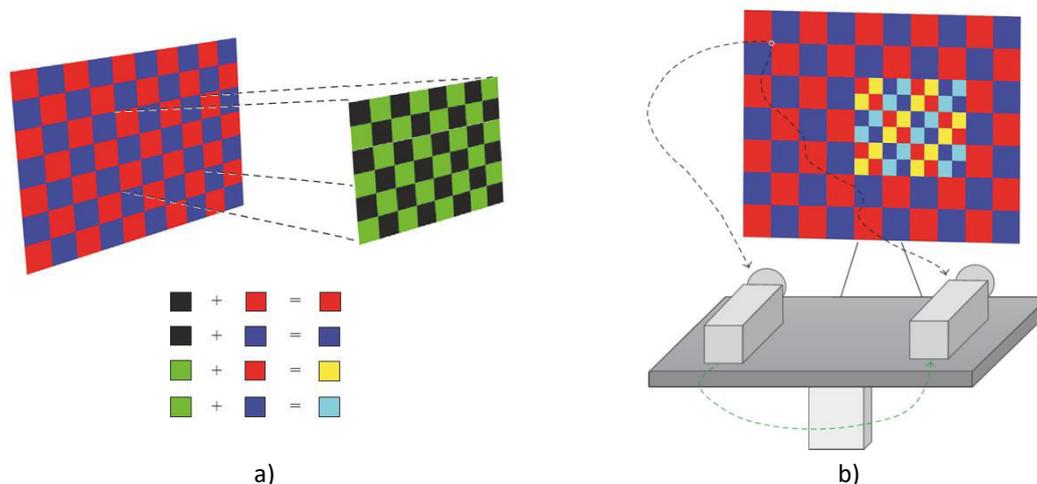


Figura 5.55. Método de combinar colores [72]. a) Colores resultantes, b) Configuración estéreo.

A modo de resumen, en la Tabla 5.26 y Tabla 5.27, se muestran las principales características de los patrones. Se escoge el patrón tablero de ajedrez, por ser uno de los más empleados en la industria para la calibración de las cámaras.

Tabla 5.26. Clasificación de los patrones de calibración.

Unidimensionales	Bidimensionales	Tridimensionales
No calculan parámetros extrínsecos ni la distancia focal	Baratos, fáciles de crear y aportan precisión	Complejidad en su construcción

Tabla 5.27. Comparación de características entre diferentes patrones de calibración bidimensional.

<b>Matriz de círculos</b>	<b><i>Chessboard</i></b>	<b><i>Chessboard:</i> tres círculos/ líneas radiales</b>	<b>Matriz con elementos codificados</b>
Binarización sencilla	Favorece detección de esquinas	Referenciación absoluta	Detección y clasificación automática
Generan distorsión	Es el más empleado		Cámaras no ideales

## 6. FUNDAMENTOS DE LA FOTOGRAMETRÍA

Con el fin de comprender mejor el funcionamiento del *software*, los datos de entrada que se piden y los resultados que se obtienen, se describen los principales conceptos de la fotogrametría [73].

### 6.1. ECUACIONES DE COLINEALIDAD

La fotogrametría se basa en el modelo de cámara estenopeica, que permite explicar el comportamiento de los haces de luz procedentes del objeto, cuando atraviesan el centro de proyección o centro óptico de la cámara y se proyectan en el plano de la imagen. Se trata de un modelo simplificado, que consiste en una cámara sin lente y con una pequeña apertura (*pinhole*) por donde entra la luz.

La expresión matemática que relaciona las coordenadas 3D (X, Y, Z) de los puntos en el espacio con sus coordenadas 2D (x, y) proyectadas en el plano de la imagen, se denominan ecuaciones de colinealidad. Las ecuaciones de colinealidad son dos ecuaciones [6.1], [6.2], que definen el comportamiento real de una cámara, ya que describen el modelo de cámara estenopeica e incluyen los errores ópticos debidos a la fabricación y montaje de la lente en la cámara.

$$x - x_0 = -c \cdot \frac{m_{11}(X - X_0) + m_{21}(Y - Y_0) + m_{31}(Z - Z_0)}{m_{13}(X - X_0) + m_{23}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)} + \Delta y \quad [6.1]$$

$$y - y_0 = -c \cdot \frac{m_{12}(X - X_0) + m_{22}(Y - Y_0) + m_{32}(Z - Z_0)}{m_{13}(X - X_0) + m_{23}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)} + \Delta x \quad [6.2]$$

Donde:

x, y = coordenadas del punto en el plano de la imagen

$x_0, y_0$  = coordenadas del punto principal como consecuencia del descentramiento entre la lente y el sensor digital

c = distancia focal

$X_0, Y_0, Z_0$  = coordenadas del centro de proyección en el sistema de coordenadas de referencia

X, Y, Z = coordenadas del punto en el sistema de coordenadas de referencia

$m_{ij}$  = elementos de la matriz de rotación (M) entre el sistema de coordenadas de la imagen y el sistema de coordenadas de referencia

$\Delta x, \Delta y$  = errores de distorsión de la lente

### 6.2. ERROR PÍXEL

El error píxel está relacionado con el procesamiento de la imagen: cuando se proyecta un punto 3D, al plano de la imagen 2D, la diferencia entre el valor real y el detectado en la imagen (condiciones ideales) se denomina error píxel y se mide en píxeles (Figura 6.1). Esta desviación se debe a las condiciones ambientales, a la resolución del sensor y al método de detección. La

precisión mejora con la resolución, mientras que las condiciones ambientales varían cada vez que se cambia el escenario de trabajo, como por ejemplo cuando se realiza la calibración en etapas separadas o la medición. También, la precisión puede variar dependiendo de la robustez de los algoritmos empleados en la detección y medición de los motivos geométricos (dianas, líneas o puntos de intersección).

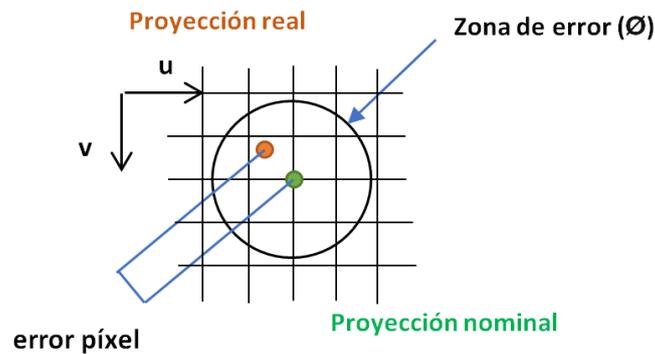


Figura 6.1. Plano de la imagen. Error pixel.

### 6.3. CONFIGURACIÓN DE LA CÁMARA Y DE LALENTE

En cualquier tarea de inspección, cuando se selecciona el tipo de cámara y de lente, se debe tener en cuenta dos aspectos importantes: el campo de visión (FOV) y la profundidad de campo (DOF).

El campo de visión es el área que se puede captar, siendo función del tamaño del sensor digital, de la distancia focal y de la distancia de trabajo. Si se seleccionan sensores de mayor tamaño u ópticas con menor distancia focal, el campo de visión se incrementa (Figura 6.2). Aunque una configuración con un campo de visión más grande permite trabajar en espacios más reducidos, la precisión disminuye considerablemente debido a una reducción de la resolución de la imagen. Por ello, se debe buscar un compromiso entre el campo de visión y la precisión.

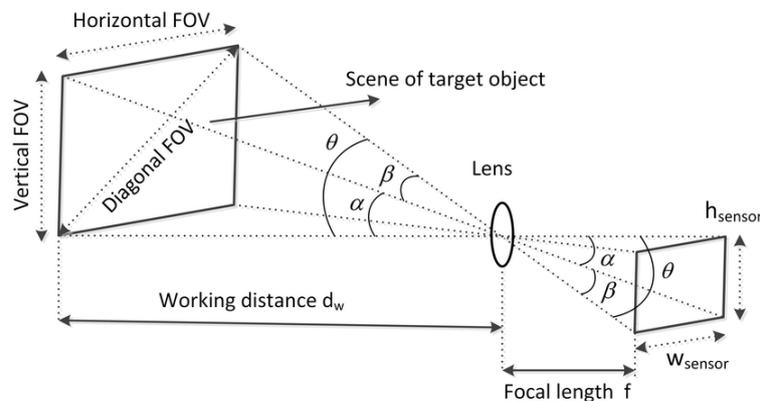


Figura 6.2. Campo de visión de la cámara (FOV) [74].

La profundidad de campo (DOF) es el rango dentro del cual, se puede enfocar al objeto con nitidez y contraste, por lo que es importante que las características a inspeccionar estén ubicadas dentro de esta zona. Depende del tamaño del sensor digital, de la distancia focal, de la apertura de la lente (F) y de la distancia entre la cámara y el objeto. Lo habitual es elegir una configuración óptica-cámara para una distancia de trabajo específica y modificar la profundidad de campo (DOF) en base a la apertura de la lente. Cuanto mayor sea el número F, es decir, a menor apertura óptica, el rango de nitidez se incrementa, pero se atenúa la iluminación del objeto (Figura 6.3).

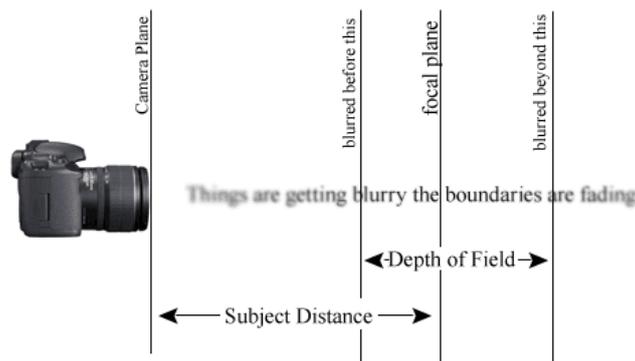


Figura 6.3. Profundidad de campo (DOF) [75].

## 6.4. CALIBRACIÓN DE LAS CÁMARAS

Después de establecer la configuración de las cámaras y de la lente, se procede con la calibración. La calibración consta de dos etapas principales: calibración intrínseca y calibración extrínseca.

### 6.4.1. CALIBRACIÓN INTRÍNSECA

La calibración intrínseca consiste en determinar los parámetros internos de la cámara y estimar las distorsiones ópticas a partir de modelos matemáticos, para corregir los errores sistemáticos procedentes de su fabricación y de la lente. Se realiza observando lo más cerca posible, un patrón de calibración que el operario mueve en diferentes posiciones y orientaciones (poses) y cuya geometría 3D se conoce con precisión (Figura 6.4). Con los puntos re proyectados en el plano de la imagen, se calculan los parámetros intrínsecos de la cámara de manera iterativa recalculando los parámetros del modelo para minimizar la diferencia en píxeles entre los puntos observados en la imagen y los estimados con el modelo.

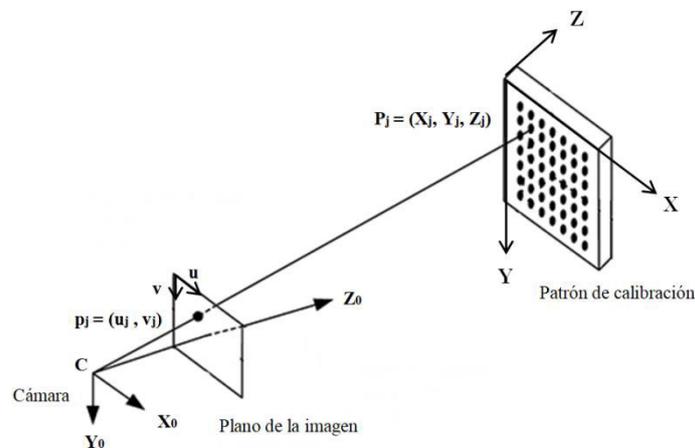


Figura 6.4. Calibración intrínseca de la cámara [76].

Los parámetros intrínsecos de una cámara son la distancia focal ( $f$ ) y el centro de proyección ( $C$ ). La distancia focal es la distancia normal entre el plano de la imagen y el centro de proyección. El centro de proyección es el lugar geométrico por el que pasan todos los haces de luz y donde se sitúa el origen del sistema de coordenadas ( $X_0Y_0Z_0$ ) de la cámara. La intersección del eje  $Z_0$  (eje de proyección) sobre el plano de la imagen se denomina punto principal de coordenadas  $(u_0, v_0)$  y la distancia comprendida entre este punto y el centro de proyección se conoce como distancia principal ( $c$ ).

Por otro lado, en el plano de la imagen se definen dos sistemas de coordenadas: el sistema de coordenadas de píxeles ( $uv$ ), que se encuentra en la parte superior izquierda y el sistema de coordenadas de la imagen ( $xy$ ) situado en el centro. Los sistemas de coordenadas de la cámara y de la imagen utilizan unidades métricas y para hacer la conversión a píxeles se emplea el tamaño de pixel del sensor digital.

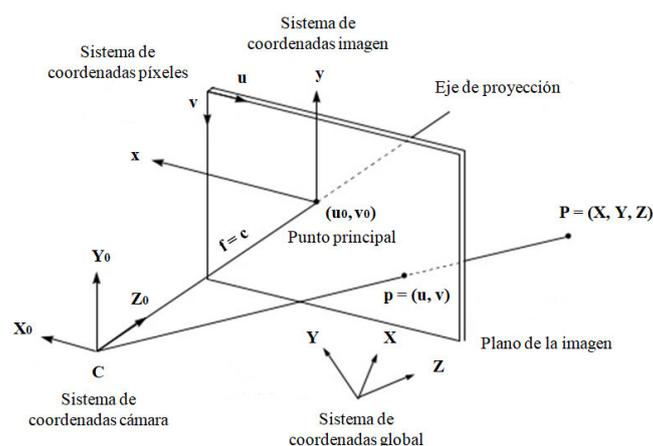


Figura 6.5. Parámetros intrínsecos de una cámara [77].

En un caso ideal, el punto principal coincidiría con el centro del plano de la imagen, y por tanto, la distancia focal y la distancia principal serían iguales ( $f=c$ ). Sin embargo, debido a las imperfecciones en el montaje de las cámaras, se produce una pequeña desviación (Figura 6.6).

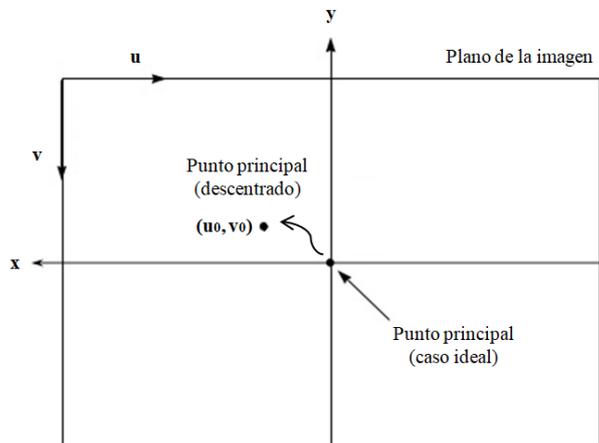


Figura 6.6. Coordenadas del punto principal en el plano de la imagen [77].

En cuanto a los errores ópticos presentes en las cámaras, se consideran la distorsión radial y la distorsión tangencial, siendo la primera, la más relevante. La distorsión radial se produce cuando los haces de luz se flexionan cerca de los bordes de la lente, como consecuencia de su esfericidad, siendo más acusado este efecto cuanto menor sea su tamaño (Figura 6.7). La distorsión tangencial se debe a la falta de paralelismo entre la lente y el sensor; es decir, es un defecto de montaje (Figura 6.8).

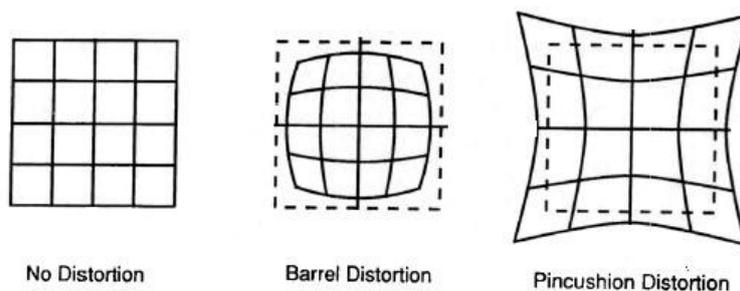


Figura 6.7. Distorsión radial: sin distorsión (*no distortion*), positiva (*barrel distortion*) y negativa (*pincushion distortion*) [78].

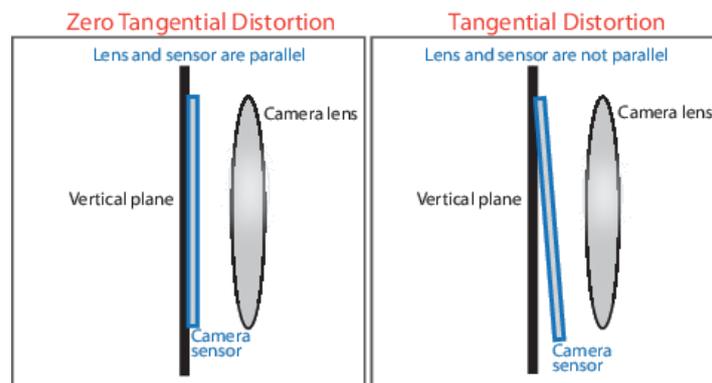


Figura 6.8. Distorsión tangencial: sin distorsión (*zero tangential distortion*) y con distorsión (*tangential distortion*) [62].

Ambas distorsiones se modelan mediante unos coeficientes [62], que caracterizan los errores sistemáticos de distorsión  $\Delta x$  y  $\Delta y$  de las ecuaciones de colinealidad [6.1], [6.2]. En general, es suficiente calcular dos coeficientes de distorsión radial ( $K_1$  y  $K_2$ ), aunque en situaciones donde la distorsión es severa, se suelen usar tres ( $K_1$ ,  $K_2$  y  $K_3$ ). En la distorsión tangencial, siempre se emplean dos coeficientes ( $p_1$  y  $p_2$ ). Como consecuencia, los puntos reproyectados en el plano de la imagen se desplazan con respecto a su posición ideal (Figura 6.9).

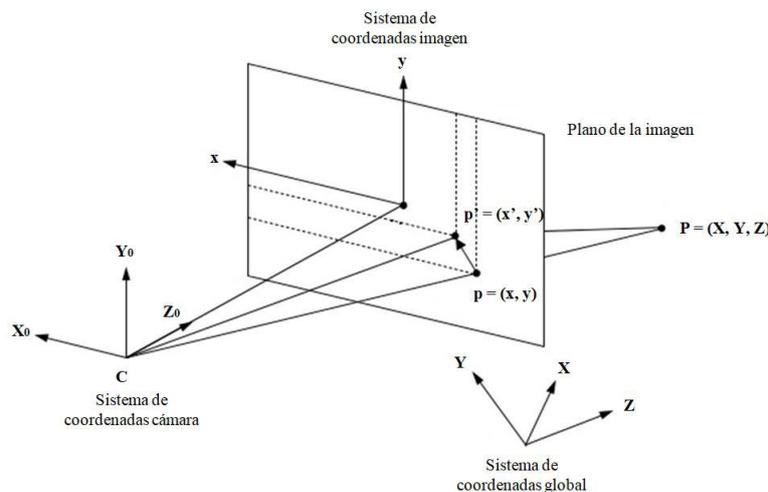


Figura 6.9. Desplazamiento de la reproyección del punto P en el plano de la imagen. p: posición ideal, p': posición real [77].

Otro tipo de error es una constante denominada *skew* ( $s$ ), que hace referencia a la falta de perpendicularidad entre los ejes  $x$  e  $y$  de los píxeles (Figura 6.10), pero en la mayoría de las cámaras modernas es prácticamente despreciable ( $s = 0$ ).

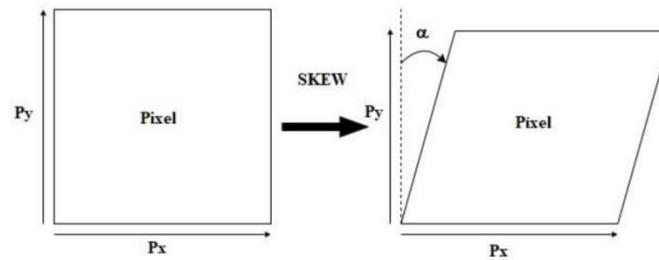


Figura 6.10. *Skew* [79].

En resumen, la calibración intrínseca permite estimar en píxeles, la distancia focal ( $f_x, f_y$ ) [6.3] [6.4] y las coordenadas del punto principal ( $u_0, v_0$ ), así como los coeficientes de distorsión radial ( $K_1, K_2$  y  $K_3$ ) y tangencial ( $p_1$  y  $p_2$ ) y el *skew* ( $s$ ) [6.5].

$$f_x = f \cdot s_x \quad [6.3]$$

$$f_y = f \cdot s_y \quad [6.4]$$

$$s = f_x \cdot \tan(\alpha) \quad [6.5]$$

Donde:

$f$  = distancia focal

$s_x, s_y$  = número de píxeles por unidad en la dirección  $x$  e  $y$  respectivamente

$\alpha$  = ángulo entre el eje  $x$  e  $y$  del plano de la imagen

$s$  = *skew*

Estos parámetros son específicos de cada cámara [62] y se almacenan en la matriz de los parámetros intrínsecos de la cámara  $[K]$ .

$$[K] = \begin{bmatrix} f_x & 0 & 0 \\ s & f_y & 0 \\ c_x & c_y & 1 \end{bmatrix}$$

#### 6.4.2. CALIBRACIÓN EXTRÍNSECA

La calibración extrínseca se basa en estimar las posiciones ( $X_{0n}, Y_{0n}, Z_{0n}$ ) y orientaciones ( $R_{xn}, R_{yn}, R_{zn}$ ) de las “ $n$ ” cámaras (poses), referenciadas a un sistema de coordenadas global (Figura 6.11). Para ello, se emplea un método no lineal denominado resección espacial, aunque también existen otros métodos como el DLT o *Bundle* (Figura 6.12).

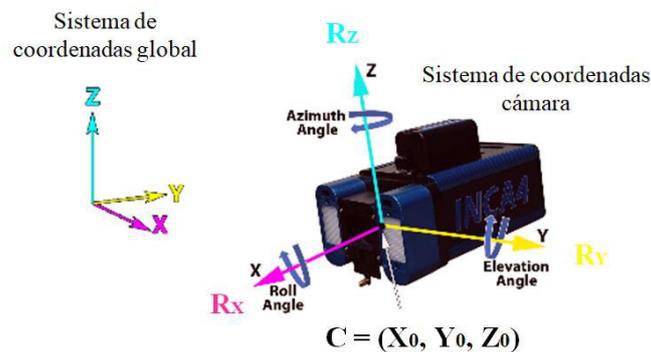


Figura 6.11. Pose de una cámara respecto a un sistema de coordenadas global.

La resección espacial consiste en usar un objeto conocido (calibrado), donde se definen una serie de puntos 3D, respecto a un sistema de coordenadas global (XYZ), mediante otra tecnología de medición, como por ejemplo, el láser tracker. Para ello, se debe saber la correspondencia entre el punto observado y el calibrado. El objeto puede ser un patrón de calibración, pero en el caso de medición de largo alcance, la distribución de las cámaras por el espacio de trabajo dificulta que se detecten sus puntos o un tamaño inapropiado del patrón no asegura la precisión en la etapa de la calibración extrínseca.

Por tanto, aplicando las ecuaciones de colinealidad [6.1],[6.2], y considerando los parámetros estimados en la calibración intrínseca, se calcula de manera iterativa las poses absolutas de cada cámara.

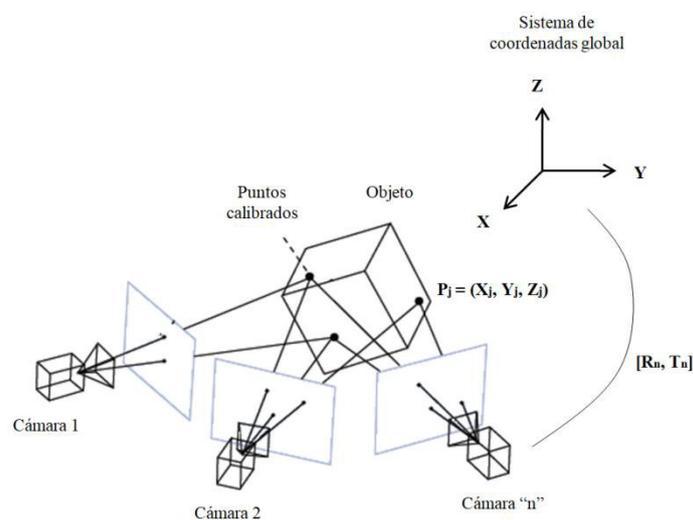


Figura 6.12. Resección espacial de "n" cámaras [80].

## 6.5. MEDICIÓN

Conocido los parámetros intrínsecos y las poses de las cámaras con respecto a un sistema de coordenadas global y sus respectivas incertidumbres (ver apartado 7.3.ESTIMACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE), se procede con la medición. Dependiendo del tipo de medición que se quiere realizar, existen dos procedimientos: triangulación y multiresección.

La triangulación consiste en obtener la posición de una serie de puntos, mediante la intersección espacial de múltiples líneas de visión de cámaras (Figura 6.13). Para ello, se necesitan dos (mínimo) o más cámaras que midan el mismo punto en cada imagen 2D para calcular sus coordenadas en el espacio (X, Y, Z). Se recomienda un mayor número de cámaras, para aumentar la redundancia de datos y así, mejorar la precisión.

La principal ventaja es que se pueden medir múltiples puntos a la vez y en tiempo real sin límite en el número de puntos triangulados simultáneamente.

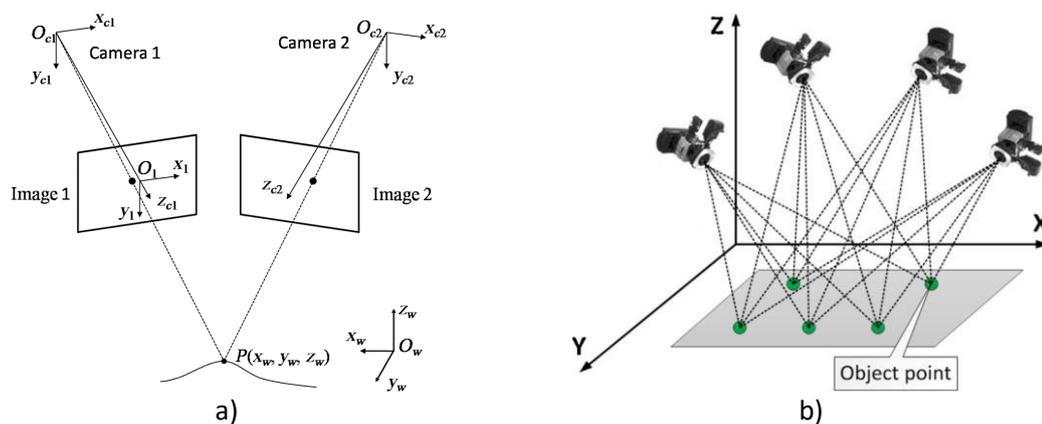


Figura 6.13. Triangulación espacial. a) Triangulación estéreo de un punto [81], b) Triangulación multivista y multipunto [82].

En cambio, la multiresección (Figura 6.14) se emplea para calcular las poses (posición y orientación) de un objeto que se mueve a lo largo de una trayectoria, como por ejemplo, en los accesorios de medición (escáner 3D, sondas de palpado). Es un método que promedia el resultado para una distribución dada de cámaras. También, se aplica a la calibración extrínseca.

En este caso, se conocen las posiciones  $(X_p, Y_p, Z_p)$  relativas de unos puntos de control (a, b, c,...) con respecto al sistema de coordenadas local del objeto  $(X_o, Y_o, Z_o)$ . Con la triangulación, se obtienen las posiciones de los puntos de control en el sistema de coordenadas global (XYZ) y por consiguiente, la traslación  $(T_x, T_y, T_z)$  del SC local con respecto al global. Por último, se aplica una transformación 6 dof, mediante la matriz de transformación homogénea  $[R, T]$  para determinar la pose del objeto en el SC global. Este procedimiento se lleva a cabo en cada una de las poses, de manera que se puede realizar su seguimiento.

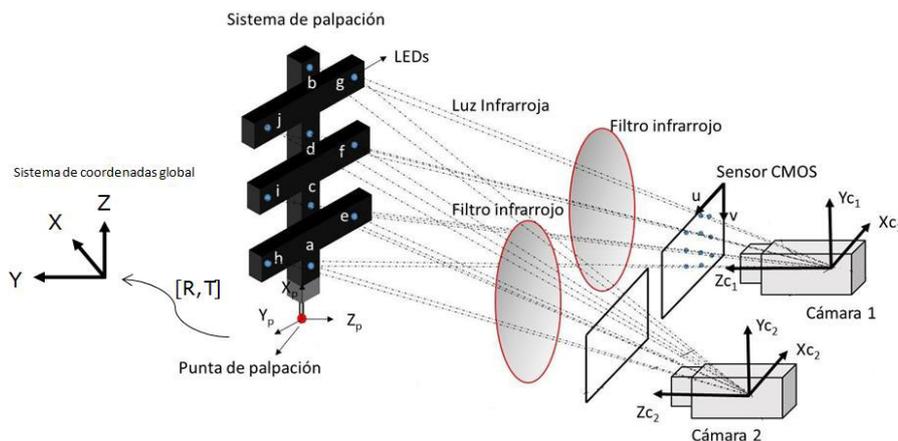


Figura 6.14. Obtención de la pose de un sistema de palpado mediante multiresección [83].

A modo de resumen, se indica en la siguiente tabla (Tabla 6.1) los datos y las incógnitas a resolver, dependiendo de la situación en la que se encuentre.

Tabla 6.1. Datos e incógnitas a resolver en cada etapa.

	<b>Etapas</b>	<b>Datos</b>	<b>Incógnitas</b>
<b>CALIBRACIÓN</b>	<b>Calibración intrínseca</b>	Pose de las cámaras ( $X_0, Y_0, Z_0, R_x, R_y, R_z$ )	Parámetros intrínsecos ( $x_0, y_0, c$ )
	<b>Calibración extrínseca</b>	Parámetros intrínsecos ( $x_0, y_0, c$ )	Pose de las cámaras ( $X_0, Y_0, Z_0, R_x, R_y, R_z$ )
		Puntos calibrados ( $X, Y, Z$ )	
<b>MEDICIÓN</b>	<b>Triangulación</b>	Parámetros intrínsecos ( $x_0, y_0, c$ )	Posición de los puntos ( $X, Y, Z$ )
		Pose de las cámaras ( $X_0, Y_0, Z_0, R_x, R_y, R_z$ )	
	<b>Multiresección</b>	Parámetros intrínsecos ( $x_0, y_0, c$ )	Pose de un objeto ( $X, Y, Z, R_x, R_y, R_z$ )
		Posición relativa de los puntos ( $X_p, Y_p, Z_p$ )	

## 7. METODOLOGÍA Y DESCRIPCIÓN DE LA SOLUCIÓN

En este apartado, se describe cada uno de los aspectos que se ha tenido en cuenta en el desarrollo del *software* de simulación fotogramétrica, tras haber analizado y comparado las diversas alternativas disponibles en el mercado.

En primer lugar, se establece el principal requisito que debe cumplir el *software*, por el que destaca de los demás. Este requisito consiste en ser capaz de abarcar una casuística genérica con “n” cámaras, de tal manera que la herramienta de simulación pueda emplearse en la mayoría de las aplicaciones industriales, donde se requieren distintas configuraciones fotogramétricas.

En base a esta condición, se prediseña conceptualmente una GUI con tres funcionalidades bien diferenciadas:

- Configuración óptica-cámara: se definen las características de la lente y de la cámara que se usan en la calibración y en la medición.
- Calibración: se divide en calibración intrínseca y extrínseca, cada una con su propia preparación de los datos y los resultados se proporcionan con una incertidumbre.
- Medición: se dispone de dos métodos, triangulación y multiresección, en función de cómo se caractericen los puntos a medir. También, los resultados van acompañados de una incertidumbre.

En este prediseño, se representan todos los elementos que componen la interfaz del usuario (pestañas, paneles, tablas, listas, menús desplegables, botones y entradas y salidas de texto), con una breve descripción de su funcionamiento. Tras numerosas revisiones, se planifica la organización de los archivos.

Se decide crear un “script” principal, que permita cargar e iniciar todas las funcionalidades del *software* y que facilite la integración de otras nuevas en el futuro. Por otro lado, este “script” genera automáticamente varias carpetas donde se guardan los datos en formato\*.mat a medida que el usuario avanza en la simulación.

En la carpeta “save”, se ubican los ficheros “ConfiguracionOpticaCamara.mat”, “CalibracionIntrinseca.mat”, “CalibracionExtrinseca.mat” y “Medicion.mat”, pertenecientes a los datos de entrada y salida que crea directamente *software*. Los datos que sean necesarios para el funcionamiento de las librerías desarrolladas por Tekniker se transfieren al fichero “DatosTest.mat” de la carpeta “DatosTest”. Por tanto, se consigue un mayor control en los valores que se introducen y permite descartar posibles fallos durante la programación. Además, todos los datos o variables se guardan en forma de estructura, para mejorar su organización y facilitar el acceso a ellos.

Por otro lado, las funcionalidades mencionadas antes tienen sus propios *scripts* (ficheros de código) y funciones, con el objetivo de dividir la tarea de programación en partes más sencillas y reducir las líneas de código de un mismo archivo. Este aspecto tiene una gran influencia en la duración del desarrollo del *software*, ya que una gran parte del tiempo invertido se basa en la detección de posibles fallos.

Por tanto, se crean las carpetas: “interfazConfiguraciónOpticaCamara”, “interfazCalibracion” e “interfazMedición”, dentro de las cuales se ubican otras: “diseño”, “funciones” y “callback”.

- Carpeta “diseño”: se encuentran las funciones que crean los objetos y que planifican su distribución en la interfaz correspondiente. Los objetos están referenciados respecto a una posición, lo que permite desplazar todos a la vez, o se puede modificar las distancias relativas entre ellos. Así, se mejora la flexibilidad en caso de que se quiera introducir nuevos componentes.
- Carpeta “callback”: hace referencia a las funciones que permiten interactuar al usuario con los objetos. Por ejemplo, botones que al pulsarlos ejecutan algún cálculo, generen una ventana emergente, o muestren y oculten otros objetos, entradas de texto donde se introducen los datos de partida...
- Carpeta “funciones”: se guardan las funciones encargadas de realizar cualquier tipo de cálculo relacionado con la fotogrametría (generar datos sintéticos, obtención de los parámetros de calibración, medición de puntos...).

Por último, cabe mencionar que la creación de los objetos de la interfaz no se apoya en el entorno interactivo de GUIDE (ver apartado 5.2.2.DESARROLLO PROPIO). Aunque esta herramienta pueda agilizar la distribución de los objetos, automáticamente genera funciones que son innecesarias para el cometido de esta aplicación, y no permite editar desde el entorno de programación ninguna característica del objeto. Por ello, se decide realizar la programación desde el nivel 0, es decir, empleando las funciones que Matlab dispone. Proporciona más robustez durante la creación del código y facilita la adaptación a *AppDesigner* en caso de que en el futuro se quiera trabajar en dicha plataforma, a costa de una mayor inversión de tiempo.

## 7.1. SOFTWARE

La interfaz dispone de una barra menú en la parte superior, donde se seleccionan las principales funcionalidades de la aplicación: “Config óptica-cámara”, “Calibración” y “Medición” (Figura 7.1).



Figura 7.1. Barra de herramientas de la interfaz.

A cada pestaña se le añade el ítem “Cargar datos”, que ofrece la posibilidad de cargar una plantilla con valores predefinidos, destinado a aquellos usuarios que quieran familiarizarse con el funcionamiento del software (Figura 7.2).



Figura 7.2. Ítem “Cargar datos” de la pestaña “Config óptica-cámara”.

### 7.1.1. CONFIGURACIÓN ÓPTICA-CÁMARA

En la pestaña “Config óptica-cámara”, el usuario introduce las características de la lente y del sensor (Figura 7.3), seleccionados en los catálogos del fabricante (ver apartado 12.ANEXO I: SELECCIÓN CÁMARA Y LENTE). Es importante mencionar, que los parámetros establecidos aquí, se aplican a todas las cámaras que se añadan posteriormente.

Los datos de entrada referidos a la lente son la distancia focal [mm] y la apertura de la lente [f/mm], mientras que para la cámara, se pide la dimensión horizontal y vertical del sensor digital [px] y el tamaño de los píxeles [ $\mu\text{m}$ ].

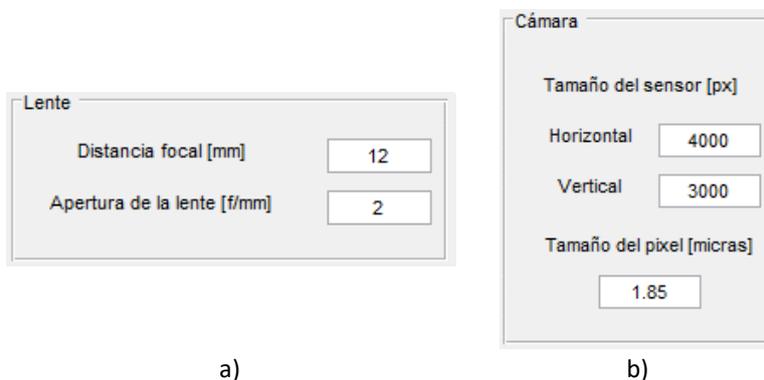


Figura 7.3. Parámetros de entrada. a) Lente, b) Cámara.

Como función adicional, se dispone de una calculadora de la profundidad de campo (DOF) [m], cuyos datos de entrada son los introducidos antes y la distancia de trabajo [m]. Se trata de un resultado aproximado del rango en el que el objeto se observa con nitidez. De esta manera, se comprueba si la combinación de la lente-cámara seleccionada cumple con las condiciones de medición (Figura 7.4).

Profundidad de Campo (DOF)	
Distancia de trabajo [m]	1
Profundidad de campo [m]	0.17046
Distancia mínima [m]	0.92198
Distancia máxima [m]	1.0924
CALCULAR DOF	

Figura 7.4. Cálculo de la profundidad de campo (DOF).

## 7.1.2. CALIBRACIÓN

A la calibración intrínseca y extrínseca se accede a través del panel “Menú Calibración”, donde se encuentran una serie de botones que permiten iniciar cada una de las fases, a medida que se van completando las anteriores (Figura 7.5).

Menú Calibración	
Parametrización	
Preparación Intrínseca	Preparación Extrínseca
Calibración Intrínseca	Calibración Extrínseca

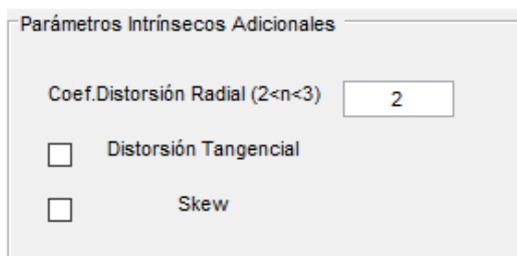
Figura 7.5. Panel “Menú Calibración”.

### 7.1.2.1. CALIBRACIÓN INTRÍNSECA

La calibración intrínseca se divide en tres etapas: parametrización, preparación de la calibración intrínseca y calibración intrínseca (obtención de los parámetros intrínsecos).

#### Parametrización

En la parametrización, se eligen los parámetros intrínsecos adicionales (errores ópticos) relacionados con la calibración intrínseca. Los errores ópticos que se consideran son la distorsión radial, tangencial y el *skew*. Por defecto, el *software* está configurado para calcular dos coeficientes de distorsión radial ( $K_1$ ,  $K_2$ ), aunque el usuario puede indicar hasta tres ( $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$ ). Los otros dos parámetros son opcionales.



Parámetros Intrínsecos Adicionales

Coef. Distorsión Radial (2<n<3)

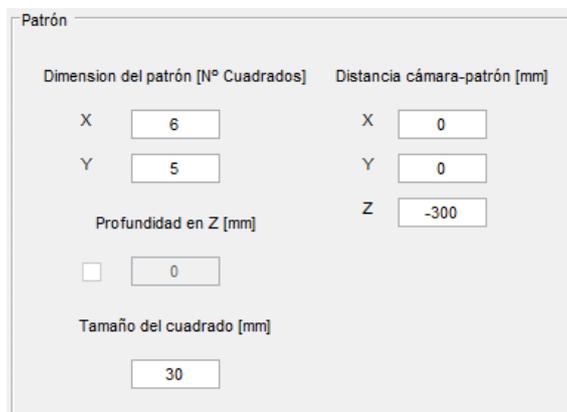
Distorsión Tangencial

Skew

Figura 7.6. Parámetros intrínsecos adicionales: coeficientes de distorsión radial, tangencial y *skew*.

### Preparación de la calibración intrínseca

La preparación de la calibración intrínseca (Figura 7.7) consiste en definir un patrón de calibración, del tipo tablero de ajedrez e indicar la posición de la cámara con respecto al centro de este [m]. Las dimensiones del patrón (ancho x alto) se especifican mediante la cantidad de número de cuadrados y el tamaño de estos [mm], siendo una de las dimensiones número par y otra impar, con el objetivo de evitar ambigüedades de rotación. El sistema de coordenadas local se sitúa en la esquina inferior derecha del cuadrado superior izquierdo del patrón, siendo la dirección del eje X, el lado que tiene más cuadrados (ver apartado 5.3. PATRONES DE CALIBRACIÓN).



Patrón

Dimension del patrón [Nº Cuadrados]	Distancia cámara-patrón [mm]
X <input type="text" value="6"/>	X <input type="text" value="0"/>
Y <input type="text" value="5"/>	Y <input type="text" value="0"/>
Profundidad en Z [mm] <input type="checkbox"/> <input type="text" value="0"/>	Z <input type="text" value="-300"/>
Tamaño del cuadrado [mm] <input type="text" value="30"/>	

Figura 7.7. Definición del patrón de calibración.

El *software* calcula doce poses del patrón de calibración y genera una nube de puntos sintéticos correspondientes a los vértices de los cuadrados, con los que se realiza la calibración intrínseca (Figura 7.8).

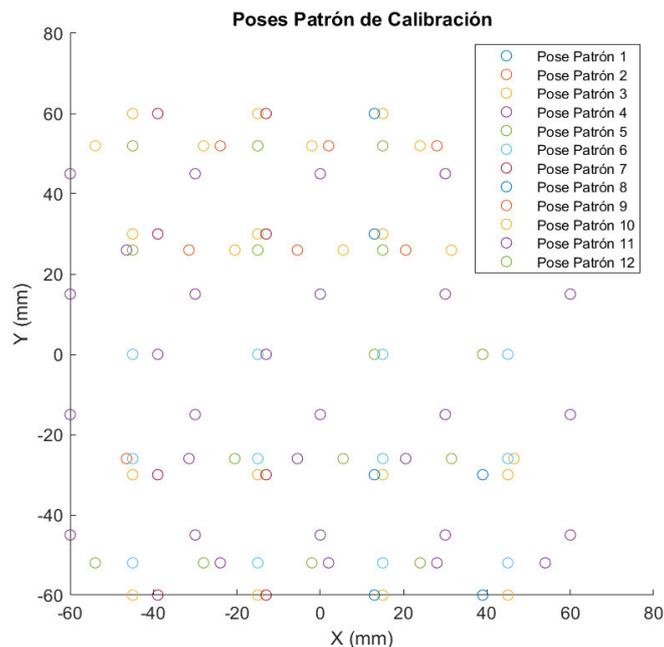


Figura 7.8. Nube de puntos sintéticos de las poses patrón generadas.

A continuación, se debe introducir el error píxel asociado con el ruido del sensor de la cámara y proyectar la nube de puntos 3D al plano de la imagen de la cámara 2D (Figura 7.9). De esta manera, se determina el porcentaje de puntos visibles en cada pose [%] y el porcentaje global [%]. Se establecen como puntos no visibles, aquellos cuya proyección queda fuera del sensor digital de la cámara. Dichos puntos se pueden identificar en una figura (Figura 7.10).

**Generar poses patrón**

Porcentaje umbral relativo de visibilidad [%]   **ACTUALIZAR**

Porcentaje global de visibilidad [%]

Número de poses

Selecc	ID.Pose patrón	Porcentaje visible [%]	Ver Pto no visible
<input checked="" type="checkbox"/>	1	100	<input type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/>	2	100	<input type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/>	3	100	<input type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/>	4	100	<input type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/>	5	100	<input type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/>	6	100	<input type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/>	7	100	<input type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/>	8	100	<input type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/>	9	100	<input type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/>	10	100	<input type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/>	11	100	<input type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/>	12	100	<input type="checkbox"/>

**GENERAR PUNTOS PARA N POSES**

Error de píxel [px]

**REPROYECCIÓN**

Figura 7.9. Generar poses patrón y reproyección.

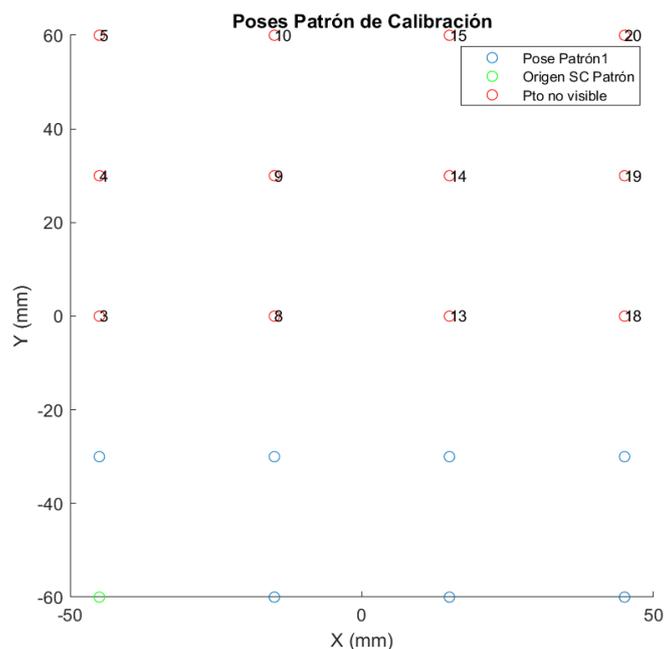


Figura 7.10. Identificación de puntos no visibles. Pose Patrón 1.

Se recomienda emplear el mayor número de poses del patrón. Sin embargo, si el usuario considera que el porcentaje en alguna pose no es lo suficientemente alta, se puede deseleccionar, y por tanto, no considerarla en el cálculo de la calibración intrínseca. Otro método de cribado es indicar un porcentaje umbral para que el descarte sea automático. En el peor de los casos, si el porcentaje global se considera bajo, la única alternativa es modificar la posición de la cámara.

#### Resultados de la calibración intrínseca

Los parámetros intrínsecos calculados (Figura 7.11) son: la distancia focal ( $f_x$ ,  $f_y$ ) [px], las coordenadas del punto principal ( $x_0$ ,  $y_0$ ) [px], los coeficientes de distorsión radial ( $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$ ) y tangencial ( $p_1$ ,  $p_2$ ) y el *skew*. A cada parámetro estimado, se le asocia una incertidumbre correspondiente a un nivel de confianza del 95% ( $2 \cdot \sigma$ ).

El algoritmo de la calibración intrínseca se basa en el enfoque matemático propuesto por Zhang [62], el mismo que Matlab dispone para sus Apps de calibración (*Camera Calibrator* y *Stereo Camera Calibrator*).

Parámetros Intrínsecos (valores medios)			Incertidumbre de Uso ( $2\sigma$ )		
	X	Y	U_X	U_Y	
Distancia focal [px]	6485.8392	6485.6973	0.80002	0.81002	
Punto principal [px]	2001.0796	1500.1398	0.50909	0.44308	
Coeficientes Distorsión Radial			U_Coeficientes Distorsión Radial		
K1	K2	K3	K1	K2	K3
-6.6253e-04	0.0107		0.0017	0.0205	
Coeficientes Distorsión Tangencial			U_Coeficientes Distorsión Tangencial		
p1	0	p2	0	0	
Skew			U_Skew		
	0				0

Figura 7.11. Resultados de la calibración intrínseca.

En una figura, se visualiza el escenario de la calibración intrínseca (patrón y cámara), lo que resulta de gran ayuda en la verificación de los resultados (Figura 7.12). Por ejemplo, si la distancia cámara patrón no coincide con los valores introducidos, puede deberse a que el algoritmo no haya convergido correctamente, como consecuencia de un excesivo error acumulado en los cálculos.

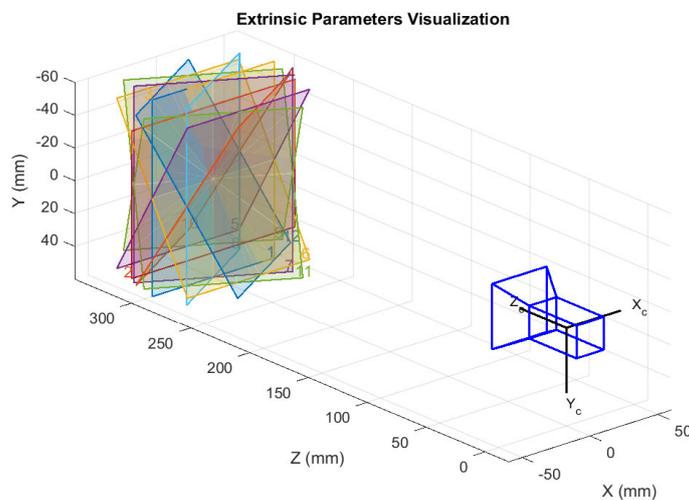


Figura 7.12. Escenario de calibración intrínseca.

En un diagrama de barras, se representa el error de reproyección promedio en cada pose de calibración. Si el error de reproyección global es demasiado alto, se debe descartar la pose que haya generado mayor error y recalibrar de nuevo (Figura 7.13). Otra opción es usar tres coeficientes de distorsión radial y/o estimar la distorsión tangencial y el skew (Figura 7.14).

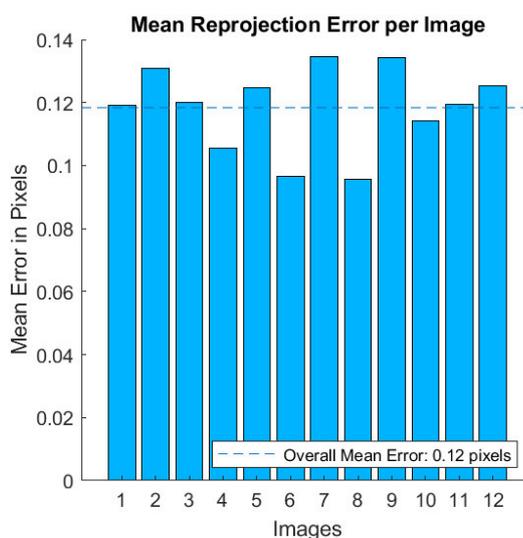


Figura 7.13. Error de reproyección promedio [píxel].

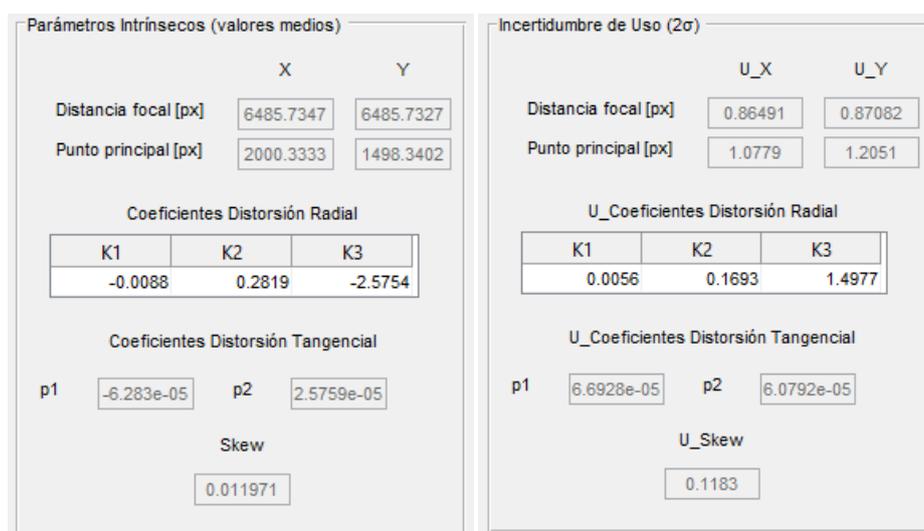


Figura 7.14. Cálculo de tres coeficientes de distorsión radial, de la distorsión tangencial y del skew.

### 7.1.2.2. CALIBRACIÓN EXTRÍNSECA

La calibración extrínseca se divide en dos etapas: preparación de la calibración extrínseca y obtención de los resultados. Se puede acceder a ellas tras completar la calibración intrínseca.

#### Preparación de los puntos de referencia

Los puntos de referencia se pueden generar manualmente, introduciendo sus coordenadas o importándolo desde un fichero \*.mat. También, se puede crear una red de puntos, indicando el número de puntos y el tramo [m] en el que se distribuyen en los tres ejes (Figura 7.15). Esta última opción agiliza la generación de un patrón de calibración del tipo tablero de ajedrez. En cualquier caso, las posiciones están referenciadas al sistema de coordenadas global (Figura 7.16).

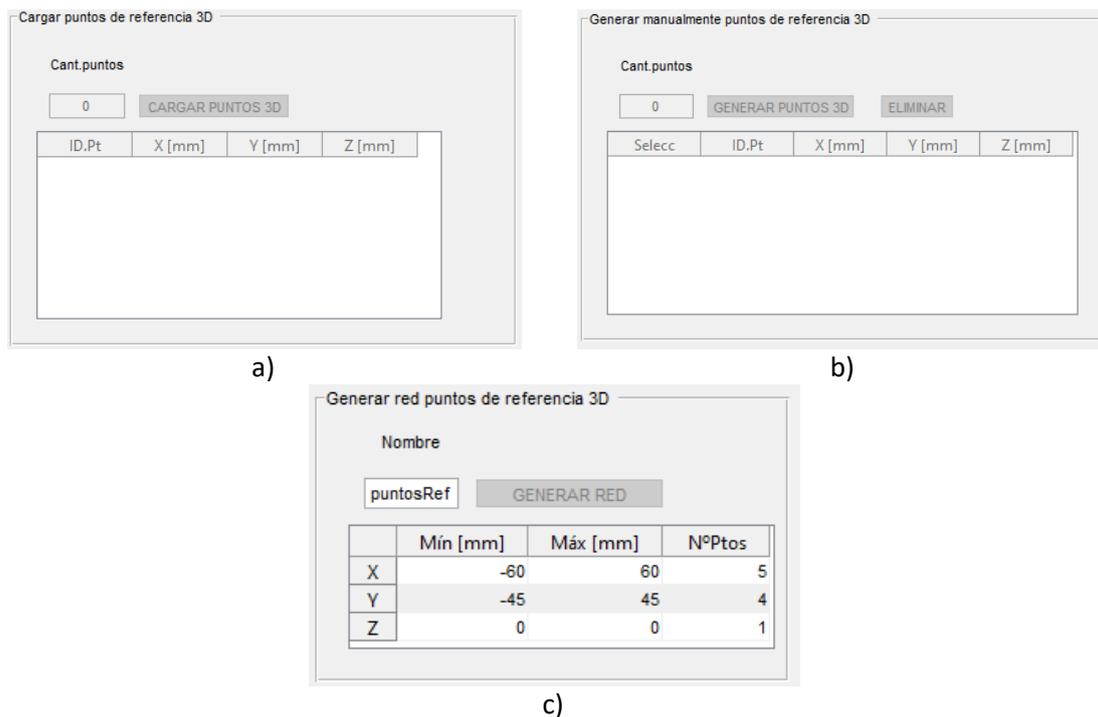


Figura 7.15. Generar puntos de referencia. a) Manualmente, b) Importar desde archivo, c) Red de puntos.

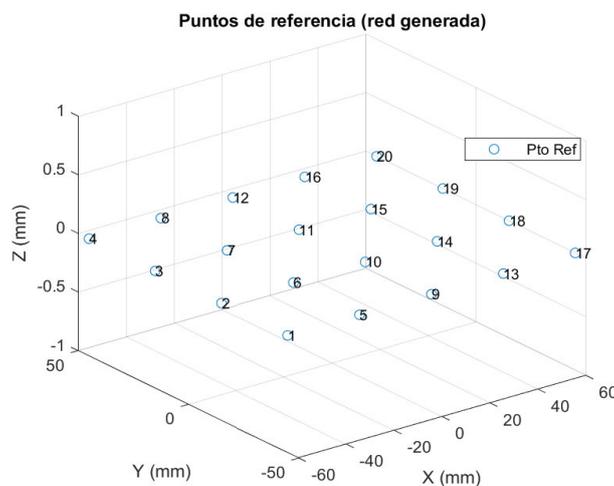


Figura 7.16. Posición de los puntos de referencia.

Como en un escenario real, la posición de dichos puntos se mide con otro instrumento de mayor precisión, en la simulación se les puede aplicar la incertidumbre asociada  $[\mu\text{m}]$  (Figura 7.17).

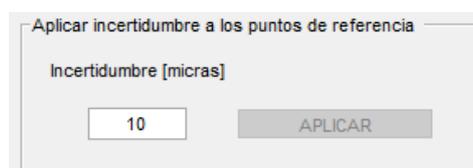


Figura 7.17. Aplicación de la incertidumbre del instrumento de medición.

### Preparación de las cámaras

La preparación de las cámaras (Figura 7.18) consiste en indicar el número de cámaras y sus poses nominales (posición y orientación), referenciadas al sistema de coordenadas global. A las cámaras se les puede aplicar un error de posición [mm] y orientación [°], además de introducir otro error píxel [px]. Después, se proyectan los puntos de referencia 3D en el plano de la imagen de las cámaras, para determinar la cantidad de puntos no detectados en cada una de ellas e identificarlos.

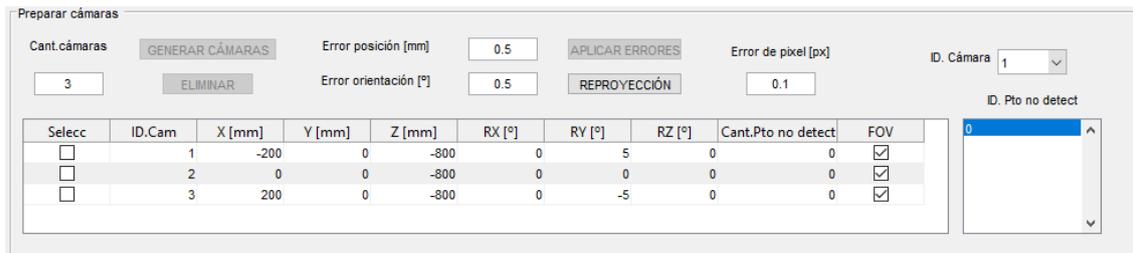


Figura 7.18. Preparación de las cámaras.

En una figura, se visualizan las poses de las cámaras, sus correspondientes conos de visión (se pueden activar/desactivar), así como los puntos detectados y no detectados (Figura 7.20). De esta manera, se analizan las mejores poses para la calibración extrínseca de las cámaras (Figura 7.19).

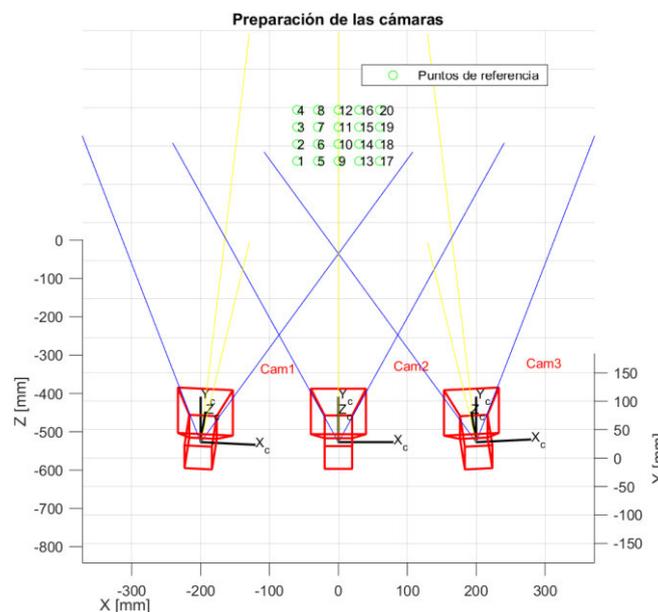


Figura 7.19. Escena de calibración extrínseca.

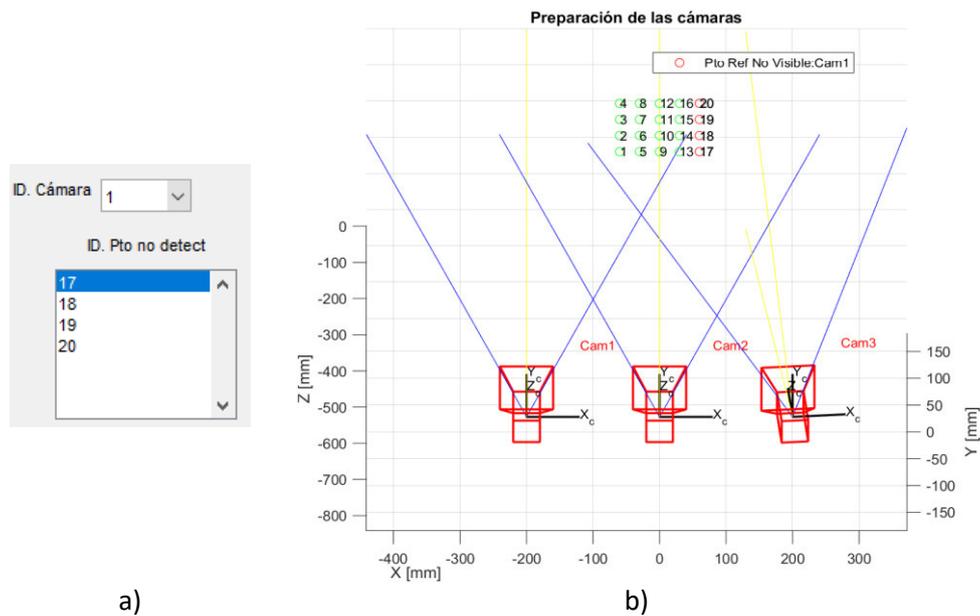


Figura 7.20. Puntos no detectados por la cámara 1. a) Identificación de los puntos, b) visualización de los puntos (color rojo).

Con el fin de proporcionar un mayor control a la hora de seleccionar los puntos de referencia, se reorganizan los puntos, para mostrar la cantidad de cámaras que detectan cada punto. (Figura 7.21 y Figura 7.22). Así, de manera automática se descartan aquellos que no sean vistos, por lo menos desde dos cámaras u otra cantidad indicada por el usuario.

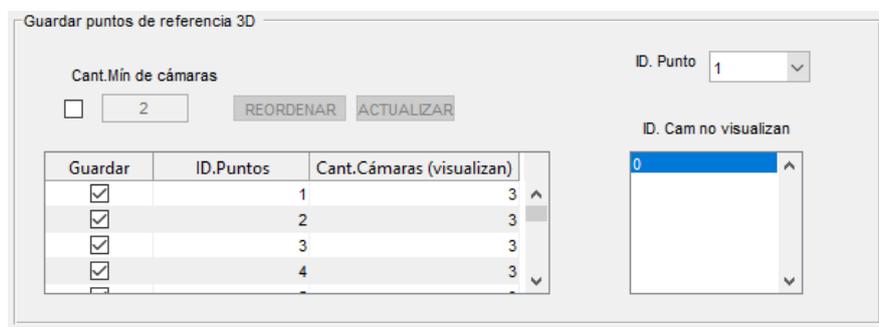


Figura 7.21. Guardado de los puntos de referencia a usar en la calibración extrínseca.

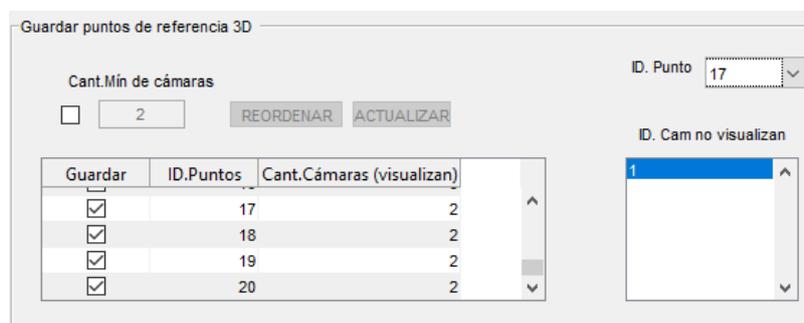


Figura 7.22. ID de la cámara que no visualiza el punto ID 17.

### Resultados de la calibración extrínseca

Se dispone de dos métodos con los que se pueden obtener las poses de las cámaras y sus incertidumbres (Figura 7.24 y Figura 7.25), a partir de un número determinado de iteraciones (Figura 7.23): resección individual y resección conjunta. En la resección individual, se emplea la función “*estimateWorldCameraPose*” de la librería de Matlab. Esta función calcula las poses de las cámaras a partir de sus puntos imagen correspondiente, considerando el mínimo error individual. En la resección conjunta, se usan las funciones de la librería desarrollada por Tekniker, donde a partir de todos los puntos imagen, se obtienen las poses que minimizan el error global. En ambos procedimientos, se tienen en cuenta los resultados de la calibración intrínseca obtenidos anteriormente (Figura 7.23).



The screenshot shows a control panel with two input fields: 'Num. Iteraciones' set to 100 and 'Cant. Cam' set to 0. Below these are two radio buttons: 'Resección Individual' (selected) and 'Resección Conjunta'.

Figura 7.23. Selección del método de cálculo de la calibración extrínseca y número de iteraciones.

Parámetros Extrínsecos (valores medios)

ID. Cam	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	RX [°]	RY [°]	RZ [°]
1	-199.9897	0.1681	-800.0133	0.0121	4.9991	0.0011
2	-0.0328	0.0777	-799.9196	0.0055	0.0024	-7.6535e-04
3	200.1588	0.2563	-799.9227	0.0183	-5.0121	-7.4454e-04

Figura 7.24. Resultados de la calibración extrínseca. Valores medios de las poses de las cámaras.

Incertidumbre de Uso (2σ)

ID. Cam	UX [mm]	UY [mm]	UZ [mm]	URX [°]	URY [°]	URZ [°]
1	0.2532	0.4237	0.1079	0.0302	0.0186	0.0030
2	0.8512	1.1570	0.1675	0.0828	0.0609	0.0025
3	0.4375	0.5935	0.2019	0.0422	0.0329	0.0030

Figura 7.25. Resultados de la calibración extrínseca. Incertidumbre de uso de las poses de las cámaras.

Antes de finalizar la etapa de calibración, se realizan dos verificaciones automáticas de los resultados.

En la primera, se mide por triangulación la posición 3D de los puntos de referencia, a partir de los puntos imagen nominales. La diferencia entre los valores nominales y los medidos proporcionan las correcciones medias [mm] de cada punto, los cuales se pueden descomponer en las coordenadas X, Y, Z (Figura 7.28). Además, se muestra en una figura tanto los puntos de referencia nominales, como los medidos y la disposición de las cámaras (Figura 7.27).

Corrección Puntos Referencia (valores medios)

ID.Pt	Err.X [mm]	Err.Y [mm]	Err.Z [mm]	Err [mm]
1	-7.5139e-05	-8.4377e-04	0.0148	0.0148
2	-1.8047e-04	-1.3764e-04	0.0066	0.0066
3	-3.3204e-04	4.3586e-04	-9.2533e-04	0.0011

Figura 7.26. Verificación de la calibración extrínseca. Corrección media de los puntos de referencia [mm].

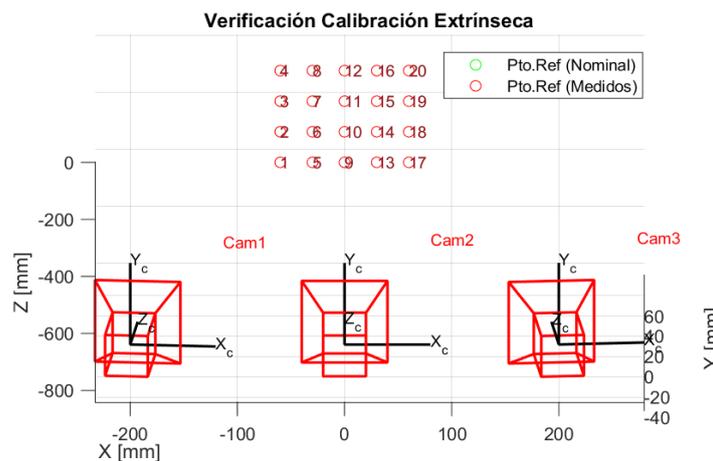


Figura 7.27. Verificación de la calibración extrínseca. Escenario de calibración.

Por otro lado, en varios histogramas se representan estas correcciones medias, proporcionando al usuario una información más resumida de la calidad de la calibración (Figura 7.28) acompañados de la desviación estándar.

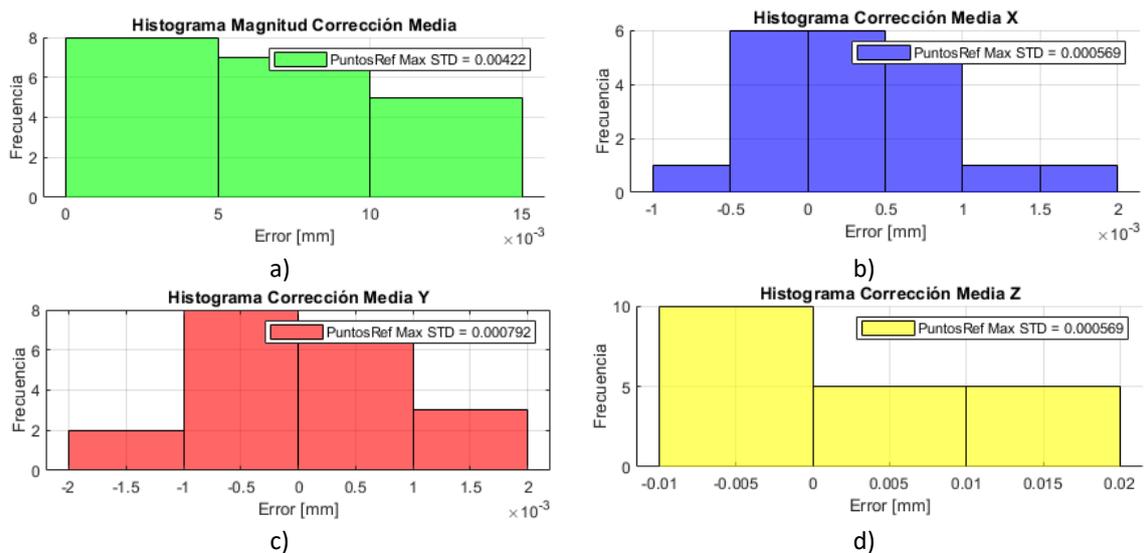


Figura 7.28. Histogramas de la corrección media de los puntos de referencia [mm]. a) Magnitud, b) Corrección en X, c) Corrección en Y, d) Corrección en Z.

La segunda verificación consiste en mostrar en un diagrama de barras, el error de reproyección medio por cámara y el global [px], a partir de la proyección de los puntos 3D de referencia (Figura 7.29) con las nuevas poses calculadas.

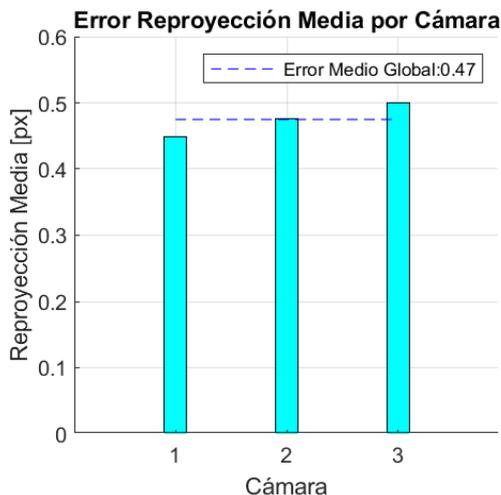


Figura 7.29. Verificación de la calibración extrínseca. Error de reproyección media por cámara y global [píxel].

Dependiendo de la precisión requerida y del escenario de medición, el usuario debe decidir el algoritmo de la calibración extrínseca y si no es suficiente, debe variar algún parámetro de la calibración y recalibrar de nuevo.

### 7.1.2.3. EDICIÓN DE LOS PARÁMETROS INTRÍNSECOS Y EXTRÍNSECOS

En caso de que se conozcan los parámetros intrínsecos y extrínsecos de las cámaras, se pueden introducir sus valores directamente (Figura 7.30). Para ello, antes se debe completar la pestaña “Config óptica-cámara”. Activando la casilla “Editar parámetros”, se editan los parámetros intrínsecos y sus incertidumbres correspondientes (Figura 7.31).

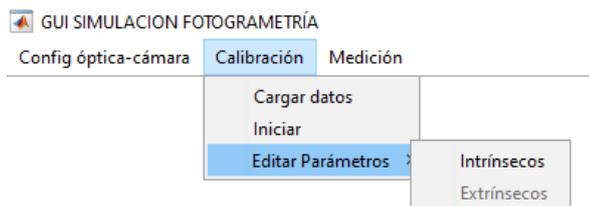
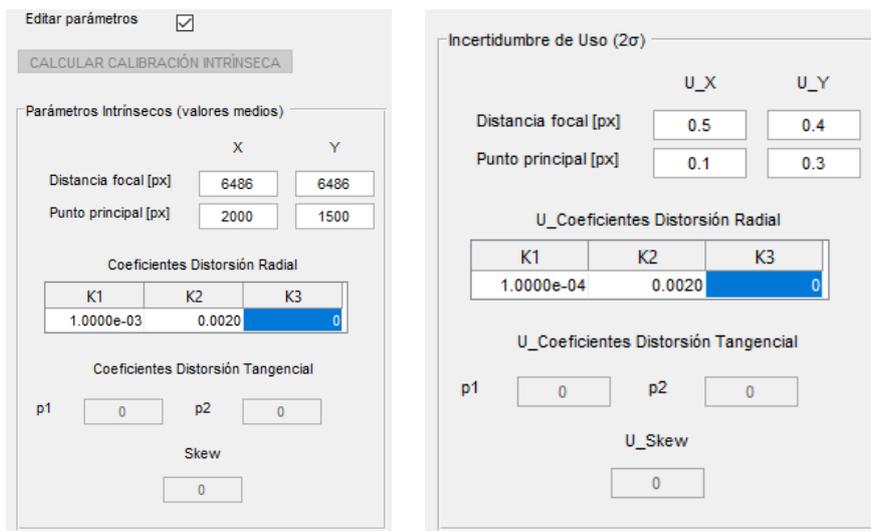


Figura 7.30. Acceso a la edición de los parámetros intrínsecos y extrínsecos.



Editar parámetros

CALCULAR CALIBRACIÓN INTRÍNSECA

Parámetros Intrínsecos (valores medios)

	X	Y
Distancia focal [px]	6486	6486
Punto principal [px]	2000	1500

Coeficientes Distorsión Radial

K1	K2	K3
1.0000e-03	0.0020	0

Coeficientes Distorsión Tangencial

p1  p2

Skew

Incertidumbre de Uso ( $2\sigma$ )

	U_X	U_Y
Distancia focal [px]	0.5	0.4
Punto principal [px]	0.1	0.3

U\_Coeficientes Distorsión Radial

K1	K2	K3
1.0000e-04	0.0020	0

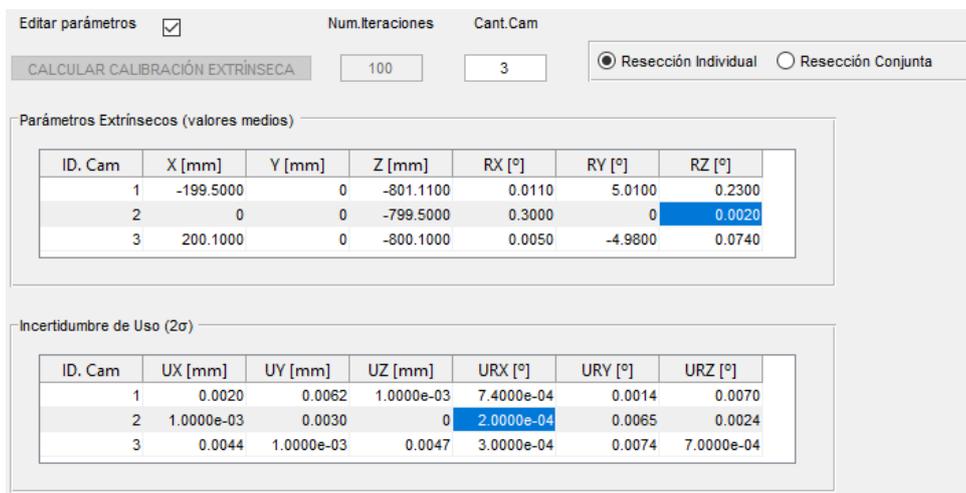
U\_Coeficientes Distorsión Tangencial

p1  p2

U\_Skew

Figura 7.31. Edición de los parámetros intrínsecos y sus incertidumbres.

Una vez guardados, se puede realizar la calibración extrínseca o editar los parámetros extrínsecos. En este último caso, se debe indicar el número de cámaras, el método de calibración extrínseca para poder introducir los valores de las poses y sus incertidumbres (Figura 7.32).



Editar parámetros

Num.Iteraciones  Cant.Cam

CALCULAR CALIBRACIÓN EXTRÍNSECA

Resección Individual  Resección Conjunta

Parámetros Extrínsecos (valores medios)

ID. Cam	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	RX [°]	RY [°]	RZ [°]
1	-199.5000	0	-801.1100	0.0110	5.0100	0.2300
2	0	0	-799.5000	0.3000	0	0.0020
3	200.1000	0	-800.1000	0.0050	-4.9800	0.0740

Incertidumbre de Uso ( $2\sigma$ )

ID. Cam	UX [mm]	UY [mm]	UZ [mm]	URX [°]	URY [°]	URZ [°]
1	0.0020	0.0062	1.0000e-03	7.4000e-04	0.0014	0.0070
2	1.0000e-03	0.0030	0	2.0000e-04	0.0065	0.0024
3	0.0044	1.0000e-03	0.0047	3.0000e-04	0.0074	7.0000e-04

Figura 7.32. Edición de los parámetros extrínsecos y sus incertidumbres.

### 7.1.3. MEDICIÓN

En la fase de medición, accediendo al panel “Menú Medición (Figura 7.33), se da la posibilidad de medir la posición de puntos 3D mediante triangulación o de calcular las poses de un objeto a través del método de multiresección.

En ambos casos, la primera fase de preparación que consiste en introducir los puntos a medir o de control, es idéntica. De manera preestablecida está seleccionada la triangulación, pero en

cualquier momento se puede cambiar a multiresección, pulsando el botón “Método” (Figura 7.34).

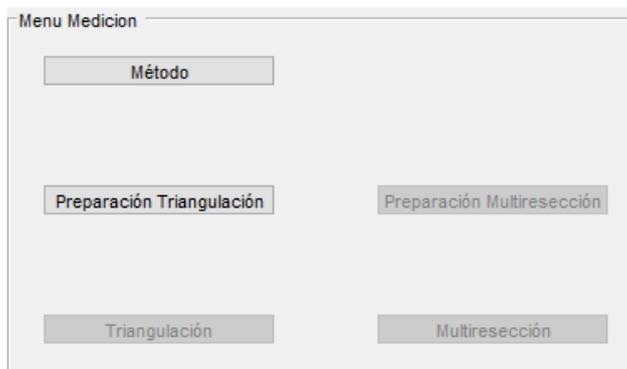


Figura 7.33. Menú de medición.

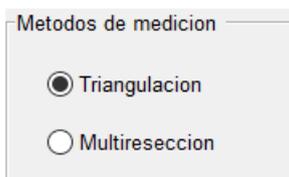


Figura 7.34. Métodos de medición.

### Preparación de los puntos para la medición (triangulación y multiresección)

La primera fase de preparación consiste en cargar los puntos a medir (triangulación) o los puntos de control (multiresección), desde un fichero \*.mat o introducir las coordenadas 3D de forma manual (Figura 7.35 y Figura 7.36). Sin embargo, el usuario debe prestar atención al sistema de coordenadas con el que se está trabajando. En triangulación, los puntos a medir están referenciados al sistema de coordenadas global, mientras que en multiresección, la posición de los puntos de control se conoce respecto a un sistema de coordenadas local, que suele situarse en el objeto, cuya pose se desea calcular. Por tanto, como en multiresección, se parte de puntos conocidos, solamente en esa opción se les puede aplicar una incertidumbre (Figura 7.37).

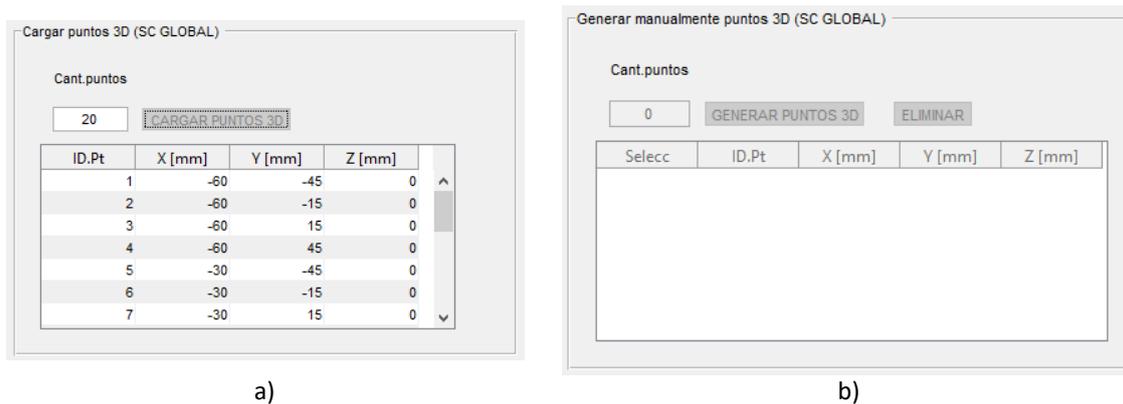


Figura 7.35. Preparación de los puntos a medir. a) Introducir puntos desde un archivo, b) Generar manualmente.

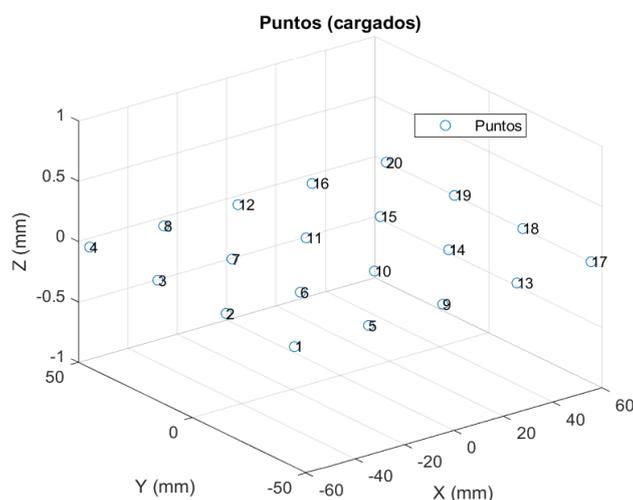


Figura 7.36. Representación de los puntos.

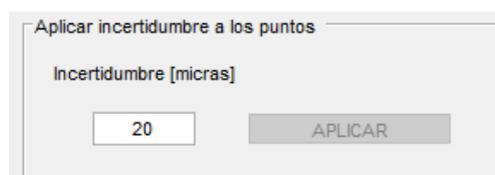


Figura 7.37. Aplicación de error a los puntos de control en multiresección [ $\mu\text{m}$ ].

### Preparación de la medición por triangulación

En la medición por triangulación (Figura 7.39), los puntos se proyectan y automáticamente se ordenan al igual que en la preparación de la calibración extrínseca, para conocer cuántas cámaras visualizan cada punto (Figura 7.38). Aquellos puntos que solamente sean vistos por una sola cámara no podrán medirse. También, se debe aplicar un error píxel y los conos de visión se pueden activar/desactivar (Figura 7.40).

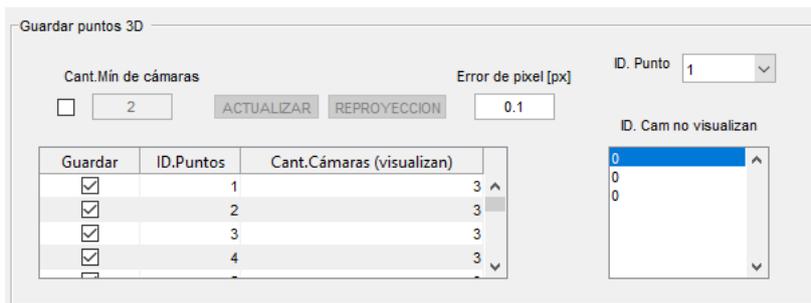


Figura 7.38. Preparación de la medición por triangulación.

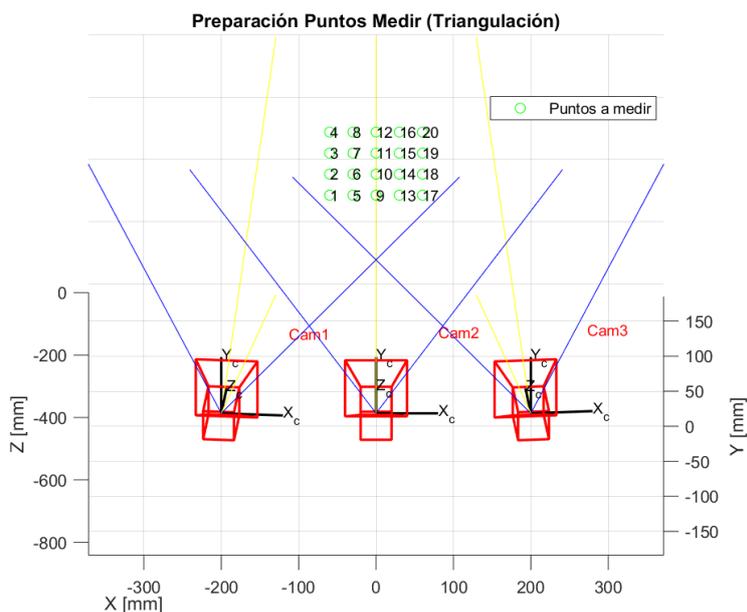


Figura 7.39. Representación del escenario de medición.

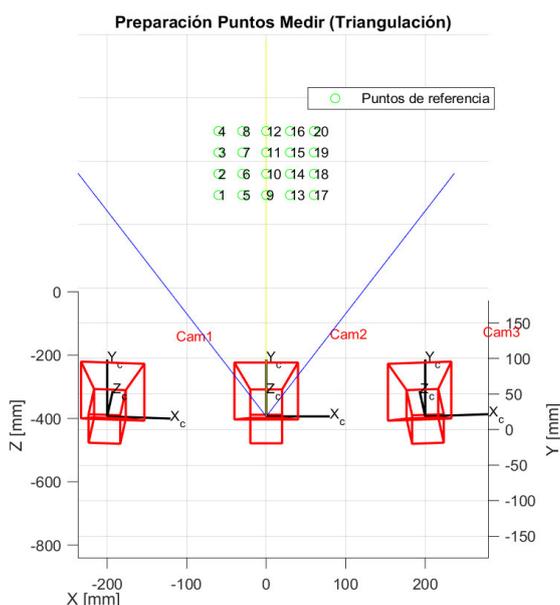


Figura 7.40. Desactivación de los conos de visión de la cámara 1 y cámara 3.

### Resultados de la medición por triangulación

Los resultados de la triangulación consisten en calcular la posición y estimar la incertidumbre de los puntos medidos (Figura 7.41), indicando el número de iteraciones. También, se representan en una figura dichos puntos junto con los nominales, introducidos en la preparación (Figura 7.42) y se muestran las correcciones medias en una serie de histogramas (Figura 7.43) acompañados de la desviación estándar. En este caso, las correcciones se calculan como la diferencia entre el resultado medido en cada iteración y la media de los resultados.

Posición Puntos Medidos (valores medios) e Incertidumbre de Uso ( $2\sigma$ )

ID.Pto	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	UX [mm]	UY [mm]	UZ [mm]
1	-60.0357	-45.0559	-0.0029	0.0970	0.1312	0.1455
2	-60.0377	-15.0536	-0.0023	0.1002	0.1272	0.1454
3	-60.0377	14.9503	-0.0017	0.1001	0.1209	0.1452
4	-60.0354	44.9524	-0.0011	0.0967	0.1180	0.1449
5	-30.0352	-45.0591	-0.0048	0.0957	0.1367	0.1456
6	-30.0422	-15.0578	-0.0049	0.1067	0.1344	0.1461
7	-30.0422	14.9544	-0.0043	0.1067	0.1142	0.1458

Figura 7.41. Posición media de los puntos medidos y sus incertidumbres de uso.

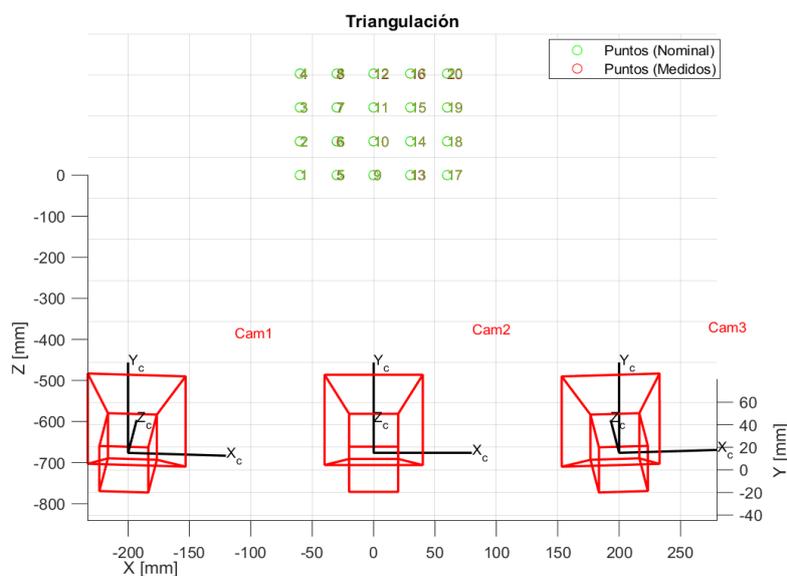


Figura 7.42. Escenario de medición por triangulación.

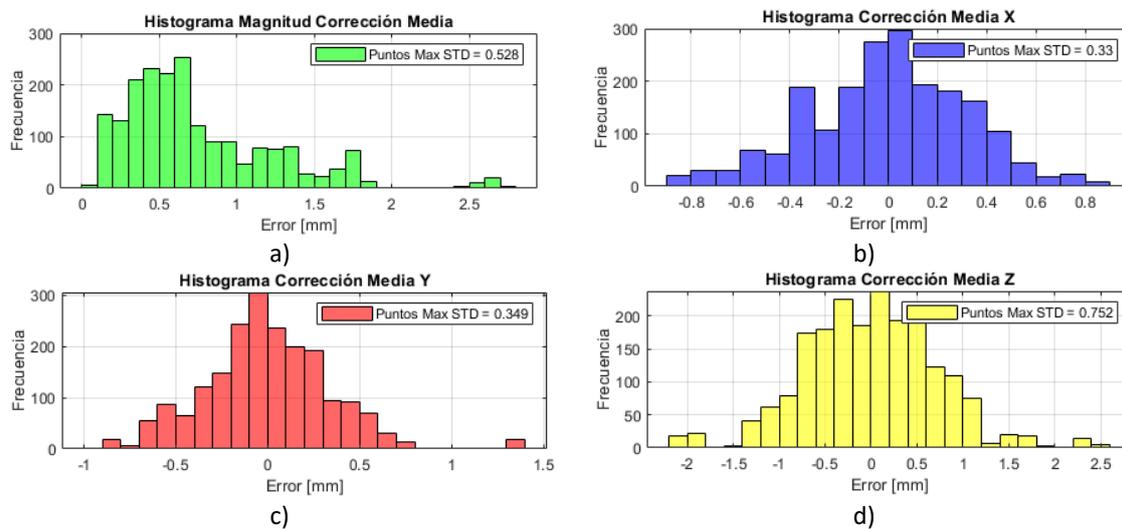


Figura 7.43. Histogramas de la corrección media de los puntos medidos por triangulación [mm]. a) Magnitud, b) Corrección en X, c) Corrección en Y, d) Corrección en Z.

### Preparación de la medición por multiresección

En cambio, en multiresección, la preparación consiste en referenciar los puntos de control al sistema de coordenadas global para cada una de las poses del objeto, mediante una serie de rotaciones y traslaciones (transformación 6 dof) (Figura 7.45). Para ello, los puntos de control, introducidos anteriormente, se importan automáticamente y el usuario debe cargar solamente las poses del objeto (Figura 7.44). En este caso, se proyectan los puntos transformados y se visualizan en una figura todas las poses (Figura 7.47).

Cargar poses del objeto

ID.Pose	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	RX[°]	RY[°]	RZ[°]
1	0	0	-100	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0

Cant.Poses:    
 Error posición [mm]:    
 Error orientación [°]:

Figura 7.44. Cargar poses del objeto.

Puntos de control

ID.Pt	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]
1	-60	-45	0
2	-60	-15	0
3	-60	15	0
4	-60	45	0
5	-30	-45	0
6	-30	-15	0
7	-30	15	0

ID.Pt Transf	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]
1	-60	-45	-100
2	-60	-15	-100
3	-60	15	-100
4	-60	45	-100
5	-30	-45	-100
6	-30	-15	-100
7	-30	15	-100

Pose1

Figura 7.45. Transformación de los puntos de control al sistema de coordenadas global.

De nuevo, como en la calibración extrínseca, se reorganizan los puntos, para mostrar la cantidad de cámaras que detectan cada punto. (Figura 7.46) y en una figura se muestra el escenario de medición de las poses del objeto (Figura 7.47).

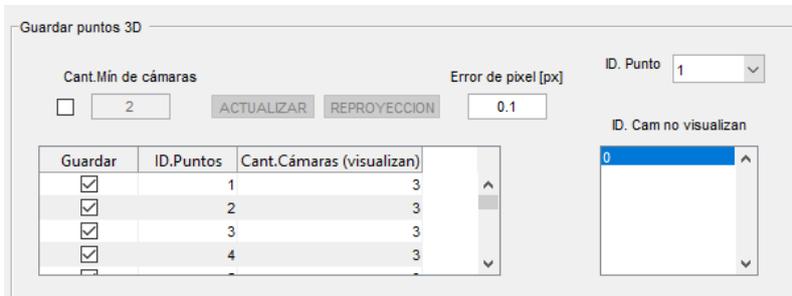


Figura 7.46. Guardado de los puntos a medir.

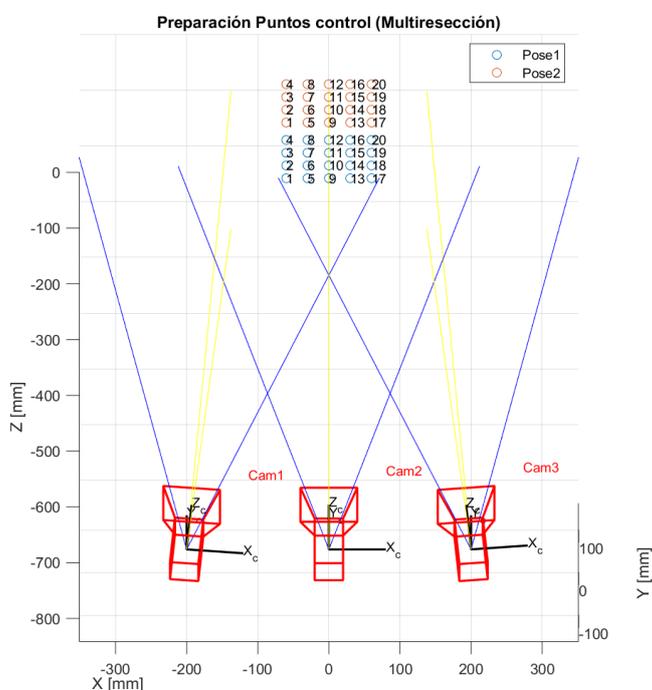


Figura 7.47. Preparación de las poses del objeto a medir.

### Resultados de la medición por multiresección

En este caso, como resultados se obtienen las posiciones y orientaciones del objeto y su incertidumbre asociada (Figura 7.48 y Figura 7.49) junto con una representación de los puntos de control medidos y los nominales (Figura 7.50). También, se muestran las correcciones medias en una serie de histogramas acompañados de la desviación estándar (Figura 7.51 y Figura 7.52). En ambos resultados, se pueden mostrar de todas las poses a la vez o por separado.

Poses del Objeto (valores medios)

ID.Pose	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	RX [°]	RY [°]	RZ [°]
1	-0.0081	0.0059	-100.0053	500.3768	-0.0060	-500.3768
2	5.6292e-04	-0.0444	-0.0168	-131.5735	0.0041	131.5732

Figura 7.48. Medición de las poses de un objeto.

Incertidumbre de Uso ( $2\sigma$ )

ID.Pose	UX [mm]	UY [mm]	UZ [mm]	URX [°]	URY [°]	URZ [°]
1	0.0469	0.0564	0.0924	1.5782e+03	0.0144	1.5782e+03
2	0.0669	0.1149	0.1327	413.3193	0.0110	413.3190

Figura 7.49. Incertidumbre de uso de las poses de un objeto.

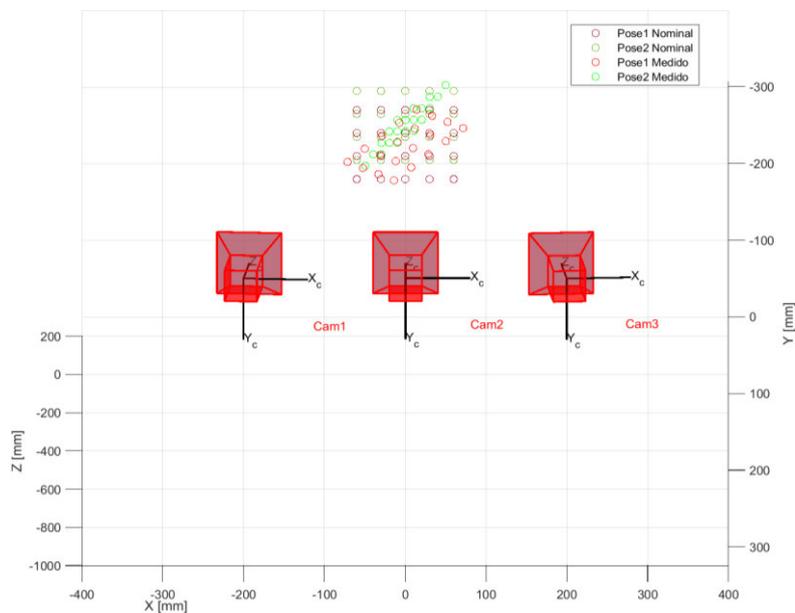


Figura 7.50. Representación de las poses 1 y 2 nominales y medidos.

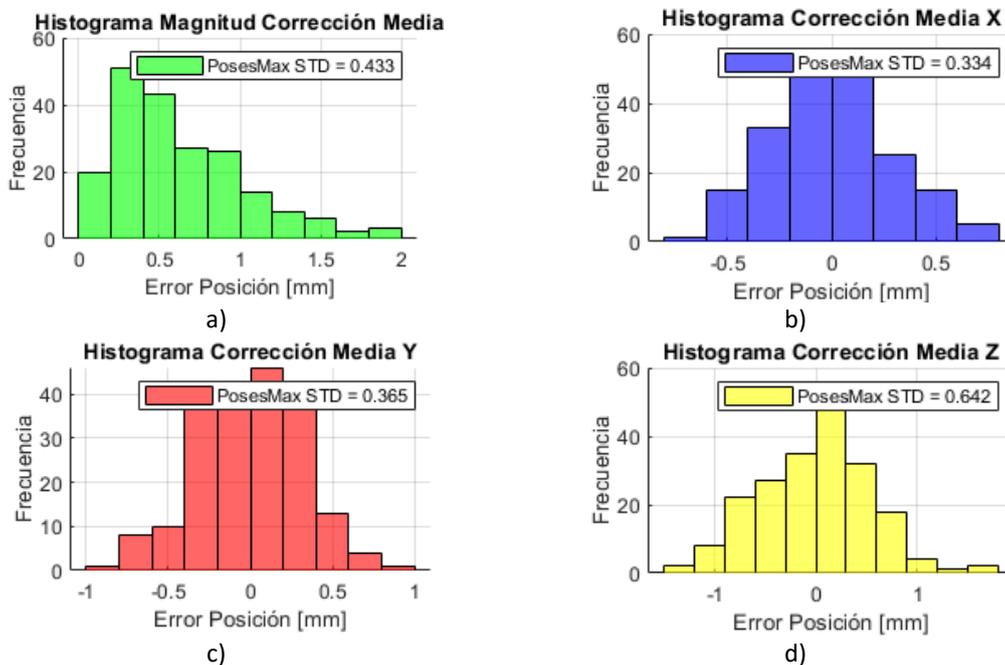


Figura 7.51. Histogramas de la corrección media de la posición medida del objeto [mm]. a) Magnitud, b) Corrección en X, c) Corrección en Y, d) Corrección en Z.

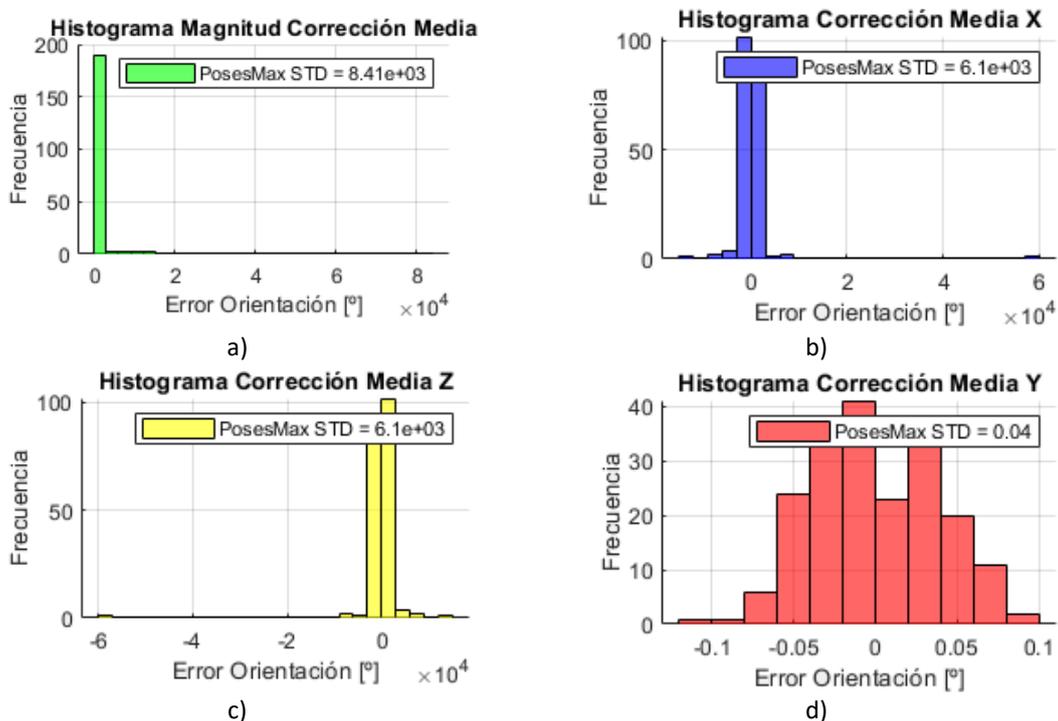


Figura 7.52. Histogramas de la corrección media de la orientación medida del objeto [°]. a) Magnitud, b) Corrección en X, c) Corrección en Y, d) Corrección en Z.

## 7.2. VALIDACIÓN DE LA APLICACIÓN

Consiste en validar las funciones implementadas en el software de simulación con los datos solicitados de un proyecto desarrollado en Tekniker para una configuración estéreo (dos cámaras). En concreto, se valida la calibración intrínseca, la calibración extrínseca (ambos métodos: resección individual y conjunta) y la medición de puntos por triangulación, pero la medición de la pose de un objeto por multiresección no se llega a validar en este TFM.

En dicho proyecto, se mide el centro de gravedad de una aeronave mediante una configuración estéreo (dos cámaras). Los objetivos retrorreflectantes se sitúan tanto en el fuselaje como en el suelo y sus posiciones están referenciadas al sistema de coordenadas del avión. Se emplea el modelo de cámara GOX-12401-PGE de resolución 4.096 x 3.000 píxeles y un tamaño píxel de 3,45  $\mu\text{m}$ . La lente que se dispone tiene una distancia focal de 12 mm (ver apartado 12. ANEXO I: SELECCIÓN CÁMARA Y LENTE).

### 7.2.1. CALIBRACIÓN INTRÍNSECA

La calibración intrínseca se realiza con un patrón de calibración (*chessboard*) de 18x29 cuadrados con un tamaño de 20 mm cada uno. El patrón se coloca a 797 mm con respecto a la cámara. En total, se recogen 28 imágenes con el patrón en diferentes poses (Figura 7.54) y se procesan en la App de Matlab *Camera Calibrator*. Los resultados de los parámetros intrínsecos se muestran en la Tabla 7.1, sus incertidumbres en la Tabla 7.2 y el error píxel en la Tabla 7.3 y Figura 7.53.

Tabla 7.1. Resultados de la calibración intrínseca.

PARÁMETROS INTRÍNSECOS			
Distancia focal [px]	X	Y	
	3660,0272	3660,8671	
Punto principal [px]	X	Y	
	2028,7176	1491,4904	
Coeficientes de distorsión radial	K1	K2	K3
	-0,1060	0,1960	0
Coeficientes de distorsión tangencial	p1	p2	
	0	0	
Skew	s		
	0		

Tabla 7.2. Estimación de la incertidumbre de los parámetros intrínsecos.

INCERTIDUMBRES			
Distancia focal [px]	X	Y	
	0,2226	0,2250	
Punto principal [px]	X	Y	
	0,0820	0,1037	
Coeficientes de distorsión radial	K1	K2	K3
	9,0246e-5	3,1855e-4	0
Coeficientes de distorsión tangencial	p1	p2	
	0	0	
Skew	s		
	0		

Tabla 7.3. Error píxel medio global en magnitud y descompuesto en X e Y.

	Magnitud	X	Y
Error píxel [px]	0,2136	0,15	0,15

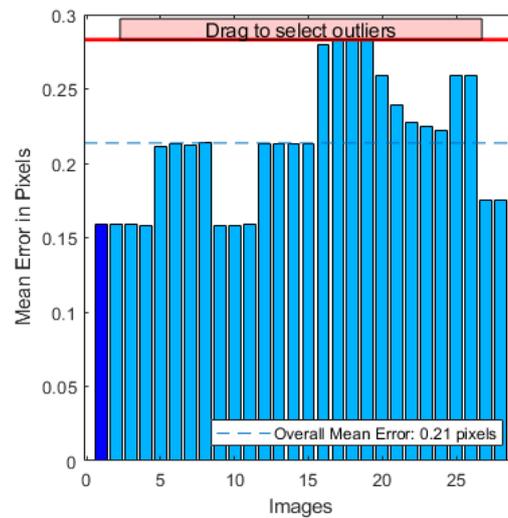


Figura 7.53. Error píxel medio de cada imagen y el global.

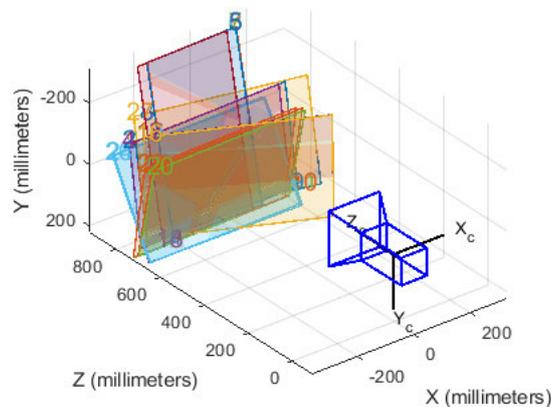


Figura 7.54. Escenario de la calibración intrínseca.

Antes de realizar la simulación, se comprueba que las funciones encargadas de la calibración intrínseca están correctamente implementadas. Para ello, se usan los puntos imagen 2D, los puntos 3D y el error de reproyección en cada imagen proporcionados por la App *Camera Calibrator*. Se observa que los resultados son idénticos (Figura 7.55 y Figura 7.56).

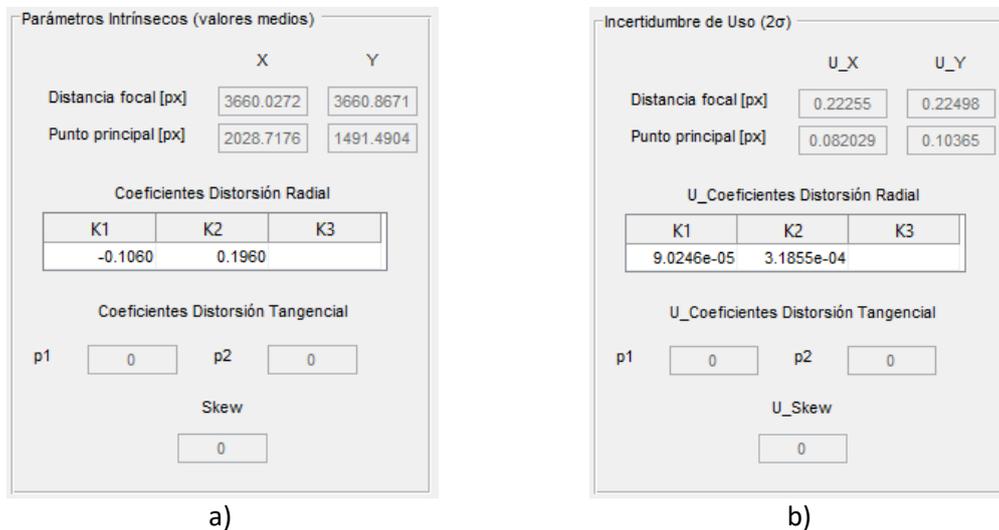


Figura 7.55. Comprobación de la correcta implementación de las funciones de la calibración intrínseca. a) Valores medios de los parámetros intrínsecos, b) Incertidumbre asociada.

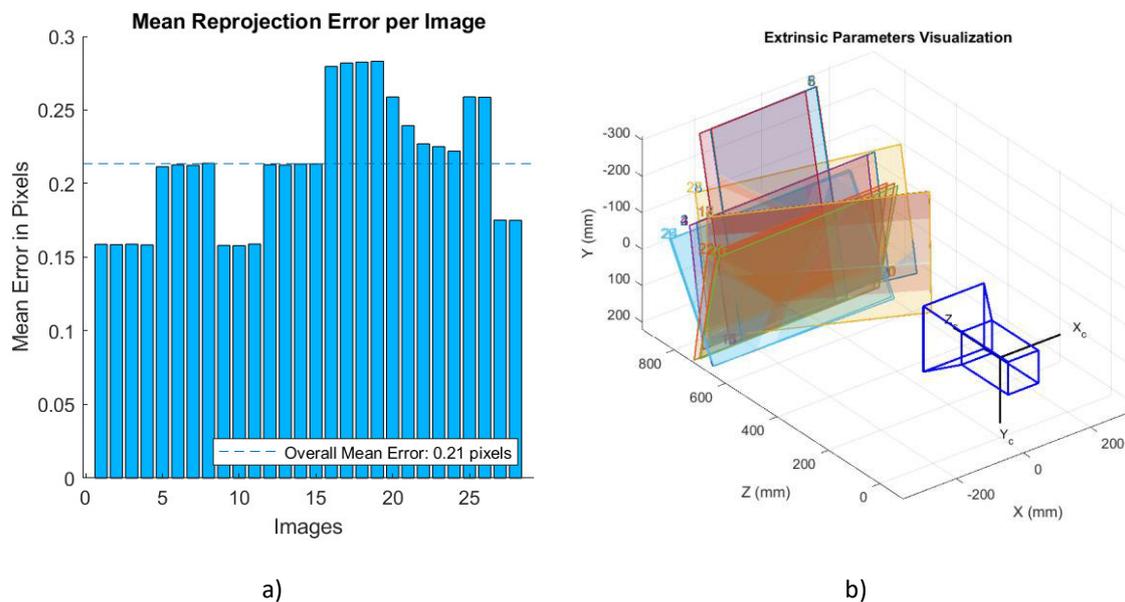


Figura 7.56. Comprobación de la correcta implementación de las funciones de la calibración intrínseca. a) Error de reproyección medio por cada imagen y el global; b) Escenario de la calibración intrínseca.

## Simulación

En el *software* de simulación, se introducen los datos de la cámara y de la lente (Figura 7.57). Cabe destacar que la distancia focal introducida en la simulación es la obtenida en la App *Camera Calibrator* (12,627 mm), ya que al usar puntos sintéticos, los resultados van a tender a al valor de dicha focal.

**Cámara**

Tamaño del sensor [px]

Horizontal

Vertical

Tamaño del píxel [micras]

**Lente**

Distancia focal [mm]

Apertura de la lente [f/mm]

a)
b)

Figura 7.57. Configuración óptica-cámara. a) Datos del sensor digital, b) Datos de la lente.

Se definen las características del patrón de calibración, el error píxel y la posición de la cámara (Figura 7.58). En este caso, la simulación se realiza con doce poses del *chessboard* (Figura 7.59).

**Patrón**

Dimensión del patrón [Nº Cuadrados]      Distancia cámara-patrón [mm]

X                       X

Y                       Y

Profundidad en Z [mm]                      Z

Tamaño del cuadrado [mm]

**Generar poses patrón**

Porcentaje umbral relativo de visibilidad [%]   ACTUALIZAR

Porcentaje global de visibilidad [%]

Número de poses

Selecc	ID.Pose patrón	Porcentaje visible [%]	Ver Pto no visible
<input checked="" type="checkbox"/>	1	100	<input type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/>	2	100	<input type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/>	3	100	<input type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/>	4	100	<input type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/>	5	100	<input type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/>	6	100	<input type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/>	7	100	<input type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/>	8	100	<input type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/>	9	100	<input type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/>	10	100	<input type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/>	11	100	<input type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/>	12	100	<input type="checkbox"/>

GENERAR PUNTOS PARA N POSES

Error de píxel [px]

REPROYECCIÓN

a)
b)

Figura 7.58. Preparación de la simulación de la calibración intrínseca. a) Dimensiones del patrón y posición de la cámara, b) Generación de las poses del patrón y visibilidad de los puntos.

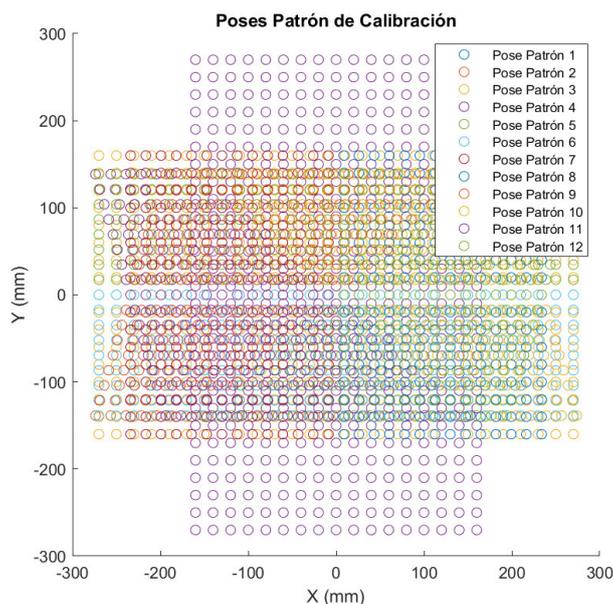


Figura 7.59. Visualización de los puntos sintéticos de las poses del patrón.

Los resultados simulados de la calibración intrínseca son los siguientes (Figura 7.60 y Figura 7.61 ).

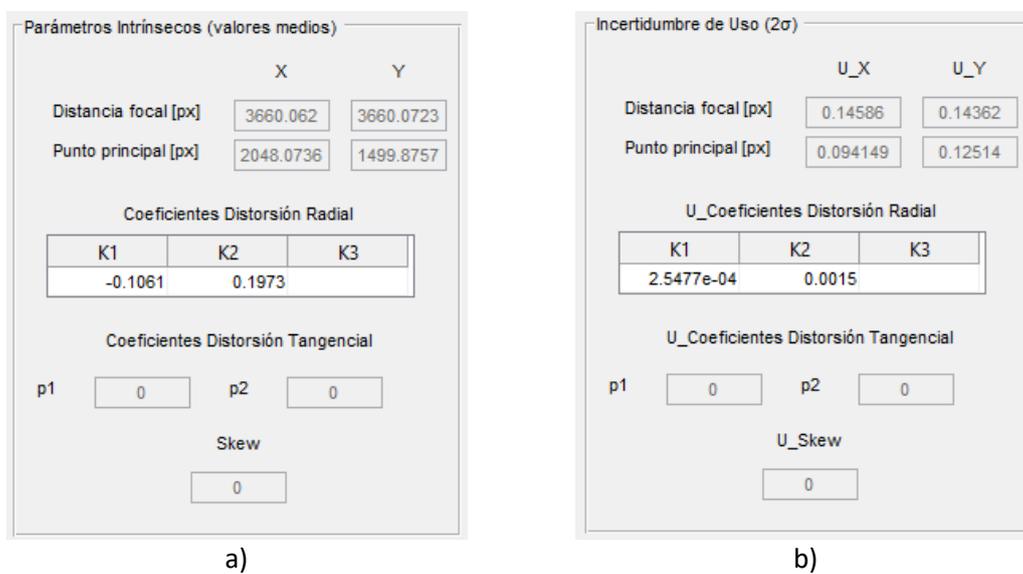


Figura 7.60. Simulación de la calibración intrínseca: a) Parámetros intrínsecos, b) Incertidumbre.

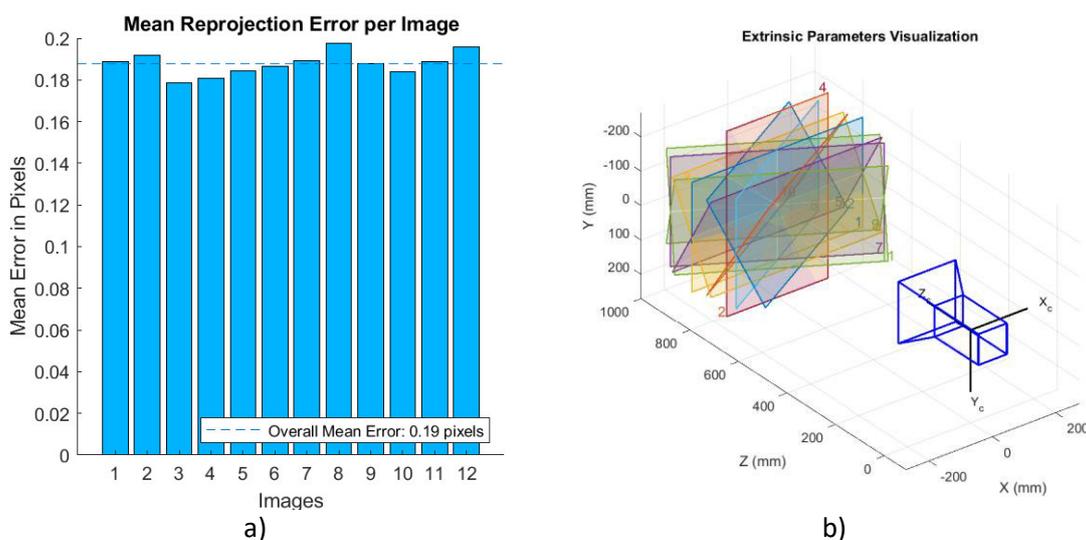


Figura 7.61. Simulación de la calibración intrínseca. a) Error de reproyección medio por pose del patrón y global, b) escenario de simulación.

Comparando los resultados de la calibración intrínseca real y simulada (Tabla 7.4, Tabla 7.5, Tabla 7.6), no hay diferencias significativas en los parámetros intrínsecos, ni en el error píxel. El mayor error se produce en el punto principal, ya que en las simulaciones, sus coordenadas iniciales se definen como el valor medio del tamaño del sensor.

Las incertidumbres son aceptables excepto la asociada a los coeficientes de distorsión radial, donde se da un orden de magnitud de diferencia debido a que es complejo su caracterización en las simulaciones.

Tabla 7.4. Error relativo cometido en los parámetros intrínsecos y porcentual absoluto.

PARÁMETROS INTRÍNSECOS			
Distancia focal [px]	X	Y	
	0,0348 (0,0010%)	-0,7948 (0,022%)	
Punto principal [px]	X	Y	
	19,356 (0,95%)	8,3853 (0,56%)	
Coeficientes de distorsión radial	K1	K2	K3
	-1·10 <sup>-4</sup> (0,094%)	0,001 (0,66%)	0
Coeficientes de distorsión tangencial	p1	p2	
	0	0	
Skew	s		
	0		

Tabla 7.5. Error relativo cometido en las incertidumbres y porcentual absoluto.

INCERTIDUMBRES			
Distancia focal [px]	X	Y	
	-0,07674 (34,47)	-0,0814 (36,17)	
Punto principal [px]	X	Y	
	0,012149 (14,82)	0,02144 (20,68)	
Coeficientes de distorsión radial	K1	K2	K3
	1,65E-04 (182,31)	1,18E-03 (370,88)	0
Coeficientes de distorsión tangencial	p1	p2	
	0	0	
Skew	s		
	0		

Tabla 7.6. Error relativo cometido en el error píxel y en el porcentual absoluto.

	Magnitud
Error píxel [px]	-0,0236 (11,05%)

### 7.2.2. CALIBRACIÓN EXTRÍNSECA

En la calibración extrínseca, se usan los parámetros intrínsecos obtenidos con la App *Camera Calibrator* (Tabla 7.1, Tabla 7.2 y Tabla 7.3) para partir de unos valores de referencia reales.

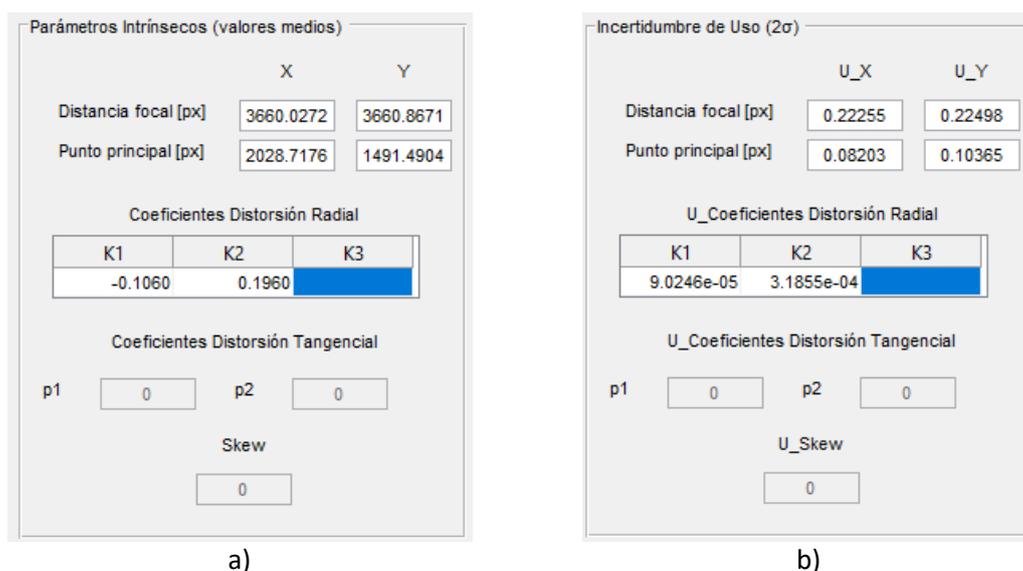


Figura 7.62. Edición de los parámetros intrínsecos.

Los objetivos retroreflectantes usados como puntos de referencia (calibrados) se encuentran en el suelo, siendo sus coordenadas, referenciadas al sistema de referencia global, los mostrados en la Tabla 7.7 con una incertidumbre de 250  $\mu\text{m}$ .

Tabla 7.7. Coordenadas de los puntos de referencia usados en la calibración extrínseca.

ID. Punto	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]
1	1880,70271851373	-2625	2316,98481870019
2	1880,70271851373	2625	2316,98481870019
3	5265,70271851373	-1350	2316,98481870019
4	6665,70271851373	2420	2316,98481870019
5	6550,70271851373	-2730	2566,98481870019
6	8265,70271851373	2500	2566,98481870019

Las poses de las cámaras obtenidas tras la calibración corresponden a los de la Tabla 7.8 y los errores considerados sobre dichos valores son los de la Tabla 7.9.

Tabla 7.8. Resultados de las poses obtenidas tras la calibración extrínseca.

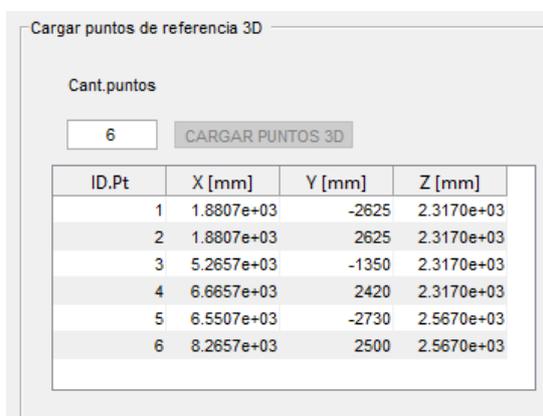
ID. Cámara	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	Rx [°]	Ry [°]	Rz [°]
1	-2311.00563378251	-5000	2484.58481870019	-90	0	-60
2	-2279.00807664887	5000	2484.58481870019	-120	0	-120

Tabla 7.9. Error considerado en las poses de las cámaras para el método de resección conjunta.

Error Cámaras	
Posición [mm]	1
Orientación [°]	0,5

## Simulación

Se introducen los puntos de referencia, su incertidumbre y se visualiza la distribución de dichos puntos (Figura 7.63 y Figura 7.64).



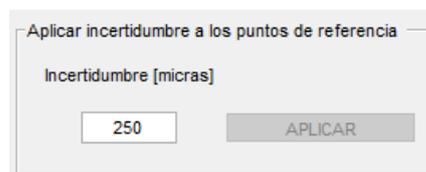
Cargar puntos de referencia 3D

Cant.puntos

6 CARGAR PUNTOS 3D

ID.Pt	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]
1	1.8807e+03	-2625	2.3170e+03
2	1.8807e+03	2625	2.3170e+03
3	5.2657e+03	-1350	2.3170e+03
4	6.6657e+03	2420	2.3170e+03
5	6.5507e+03	-2730	2.5670e+03
6	8.2657e+03	2500	2.5670e+03

a)



Aplicar incertidumbre a los puntos de referencia

Incertidumbre [micras]

250 APLICAR

b)

Figura 7.63. Preparación de los puntos de referencia en la simulación de la calibración extrínseca. a) Coordenadas de los puntos de referencia, b) Incertidumbre.

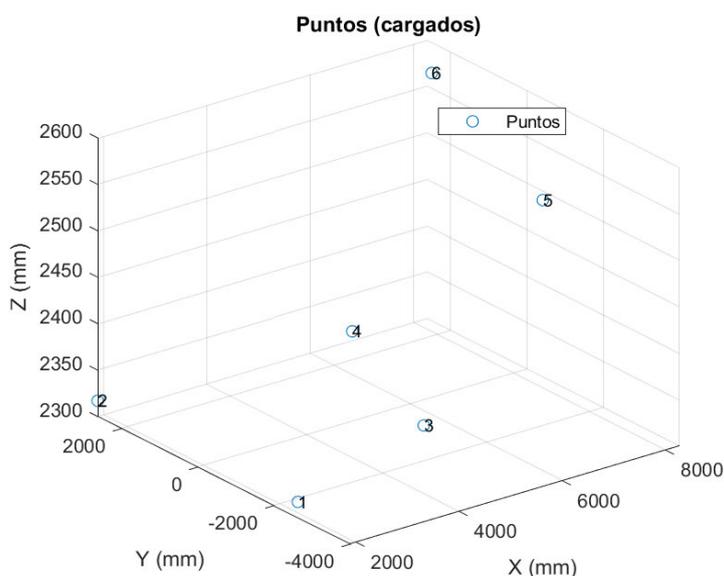


Figura 7.64. Preparación de los puntos de referencia en la simulación de la calibración extrínseca. c) Distribución de los puntos.

Se indican las poses iniciales de las cámaras, su error (solamente para la resección conjunta) y el error píxel (Figura 7.65). Al reproyectar los puntos, se comprueba que, al igual que en el ensayo real, dos puntos no son detectados por ambas cámaras (Figura 7.66 y Figura 7.67): el punto de referencia ID. 1 no es detectado por la cámara ID. 2 y el punto ID.2 por la cámara ID.1.

Preparar cámaras

Cant. cámaras:

Error posición [mm]:

Error orientación [°]:

Error de píxel [px]:

ID. Cámara:

ID. Pto no detect:

Selecc	ID. Cam	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	RX [°]	RY [°]	RZ [°]	Cant. Pto no detect	FOV
<input type="checkbox"/>	1	-2.3110e+03	-5000	2.4846e+03	-90	0	-60	1	<input checked="" type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	2	-2.2790e+03	5000	2.4846e+03	-90	0	-120	1	<input checked="" type="checkbox"/>

Figura 7.65. Preparación de las cámaras en la simulación de la calibración extrínseca.

Guardar puntos de referencia 3D

Cant. Mín de cámaras:

ID. Punto:

ID. Cam no visualizan:

Guardar	ID. Puntos	Cant. Cámaras (visualizan)
<input type="checkbox"/>	1	1
<input type="checkbox"/>	2	1
<input checked="" type="checkbox"/>	3	2
<input checked="" type="checkbox"/>	4	2

Figura 7.66. Identificación de los puntos no detectados por las cámaras.

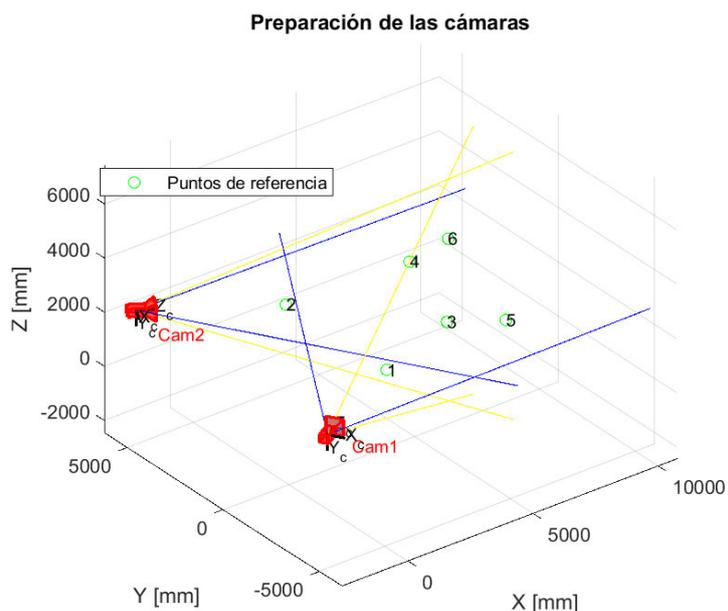


Figura 7.67. Visualización del escenario de simulación de la calibración extrínseca.

Los resultados de la simulación de la calibración extrínseca con 1.000 iteraciones empleando el método de resección conjunta (Figura 7.68 y Figura 7.69) e individual (Figura 7.74 y Figura 7.75) son los siguientes.

Parámetros Extrínsecos (valores medios)

ID. Cam	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	RX [°]	RY [°]	RZ [°]
1	-2.3110e+03	-5.0000e+03	2.4845e+03	-90.0000	4.1695e-04	-59.9997
2	-2.2790e+03	5.0000e+03	2.4845e+03	-89.9999	-2.1171e-04	-119.9999

Figura 7.68. Poses de las cámaras obtenidas en la simulación de la calibración extrínseca mediante resección conjunta.

Incertidumbre de Uso (2σ)

ID. Cam	UX [mm]	UY [mm]	UZ [mm]	URX [°]	URY [°]	URZ [°]
1	0.0903	0.0410	0.1297	4.2341e-04	9.2734e-04	7.4326e-04
2	0.0520	0.0523	0.1667	5.2704e-04	5.4452e-04	4.6087e-04

Figura 7.69. Incertidumbre de uso asociado a la simulación de la calibración extrínseca mediante resección conjunta.

Parámetros Extrínsecos (valores medios)

ID. Cam	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	RX [°]	RY [°]	RZ [°]
1	-2.3109e+03	-5.0001e+03	2.4846e+03	-90.0000	-1.5227e-04	-59.9994
2	-2.2790e+03	4.9999e+03	2.4846e+03	-90.0002	1.5631e-04	-119.9996

Figura 7.70. Poses de las cámaras obtenidas en la simulación de la calibración extrínseca mediante resección individual.

ID. Cam	UX [mm]	UY [mm]	UZ [mm]	URX [°]	URY [°]	URZ [°]
1	0.2222	0.1950	0.1062	5.9406e-04	7.1456e-04	0.0013
2	0.0983	0.1602	0.1588	9.1214e-04	4.4261e-04	0.0010

Figura 7.71. Incertidumbre de uso asociado a la simulación de la calibración extrínseca mediante resección individual.

En ambos casos, se observa que los valores medios de las poses son prácticamente las mismas que las iniciales y que la incertidumbre estimada es muy baja al realizar 1.000 iteraciones. Los resultados calculados mediante resección conjunta se obtuvieron introduciendo un error inicial de orientación dos órdenes de magnitud inferior al de posición; es decir,  $0,01^\circ$  en vez de  $0,5^\circ$  (como se mostraba en la Tabla 7.9), ya que tiene una gran influencia en los resultados finales.

A partir de estas poses de las cámaras, se miden los puntos de referencia mediante triangulación como fase de comprobación (Figura 7.72 y Figura 7.74) y sus valores se muestran en los histogramas de la Figura 7.73 y Figura 7.75. En principio, el mayor error que se comete al realizar la medición de un punto por triangulación, se debería dar en la dirección de la profundidad (en este caso, el eje X), pero como los puntos de referencia están centrados con respecto a las posiciones de las cámaras y el ángulo entre ellas se encuentra entre  $60^\circ$  y  $120^\circ$ , esta relación no es tan directa.

ID.Pt	Err.X [mm]	Err.Y [mm]	Err.Z [mm]	Err [mm]
3	0.0420	-0.0461	0.0564	0.0841
4	0.0877	-0.0384	0.0542	0.1100
5	0.0375	-0.0475	0.0605	0.0856

ID.Pt	Err.X [mm]	Err.Y [mm]	Err.Z [mm]	Err [mm]
4	0.0877	-0.0384	0.0542	0.1100
5	0.0375	-0.0475	0.0605	0.0856
6	0.0976	-0.0393	0.0582	0.1202

Figura 7.72. Comprobación de los resultados obtenidos en la simulación de la calibración extrínseca mediante resección conjunta.

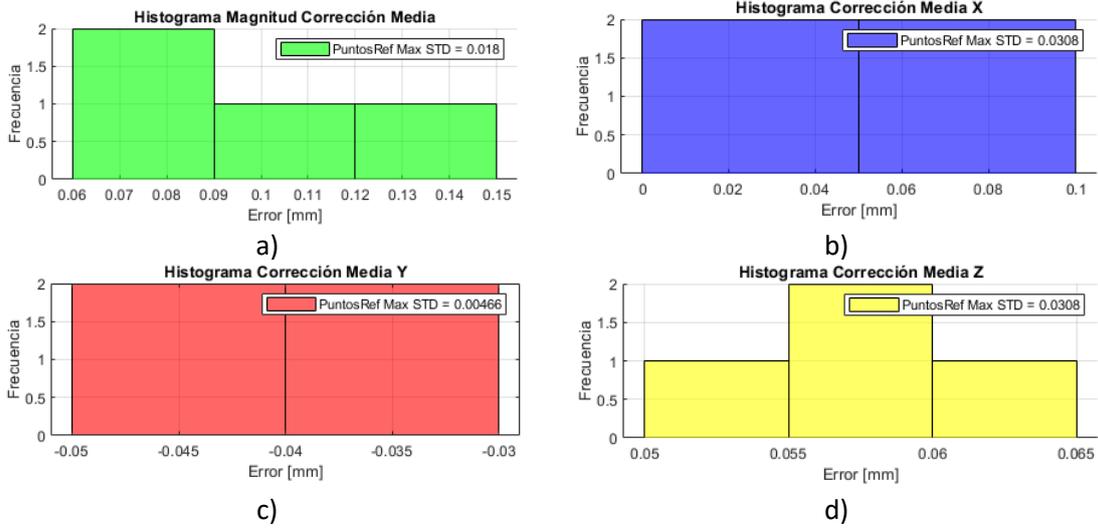


Figura 7.73. Histograma de la corrección media de los puntos de referencia y desviación estándar mediante resección conjunta [mm]. a) Magnitud, b) En la dirección X, c) En la dirección Y, d) En la dirección Z.

Corrección Puntos Referencia (valores medios)

ID.Pt	Err.X [mm]	Err.Y [mm]	Err.Z [mm]	Err [mm]
3	-0.0320	0.0224	-6.9165e-04	0.0390
4	-0.0046	0.0043	-0.0030	0.0069
5	-0.0338	0.0085	0.0015	0.0349

Corrección Puntos Referencia (valores medios)

ID.Pt	Err.X [mm]	Err.Y [mm]	Err.Z [mm]	Err [mm]
4	-0.0046	0.0043	-0.0030	0.0069
5	-0.0338	0.0085	0.0015	0.0349
6	0.0038	-0.0081	-0.0019	0.0091

Figura 7.74. Comprobación de los resultados obtenidos en la simulación de la calibración extrínseca mediante resección individual.

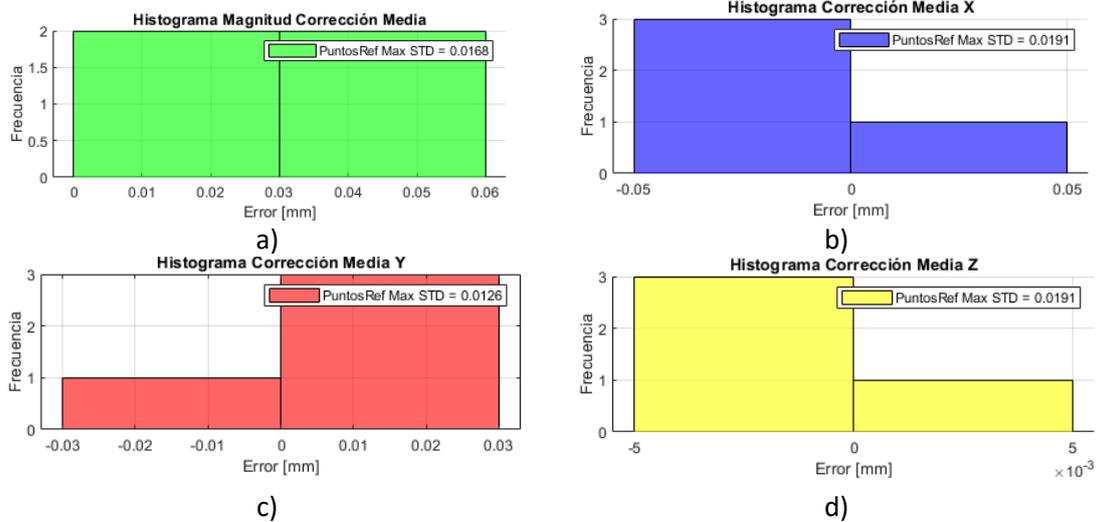


Figura 7.75. Histograma de la corrección media de los puntos de referencia y desviación estándar [mm] mediante resección individual. a) Magnitud, b) En la dirección X, c) En la dirección Y, d) En la dirección Z.

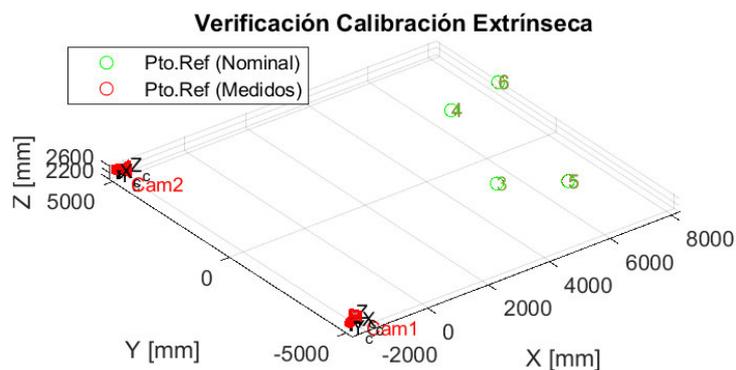


Figura 7.76. Visualización de las poses de las cámaras simuladas y de la posición de los puntos de referencia nominales y medidos.

El error de reproyección medio global cometido en la calibración extrínseca mediante resección conjunta es de 0,52 píxeles (Figura 7.77) y con la resección individual es de 0,16 píxeles (Figura 7.78). En ambos casos, es mayor que la obtenida en la calibración intrínseca (0,15), ya que se están agregando los errores de las dos etapas de calibración (intrínseca y extrínseca).

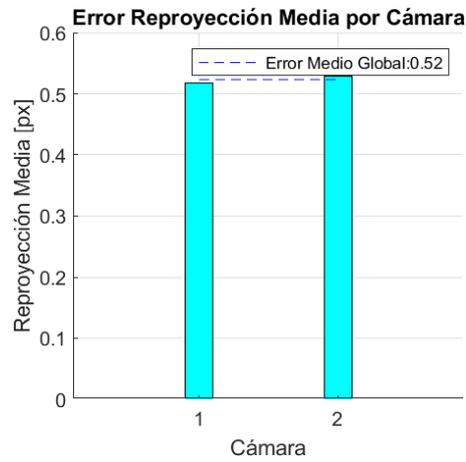


Figura 7.77. Error de reproyección medio de cada cámara y el global [píxel] mediante resección conjunta.

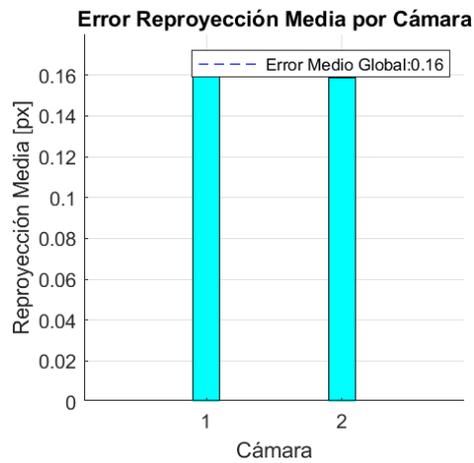


Figura 7.78. Error de reproyección medio de cada cámara y el global [píxel] mediante resección individual.

La visualización de la calibración extrínseca de los dos métodos se muestra en la Figura 7.79.

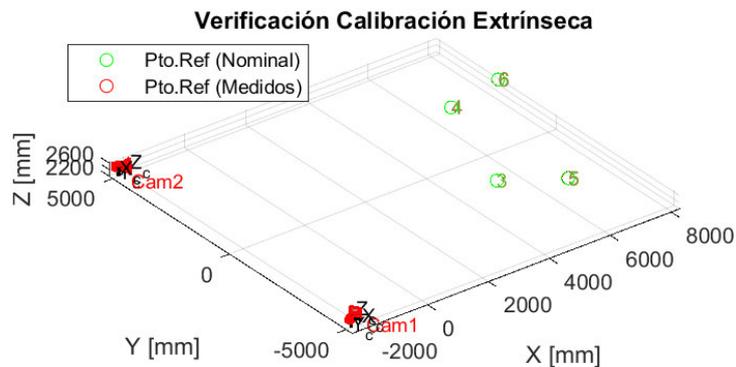


Figura 7.79. Visualización de las poses de las cámaras simuladas (resección individual y conjunta) de la posición de los puntos de referencia nominales y medidos.

### 7.2.3. MEDICIÓN DE PUNTOS (TRIANGULACIÓN)

Los objetivos retroreflectantes medidos se encontraban en el avión, estando sus coordenadas referenciadas al sistema de coordenadas global (Tabla 7.10).

Tabla 7.10. Coordenadas de los puntos medidos por triangulación.

ID. Punto	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]
1	2675.56838781511	-672.856667675768	2712.65310775069
2	6351.66673586489	4346.19399997806	2666.25157605016
3	6351.66673586489	4346.19399997806	2666.25157605016
4	8181.93408703124	-295.371564383772	2427.00519423882
5	8181.93408703124	295.371564383772	2427.00519423882

#### Simulación

Se cargan los puntos a medir y se visualiza su distribución (Figura 7.80 y Figura 7.81).

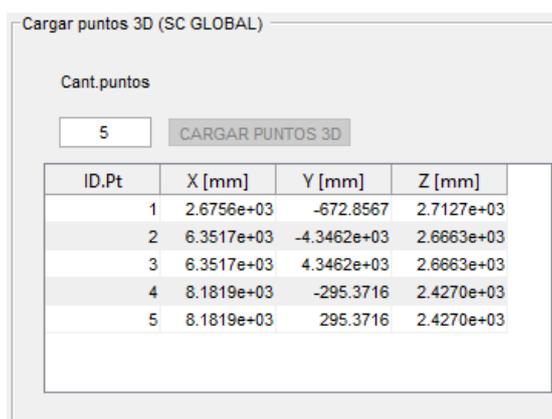


Figura 7.80. Preparación de la medición simulada de los puntos por triangulación.

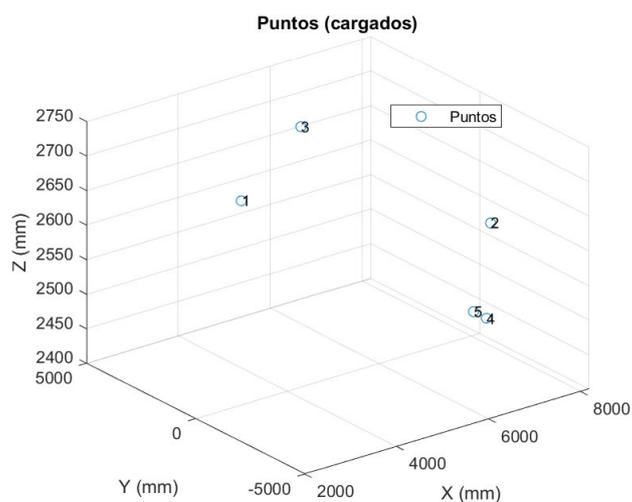


Figura 7.81. Distribución de los puntos sintéticos a medir por triangulación.

Se comprueban que todos los puntos son detectados por ambas cámaras (Figura 7.82 y Figura 7.83).

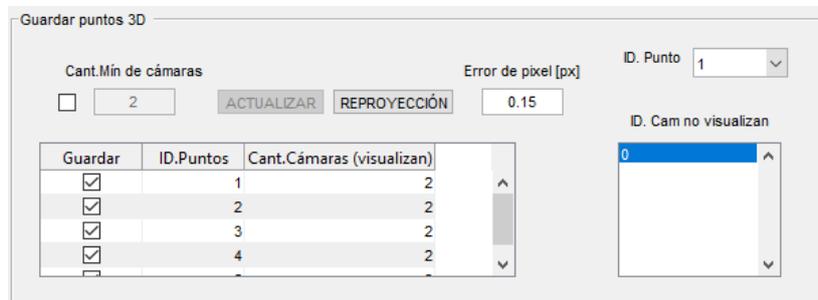


Figura 7.82. Comprobación de la detección de los puntos por ambas cámaras en la simulación.

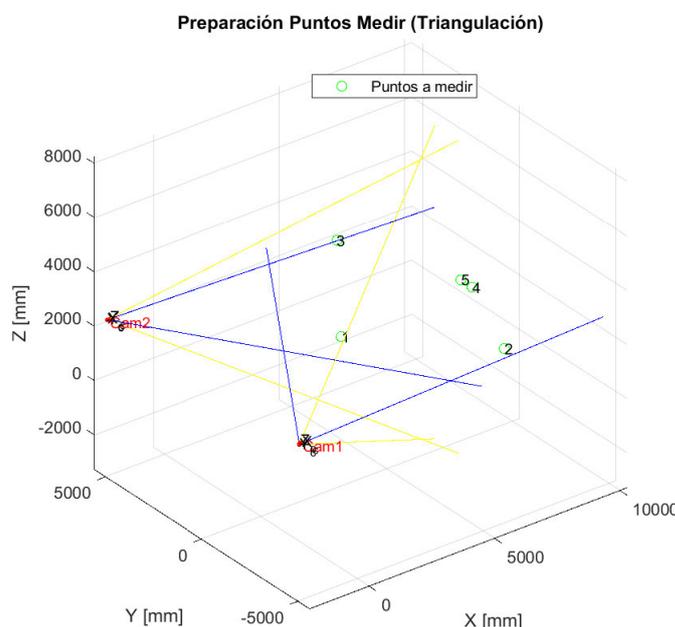


Figura 7.83. Visualización del escenario de medición.

Las coordenadas de los puntos medidos por simulación y su incertidumbre asociada obtenidas con 1.000 iteraciones se muestran en la Figura 7.84 y la corrección media junto con la desviación estándar se muestra en los histogramas de la Figura 7.85.

Posición Puntos Medidos (valores medios) e Incertidumbre de Uso (2σ)

ID.Pto	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	UX [mm]	UY [mm]	UZ [mm]
1	2.6756e+03	-672.8540	2.7127e+03	0.1088	0.0714	0.0535
2	6.3518e+03	-4.3462e+03	2.6663e+03	0.2657	0.0988	0.0993
3	6.3518e+03	4.3462e+03	2.6662e+03	0.2618	0.1028	0.0827
4	8.1820e+03	-295.3733	2.4270e+03	0.2971	0.0927	0.0906
5	8.1820e+03	295.3738	2.4270e+03	0.2971	0.0930	0.0891

Figura 7.84. Medida simulada de los puntos sintéticos mediante triangulación.

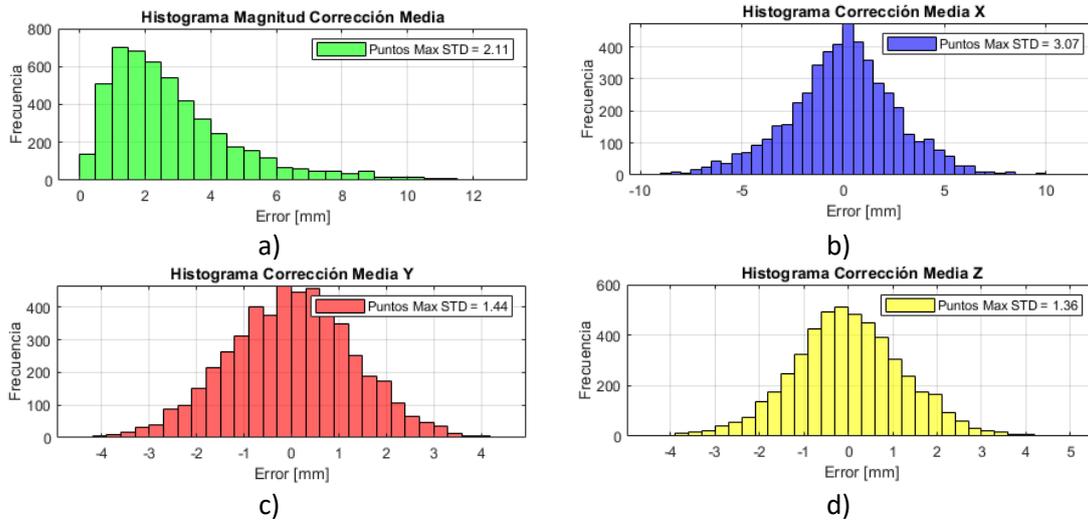


Figura 7.85. Histograma de la corrección media de los puntos medidos junto con la desviación estándar [mm]: a) Magnitud, b) En la dirección X, c) En la dirección Y, d) En la dirección Z.

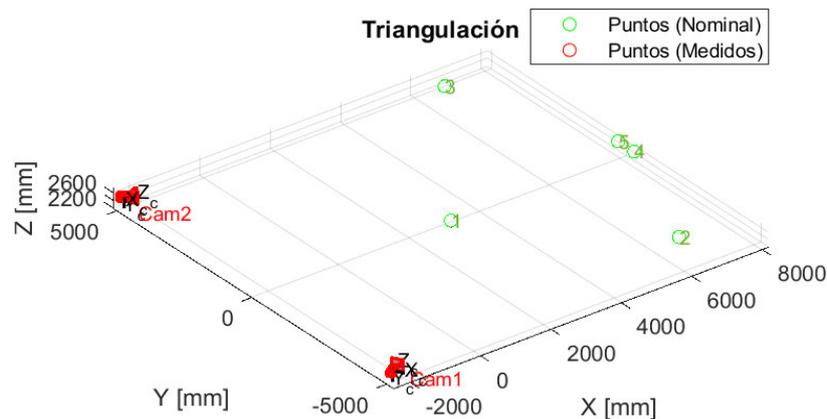


Figura 7.86. Visualización de las cámaras, de los puntos nominales y de los puntos medidos por simulación.

Observando las mediciones simuladas, la incertidumbre asociada a la coordenada X de los puntos es mayor. En este caso, como los puntos no están centrados con respecto a las cámaras, se comprueba mejor que la triangulación comete más error al medir la profundidad (eje X). Lo mismo sucede con los histogramas de la corrección media. El punto con menor incertidumbre es el ID. 1 al estar más cerca de las cámaras. Las incertidumbres asociadas a la coordenada X de los puntos ID.4 e ID.5 son mayores que los demás al estar más distanciados con respecto a las cámaras, mientras que la de los puntos ID.2 e ID.3 en la dirección Y es mayor que las demás.

### 7.3. ESTIMACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE

Los resultados obtenidos en la calibración y en la medición, corresponden al valor medio ( $\bar{q}$ ) del mensurando (Y) y a la incertidumbre de uso (U) para un nivel de confianza del 95% [7.1].

$$Y = \bar{q} \pm U \quad [7.1]$$

La expresión del valor medio ( $\bar{q}$ ) es:

$$\bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n q_k \quad [7.2]$$

Donde:

q = valor medido

n = número de mediciones

La incertidumbre de uso o incertidumbre expandida es:

$$U = k \cdot u_c \quad [7.3]$$

Donde:

k = factor de cobertura = 2 (nivel de confianza del 95%)

$u_c$  = incertidumbre combinada

La incertidumbre combinada ( $u_c$ ), se calcula mediante la ley de propagación de incertidumbre; es decir, con la suma de cuadrados de las componentes de incertidumbre. En este caso, se considera la incertidumbre de repetibilidad ( $u_{rep}$ ) y la corrección media ( $\bar{c}$ ).

$$u_c = \sqrt{u_{rep}^2 + \bar{c}^2} \quad [7.4]$$

Donde:

$u_c$  = incertidumbre combinada

$u_{rep}$  = incertidumbre de repetibilidad

$\bar{c}$  = corrección media

La incertidumbre de repetibilidad tiene la siguiente expresión:

$$u_{rep} = \frac{s(\bar{q}_k)}{\sqrt{n}} \quad [7.5]$$

Donde:

$s(\bar{q}_k)$  = desviación estándar experimental de la media:

n = número de mediciones

La desviación estándar experimental de la media es:

$$s^2(\bar{q}_k) = \frac{s^2(q_k)}{n} \quad [7.6]$$

Donde:

$s(q_k)$  = desviación estándar experimental

$$s(q_k) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (q_k - \bar{q})^2} \quad [7.7]$$

Por tanto, sustituyendo la ecuación [7.7] en la [7.6] y haciendo la raíz cuadrada de la expresión resultante, se obtiene la incertidumbre de repetibilidad.

$$u_{rep} = \frac{s(\bar{q}_k)}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{1}{n \cdot (n-1)} \sum_{k=1}^n (q_k - \bar{\mu})^2} \quad [7.8]$$

Por otro lado, la corrección media ( $\bar{c}$ ), es la media de la diferencia entre el valor de referencia y el valor medido.

$$\bar{c} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (Q_k - q_k) \quad [7.9]$$

Donde:

Q = valor de referencia

q = valor medido

Sustituyendo la expresión [7.8] y [7.9] en [7.4]:

$$u_c = \sqrt{\left( \sqrt{\frac{1}{n \cdot (n-1)} \sum_{k=1}^n (q_k - \bar{\mu})^2} \right)^2 + \left( \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (Q_k - q_k) \right)^2} \quad [7.10]$$

## 7.4. ERRORES E INCERTIDUMBRES CONSIDERADOS EN LA SIMULACIÓN

Como ya se ha explicado en el apartado 7.1. *SOFTWARE*, en cada fase de la simulación se introducen una serie de errores y/o incertidumbres (Tabla 7.11). Para considerarlos en los cálculos, se generan valores aleatorios con distribución normal mediante la función “*randn*” de Matlab (Figura 7.87) y se aplican a los valores nominales mediante la expresión [7.11] (la desviación se refiere al error o a la incertidumbre).

$$\text{valor} = \text{valor}_{\text{nominal}} + \text{desviación} \cdot \text{valor}_{\text{aleatorio}} \quad [7.11]$$

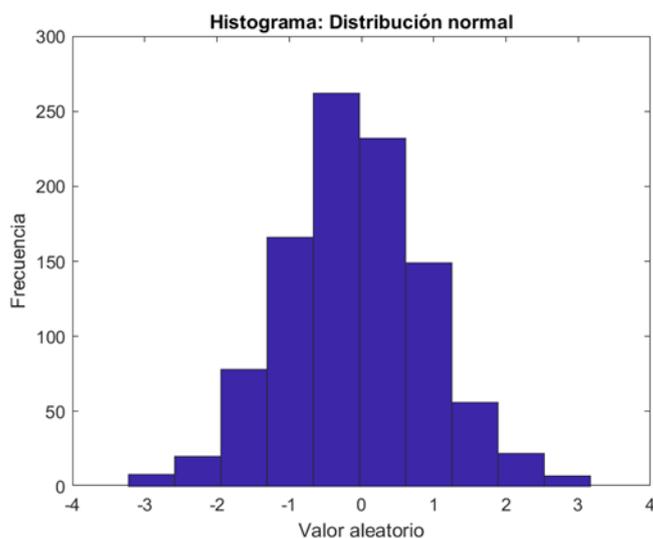


Figura 7.87. Ejemplo. Histograma de 1.000 valores generados aleatoriamente con una distribución normal mediante la función “*randn*” de Matlab.

Tabla 7.11. Errores e incertidumbres considerados en la simulación.

CALIBRACIÓN			MEDICIÓN	
Calibración intrínseca	Calibración extrínseca		Triangulación	Multiresección
	Resección individual	Resección conjunta		
		Error píxel		
-		Incertidumbre parámetros intrínsecos		
-		Incertidumbre puntos referencia	Incertidumbre parámetros extrínsecos	
-	-	Error posición cámaras	-	Incertidumbre puntos control
-	-	Error orientación cámaras	-	Error posición objeto
-	-	-	-	Error orientación objeto

### 7.4.1. CALIBRACIÓN INTRÍNSECA

En la calibración intrínseca (Figura 7.88), se parte de una serie de poses de un patrón (*chessboard*) cuyos puntos se re proyectan, teniendo en cuenta los datos del sensor y de la lente (configuración óptica-cámara) y de la posición de la cámara con respecto al patrón. A los puntos 2D se les aplica un error píxel para realizar la calibración intrínseca y obtener así los valores medios de los parámetros intrínsecos ( $\bar{p}_{intrín}$ ) con sus incertidumbres de uso ( $U_{intrín}$ ).

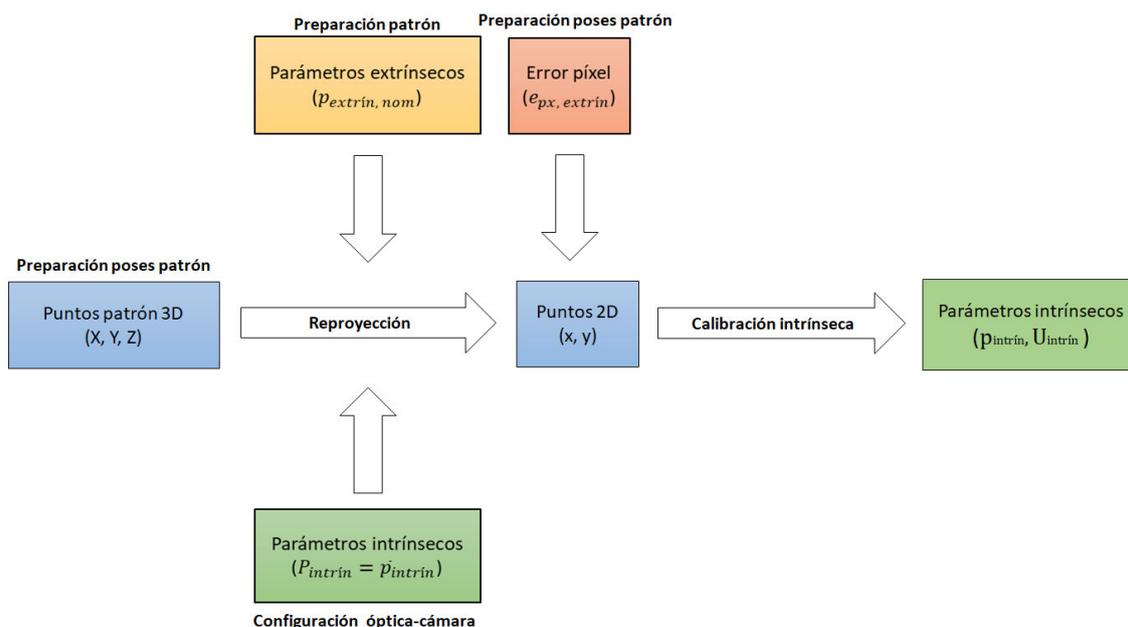


Figura 7.88. Esquema de los errores considerados en la calibración intrínseca.

### 7.4.2. CALIBRACIÓN EXTRÍNSECA

#### Resección individual (Funciones Matlab)

A los puntos de referencia 3D se les aplica la incertidumbre del equipo de medición ( $U_{pto\ ref}$ ) usado para conocer sus posiciones (X, Y, Z) en el sistema de coordenadas global. Con los valores medios de los parámetros intrínsecos ( $\bar{p}_{intrín}$ ) obtenidos en la calibración intrínseca, y con los valores nominales de los parámetros extrínsecos ( $p_{extrín, nom}$ ) que se introducen en la preparación de la calibración extrínseca, se proyectan los puntos para obtener sus coordenadas 2D (x, y). A continuación, de forma iterativa, se obtienen “n” poses de cada cámara mediante resección espacial, con las que se calculan sus valores medios ( $\bar{p}_{extrín}$ ) y sus incertidumbres de uso ( $U_{extrín}$ ). Para ello, en la resección espacial se usan los puntos 2D con un error píxel ( $e_{px, extrín}$ ) y los valores medios de los parámetros intrínsecos ( $\bar{p}_{intrín}$ ) con sus incertidumbres de uso ( $U_{intrín}$ ) calculadas en la calibración intrínseca (Figura 7.89).

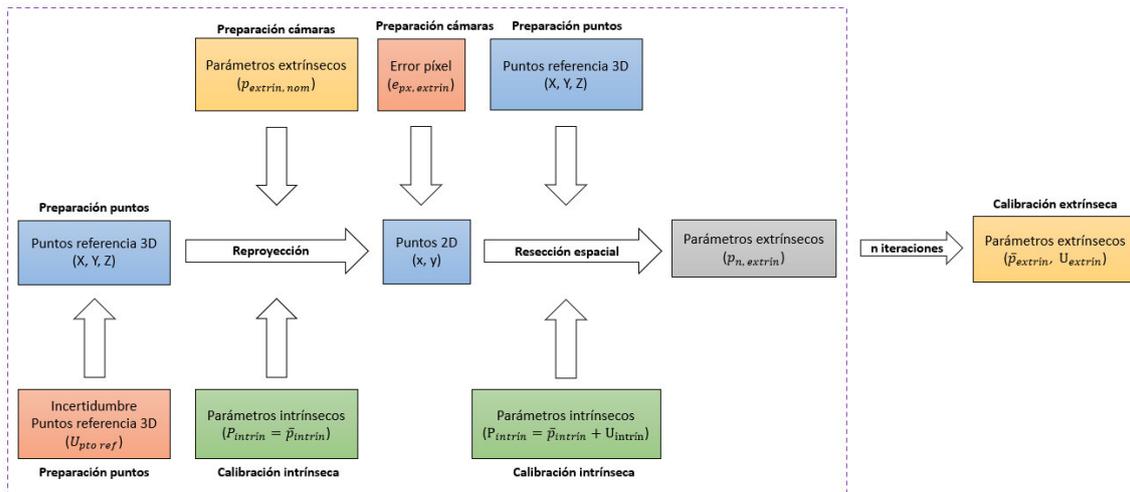


Figura 7.89. Esquema de los errores e incertidumbres considerados en la resección individual.

### Resección conjunta (Función desarrollado por Tekniker)

A diferencia de las funciones de Matlab, en las funciones desarrolladas por Tekniker, se aplican los errores de posición ( $e_{pos, cámara}$ ) y orientación ( $e_{orien, cámara}$ ) a las poses de las cámaras nominales, antes de realizar la reproyección. Después de aplicar la resección espacial “m” iteraciones, se obtienen las “n” poses de las cámaras que minimizan el error global y con las que se calculan sus valores medios ( $\bar{p}_{extrin}$ ) y sus incertidumbres de uso ( $U_{extrin}$ ).

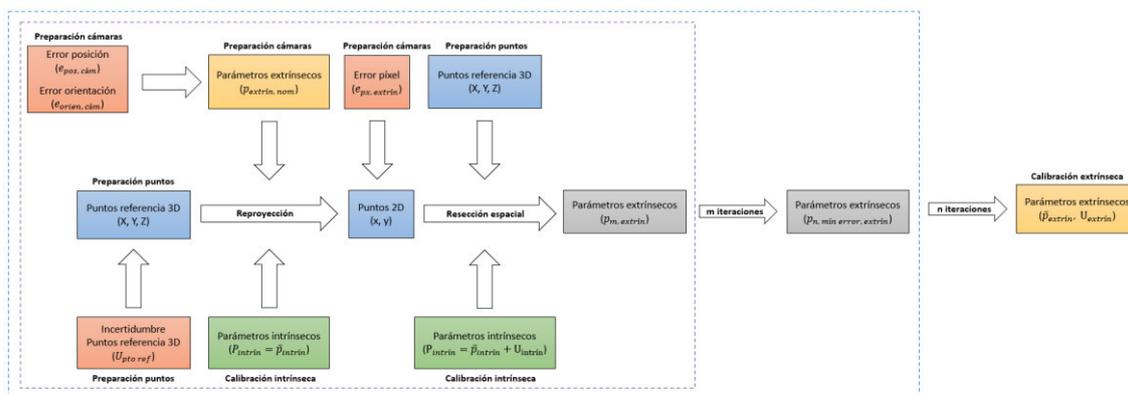


Figura 7.90. Esquema de los errores e incertidumbres considerados en la resección conjunta.

## 7.4.3. MEDICIÓN

### Triangulación

Se reproyectan los puntos nominales 3D, considerando los valores medios de los parámetros intrínsecos ( $\bar{p}_{intrin}$ ) y extrínsecos ( $\bar{p}_{extrin}$ ) obtenidos en la calibración. A continuación, se aplica la triangulación a los puntos 2D con un error píxel ( $e_{px, med}$ ) y teniendo en cuenta las incertidumbres de uso de los parámetros de calibración ( $U_{intrin}, U_{extrin}$ ). De esta forma, se

calcula el valor medio de las coordenadas de los puntos 3D ( $X', Y', Z'$ ) correspondientes a “n” mediciones ( $X_n, Y_n, Z_n$ ) y sus incertidumbres de uso ( $U_x, U_y, U_z$ ) (Figura 7.91).

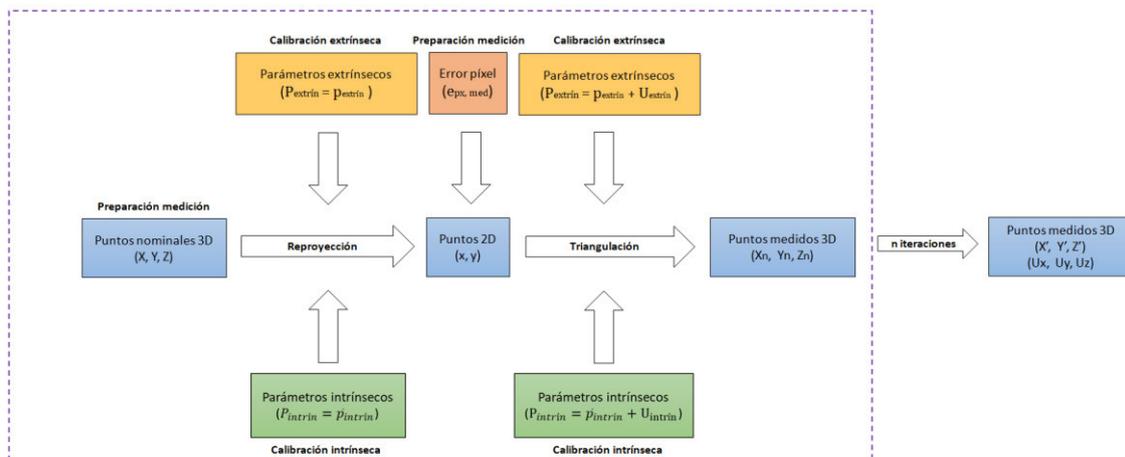


Figura 7.91. Esquema de los errores e incertidumbres considerados en la medición por triangulación.

### Multiresección

A partir de las poses nominales del objeto ( $X, Y, Z, R_x, R_y, R_z$ ) y de los puntos de control 3D en el sistema de coordenadas local ( $X, Y, Z$ ), se realiza la transformación 6 dof, para obtener los puntos de control en el sistema de coordenadas global. En dicha transformación se consideran los errores de posición ( $e_{pos,med}$ ) y orientación ( $e_{orien,med}$ ) del objeto. A los puntos de control se les aplica la incertidumbre del equipo de medición usado ( $U_{pto,control}$ ) para conocer sus posiciones en el sistema de coordenadas global y se re proyectan considerando los valores medios de los parámetros intrínsecos ( $\bar{p}_{intrín}$ ) y extrínsecos ( $\bar{p}_{extrín}$ ) obtenidos en la calibración. A continuación, se realiza la multiresección, a los puntos 2D con un error píxel ( $e_{px,med}$ ) y teniendo en cuenta las incertidumbres de uso de los parámetros de calibración ( $U_{intrín}, U_{extrín}$ ). De esta forma, se calcula el valor medio de las poses del objeto ( $X', Y', Z', R_x', R_y', R_z'$ ) correspondientes a “n” mediciones ( $X_n, Y_n, Z_n, R_{xn}, R_{yn}, R_{zn}$ ) y sus incertidumbres de uso ( $U_x, U_y, U_z, U_{Rx}, U_{Ry}, U_{Rz}$ ) (Figura 7.92).

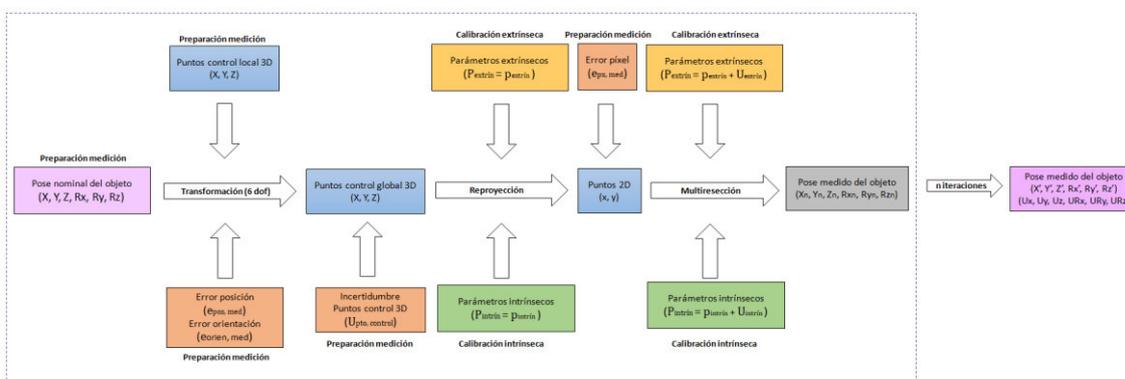


Figura 7.92. Esquema de los errores e incertidumbres considerados en la medición por multiresección.

## 8. TAREAS

A partir de un diagrama de Gantt, se describe cada una de las tareas (T) e hitos (H) que se han realizado durante el desarrollo del TFM para tratar de conseguir una visión global de la metodología empleada y del tiempo dedicado a las diversas actividades.

### T.1. Recopilación de referencias y revisión del estado del arte de fotogrametría

#### T1.1. Clasificación de los principales sistemas de medición

Se recopila información acerca de los principales sistemas de medición de largo alcance y se clasifican en función de las propiedades del diseño del sistema de medición, del tipo de contacto y de su principio de funcionamiento.

#### T1.2. Tecnologías de medición

Se encuentran las principales características que hacen destacar cada una de las tecnologías de medición y sus aplicaciones industriales. Con ello, se somete a una comparación exhaustiva, mediante el uso de tablas ponderadas, para determinar cuál es la más conveniente.

#### T1.3. Digital Twin

Por otro lado, se expone el concepto de *Digital Twin* al estar estrechamente relacionado con el desarrollo de aplicaciones de simulación. Se describe las características de los diferentes niveles que puede alcanzar y cómo gestiona el ciclo de vida del producto.

#### T1.4. Fundamentos de la fotogrametría

Se explican los fundamentos básicos de la fotogrametría, abarcando el concepto de cámara estenopeica junto con las ecuaciones de colinealidad y describiendo las etapas de calibración y de medición.

#### T1.5. Patrones de calibración

Se explican los diversos patrones de calibración existentes en la actualidad, y se exponen sus ventajas e inconvenientes de todas ellas.

### T2. Recopilación de soluciones tecnológicas existentes, análisis de su funcionamiento y alcance (E/S)

#### T2.1. Análisis de software comerciales

Se analiza los *softwares* de simulación que existen actualmente en el mercado, describiendo el funcionamiento de cada uno de ellos y sus limitaciones. Además, se estudia los modelos de calibración y de medición 3D que emplean, para obtener una visión más amplia de las alternativas y su alcance.

## T2.2. Pruebas con aplicaciones de desarrollo propio

Se realizaron varias pruebas con las Apps Camera Calibrator y Stereo Camera Calibrator de Matlab y se solicitó una licencia de PhoX. En Matlab, se indagó en la librería *Computer Vision Toolbox*. Después, se replicó su funcionamiento mediante el desarrollo de una interfaz simple con GUIDE.

## **T3. Análisis de las metodologías de programación en Matlab**

### T3.1. Pruebas con las aplicaciones de Matlab

Se comparan las principales características de los métodos interactivos y de programación que dispone Matlab en sus dos aplicaciones: GUIDE y App Designer. De nuevo, en base a una serie de criterios se selecciona la más conveniente para el ámbito industrial.

## **T4. Selección de configuraciones (modelos) a integrar en la App (análisis viabilidad)**

### T4.1. Diseño de la App en PowerPoint

Se selecciona de entre los modelos de calibración y medición 3D analizados, cuáles se van a incorporar al *software* de simulación para poder abarcar la mayoría de las casuísticas.

## **T5. Desarrollo de plataforma de simulación y sus funcionalidades**

### T5.1. Software de simulación de fotogrametría

A través del empleo de las funciones que proporciona la aplicación GUIDE de Matlab, se desarrolla la interfaz del usuario, según los requerimientos seleccionados previamente. Cuando se completa la fase de la creación de la interfaz, se procede a la implementación de las funcionalidades de fotogrametría, ya elaboradas por la unidad de Mecánica de Tekniker, además de las funciones de la librería de Matlab.

## **T6. Validación de la aplicación con medios externos**

### T6.1. Validación de la calibración y de la medición

Se comprueba que los resultados de la calibración intrínseca y extrínseca, así como la medición de unos puntos y de una pose de un objeto son coherentes con la realidad. Para ello, se solicita unos datos de partida pertenecientes a varios proyectos desarrollados por Tekniker.

## **T7. Documentación del desarrollo**

### T7.1. Manual de usuario

En un manual de usuario, se describe el funcionamiento del *software* con el fin de que cualquier usuario pueda utilizarlo.

## **T8. Documentación del TFM**

### T8.1. Elaboración de la memoria

Consiste en elaborar la memoria, uniendo toda la información recopilada, incluido los anexos.

### T8.2. Elaboración de la presentación

Se prepara la defensa mediante una presentación oral.

## **8.1. HITOS**

A medida que se realizan las tareas, se van alcanzando los siguientes hitos:

### **H1. Entrega del estado del arte**

En el estado del arte, se recopila la información de los sistemas de medición de largo alcance y se explican los fundamentos de la fotogrametría. También, se explican los diversos software comerciales y de desarrollo propio, y se profundiza en las alternativas que ofrece las aplicaciones de Matlab.

### **H2. Entrega del prediseño**

En un PowerPoint, se diseña el aspecto visual del *software* y la distribución de los objetos (paneles, botones, entradas de datos...). También, se especifican las entradas y salidas de los objetos, la manera en el que se encuentra relacionado entre ellos y con las funciones de cálculo de las distintas librerías de Matlab y desarrolladas por Tekniker y cómo el usuario debe interactuar.

### **H3. Entrega del software**

Se crea un entorno de simulación que permite analizar la viabilidad de distintas configuraciones fotogramétricas. De esta manera, se homogeneiza los modelos fotogramétricos existentes en Tekniker en una única herramienta, dando lugar a un *software* que simula tanto la calibración como la medición 3D basada en visión.

### **H4. Entrega del manual de usuario**

Se trata de una guía donde se explican los conceptos fundamentales que permiten comprender al lector la influencia de diversos parámetros en su funcionamiento y el empleo de dichos parámetros con criterio.

### **H5. Entrega del TFM**

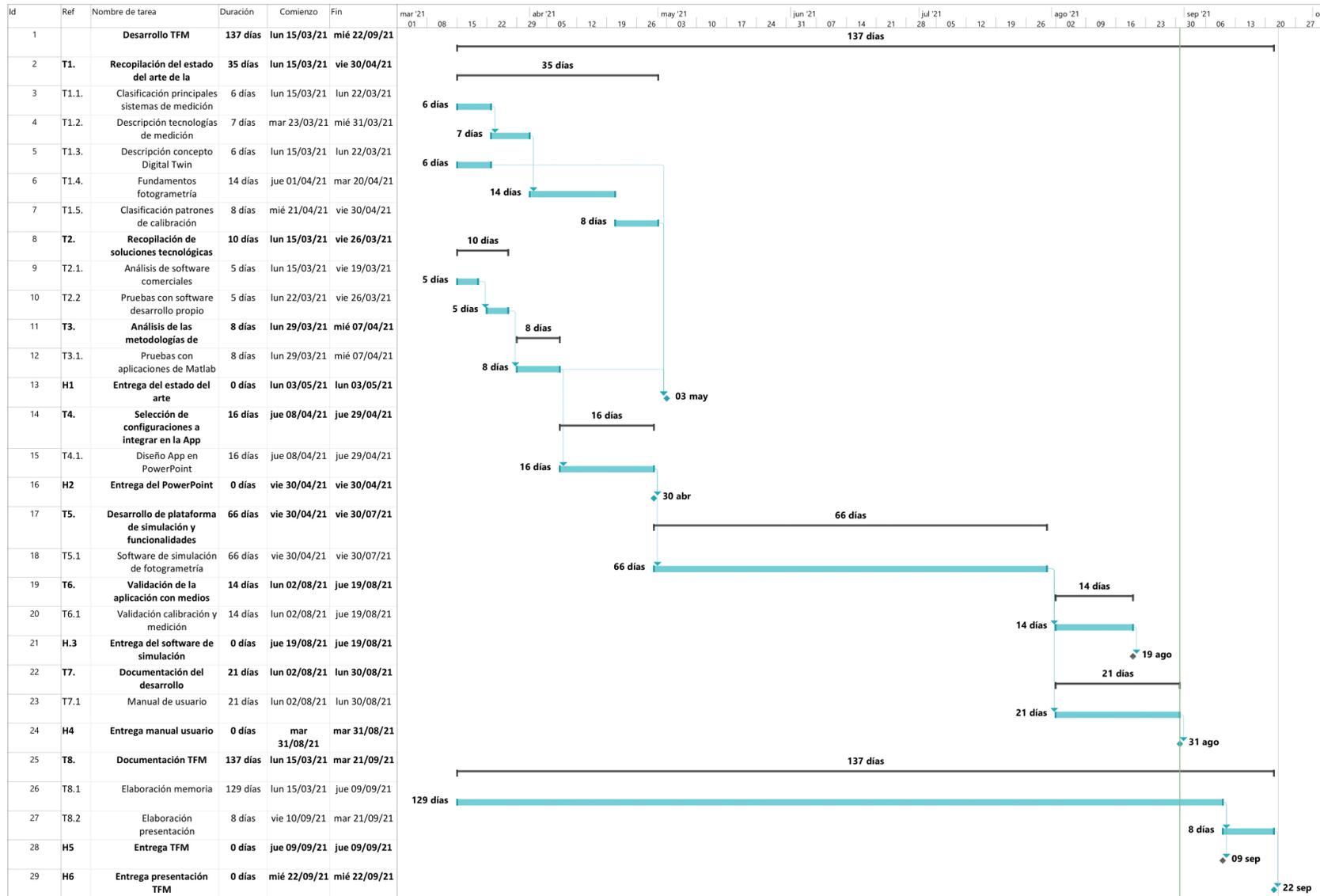
En un único documento, se entrega el estado del arte, los objetivos y beneficios del trabajo, se describe la metodología seguida para alcanzar los objetivos y se confecciona un presupuesto.

También, cuenta con dos anexos que corresponden con el manual de usuario y un ejemplo de una simulación.

### **H6. Entrega de la presentación del TFM**

En un PowerPoint, se detallan los aspectos más relevantes alcanzados durante el desarrollo del proyecto. Se usa en la realización de la defensa del TFM.

# TFM: Desarrollo de aplicación SW para el diseño de soluciones fotogramétricas



## 9. PRESUPUESTO

La realización de este TFM implica una serie de costes, debido a los recursos que son necesarios emplear para alcanzar los objetivos planteados. Por ello, se confecciona el siguiente presupuesto.

### 9.1. COSTES DIRECTOS

Los costes directos se desglosan en:

- **Gastos de personal:** se refiere a las horas dedicadas al desarrollo del TFM (Tabla 9.1). Por un lado, se incluye el tiempo invertido por parte del alumno en la búsqueda de información, aprendizaje de Matlab, desarrollo de la aplicación y redacción del trabajo. Por otro lado, se tienen en cuenta las tareas realizadas por la directora del TFM por parte de la Universidad y de la empresa Tekniker, tales como la supervisión del trabajo a través de reuniones, la revisión de resultados de los análisis y las correcciones en la redacción del informe. También, el trabajo realizado de otros compañeros pertenecientes a la unidad de Mecánica e implicados en el proyecto de fotogrametría.

Tabla 9.1. Gastos de personal.

Concepto	Dedicación [h]	Coste unitario [€/h]	Coste total [€]
<b>Directora Universidad</b>	10	30	300
<b>Director Tekniker</b>	20	70	1.400
<b>Unidad de Mecánica</b>	10	60	600
<b>Alumno</b>	400	6	2.400

**TOTAL GASTOS DE PERSONAL.....4.700€**

- **Amortizaciones:** son los bienes materiales o inmateriales utilizados en el TFM cuyo valor se deprecia acorde al tiempo que va pasando y durante el cual, se está utilizando (Tabla 9.2). Estos bienes son: el ordenador de la empresa, donde se desarrolla la aplicación y el portátil personal para la redacción del trabajo. También, se utiliza las siguientes licencias de *software*: MATLAB GUIDE empleado para la creación de la aplicación y Microsoft Office tanto para la redacción y presentación del TFM.

Tabla 9.2. Amortizaciones.

Concepto	Precio [€]	Duración [meses]	Uso [meses]	Amortización [€]
<b>Licencia de MATLAB</b>	2.000	12	5	833,33
<b>Licencia de Microsoft Office</b>	100	12	5	41,67
<b>Ordenador</b>	1.000	72	5	69,44
<b>Portátil</b>	800	48	5	83,33

**TOTAL AMORTIZACIONES.....1.027,78€**

- Material fungible: en este apartado se introduce el material de oficina para desarrollar el trabajo.

Tabla 9.3. Material fungible.

Concepto	Coste total [€]
Material de oficina	100

**TOTAL MATERIAL FUNGIBLE.....100€**

- Validación del *software*: se contempla el equipamiento y la mano de obra.

Tabla 9.4. Validación del *software*.

Concepto	Coste total [€]
Validación	2.000

**TOTAL VALIDACIÓN.....2.000€**

-GASTOS DE PERSONAL.....	4.700€
-AMORTIZACIONES.....	1.027,78€
-MATERIAL FUNGIBLE.....	100€
-VALIDACIÓN DEL SOFTWARE.....	2.000€

**TOTAL DE COSTES DIRECTOS.....7.827,78€**

Asciende el presupuesto de costes directos a la expresada unidad de:

**SIETE MIL OCHOCIENTOS VEINTISIETE EUROS CON SETENTA Y OCHO CÉNTIMOS**

## 9.2. PRESUPUESTO TOTAL DEL TFM

Costes directos.....7.827,78€

**SUBTOTAL:.....7.827,78€**

21% I.V.A.....1.643,83€

**TOTAL:.....9.471,61€**

**PRESUPUESTO TOTAL:..... 9.471,61€**

Asciende el presupuesto total del TFM a la expresada unidad de:

**NUEVE MIL CUATROCIENTOS SETENTA Y UNO EUROS CON SESENTA Y UNO CÉNTIMOS**

## 10. CONCLUSIONES

Este Trabajo Fin de Máster surge de la necesidad de crear un entorno de simulación para cualquier configuración fotogramétrica (mono-cámara, estéreo o multi-cámara), ante la falta de alternativas de *softwares* comerciales. Por tanto, en este TFM se desarrolla un *software* de simulación fotogramétrica mediante la librería de Matlab *Computer Vision Toolbox* y las librerías propias desarrolladas por Tekniker, capaz de analizar la viabilidad de distintas configuraciones fotogramétricas.

Esta aplicación permite previsualizar y optimizar el procedimiento de calibración y de medición, además de estudiar el comportamiento del sistema frente a variaciones en las condiciones de trabajo y en los parámetros del modelo fotogramétrico. También, se estima la incertidumbre de uso en cada etapa como parámetro indicativo de la calidad de las simulaciones. De esta manera, se abarca aspectos como el rango de medida, la visibilidad de los puntos, la selección de los componentes de medición, la incertidumbre y el procedimiento de medición.

Para ello, en esta herramienta se integra la configuración cámara-lente, la fase de calibración (intrínseca y extrínseca) y un sistema de medición capaz de simular escenarios de medida con datos sintéticos y reales y de editar los parámetros de la calibración.

Por otro lado, la validación ha permitido comprobar el correcto funcionamiento tanto de la calibración de las cámaras como de la medición de puntos por triangulación, obteniendo resultados coherentes con un ensayo fotogramétrico estéreo real.

Por último, como líneas de trabajo a futuro, se debe validar la medición de la pose de un objeto por multiresección. Otra decisión a considerar es migrar el código hecho en *GUIDE* a *App Designer*, ya que está recibiendo cada vez más actualizaciones y por tanto, se está convirtiendo en la plataforma de programación del futuro en el entorno de Matlab, quedándose obsoleto *GUIDE*. También, la generación de un ejecutable .exe como aplicación independiente, para que cualquier usuario pueda iniciarlo con más facilidad y sin necesidad de usar los ficheros .m de Matlab.

En cuanto a las mejoras que puede recibir el activo tangible desarrollado, la más relevante consiste en agregar una nueva funcionalidad denominada *Bundle*. Es otro método de cálculo de fotogrametría que permite determinar las poses de las cámaras y realizar la medición de unos puntos 3D a la vez, es decir, agrupar la calibración extrínseca y la medición en una sola etapa.

A continuación, las principales funcionalidades, los resultados que se obtienen y los factores que se pueden analizar con el activo tangible desarrollado:

### Configuración cámara-lente

- Selección de la cámara: tamaño del sensor digital [px] y tamaño del píxel [ $\mu\text{m}$ ].
- Selección de la lente: distancia focal [mm].
- Cálculo de la profundidad de campo [mm].

### Calibración intrínseca

- Cálculo de los parámetros intrínsecos: distancia focal [px], punto principal [px], coeficientes de distorsión radial ( $K_1$ ,  $K_2$  y  $K_3$ ), coeficientes de distorsión tangencial ( $p_1$  y  $p_2$ ) y *skew* (ambos opcionales).
- Estimación de la incertidumbre de los parámetros intrínsecos con un nivel de confianza del 95%.
- Visualización del escenario de la calibración intrínseca: cámara y poses del patrón de calibración.
- Diagrama de barras del error de reproyección medio correspondiente a cada pose y el error global medio [px].
- Edición de los parámetros intrínsecos o introducción de unos nuevos sin realizar la calibración intrínseca.
- Estudio de los siguientes factores:
  - Dimensiones del patrón
  - Profundidad en Z de los puntos del patrón
  - Distancia cámara - patrón
  - Error píxel
  - Porcentaje de puntos detectados
  - Número de poses patrón
  - Parámetros adicionales (distorsión radial, tangencial, *skew*)

### Calibración extrínseca

- Cálculo de las poses de las cámaras: posiciones [mm] y orientaciones [°].
- Estimación de la incertidumbre de los parámetros extrínsecos con un nivel de confianza del 95%.
- Verificación de la calibración extrínseca: error cometido [mm] al medir por triangulación los puntos de referencia usando las poses obtenidas.
- Visualización del escenario de la calibración extrínseca: puntos de referencia (valores nominales), puntos de referencia medidos con triangulación y poses de las cámaras.
- Histogramas de la corrección media de los puntos de referencia en magnitud y descompuestos en la dirección X, Y, Z y sus correspondientes desviaciones estándar [mm].
- Diagrama de barras del error de reproyección medio correspondiente a cada cámara y el error global medio [px].
- Edición de los parámetros extrínsecos o introducción de unos nuevos sin realizar la calibración extrínseca.
- Estudio de los siguientes factores:
  - Distribución de los puntos de referencia.
  - Número de puntos de referencia.
  - Incertidumbre asociada a los puntos de referencia.
  - Número de cámaras.
  - Distribución de las cámaras.
  - Error de posición de las cámaras.
  - Error de orientación de las cámaras.
  - Error píxel.
  - Método de cálculo: resección individual o resección conjunta.
  - Número de iteraciones.
  - Calibración intrínseca.

### Medición de puntos (triangulación)

- Cálculo de la posición 3D de los puntos medidos [mm].
- Estimación de la incertidumbre de la medición con un nivel de confianza del 95%.

- Visualización del escenario de medición: puntos nominales, puntos medidos y poses de las cámaras.
- Histogramas de la corrección media de los puntos medidos en magnitud y descompuestos en la dirección X, Y, Z y sus correspondientes desviaciones estándar [mm].
- Estudio de los siguientes factores:
  - Distribución de los puntos a medir
  - Error píxel
  - Número de iteraciones
  - Calibración intrínseca
  - Calibración extrínseca

#### Medición de poses del objeto (multiresección)

- Cálculo de las poses del objeto: posición [mm] y orientación [°].
- Estimación de la incertidumbre de la medición con un nivel de confianza del 95%.
- Visualización del escenario de medición: pose nominal del objeto, pose medido del objeto y poses de las cámaras.
- Histogramas de la corrección media de la pose del objeto medido en magnitud y descompuestos en la dirección X, Y, Z [mm] y sus correspondientes desviaciones estándar [mm].
- Estudio de los siguientes factores:
  - Distribución de los puntos de control
  - Incertidumbre de los puntos de control
  - Poses del objeto
  - Error de posición del objeto
  - Error de orientación del objeto
  - Error píxel
  - Número de iteraciones
  - Calibración intrínseca
  - Calibración extrínseca

## 11. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Franceschini, Fiorenzo & Galetto, Maurizio & Maisano, Domenico & Mastrogiacomo, Luca. (2014). "Large-Scale Dimensional Metrology (LSDM): from Tapes and Theodolites to Multi Sensor Systems" en *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. [En línea]. Vol. 15, No. 8, pp. 1739-1758. Doi: 10.1007/s12541-014-0527-2. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12541-014-0527-2> [Accesado el día 15 de marzo de 2021]
- [2] Luhmann, Thomas. (2010). "Close range photogrammetry for industrial applications" en *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. [En línea]. Vol. 65, No. 6, pp. 558-569. Doi: 10.1016/j.isprsjprs.2010.06.003. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2010.06.003>. [Accesado el día 15 de marzo de 2021]
- [3] Luhmann, Thomas. (2018). "Photogrammetry for Industry 4.0. Prospects and Challenges" [En línea]. Disponible en: [https://www.isprs.org/tc2\\_symposium2018/images/ISPRS-Invited-Luhmann.pdf](https://www.isprs.org/tc2_symposium2018/images/ISPRS-Invited-Luhmann.pdf) [Accesado el día 15 de marzo de 2021]
- [4] R.H. Schmitt, M. Peterek, E. Morse, W. Knapp, M. Galetto, F. Härtig, G. Goch, B. Hughes, A. Forbes, W.T. Estler. (2016). "Advances in Large-Scale Metrology-Review and future trends" en *CIRP Annals*. [En línea]. Vol. 65, No. 2, pp. 643-665. Doi: 10.1016/j.cirp.2016.05.002. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.05.002> [Accesado el día 18 de marzo de 2021]
- [5] Fiorenzo Franceschini, Maurizio Galetto, Domenico Maisano, Luca Mastrogiacomo, Barbara Pralio. (2011). "Distributed Large-Scale Dimensional Metrology" en *Springer* [En línea]. Vol. 1. Doi: 10.1007/978-0-85729-543-9. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/978-0-85729-543-9> [Accesado el día 24 de marzo de 2021]
- [6] MSI VIKING Total Metrology Solutions. (2021). "ZEISS Coordinate Measuring Machines" [En línea]. Disponible en: <https://www.msiviking.com/zeiss-coordinate-measuring-machines/> [Accesado el día 24 de marzo de 2021]
- [7] Metrology News E-Zine, (2018). "Robotic Inspection Lands In Advanced Aerospace Manufacturing Plant" [En línea]. Disponible en: <https://metrology.news/accurate-robotic-inspection-lands-in-advanced-aerospace-manufacturing-plant/> [Accesado el día 26 de marzo de 2021]

- [8] Gang Zhao, Xishuang Jing, Liangjie Chen. (2015). "Dynamic tracking performance of indoor global positioning system: An experimental and theoretical study" en *Advances in Mechanical Engineering* [En línea]. Vol. 7, No. 10, pp. 1-8. Doi: 10.1177/1687814015610464. Disponible en: <https://doi.org/10.1177/1687814015610464> [Accesado el día 26 de marzo de 2021]
- [9] Geodetic Services, Inc. (2017). "Basics of Photogrammetry" [En línea]. Disponible en: <https://www.geodetic.com/basics-of-photogrammetry/> [Accesado el día 1 de abril de 2021]
- [10] Angira Sharma, Edward Kosasih, Jie Zhang, Alexandra Brintrup, Anisoara Calinescu. (2020). "Digital Twins: State of the Art Theory and Practice, Challenges, and Open Research Questions" en *Computer Science* [En línea]. Disponible en: <https://arxiv.org/abs/2011.02833> [Accesado el día 19 de marzo de 2021]
- [11] Lim, Kendrik Yan Hong & Zheng, Pai & Chen, Chun-Hsien. (2019). "A state-of-the-art survey of Digital Twin: techniques, engineering product lifecycle management and business innovation perspectives" en *Journal of Intelligent Manufacturing* [En línea]. Vol. 31, pp. 1313–1337. Doi: 10.1007/s10845-019-01512-w. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s10845-019-01512-w> [Accesado el día 20 de marzo de 2021]
- [12] Melesse, Tsega & Di Pasquale, Valentina & Riemma, Stefano. (2021). "Digital Twin models in industrial operations: State-of-the-art and future research directions" en *IET Collaborative Intelligent Manufacturing*. [En línea]. Vol. 3, pp. 37–47. Doi: 10.1049/cim2.12010. Disponible en: <https://doi.org/10.1049/cim2.12010> [Accesado el día 22 de marzo de 2021]
- [13] Siemens Digital Industries Software. (2021). "Implementation Services" [En línea]. Disponible en: <https://www.plm.automation.siemens.com/global/es/your-success/implementation-services/> [Accesado el día 21 de marzo de 2021]
- [14] Wagg, D. & Worden, Keith & Barthorpe, Robert & Gardner, Paul. (2020). Digital Twins: "State-of-The-Art Future Directions for Modelling and Simulation in Engineering Dynamics Applications" en *ASCE-ASME J Risk and Uncert in Engrg Sys Part B Mech Engrg*. [En línea]. Vol. 6. Doi: 10.1115/1.4046739. Disponible en: <https://doi.org/10.1115/1.4046739> [Accesado el día 21 de marzo de 2021]
- [15] IK4-TEKNIKER. (2018). "TECNOLOGÍA LÁSER COMO VECTOR DE DESARROLLO DE LA METROLOGÍA 4.0". [En línea]. Disponible en: <https://www.tekniker.es/es/tecnologia-laser-como-vector-de-desarrollo-de-la-metrologia-40> [Accesado el día 2 de mayo de 2021]
- [16] TEKNIKER. (2021). "INSPECCIÓN Y MEDIDA". [En línea]. Disponible en: <https://www.tekniker.es/es/inspeccion-y-medida> [Accesado el día 2 de mayo de 2021]

- [17] EuskadiTecnología. (2017). “IK4-Tekniker desarrolla nuevas herramientas de medición avanzada de piezas”. [En línea]. Disponible en: <https://www.euskaditecnologia.com/ik4-tekniker-metrologia-avanzada/> [Accesado el día 2 de mayo de 2021]
- [18] GlobalSpec. (2014). “Image Repository”. [En línea]. Disponible en: [https://www.globalspec.com/ImageRepository/LearnMore/20146/HFER\\_23117d3b71278d29488e839df0bf294f784d.png](https://www.globalspec.com/ImageRepository/LearnMore/20146/HFER_23117d3b71278d29488e839df0bf294f784d.png) [Accesado el día 27 de marzo de 2021]
- [19] HEXAGON. (2019). “MMCs de brazo horizontal: su aplicación es ideal para medición y trazado de piezas de tamaño medio a grande”. [En línea]. Disponible en: <http://www.interempresas.net/FotosArtProductos/P152916.jpg> [Accesado el día 28 de marzo de 2021]
- [20] Javwieser. (2018). “Máquinas de medir por coordenadas (MMC)” en *Metrología dimensional*. [En línea]. Disponible en: <https://metrologiadimensionalcom.wordpress.com/2018/02/15/maquinas-de-medicion-por-coordenadas-mmc/> [Accesado el día 28 de marzo de 2021]
- [21] Vladimir Kupriyanov. (2018). “Comparison of optical and tactile Coordinate Measuring Machines in a production environment” en *Computer Science*. [En línea]. Disponible en: <http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2018060813285> [Accesado el día 23 de marzo de 2021]
- [22] Nikon Metrology. (2018). “Altera Coordinate Measuring Machines”. [En línea]. Disponible en: <https://www.nikonmetrology.com/images/brochures/altera-en.pdf> [Accesado el día 25 de marzo de 2021]
- [23] Nikon Metrology. (2018). “L100. El escáner láser de MMC definitivo, que combina productividad y precisión”. [En línea]. Disponible en: <https://www.nikonmetrology.com/images/brochures/l100-es.pdf> [Accesado el día 28 de marzo de 2021]
- [19] Nikon Metrology. (2017). “Watch it again – Nikon CMM laser scanners & PolyWorks AMS webinar”. [En línea]. Disponible en: [http://blog.nikonmetrology.com/wp-content/uploads/2017/09/DSC\\_7516.jpg](http://blog.nikonmetrology.com/wp-content/uploads/2017/09/DSC_7516.jpg) [Accesado el día 30 de marzo de 2021]
- [24] FARO. (2017). “FARO Vantage y Vantage Laser”. [En línea]. Disponible en: [https://www.faroandina.com/pdfs/Faro\\_Vantage.pdf](https://www.faroandina.com/pdfs/Faro_Vantage.pdf) [Accesado el día 30 de marzo de 2021]

- [25] Martin, Oliver & Robson, Stuart & Kayani, Amir & Muelaner, J. & Dhokia, Vimal & Maropoulos, Paul. (2016). "Comparative Performance between Two Photogrammetric Systems and a Reference Laser Tracker Network for Large-Volume Industrial Measurement" en *The Photogrammetric Record*. [En línea]. Vol. 31. Doi: 10.1111/phor.12154. Disponible en: <https://doi.org/10.1111/phor.12154> [Accesado el día 26 de marzo de 2021]
- [26] Automated Precision, Inc. (2019). "3 Common Mistakes To Avoid When Using Laser Trackers". [En línea]. Disponible en: <https://apimetrology.com/3-common-mistakes-to-avoid-when-using-laser-trackers/> [Accesado el día 26 de marzo de 2021]
- [27] Acero Cacho, Raquel (2015). "Desarrollo, implementación y ensayo de técnicas de verificación y calibración de instrumentos portátiles de medición por coordenadas mediante plataforma multi-registro". [En línea]. ISSN 2254-7606. Disponible en: <https://zaguan.unizar.es/record/31593> [Accesado el día 27 de marzo de 2021]
- [28] Hexagon (2013). "LEICA ABSOLUTE TRACKER AT901". [En línea]. Disponible en: [https://w3.leica-geosystems.com/downloads123/m1/metrology/at901/brochures/leica%20absolute%20otracker%20at901%20brochure\\_es.pdf](https://w3.leica-geosystems.com/downloads123/m1/metrology/at901/brochures/leica%20absolute%20otracker%20at901%20brochure_es.pdf) [Accesado el día 28 de marzo de 2021]
- [29] TEKNIKER (2018). "Multilateración simultánea para la verificación volumétrica de máquina herramienta". [En línea]. Disponible en: <https://www.tekniker.es/es/Multilateracion-simultanea-para-la-verificacion-volumetrica-de-maquina-herramienta> [Accesado el día 31 de marzo de 2021]
- [30] RoboDK. (2021). "Robot Calibration (Laser Tracker)". [En línea]. Disponible en: <https://robodk.com/doc/en/Robot-Calibration-LaserTracker.html> [Accesado el día 24 de marzo de 2021]
- [31] Nikon Metrology. (2021). "CMM portátil MV331/351" [En línea]. Disponible en: <https://www.directindustry.es/prod/nikon-metrology/product-21023-430895.html> [Accesado el día 24 de marzo de 2021]
- [32] Nikon Metrology. (2020). "APDIS Laser radar". [En línea]. Disponible en: <https://www.nikonmetrology.com/images/brochures/apdis-laser-radar-es.pdf> [Accesado el día 24 de marzo de 2021]
- [33] Nikon Metrology. (2018). "Laser Radar MV331/351" [En línea]. Disponible en: <https://www.nikonmetrology.com/images/brochures/laser-radar-general-es.pdf> [Accesado el día 24 de marzo de 2021]
- [34] Nikon Metrology. (2014). "Laser Radar for automated inline inspection". [En línea]. Disponible en: <https://blog.nikonmetrology.com/laser-radar-automated-inline-inspection-2/> [Accesado el día 25 de marzo de 2021]

- [35] Nikon Metrology. (2021). “CMM de planta Laser Radar: inspección flexible, productividad imbatible”. [En línea]. Disponible en: <https://www.nikonmetrology.com/es/metrologia-3d/metrologia-de-gran-volumen-cmm-de-planta-laser-radar> [Accesado el día 27 de marzo de 2021]
- [36] FARO (2014). “FARO Laser Scanner Focus 3D Características, beneficios y especificaciones técnicas”. [En línea]. Disponible en: [http://www.globalmediterranea.es/wp-content/uploads/2013/06/FARO\\_Focus3D-S\\_SPA\\_.pdf](http://www.globalmediterranea.es/wp-content/uploads/2013/06/FARO_Focus3D-S_SPA_.pdf) [Accesado el día 30 de marzo de 2021]
- [37] Sunbelt Rentals Ltd. (2021). “FARO Focus S 350 Laser Scanner”. [En línea]. Disponible en: <https://surveyequipment.com/faro-focus-s-350-laser-scanner/> [Accesado el día 30 de marzo de 2021]
- [38] Lanmar Services. (2014). “Laser Scanning vs. Photogrammetry”. [En línea]. Disponible en: <http://lanmarservices.com/2014/11/07/laser-scanning-vs-photogrammetry/#:~:text=Generally%2C%20laser%20scanning%20is%20your,but%20more%20visual%20photo%20realism> [Accesado el día 31 de marzo de 2021]
- [39] CartoGalicía. (2019). “Láser Escaner”. [En línea]. Disponible en: <https://cartogalicia.com/laser-escaner/> [Accesado el día 28 de marzo de 2021]
- [40] FARO. (2021). “FARO. Laser Scanner Focus 3D. El instrumento perfecto para documentación 3D, BIM y topografía”. [En línea]. Disponible en: [https://www.faroandina.com/pdfs/FARO\\_Focus\\_General.pdf](https://www.faroandina.com/pdfs/FARO_Focus_General.pdf) [Accesado el día 27 de marzo de 2021]
- [41] FARO (202). “Focus Laser Scanner” [En línea]. Disponible en: <https://media.faro.com/-/media/Project/FARO/FARO/FARO/Resources/2021/01/15/22/34/Tech-Sheet-FARO-Focus-Laser-Scanners-SPA.pdf?rev=ac4a948f63524c15964778810096f28b> [Accesado el día 23 de marzo de 2021]
- [42] Monsalve, Juan J. & Baggett, Jonathan & Bishop, Richard & Ripepi, Nino. (2018). “Application of Laser Scanning for Rock Mass Characterization and Discrete Fracture Network Generation in an Underground Limestone Mine” en *International Conference on Ground Control in Mining*. [En línea]. Vol. 29, No. 1, pp. 131-137. Doi: 10.1016/j.ijmst.2018.11.009. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2018.11.009> [Accesado el día 23 de marzo de 2021]
- [43] Velios, A. (2010). “Laser Scanning and Digital Close Range Photogrammetry for Capturing 3-d Archaeological Objects: a Comparison of Quality and Practicality”. [En línea]. Disponible en: <https://core.ac.uk/download/pdf/158279375.pdf> [Accesado el día 29 de marzo de 2021]

- [44] Metrología Sariki S.A. (2018). “iGPS”. [En línea]. Disponible en: [https://nanopdf.com/download/gps-metrologia-sariki\\_pdf](https://nanopdf.com/download/gps-metrologia-sariki_pdf) [Accesado el día 30 de marzo de 2021]
- [45] Nikon Metrology. (2018). “iGPS for Dynamic Tracking and Alignment”. [En línea]. Disponible en: <https://www.nikonmetrology.com/images/brochures/inspace-dynamic-tracking-en.pdf> [Accesado el día 29 de marzo de 2021]
- [46] Metrology News. (2019). “7D Kinematic Metrology Acquires iGPS Business from Nikon Metrology”. [En línea]. Disponible en: <https://metrology.news/7d-kinematic-metrology-acquired-igps-business-from-nikon-metrology/> [Accesado el día 29 de marzo de 2021]
- [47] Nikon Metrology. (2013). “iGPS Large volume metrology, tracking and positioning”. [En línea]. Disponible en: <https://www.nikonmetrology.com/images/brochures/inspace-en.pdf> [Accesado el día 29 de marzo de 2021]
- [48] Beth Kelley. (2010). “Finding yourself in the great indoors”. [En línea]. Disponible en: <https://spie.org/news/1110-kelley-igps?SSO=1> [Accesado el día 29 de marzo de 2021]
- [49] Zhao, Gang & Zhang, Chengyang & Jing, Xishuang & Ling, Xuanzhe & Chen, Siyu. (2018). “Study on the Technologies of Close Range Photogrammetry and Applications in the Manufacture of Aviation” en *2018 8th International Conference on Manufacturing Science and Engineering*. [En línea] Doi: 10.2991/icmse-18.2018.91. Disponible en: <https://doi.org/10.2991/icmse-18.2018.91>. [Accesado el día 28 de marzo de 2021]
- [50] HEXAGON. (2021). “Photogrammetry”. [En línea]. Disponible en: <https://www.hexagonmi.com/products/photogrammetry> [Accesado el día 27 de marzo de 2021]
- [51] Riveiro, B. & Caamaño, J.C. & Arias, Pedro & Sanz, E. (2011). “Photogrammetric 3D modelling and mechanical analysis of masonry arches: An approach based on a discontinuous model of voussoirs” en *Automation in Construction*. [En línea]. Vol. 20, No. 4, pp. 380-388. Doi: 10.1016/j.autcon.2010.11.008. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2010.11.008> [Accesado el día 28 de marzo de 2021]
- [52] FADI-IMS. (2021). “The Automotive Sector”. [En línea]. Disponible en: <https://www.fadi-ims.com/industries.html> [Accesado el día 29 de marzo de 2021]
- [53] Linearis3D. (2021). “VALVE HOUSING”. [En línea]. Disponible en: <http://www.linearis3d.com/valve.html> [Accesado el día 30 de marzo de 2021]
- [54] FADI-IMS. (2021). “OnSite Services”. [En línea]. Disponible en: <https://www.fadi-ims.com/services.html> [Accesado el día 28 de marzo de 2021]
- [55] Solve Metrology. (2021). “WHY V-STARS?” [En línea]. Disponible en: <http://solve3d.net/ENG/Veproducts.htm> [Accesado el día 18 de marzo de 2021]

- [56] Geodetic. (2021). "GSI V-STARS Photogrammetry System". [En línea]. Disponible en: <https://www.kinematics.com/ftp/SA/Install/Documentation/QuickStartGuides/VstartsQuickStart.pdf> [Accesado el día 18 de marzo de 2021]
- [57] Kinematics. (2021). "Measurement Uncertainty". [En línea]. Disponible en: <https://www.kinematics.com/spatialanalyzer/measurementuncertainty.php> [Accesado el día 16 de marzo de 2021]
- [58] Kinematics. (2021). "Measurement Simulation: Planning a Measurement Task to Save Time". [En línea]. Disponible en: <https://www.kinematics.com/about/newsletterarticlemeasurementsimulation.php> [Accesado el día 20 de marzo de 2021]
- [59] González-Aguilera, Diego & López Fernández, Luis & Rodríguez-Gonzálvez, Pablo & Guerrero, D. & Hernandez, David & Remondino, Fabio & Menna, Fabio & Nocerino, Erica & Toschi, Isabella & Ballabeni, Andrea & Gaiani, Marco. (2016). "DEVELOPMENT OF AN ALL-PURPOSE FREE PHOTOGRAMMETRIC TOOL" en *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. [En línea]. Doi: 10.5194/isprsarchives-XLI-B6-31-2016. Disponible en: <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XLI-B6-31-2016> [Accesado el día 2 de abril de 2021]
- [60] Phox. (2019). "PhoX. Photogrammetric Calculation System". [En línea]. Disponible en: <https://phox.iapg.jade-hs.de/> [Accesado el día 15 de marzo de 2021]
- [61] David Samper, Jorge Santolaria, Jorge Juan Pastor, Juan José Aguilar. (2009). "MetroVisionLab Toolbox for Camera Calibration and Simulation". [En línea]. Disponible en: <http://metrovisionlab.unizar.es/> [Accesado el día 18 de marzo de 2021]
- [62] MathWorks. (2021). "Design and test computer vision, 3D vision, and video processing systems". [En línea]. Disponible en: <https://www.mathworks.com/products/computer-vision.html> [Accesado el día 22 de marzo de 2021]
- [63] MathWorks. (2021). "Create apps with graphical user interfaces in MATLAB". [En línea]. Disponible en: <https://www.mathworks.com/discovery/matlab-gui.html> [Accesado el día 22 de marzo de 2021]
- [64] Cid Espinosa, Guillermo. (2018). "Programación de interfaz gráfica en App Designer para el control vectorial de motores de imanes permanentes". [En línea]. Disponible en: [http://oa.upm.es/53343/1/TFG\\_GUILLERMO\\_CID\\_ESPINOSA.pdf](http://oa.upm.es/53343/1/TFG_GUILLERMO_CID_ESPINOSA.pdf) [Accesado el día 23 de marzo de 2021]

- [65] Arturo de la Escalera, Jose María Armingol, Jose Luis Pech, José Julián Gómez. (2010). “Detección Automática de un Patrón para la Calibración de Cámaras” en *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI*. [En línea]. Vol. 7 No. 4 pp. 83-94. Doi: 10.1016/S1697-7912(10)70063-7. Disponible en: [https://doi.org/10.1016/S1697-7912\(10\)70063-7](https://doi.org/10.1016/S1697-7912(10)70063-7) [Accesado el día 25 de abril de 2021]
- [66] Aguirre de Mata, Julián. (2016). “Calibración geométrica de cámaras no métricas. Estudio de metodologías y modelos matemáticos de distorsión”. [En línea]. Disponible en: [http://oa.upm.es/39454/1/JULIAN\\_AGUIRRE\\_DE\\_MATA.pdf](http://oa.upm.es/39454/1/JULIAN_AGUIRRE_DE_MATA.pdf) [Accesado el día 27 de abril de 2021]
- [67] Jakob W. (2018). “Calibration Patterns Explained”. [En línea]. Disponible en: <https://calib.io/blogs/knowledge-base/calibration-patterns-explained> [Accesado el día 27 de abril de 2021]
- [68] Shopify. (2021). “Products: Circles 800x600”. [En línea]. Disponible en: [https://cdn.shopify.com/s/files/1/0021/3984/8751/products/circles\\_800x600\\_12x17\\_44\\_14\\_250x250@2x.png?v=1536591093](https://cdn.shopify.com/s/files/1/0021/3984/8751/products/circles_800x600_12x17_44_14_250x250@2x.png?v=1536591093) [Accesado el día 30 de abril de 2021]
- [69] Shopify. (2021). “Products: Checker 800x600”. [En línea]. Disponible en: [https://cdn.shopify.com/s/files/1/0021/3984/8751/products/checker\\_800x600\\_18x25\\_30\\_250x250@2x.png?v=1536590957](https://cdn.shopify.com/s/files/1/0021/3984/8751/products/checker_800x600_18x25_30_250x250@2x.png?v=1536590957) [Accesado el día 28 de abril de 2021]
- [70] Shopify. (2021). “Products: Photo Modeler Calibration Grid 800x600”. [En línea]. Disponible en: [https://cdn.shopify.com/s/files/1/0021/3984/8751/products/PhotoModelerCalibrationGrid-36x36\\_1200x1200.png?v=1536671063](https://cdn.shopify.com/s/files/1/0021/3984/8751/products/PhotoModelerCalibrationGrid-36x36_1200x1200.png?v=1536671063) [Accesado el día 28 de abril de 2021]
- [71] Rigoberto Juarez-Salazar. (2021). “Patrón de calibración. Cuadrado-radial”. [En línea]. Disponible en: [http://www.rjuarezs.com/t\\_srpattern.html](http://www.rjuarezs.com/t_srpattern.html) [Accesado el día 24 de abril de 2021]
- [72] Remondino, Fabio & Fraser, Clive. (2005). “Digital camera calibration methods: Considerations and comparisons” en *ISPRS Commission V Symposium 'Image Engineering and Vision Metrology*. [En línea]. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/228672107\\_Digital\\_camera\\_calibration\\_methods\\_Considerations\\_and\\_comparisons](https://www.researchgate.net/publication/228672107_Digital_camera_calibration_methods_Considerations_and_comparisons) [Accesado el día 7 de mayo de 2021]
- [73] Berriozabal Kortaberria, Gorka. (2019). “Progress in industrial photogrammetry by means of markerless solutions”. [En línea]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10810/41884> [Accesado el día 15 de marzo de 2021]
- [74] Ngo, Trung-Thanh & Abdukhakimov, Asatilla & Kim, Dong-Seong. (2019). “Long-Range Wireless Tethering Selfie Camera System Using Wireless Sensor Networks” en *IEEE Access*. [En línea]. Doi: 10.1109/ACCESS.2019.2933402. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2933402> [Accesado el día 10 de mayo de 2021]

- [75] Dpreview (2017). "To hiperfocal or not". [En línea]. Disponible en: <http://aptnk.in/wp-content/uploads/2011/02/depth-of-field.png> [Accesado el día 15 de abril de 2021]
- [76] Sourish Ghosh. (2016). "Stereo calibration using C++ and OpenCV". [En línea]. Disponible en: <https://sourishghosh.com/2016/stereo-calibration-cpp-opencv/> [Accesado el día 30 de abril de 2021]
- [77] Joaquim Salvi. (2016). "Camera Calibration". [En línea]. Disponible en: <https://www.slideshare.net/JoaquimSalvi/lecture-2-camera-calibration> [Accesado el día 8 de abril de 2021]
- [78] Unipython. (2018). "CALIBRACIÓN DE LA CÁMARA OPENCV". [En línea]. Disponible en: <https://unipython.com/calibracion-la-camara-opencv/> [Accesado el día 25 de marzo de 2021]
- [79] Iriarte Cariño, Oscar. (2020). "Desarrollo de algoritmos de calibración automática de cámaras de vídeo a partir de patrones tridimensionales y bidimensionales para su aplicación en eventos deportivos". [En línea]. Disponible en: [http://oa.upm.es/62928/1/PFC\\_OSCAR\\_IRIARTE\\_CARI%C3%91O.pdf](http://oa.upm.es/62928/1/PFC_OSCAR_IRIARTE_CARI%C3%91O.pdf) [Accesado el día 26 de abril de 2021]
- [80] Moulon, Pierre & Monasse, Pascal & Marlet, Renaud. (2012). "Adaptive Structure from Motion with a Contrario Model Estimation" en *11th Asian Conference on Computer Vision-ACCV*. [En línea]. pp 257-270. Doi: 10.1007/978-3-642-37447-0\_20. Disponible en: [https://doi.org/10.1007/978-3-642-37447-0\\_20](https://doi.org/10.1007/978-3-642-37447-0_20) [Accesado el día 15 de mayo de 2021]
- [81] Rong Wu, Hua Wu, Dwayne Arola, Dongsheng Zhang. (2016). "Real-time three-dimensional digital image correlation for biomedical applications". [En línea]. 10.1117/1.JBO.21.10.107003. Disponible en: <https://doi.org/10.1117/1.JBO.21.10.107003> [Accesado el día 3 de mayo de 2021]
- [82] Li, Da & Liang, Jin & Hu, Hao & Tang, Zheng & Guo, Xiang & Li, Lei. (2013). "Strain Measurement for Sheet Metal Forming Based on Close Range Photogrammetry" en *Applied Mechanics and Materials*. [En línea]. Doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.475-476.148. Disponible en: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.475-476.148> [Accesado el día 8 de mayo de 2021]
- [83] Icasio, Octavio. (2018). "Instrumento de medición por coordenadas de mano sin contacto por estereoscopia (PCMM)" en *X Tri National Conference of the North American Coordinate Metrology Association*. [En línea]. Doi: 10.13140/RG.2.2.17085.72169. Disponible en: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.17085.72169> [Accesado el día 5 de mayo de 2021]
- [84] Instituto de Astrofísica de Canarias. (2021). "Sistema Laser Tracker de medición 3D". [En línea]. Disponible en: <https://www.iac.es/es/ciencia-y-tecnologia/tecnologia/medios-tecnicos/sistema-laser-tracker-de-medicion-3d> [Accesado el día 29 de abril de 2021]

- 
- [85] Cooper Vision Technologies. (2016). "GOX-12401-PGE". [En línea]. Disponible en: <http://www.cvtechnologies.com/product/gox-12401-pge/> [Accesado el día 30 de julio de 2021]
- [86] Computar. (2021). "MPY2 Series Machine Vision Lens V1228-MPY2". [En línea]. Disponible en: <https://computar.com/product/1394/V1228-MPY2> [Accesado el día 30 de julio de 2021]

## 12. ANEXO I: SELECCIÓN CÁMARA Y LENTE

En este Anexo, se describe el procedimiento a seguir para seleccionar la cámara y la lente que mejor se ajusta al escenario de medición usado en la validación. De esta forma, se completa todas las etapas de simulación.

Se trata de un escenario estático, en el que se emplea una configuración estéreo de cámaras para observar todos los objetivos retroreflectantes a medir con una precisión absoluta menor de 1 mm.

En primer lugar, se determina las dimensiones del campo de visión (FOV) necesario para abarcar los puntos de medición. En este caso, los rangos de medida son de 4,9 m x 2,6 m con una profundidad de 5,6 m. (Figura 12.1).

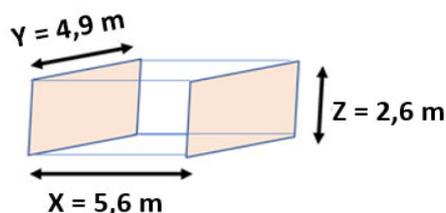


Figura 12.1. Rangos de medida del escenario de medición (FOV).

Además, se especifica que el punto más alejado no puede estar a más de 10,6 metros para asegurar la precisión requerida en el proyecto, por lo que la posición más alejada de la cámara con respecto al punto más cercano puede ser de hasta 5 metros (Figura 12.2).

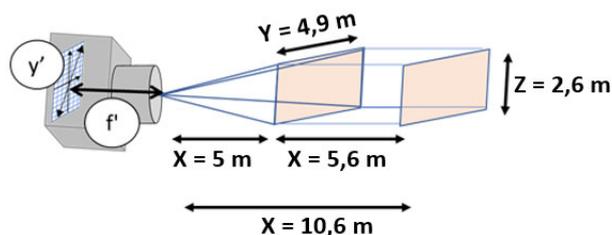


Figura 12.2. Determinación de la distancia de trabajo.

A partir de la relación trigonométrica [12.1], se obtiene la combinación sensor y lente que cumple con las exigencias descritas. Después, se debe comprobar la compatibilidad de los elementos comerciales, ya que la lente debe servir para el tamaño del sensor seleccionado. Por tanto, se convierte en un proceso iterativo.

$$\frac{y'}{f'} = \frac{y}{d_w} \quad [12.1]$$

Donde:

$y'$  = diagonal del sensor [mm]

$f$  = distancia focal [mm]

$y$  = diagonal del FOV (plano YZ) [mm]

$d_w$  = distancia de trabajo [mm]

Se prioriza la selección de un sensor con bastante resolución, aunque implique mayores tiempos de procesamiento. Por ejemplo, un sensor de 12 MPix (4.096 px x 3.000 px) con un tamaño de 1" (14,13 mm x 10,35 mm) [85].

A partir de los datos iniciales del tamaño del sensor, de la distancia de trabajo y del campo de visión, se calcula la distancia focal [12.2].

$$f = \frac{y'}{y} \cdot d_w = \frac{17,51 \text{ mm}}{5.547,07 \text{ mm}} \cdot 5.000 \text{ mm} = 15,78 \text{ mm} \quad [12.2]$$

Se decide usar una distancia focal de 12 mm, al haber mayor disponibilidad en el mercado [86] y se recalcula la distancia de trabajo [12.3].

$$d_w = f \cdot \frac{y}{y'} = 12 \text{ mm} \cdot \frac{5.547,07 \text{ mm}}{17,51 \text{ mm}} = 3.801,53 \text{ mm} \quad [12.3]$$

Se determina el tamaño mínimo ( $\emptyset$ ) de los objetivos retroreflectantes para que se detecte en el sensor con una precisión de 10 píxeles a la distancia máxima de trabajo [12.4]. El tamaño píxel del sensor es de 3,45  $\mu\text{m}/\text{píx}$  [85].

$$y = \frac{y'}{f} \cdot d_w = \frac{10 \text{ píx} \cdot 3,45 \cdot 10^{-3} \text{ mm}/\text{píx}}{12 \text{ mm}} \cdot (5.600 \text{ mm} + 3.801,53 \text{ mm}) = 27,03 \text{ mm} \quad [12.4]$$

Por último, se definen las poses iniciales de las cámaras, teniendo en cuenta la distancia de trabajo estimada, y con un ángulo entre cámaras de entre 60-120 grados para mejorar la precisión (Tabla 12.1 y Figura 12.3).

Tabla 12.1. Poses iniciales de las cámaras.

ID. Cámara	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	Rx [°]	Ry [°]	Rz [°]
1	-2311	-5000	2485	-90	0	-60
2	-2279	5000	2485	-120	0	-120

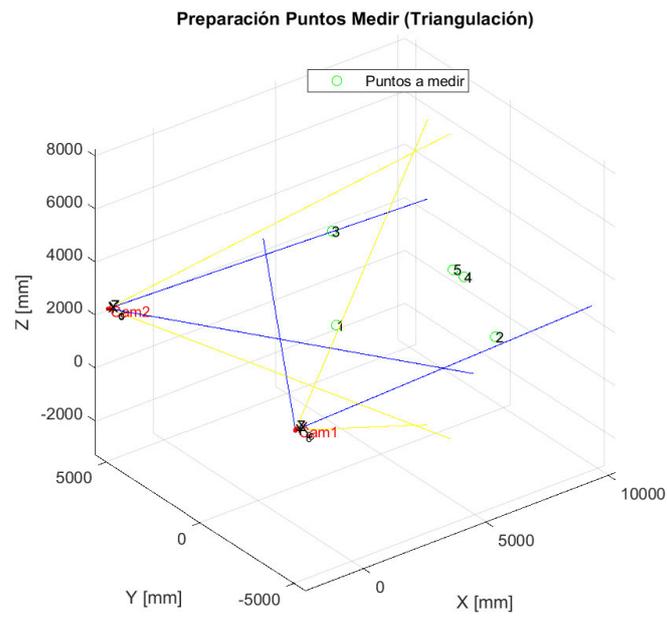


Figura 12.3. Escenario de medición a partir de la selección cámara y lente.

## MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA MECÁNICA

# TRABAJO FIN DE MÁSTER

## ***13. ANEXO II: MANUAL DE USUARIO***

**Estudiante**  
**Directora**  
**Departamento**  
**Curso académico**

Pérez, Vigiola, Asier  
Ortega, Rodríguez, Naiara  
Ingeniería Mecánica  
2020-2021

Bilbao, 9, septiembre, 2021

## ÍNDICE

<b>1. INICIO DEL SOFTWARE</b>	<b>6</b>
<b>2. FUNCIONAMIENTO DE LA INTERFAZ</b>	<b>8</b>
2.1.1. PESTAÑA: “Config óptica cámara”	9
2.1.2. PESTAÑA “Calibración”	11
2.1.2.1. CALIBRACIÓN INTRÍNSECA	12
2.1.2.2. CALIBRACIÓN EXTRÍNSECA	22
2.1.2.3. EDITAR PARÁMETROS INTRÍNSECOS Y EXTRÍNSECOS	33
2.1.3. PESTAÑA: “Medición”	37
2.1.3.1. MÉTODO DE MEDICIÓN	37
2.1.3.2. MEDICIÓN DE PUNTOS (TRIANGULACIÓN)	38
2.1.3.3. MEDICIÓN DE PUNTOS (MULTIRRESECCIÓN)	44
<b>3. INFORMACIÓN ADICIONAL</b>	<b>51</b>
3.1.1. MODIFICACIÓN DE LA UBICACIÓN DE LA CARPETA “testJsons”	51
3.1.2. PREPARACIÓN DE LOS PUNTOS	51
3.1.2.1. CARGAR UN FICHERO *.mat	51
3.1.2.2. GENERACIÓN MANUAL DE LOS PUNTOS	52
3.1.2.3. GENERAR RED DE PUNTOS DE REFERENCIA	53
3.1.2.4. APLICAR INCERTIDUMBRE A LOS PUNTOS	54
3.1.2.5. MODIFICACIÓN DE LOS FICHEROS *.mat DE LOS “datosPrueba”	55

## **Lista de ilustraciones**

Figura 1.1. Carpeta “desarrolloGUI”.	6
Figura 1.2. Ejecución de la función “init”.	6
Figura 1.3. Carpeta “src” y generación de otras carpetas.	7
Figura 2.1. Barra menú de la ventana de la interfaz.	8
Figura 2.2. Menú de calibración.	8
Figura 2.3. Ítems de la pestaña “Config óptica-cámara”.	8
Figura 2.4. Ítem “Editar Parámetros” de la pestaña “Calibración”.	9
Figura 2.5. Panel Configuración óptica-cámara.	9
Figura 2.6. Resultados obtenidos de la configuración óptica cámara.	10
Figura 2.7. Botones asociados a cada una de las fases de la calibración.	11
Figura 2.8. Iniciar la calibración.	11
Figura 2.9. Parámetros intrínsecos adicionales relacionados con los defectos ópticos y de montaje.	12
Figura 2.10. Panel “Preparación de la calibración intrínseca”.	13
Figura 2.11. Forma en la que se definen los ejes locales del patrón de calibración.	14
Figura 2.12. Generación de las poses del patrón.	14
Figura 2.13. Puntos de las poses del patrón generadas: a) todas las poses. b) pose patrón 1.	15
Figura 2.14. Porcentaje visible y porcentaje global de visibilidad.	16
Figura 2.15. Habilitación del botón “Calibración Intrínseca”.	16
Figura 2.16. Visualización de los puntos no visibles de la pose patrón 1: a) seleccionar la pose en el menú desplegable; b) activar la casilla correspondiente de dicha pose.	17
Figura 2.17. Selección automática de las poses patrón a partir de un porcentaje umbral.	18
Figura 2.18. Panel “Resultados calibración intrínseca”.	19
Figura 2.19. Resultados de la calibración intrínseca: a) parámetros intrínsecos; b) estimación de la incertidumbre.	19
Figura 2.20. Otros resultados de la calibración intrínseca: a) escenario de calibración; b) error de reproyección.	20
Figura 2.21. Habilitación del botón “Preparación CE”.	20
Figura 2.22. Activación de la distorsión tangencial y del skew y aumento del número de coeficientes de distorsión radial a 3.	21
Figura 2.23. Cálculo de los parámetros intrínsecos adicionales indicados.	21
Figura 2.24. Panel “Preparación puntos calibración extrínseca”.	23
Figura 2.25. Generación de los puntos de referencia mediante una red de puntos.	24
Figura 2.26. Panel “Preparación de las cámaras”.	24
Figura 2.27. Campos obligatorios en la preparación de las cámaras.	25
Figura 2.28. Visualización de las cámaras, de los conos de visión y de los puntos de referencia.	25
Figura 2.29. Cantidad de cámaras que detecta cada punto y la ID de las cámaras que no detectan.	26
Figura 2.30. Habilitación del botón “Calibración extrínseca”.	26
Figura 2.31. Ocultación de los conos de visión de la cámara 1 y cámara 3.	27

Figura 2.32. Identificación (ID) de los puntos no detectados. Cámara 2. _____	27
Figura 2.33. ID de la cámara que no detecta el punto 5. _____	28
Figura 2.34. Selección de los puntos de referencia mediante un número de cámaras umbral. _____	28
Figura 2.35. Panel “Resultados calibración extrínseca”. _____	30
Figura 2.36. Valores medios de las poses de las cámaras. _____	30
Figura 2.37. Estimación de la incertidumbre de uso de las poses de las cámaras. _____	31
Figura 2.38. Corrección media de los puntos de referencia medidos. _____	31
Figura 2.39. Histogramas de la corrección media de los puntos de referencia medidos y desviación estándar: a) Magnitud, b) Eje X; c) Eje Y; d) Eje Z. _____	31
Figura 2.40. Error de reproyección media por cada cámara y global en la calibración extrínseca. _____	31
Figura 2.41. Visualización de las poses de las cámaras calculadas, y de los puntos de referencia nominales y medidos por triangulación _____	32
Figura 2.42. Habilidad de los botones “Método” y Preparación triangulación” en el menú de medición. _____	32
Figura 2.43. Acceso a la edición de los parámetros intrínsecos. _____	33
Figura 2.44. Edición de los parámetros intrínsecos. _____	34
Figura 2.45. Parámetros intrínsecos adicionales. _____	34
Figura 2.46. Edición de los parámetros intrínsecos adicionales. _____	35
Figura 2.47. Acceso a la edición de los parámetros extrínsecos. _____	36
Figura 2.48. Edición de los parámetros extrínsecos. _____	36
Figura 2.49. Método de medición: a) selección del método; b) habilitación del botón correspondiente a la preparación. _____	37
Figura 2.50. Panel “Preparación de los puntos a medir por triangulación (SC global)”. _____	38
Figura 2.51. Panel “Preparación de los puntos a medir por triangulación (SC global)”. _____	39
Figura 2.52. Selección de los puntos a medir por triangulación. _____	39
Figura 2.53. Visualización del escenario de medición. _____	40
Figura 2.54. Habilidad del botón “Triangulación en el menú de medición. _____	40
Figura 2.55. Activar/desactivar conos de visión. _____	41
Figura 2.56. Panel "Resultados medición. Triangulación". _____	42
Figura 2.57. Valores medios de las posiciones 3D de los puntos medidos por triangulación y estimación de la incertidumbre de uso. _____	42
Figura 2.58. Histogramas de la corrección media de los puntos de referencia medidos por triangulación: a) Magnitud, b) Eje X; c) Eje Y; d) Eje Z. _____	43
Figura 2.59. Visualización de los puntos nominales, de los medidos y de las poses de las cámaras. _____	43
Figura 2.60. Panel "Preparación de los puntos de control". _____	44
Figura 2.61. Panel "Preparación de las poses del objeto". _____	45
Figura 2.62. Panel "Preparación de los puntos de control". _____	46
Figura 2.63. Habilidad del botón " Multirresección". _____	46
Figura 2.64. Visualización de todas las poses del objeto. _____	47
Figura 2.65. Panel “Resultados medición. Multiresección”. _____	48
Figura 2.66. Medición de las poses de un objeto. _____	48

Figura 2.67. Incertidumbre de uso de las poses de un objeto. _____	49
Figura 2.68. Representación de las poses 1 y 2 nominales y medidos. _____	49
Figura 2.69. Histogramas de la corrección media de la posición medida del objeto y de la desviación estándar [mm]. a) Magnitud, b) Corrección en X, c) Corrección en Y, d) Corrección en Z. _____	49
Figura 2.70. Histogramas de la corrección media de la orientación medida del objeto y de la desviación estándar [°]. a) Magnitud, b) Corrección en X, c) Corrección en Y, d) Corrección en Z. _____	50
Figura 3.1. Código del script “iniciarSimulacionFotogram” y función “carpeta”. _____	51
Figura 3.2. Variables que modifican la ruta y el nombre de la carpeta donde se guardan los jsons. _____	51
Figura 3.3. Selección del fichero “CargarPuntosRef.mat” _____	52
Figura 3.4. Cargar puntos de referencia. _____	52
Figura 3.5. Generar puntos de referencia manualmente. _____	53
Figura 3.6. Eliminación del punto ID Pto 6. _____	53
Figura 3.7. Generación de los puntos de referencia mediante una red de puntos. _____	54
Figura 3.8. Incertidumbre asociada a los puntos de referencia. _____	55
Figura 3.9. Ubicación de los scripts editables. _____	55
Figura 3.10. “scriptPuntosReferencia”. Genera el fichero CargarPuntosRef.mat _____	55
Figura 3.11. “scriptMedirPuntos”. Genera el fichero CargarPuntosMedir.mat _____	56
Figura 3.12. “scriptPosesObjetoMedir”. Genera el fichero CargarPosesObjeto.mat _____	56

## 1. INICIO DEL SOFTWARE

En caso de iniciar el software de simulación desde Matlab, se deben seguir los siguientes pasos.

Pasos:

1. Situarse en la carpeta “desarrolloGUI” del proyecto “7033\_METROTEKII” (Figura 1.1).

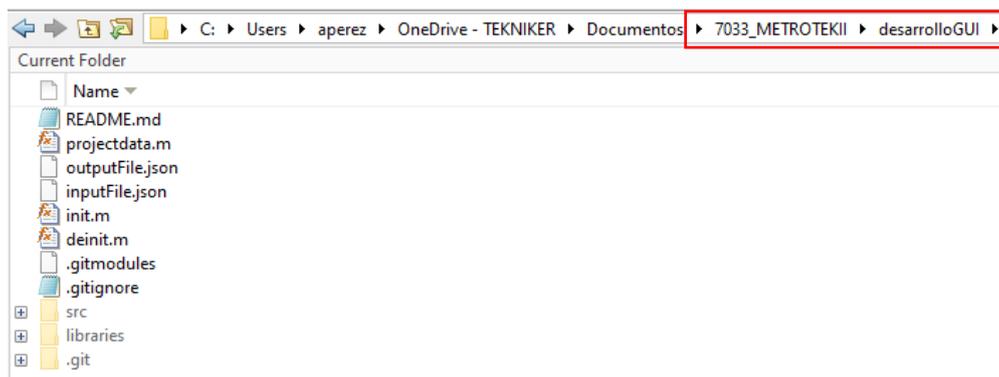


Figura 1.1. Carpeta “desarrolloGUI”.

2. Ejecutar la función “init” (Figura 1.2): se agrega la carpeta “libraries” y la carpeta “src”.

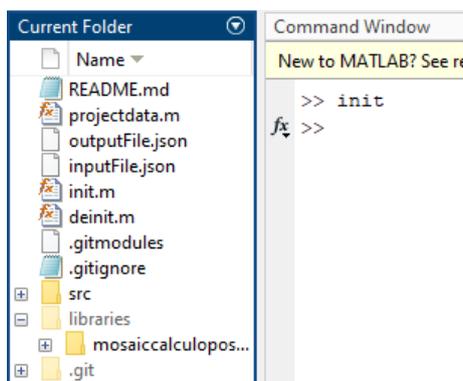


Figura 1.2. Ejecución de la función “init”.

3. Situarse en la carpeta “src” (Figura 1.3), donde se guardan los datos de la simulación.
4. Ejecutar la función “iniciarSimulacionFotogram” (Figura 1.3): se inicia la aplicación.

En el directorio actual (“src”), el software genera las siguientes carpetas (Figura 1.3):

- **“save”**: se guardan los datos de entrada y los resultados que se obtienen de la simulación.
- **“datosPrueba”**: se guarda una plantilla con datos de entrada, que posteriormente, se puede cargaren la interfaz.

- **“datosTest”**: se guardan los datos de entrada necesarios, para el funcionamiento de la librería MOSAIC.
- **“testJsosn”**: se guardan los ficheros “jsons” que se generan, cuando se emplean las funciones de la librería “mosaic”.
- **“infoGUI”**: se guardan los identificadores de los objetos de la interfaz que interactúan con el usuario y sus estados de activación.

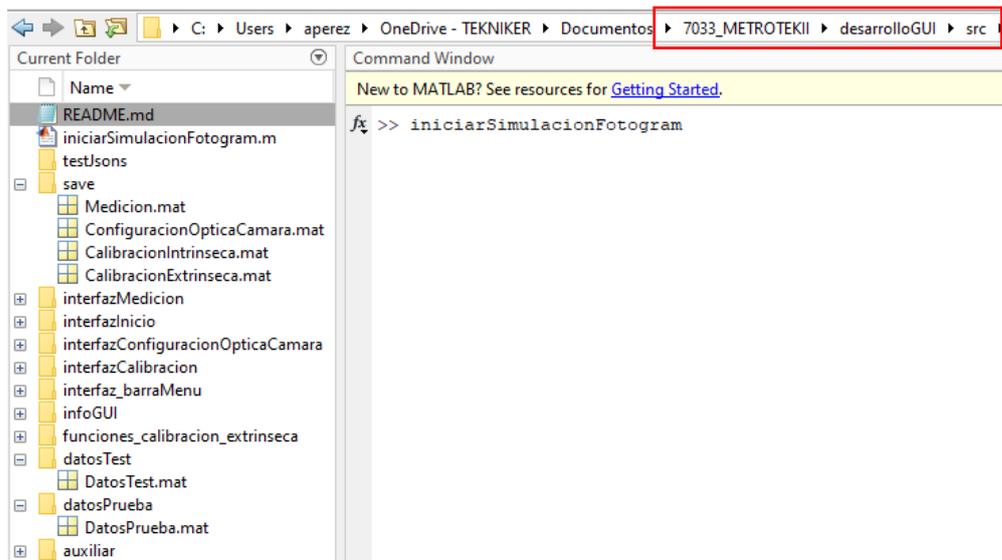


Figura 1.3. Carpeta “src” y generación de otras carpetas.

#### Notas:

- En “libraries”, se encuentran las funciones de MOSAIC con las que se obtienen los parámetros extrínsecos de las cámaras y se realizan las mediciones.
- En “src”, están las funciones asociadas a la interfaz de la GUI.
- La ubicación de la carpeta “testJsosn”, se puede modificar en el código (ver apartado 3.1.1. MODIFICACIÓN DE LA UBICACIÓN DE LA CARPETA “testJsosn”).
- El resto de las carpetas no mencionadas están relacionadas con el diseño de la interfaz.

## 2. FUNCIONAMIENTO DE LA INTERFAZ

Después de iniciar la aplicación, se muestra una ventana maximizada (Figura 2.1) con las siguientes pestañas: “Configuración óptica-cámara”, “Calibración” y “Medición”. Cada pestaña visibiliza un panel.



Figura 2.1. Barra menú de la ventana de la interfaz.

La pestaña “Configuración óptica-cámara” y “Medición” tienen dos ítems (Figura 2.3):

- **“Iniciar”**: visibiliza el panel correspondiente. Por ejemplo, en el caso de la calibración, se muestra un panel con los botones de las diferentes fases inhabilitadas por defecto, ya que la primera etapa es la configuración óptica-cámara (Figura 2.2). A medida, que se vayan completando las fases, el usuario tendrá acceso a ellos.

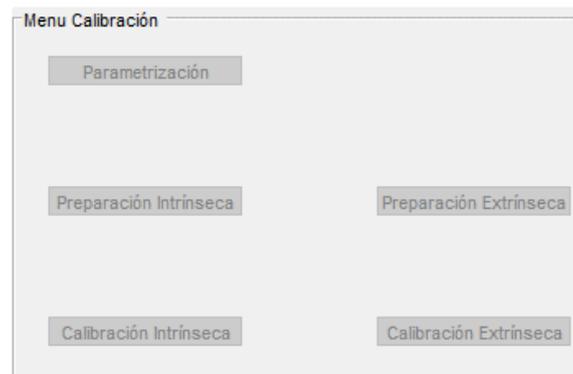


Figura 2.2. Menú de calibración.

- **“Cargar datos”**: se carga una plantilla del fichero “datosPrueba.mat” con datos de entrada.



Figura 2.3. Ítems de la pestaña “Config óptica-cámara”.

- **“Editar parámetros”**: en la pestaña “Calibración”, se le ha agregado la opción de modificar los intrínsecos y extrínsecos de las cámaras, en el caso de que ya sean conocidos dichos valores (Figura 2.4)

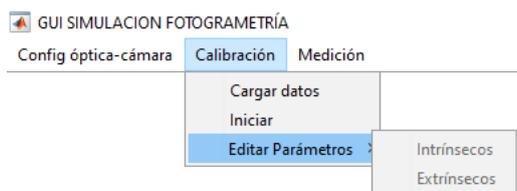


Figura 2.4. Ítem “Editar Parámetros” de la pestaña “Calibración”.

### 2.1.1. PESTAÑA: “Config óptica cámara”

En el panel “Configuración óptica-cámara” (Figura 2.5), el usuario debe introducir los datos relacionados con el sensor de la cámara, la lente y la distancia de trabajo. En la simulación, todas las cámaras tienen las mismas características.

Con ellos, se estima la profundidad de campo (DOF), la distancia mínima y máxima. Si las distancias de los puntos a medir con respecto a las cámaras están entre el valor mínimo y máximo, implica que dichos puntos son enfocados con nitidez. Realmente, en esta aplicación, la apertura de la lente y la distancia de trabajo no afectan a la simulación, por lo que, si se desconocen, se podrá introducir cualquier valor.

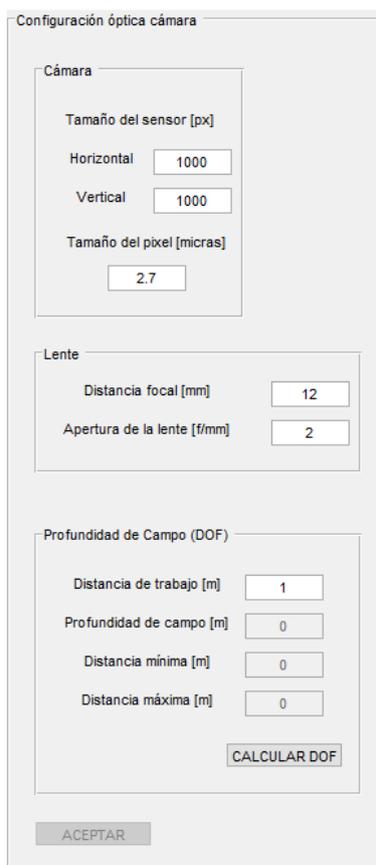


Figura 2.5. Panel Configuración óptica-cámara.

Pasos:

1. Pulsar el botón “Cargar datos” (opcional) y el de “Iniciar” en la pestaña “Config óptica-cámara” (Figura 2.3): se hace visible el panel “Configuración óptica-cámara”.
2. Rellenar campos obligatorios:
  - **Tamaño del sensor:** dimensión horizontal y vertical del sensor digital de la cámara [píxeles].
  - **Tamaño del píxel:** tamaño del píxel del sensor digital de la cámara [micras].
  - **Distancia focal:** distancia normal entre el plano de la imagen y el centro de proyección [mm].
  - **Apertura de la lente:** número F [f/mm].
  - **Distancia de trabajo:** distancia a la que se encuentran los puntos a medir con respecto a las cámaras [m].
3. Pulsar botón “CALCULAR DOF”: se obtienen los siguientes resultados (Figura 2.6).
  - **Profundidad de campo (DOF):** rango en la que el objeto (puntos) se enfoca con nitidez [m].
  - **Distancia mínima:** distancia de trabajo - DOF [m].
  - **Distancia máxima:** distancia de trabajo + DOF [m].

Profundidad de Campo (DOF)	
Distancia de trabajo [m]	1
Profundidad de campo [m]	0.072693
Distancia mínima [m]	0.96497
Distancia máxima [m]	1.0377
CALCULAR DOF	

Figura 2.6. Resultados obtenidos de la configuración óptica cámara.

4. Pulsar botón “ACEPTAR”: se habilitan los botones “Parametrización” y “Preparación Intrínseca” del panel correspondiente a la pestaña “Calibración”. También, da acceso a introducir los parámetros intrínsecos de las cámaras (ver apartado Preparación de la calibración intrínseca).

### 2.1.2. PESTAÑA “Calibración”

La calibración consta de cinco fases (Figura 2.7) que forman parte de la calibración intrínseca (1-3) y extrínseca (4-5):

1. **Parametrización:** se indican las distorsiones a considerar en el cálculo de la calibración intrínseca.
2. **Preparación intrínseca:** se define el patrón de calibración y sus poses que se emplearán en la calibración intrínseca.
3. **Calibración intrínseca:** se calculan los parámetros intrínsecos y se estima la incertidumbre.
4. **Preparación extrínseca:** se definen los puntos de referencia que se usarán en la calibración extrínseca y las poses de las cámaras.
5. **Calibración extrínseca:** se obtienen los parámetros extrínsecos de las cámaras y sus incertidumbres.

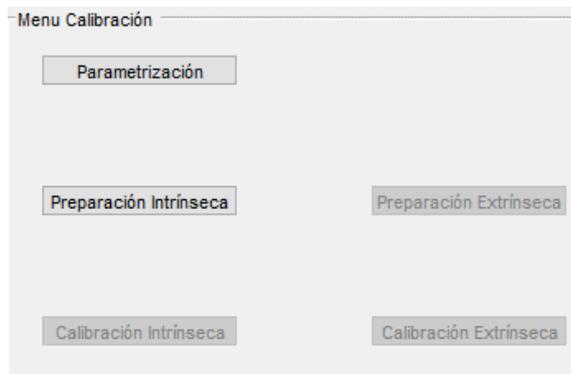


Figura 2.7. Botones asociados a cada una de las fases de la calibración.

#### Pasos:

1. Pulsar el botón “Cargar datos” (opcional) y el de “Iniciar” en la pestaña Calibración (Figura 2.8): se hace visible el panel “Menú Calibración” (Figura 2.7).

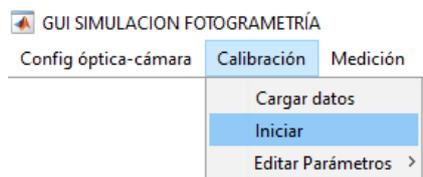


Figura 2.8. Iniciar la calibración.

### 2.1.2.1. CALIBRACIÓN INTRÍNSECA

#### Parametrización

Por defecto, se establecen dos coeficientes de distorsión radial y están desactivados la distorsión tangencial y el *skew* (Figura 2.9). En caso de no querer modificar estos parámetros, se puede pasar directamente a la preparación de la calibración intrínseca (ver apartado Preparación de la calibración intrínseca).

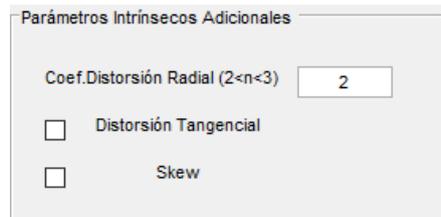


Figura 2.9. Parámetros intrínsecos adicionales relacionados con los defectos ópticos y de montaje.

#### Pasos

1. Rellenar campos (opcional):
  - **Coefficientes de distorsión radial:** número de coeficientes que modelan la distorsión radial. Admite dos coeficientes (K1, K2, 0) o tres coeficientes (K1, K2, K3).
  - **Distorsión tangencial:** modela la falta de paralelismo entre la lente y el sensor a través de dos coeficientes (p1, p2).
  - **Skew:** es una constante que hace referencia a la falta de perpendicularidad entre los ejes x e y de los píxeles del sensor.

#### Preparación de la calibración intrínseca

Se define el patrón tipo tablero de ajedrez (*checkerboard*) y el posicionamiento de la cámara con respecto a él (Figura 2.10).

Figura 2.10. Panel “Preparación de la calibración intrínseca”.

Pasos:

1. Rellenar campos obligatorios (Figura 2.10):
  - **Dimensiones del patrón:** número de cuadrados en la dirección X e Y del patrón en el sistema de coordenadas local del patrón. La dirección del eje X siempre se establece en el lado con mayor número de cuadrados (Figura 2.11). El número de cuadrados en una dirección debe ser par y en la otra impar, con el fin de evitar ambigüedades en la rotación. El sistema de coordenadas del patrón se sitúa en la esquina inferior derecha del cuadrado superior izquierdo del tablero.

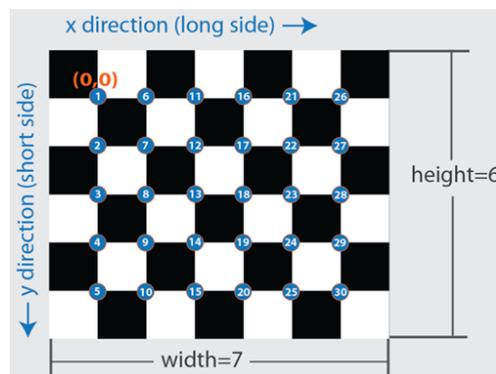


Figura 2.11. Forma en la que se definen los ejes locales del patrón de calibración.

- **Profundidad en Z:** distancia de los puntos del patrón con respecto al eje Z de su sistema de coordenadas local [mm]. En patrones coplanares, este parámetro es cero ( $z \approx 0$ ).
  - **Tamaño del cuadrado:** dimensión del lado de los cuadrados del patrón [mm].
  - **Distancia cámara-patrón:** distancia relativa de la cámara con respecto al patrón, medido desde el centro del patrón [mm]. Para que la cámara se sitúe detrás del patrón, el valor en Z debe ser negativo.
  - **Número de poses:** número de poses del patrón que se emplean para calcular la calibración intrínseca. Por defecto, la simulación se realiza con 12 poses.
2. Pulsar botón “GENERAR PUNTOS PARA N POSES”: se generan 12 poses cuyos números de identificación ID se muestran en la tabla (Figura 2.12). En la gráfica (Figura 2.13 a)), se muestran los puntos; es decir, los vértices de los cuadrados del patrón.

Generar poses patrón

Porcentaje umbral relativo de visibilidad [%]

Porcentaje global de visibilidad [%]

Número de poses

Selecc	ID.Pose patrón	Porcentaje visible [%]	Ver Pto no visible
<input type="checkbox"/>	1		<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	2		<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	3		<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	4		<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	5		<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	6		<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	7		<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	8		<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	9		<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	10		<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	11		<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	12		<input type="checkbox"/>

Error de píxel [px]

Figura 2.12. Generación de las poses del patrón.

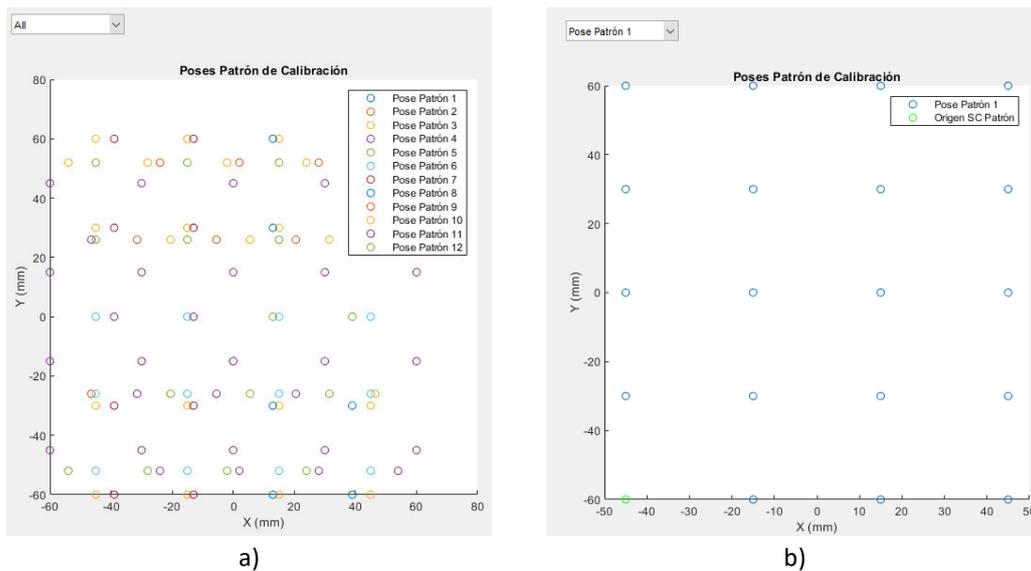


Figura 2.13. Puntos de las poses del patrón generadas: a) todas las poses. b) pose patrón 1.

### 3. Rellenar campos obligatorios:

- **Error píxel:** es la desviación considerada en el cálculo del centro de los objetivos (puntos del patrón) respecto al nominal durante el procesamiento de los datos sintéticos [pixel]. Valores de referencia (de mayor a menor precisión): 0.03; 0.1; 0.3.

### 4. Pulsar botón "REPROYECCIÓN": se proyectan los puntos de las poses definido en coordenadas 3D al plano de la imagen (2D). Se obtiene los siguientes resultados (Figura 2.14):

- **Porcentaje visible:** porcentaje de puntos visibles en cada pose (Columna de la tabla: "Porcentaje visible") [%].
- **Porcentaje global de visibilidad:** porcentaje de puntos visibles, considerando todas las poses [%].

Selecc	ID.Pose patrón	Porcentaje visible [%]	Ver Pto no visible
<input checked="" type="checkbox"/>	1	100	<input type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/>	2	100	<input type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/>	3	100	<input type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/>	4	100	<input type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/>	5	100	<input type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/>	6	100	<input type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/>	7	100	<input type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/>	8	100	<input type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/>	9	100	<input type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/>	10	100	<input type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/>	11	100	<input type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/>	12	100	<input type="checkbox"/>

Figura 2.14. Porcentaje visible y porcentaje global de visibilidad.

5. Pulsar botón “GUARDAR”: se habilita el botón “Calibración Intrínseca” del “MenúCalibración” (Figura 2.15).

Figura 2.15. Habilitación del botón “Calibración Intrínseca”.

#### Funciones adicionales:

- Menu desplegable “ID.Pose patrón”: permite mostrar en la gráfica la pose seleccionada o todas a la vez.
- Edición de dos columnas de la tabla:
  - “Selecc”: se puede seleccionar/deseleccionar las poses a considerar para el calculo de la calibración intrínseca. Por defecto se encuentran todas activadas. Se recomienda usar todas las poses, para facilitar la convergencia en los cálculos posteiores.

- “Ver Pto no visible”: se puede mostrar en la gráfica, los puntos no visibles y su número de identificación (ID). Para usarse debe seleccionar una pose en el menú desplegable, con un porcentaje de visibilidad menor del 100% (Figura 2.16a) y activar en la tabla la casilla de dicha pose (Figura 2.16b)).

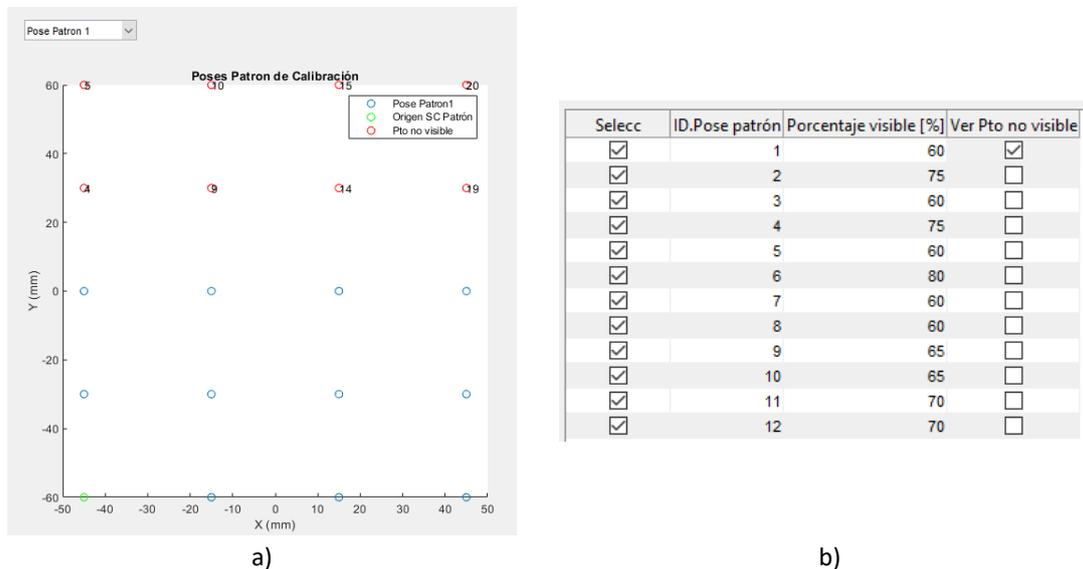


Figura 2.16. Visualización de los puntos no visibles de la pose patrón 1: a) seleccionar la pose en el menú desplegable; b) activar la casilla correspondiente de dicha pose.

- Edición del porcentaje umbral relativo de visibilidad (Figura 2.17): permite seleccionar automáticamente las poses cuyo porcentaje sea mayor que dicho valor. Esta opción es útil, cuando se generan una gran cantidad de poses.

Pasos:

1. Activar la casilla situada al lado del botón “ACTUALIZAR”.
2. Introducir un valor.
3. Pulsar botón “ACTUALIZAR”.

Generar poses patrón

Porcentaje umbral relativo de visibilidad [%]   ACTUALIZAR

Porcentaje global de visibilidad [%]

Número de poses

Selecc	ID.Pose patrón	Porcentaje visible [%]	Ver Pto no visible
<input type="checkbox"/>	1	60	<input type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/>	2	75	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	3	60	<input type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/>	4	75	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	5	60	<input type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/>	6	80	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	7	60	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	8	60	<input type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/>	9	65	<input type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/>	10	65	<input type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/>	11	70	<input type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/>	12	70	<input type="checkbox"/>

Figura 2.17. Selección automática de las poses patrón a partir de un porcentaje umbral.

### Calibración intrínseca

Los resultados que se obtienen son los siguientes (Figura 2.18):

- **Parámetros intrínsecos:**
  - Distancia focal: distancia normal entre el centro de proyección y el plano de la imagen, definido en componentes X e Y respecto del sistema de coordenadas de la cámara [píxeles].
  - Punto principal: coordenadas de la intersección del eje Z del sistema de coordenadas de la cámara (eje de proyección) sobre el plano de la imagen, respecto del sistema de coordenadas píxel del plano de la imagen (situado en la parte superior izquierda) [píxeles].
  - Coeficientes de distorsión radial: K1, K2 y K3.
  - Coeficientes de distorsión tangencial: p1 y p2.
  - Skew
- **Estimación de la incertidumbre de los parámetros intrínsecos:** se estima con un nivel de confianza del 95% ( $2 \cdot \sigma$ ).
- **Otros resultados:**
  - Visualización del escenario de la calibración intrínseca.
  - Diagrama de barras del error de reproyección medio correspondiente a cada pose y el error global medio [píxeles].

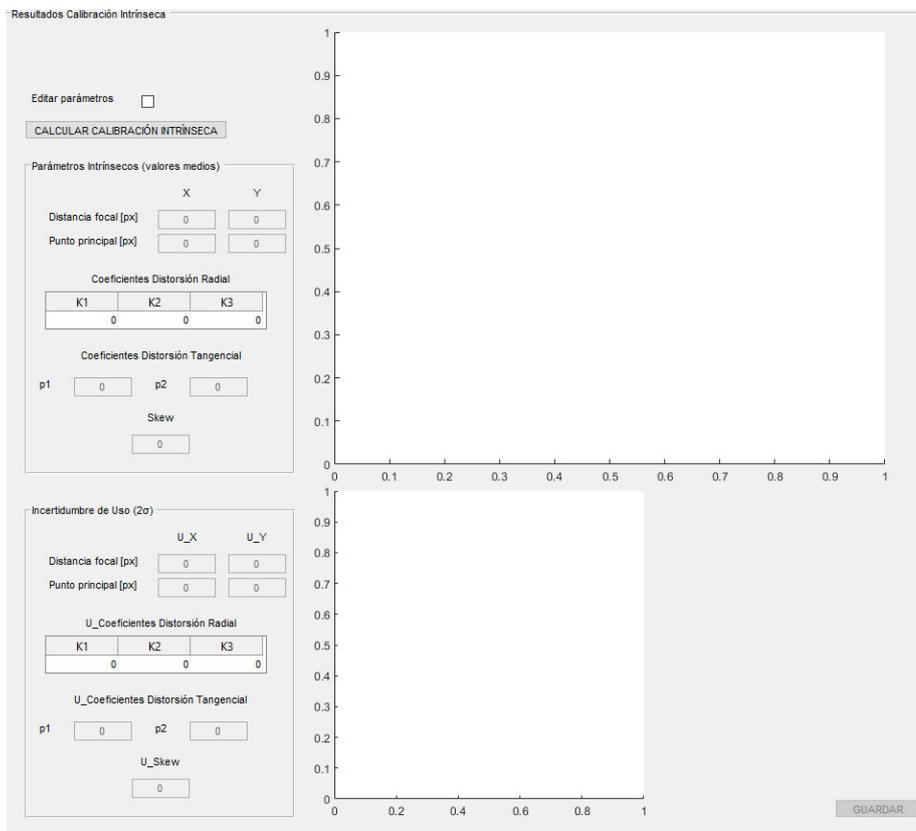


Figura 2.18. Panel “Resultados calibración intrínseca”.

**Pasos:**

1. Pulsar botón “CALCULAR CALIBRACIÓN INTRÍNSECA”: se muestran los siguientes valores (Figura 2.19 y Figura 2.20):

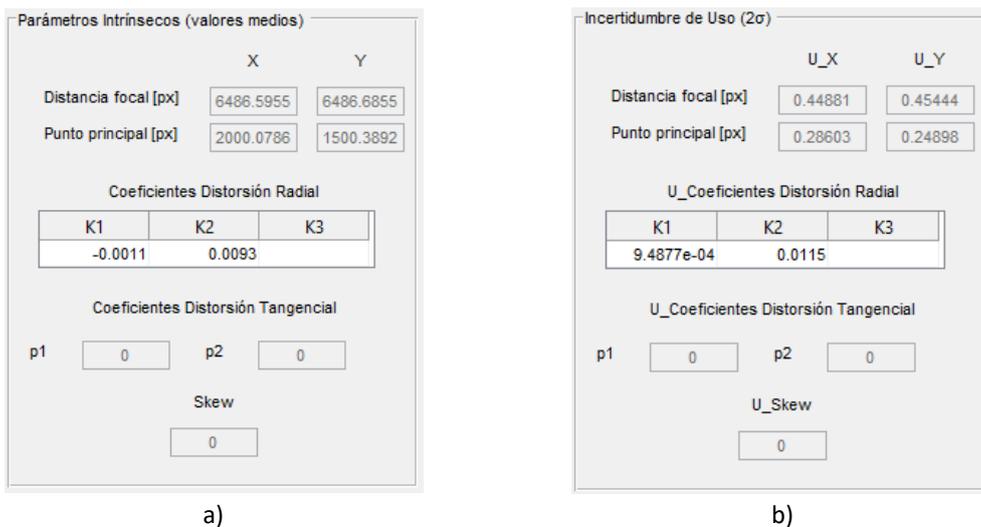


Figura 2.19. Resultados de la calibración intrínseca: a) parámetros intrínsecos; b) estimación de la incertidumbre.

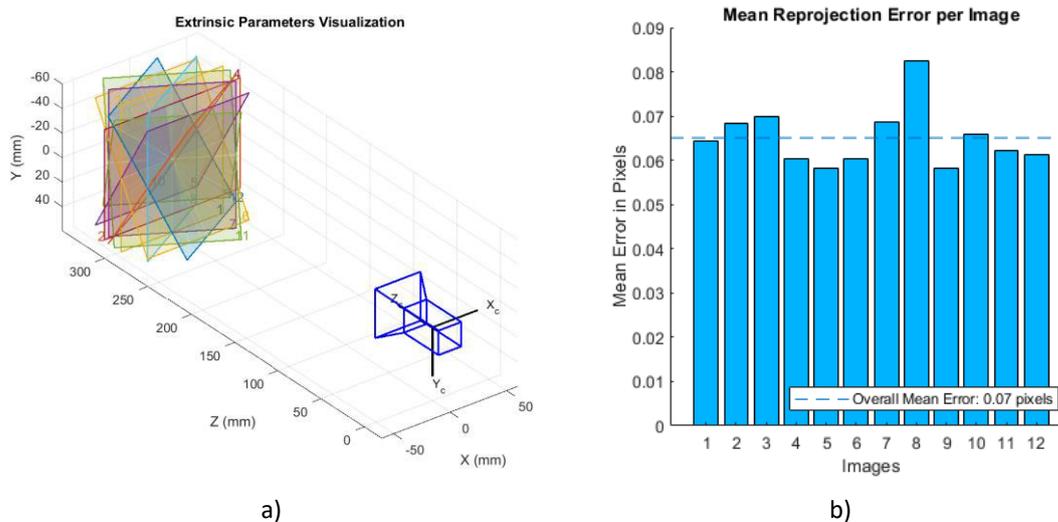


Figura 2.20. Otros resultados de la calibración intrínseca: a) escenario de calibración; b) error de reproyección.

2. Pulsar botón "GUARDAR": se habilita el botón "Preparación Extrínseca" (Figura 2.21). También, da acceso a introducir los parámetros extrínsecos de las cámaras (2.1.2.3. EDITAR PARÁMETROS INTRÍNSECOS Y EXTRÍNSECOS).

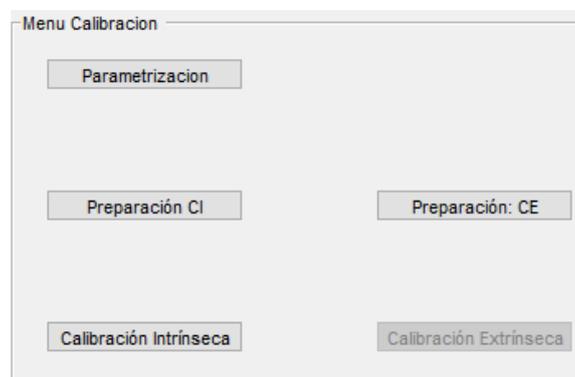


Figura 2.21. Habilitación del botón "Preparación CE".

### Cálculo de los parámetros intrínsecos adicionales (Figura 2.21)

#### Pasos:

1. Pulsar botón "Parametrización" en el menú de calibración.
2. Activar los parámetros adicionales y/o cambiar el número de coeficientes de distorsión radial (Figura 2.21).

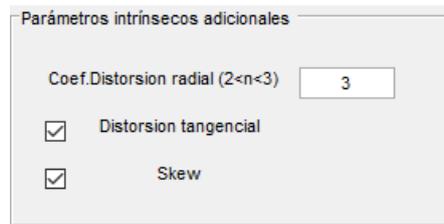


Figura 2.22. Activación de la distorsión tangencial y del skew y aumento del número de coeficientes de distorsión radial a 3.

3. Pulsar botón “Calibración intrínseca” en el menú de calibración.
4. Pulsar botón “CALCULAR PARÁMETROS INTRINSECOS”.
5. Pulsar botón “GUARDAR”.

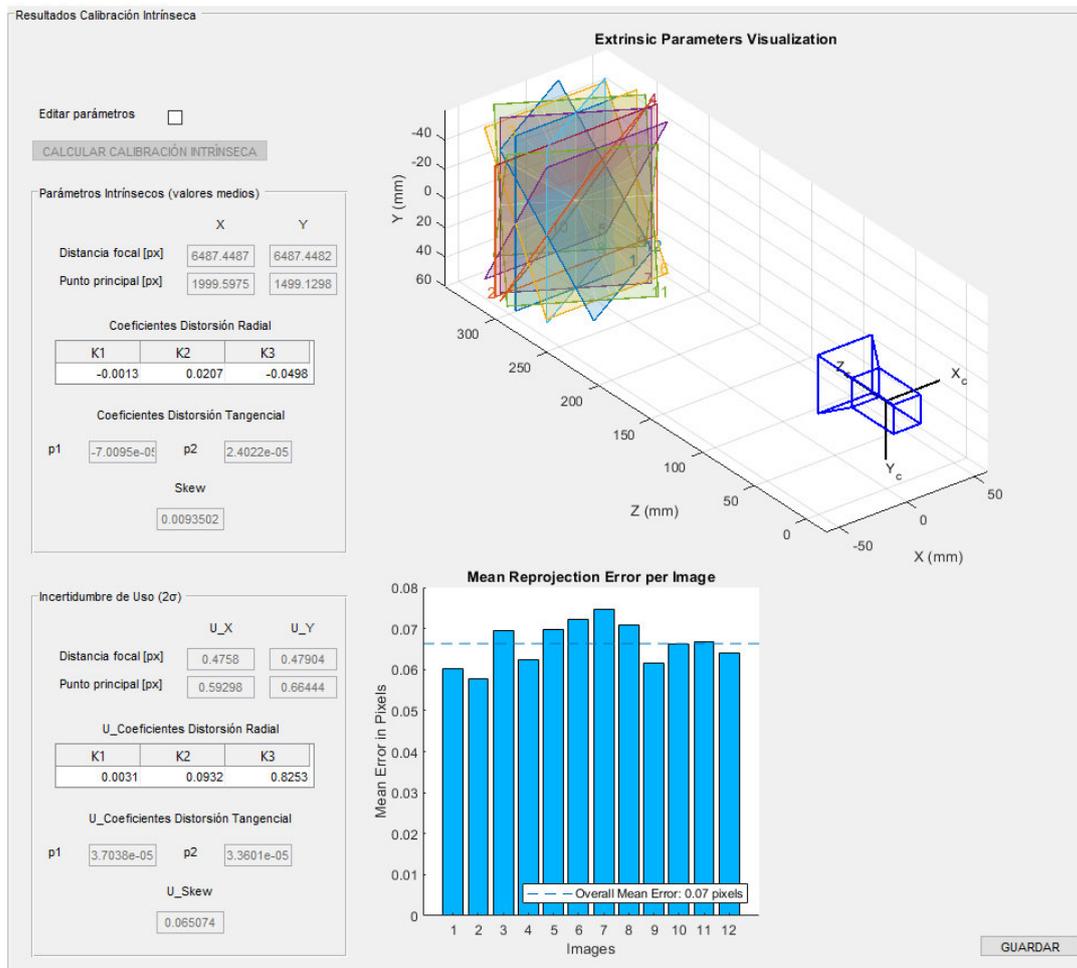


Figura 2.23. Cálculo de los parámetros intrínsecos adicionales indicados.

### Capacidad de estudio de los siguientes factores en la influencia de la calibración intrínseca:

1. Dimensiones del patrón
2. Profundidad en Z de los puntos del patrón
3. Distancia cámara - patrón
4. Error píxel
5. Porcentaje de puntos detectados
6. Número de poses patrón
7. Parámetros adicionales (distorsión radial, tangencial, skew)

### Notas:

- Posicionar la cámara lo más cerca posible del patrón, (siempre que las características de la lente lo permitan) para obtener la mayor precisión en los resultados.
- Si en la visualización de la cámara-patrón, la distancia no coincide con los valores de entrada, significa que el algoritmo no ha convergido de forma correcta, posiblemente por falta de puntos detectados.

### **2.1.2.2. CALIBRACIÓN EXTRÍNSECA**

#### **Preparación de los puntos de referencia**

La preparación de los puntos de referencia consiste en definir los puntos de referencia y en asignarles una incertidumbre, asociada al instrumento usado para medirlos (Figura 2.24).

Los puntos de referencia se pueden generar de tres formas: importación desde el fichero "CargarPuntosRef.mat" en la carpeta "datosPrueba", generación manual de las coordenadas y definición de una red de puntos. Cuando se haga uso de una de ellas, las otras dos se inhabilitarán.

El botón "Cancelar" permite reiniciar la pantalla actual y volver a generar los puntos de referencia y aplicar la incertidumbre.

Preparación Puntos Referencia Calibración Extrínseca

**Cargar puntos de referencia 3D**

Cant.puntos

ID.Pt	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]

**Aplicar incertidumbre a los puntos de referencia**

Incertidumbre [micras]

**Generar manualmente puntos de referencia 3D**

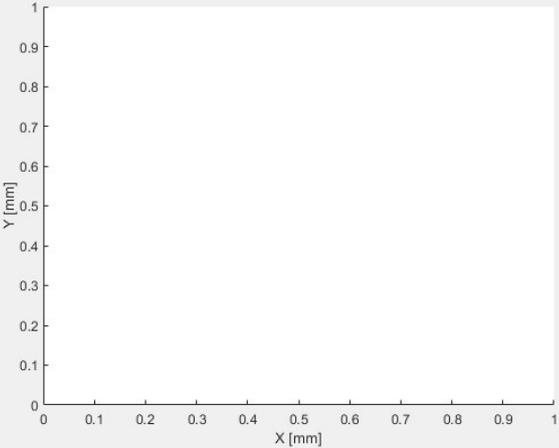
Cant.puntos

Selecc	ID.Pt	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]

**Generar red puntos de referencia 3D**

Nombre

	Min [mm]	Máx [mm]	NºPtos
X	-60	60	5
Y	-45	45	4
Z	0	0	1



Y [mm]  
X [mm]

Figura 2.24. Panel “Preparación puntos calibración extrínseca”.

Pasos:

1. Generar/cargar los puntos de referencia (ver apartado 3.1.2. PREPARACIÓN DE LOS PUNTOS): se visualizan los puntos en la gráfica (Figura 2.25).
2. Aplicar incertidumbre (ver apartado 3.1.2. PREPARACIÓN DE LOS PUNTOS).
3. Pulsar el botón “ACEPTAR” y el botón “SIGUIENTE”.

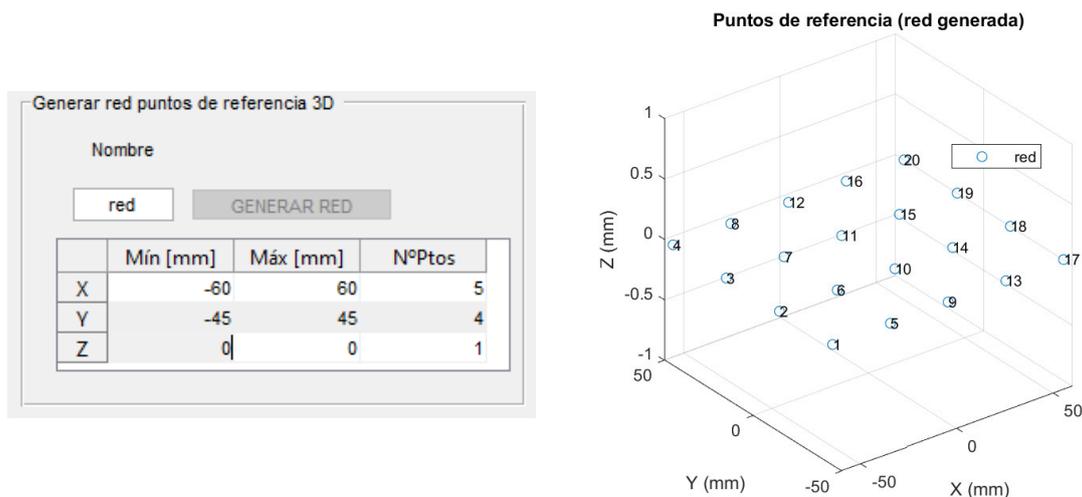


Figura 2.25. Generación de los puntos de referencia mediante una red de puntos.

### Preparación de las cámaras

Se definen las poses de las cámaras y los puntos de referencia a considerar para la calibración extrínseca (Figura 2.26).

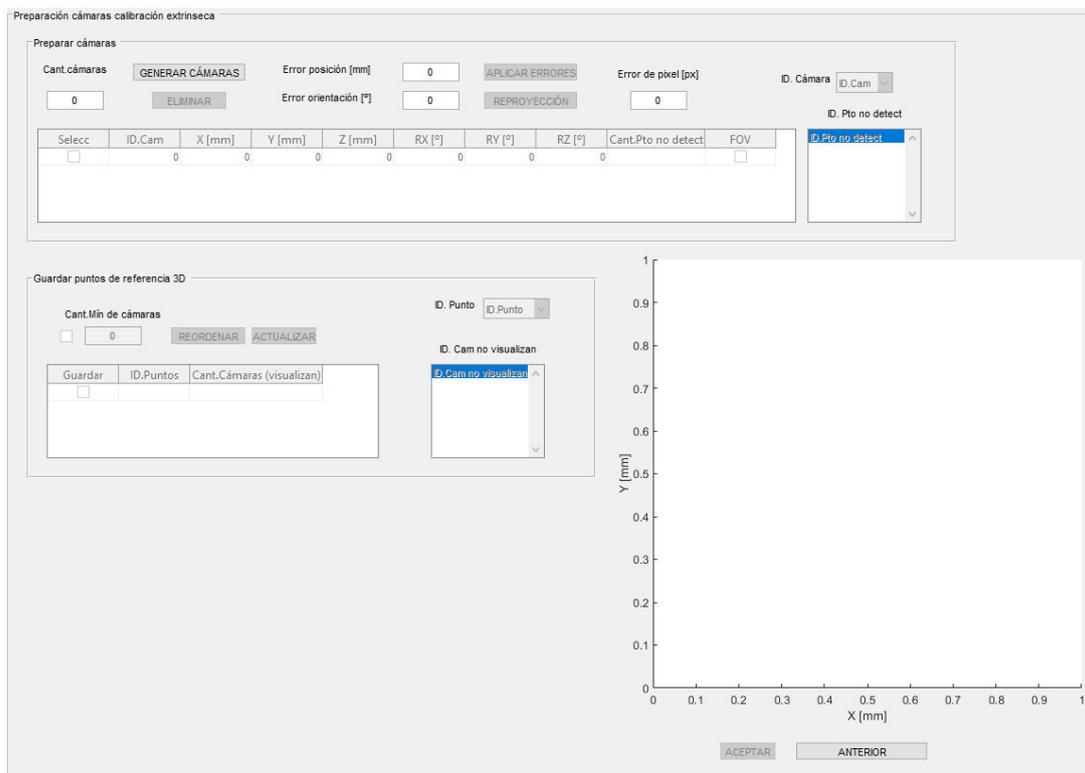
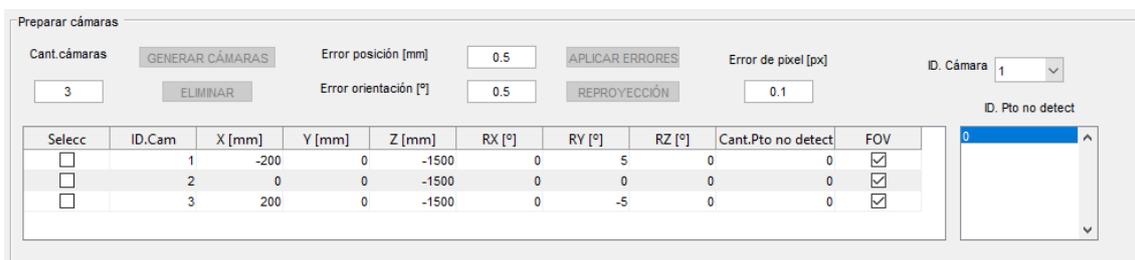


Figura 2.26. Panel "Preparación de las cámaras".

Pasos:

1. Rellenar campos obligatorios (Figura 2.27):

- **Cant. Cámaras:** número de cámaras.
- **Tabla:** posición [mm] y orientación [°] de las cámaras (poses)
- **Error de posición:** diferencia entre el valor real y el nominal de la posición [mm].
- **Error de orientación:** diferencia entre el valor real y el nominal de la orientación [°].
- **Error píxel.**



Selecc	ID.Cam	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	RX [°]	RY [°]	RZ [°]	Cant.Pto no detect	FOV
<input type="checkbox"/>	1	-200	0	-1500	0	5	0	0	<input checked="" type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	2	0	0	-1500	0	0	0	0	<input checked="" type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	3	200	0	-1500	0	-5	0	0	<input checked="" type="checkbox"/>

Figura 2.27. Campos obligatorios en la preparación de las cámaras.

2. Pulsar botón “GENERAR CÁMARAS”: se generan las poses de las cámaras y se visualizan en la gráfica junto con los puntos de referencia creados anteriormente (Figura 2.28) y los conos de visión (FOV).

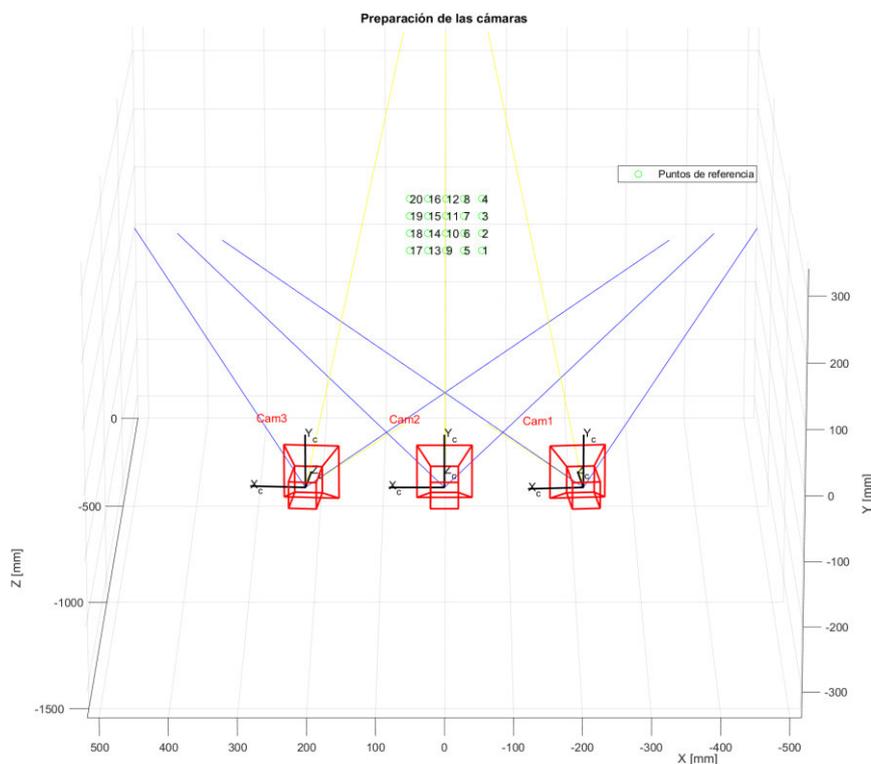


Figura 2.28. Visualización de las cámaras, de los conos de visión y de los puntos de referencia.

3. Pulsar botón “APLICAR ERRORES”.
4. Pulsar botón “REPROYECCIÓN”: se proyectan los puntos de referencia definido en coordenadas 3D al plano de la imagen (2D) y se calcula el número de puntos no detectados por cada cámara (columna: “Cant.Pto no detect”).
5. Pulsar botón “REORDENAR”: permite conocer la cantidad de cámaras que detecta cada punto y su identificación. También, por defecto se seleccionan los puntos de referencia, que son detectados por dos o más cámaras para usarlos en la calibración extrínseca (Figura 2.30).

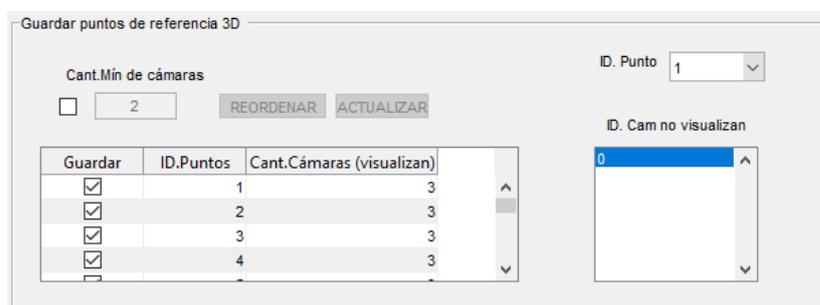


Figura 2.29. Cantidad de cámaras que detecta cada punto y la ID de las cámaras que no detectan.

6. Pulsar botón “ACEPTAR”: se habilita el botón “Calibración extrínseca” (Figura 2.30).

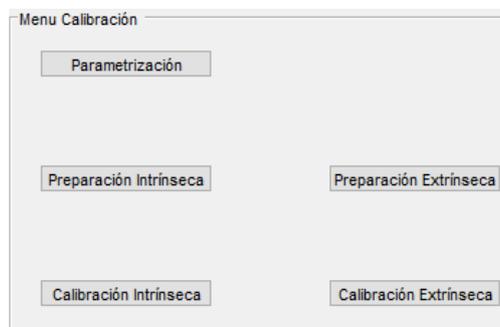


Figura 2.30. Habilitación del botón “Calibración extrínseca”.

#### Funciones adicionales:

- Los conos de visión se pueden ocultar desactivando las casillas de la columna “FOV” de la tabla (Figura 2.31).

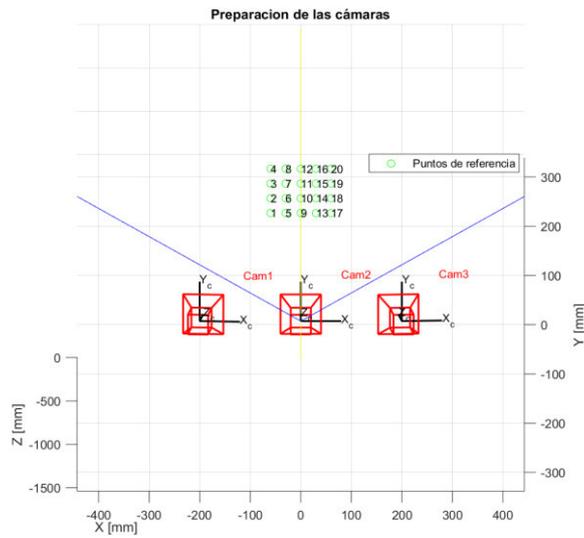


Figura 2.31. Ocultación de los conos de visión de la cámara 1 y cámara 3.

- Menú desplegable “ID Cámara”: se pueden identificar en la gráfica, los puntos no detectados de cada cámara (Figura 2.32).

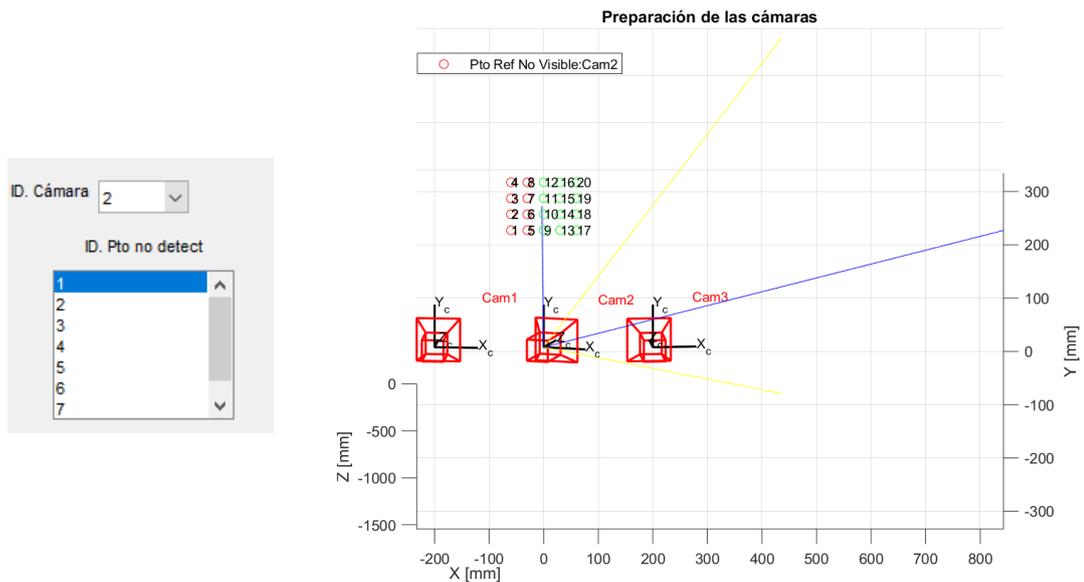


Figura 2.32. Identificación (ID) de los puntos no detectados. Cámara 2.

- Menú desplegable “ID Punto”: se pueden identificar las cámaras que no detectan cada punto (Figura 2.33).

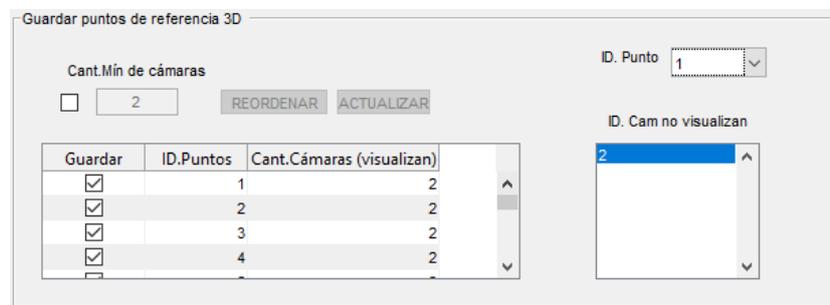


Figura 2.33. ID de la cámara que no detecta el punto 5.

- Columna “Guardar”: se puede añadir manualmente puntos que por defecto se habían desactivado.
- Checkbox “Cant Mín de cámaras”: permite introducir un número de cámaras umbral, para descartarlos puntos que no superen dicho valor (Figura 2.34).

Pasos:

1. Activar checkbox.
2. Introducir el número de cámaras umbral.
3. Pulsar botón “ACTUALIZAR”
4. Pulsar botón “ACEPTAR”.

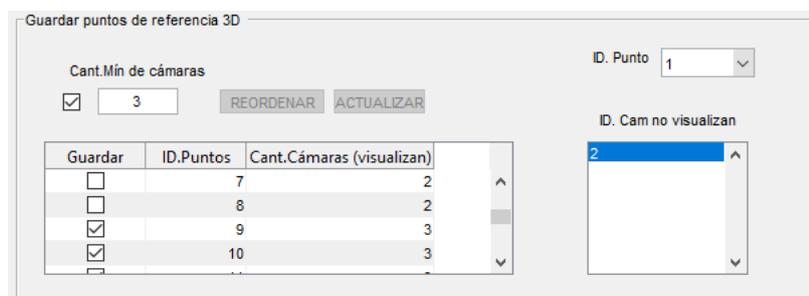


Figura 2.34. Selección de los puntos de referencia mediante un número de cámaras umbral.

**Calibración extrínseca**

Se dispone de dos métodos en la calibración extrínseca (Figura 2.35): resección individual (por defecto) y resección conjunta. La resección individual emplea la función “extrinsics” del toolbox “Computer Vision” de Matlab. Calcula las poses de las cámaras de manera individual, minimizando el error de reproyección. Se necesitan al menos 4 puntos de referencia. La resección conjunta usa las funciones de la librería “MOSAIC”, considerando el mínimo error de todo el conjunto de las poses. Se necesitan al menos 2 cámaras.

Los resultados que se obtienen son los siguientes (Figura 2.35):

- **Valor medio de las poses de las cámaras:**
  - Posición [mm].
  - Orientación [°].
  
- **Estimación de la incertidumbre de uso:** se estima con un nivel de confianza del 95% ( $2 \cdot \sigma$ ).
  - Posición [mm].
  - Orientación [°].
  
- **Otros resultados:**
  - Verificación de la calibración: consiste en medir mediante triangulación las posiciones 3D de los puntos de referencia con las poses obtenidas y con ello obtener la corrección media [mm].
  - Visualización de la calibración extrínseca: se visualiza los puntos de referencia (valores nominales), los puntos de referencia medidos con triangulación y las poses de las cámaras.
  - Histogramas: corrección media de los puntos de referencia en magnitud y descompuestos en la dirección X, Y, Z y desviación estándar [mm].
  - Diagrama de barras: muestra el error de reproyección medio por cada cámara y el global [px].

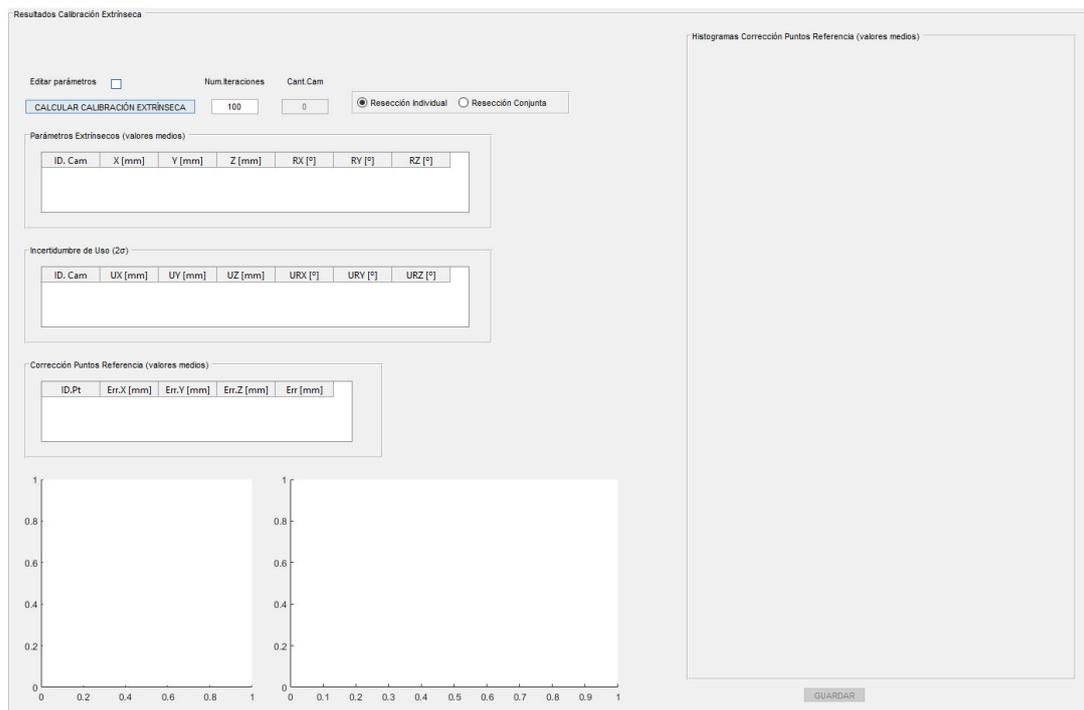


Figura 2.35. Panel “Resultados calibración extrínseca”.

**Pasos:**

1. Seleccionar el método de calibración extrínseca.
2. Rellenar campos obligatorios:
  - **Número de iteraciones:** es la cantidad de mediciones que se realizan para obtener el valor medio y estimar la incertidumbre de uso.
3. Pulsar botón “CALCULAR PARÁMETROS EXTRÍNSECOS”: se muestran los siguientes valores con resección conjunta (Figura 2.36, Figura 2.37, Figura 2.38, Figura 2.39, Figura 2.41, Figura 2.40):

Parámetros Extrínsecos (valores medios)						
ID. Cam	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	RX [°]	RY [°]	RZ [°]
1	-200.0547	0.0257	-1.5000e+03	0.0072	4.9953	0.0077
2	-0.0023	-0.0135	-1.5000e+03	0.0100	-0.0084	-0.0120
3	200.0566	0.0284	-1.5000e+03	-0.0138	-4.9916	0.0013

Figura 2.36. Valores medios de las poses de las cámaras.

ID. Cam	UX [mm]	UY [mm]	UZ [mm]	URX [°]	URY [°]	URZ [°]
1	0.1461	0.0591	0.0434	0.0326	0.0312	0.0304
2	0.0350	0.0483	0.0400	0.0355	0.0339	0.0375
3	0.1523	0.0644	0.0577	0.0388	0.0356	0.0284

Figura 2.37. Estimación de la incertidumbre de uso de las poses de las cámaras.

ID.Pt	Err.X [mm]	Err.Y [mm]	Err.Z [mm]	Err [mm]
3	0.0420	-0.0461	0.0564	0.0841
4	0.0877	-0.0384	0.0542	0.1100
5	0.0375	-0.0475	0.0605	0.0856

Figura 2.38. Corrección media de los puntos de referencia medidos.

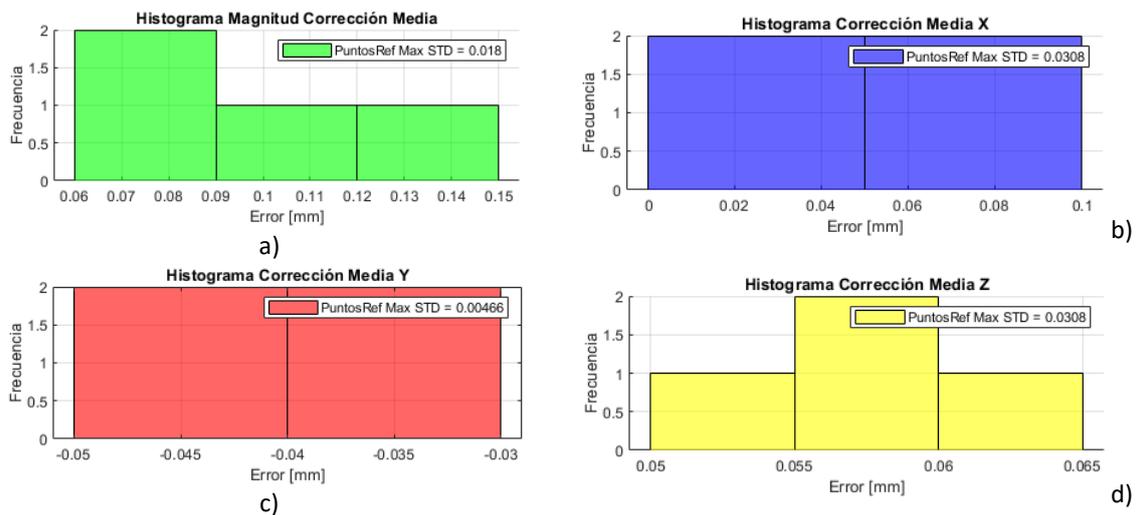


Figura 2.39. Histogramas de la corrección media de los puntos de referencia medidos y desviación estándar: a) Magnitud, b) Eje X; c) Eje Y; d) Eje Z.

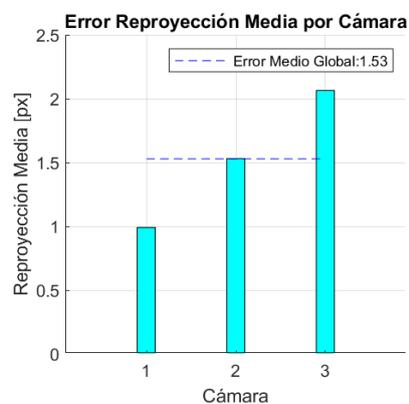


Figura 2.40. Error de reproyección media por cada cámara y global en la calibración extrínseca.

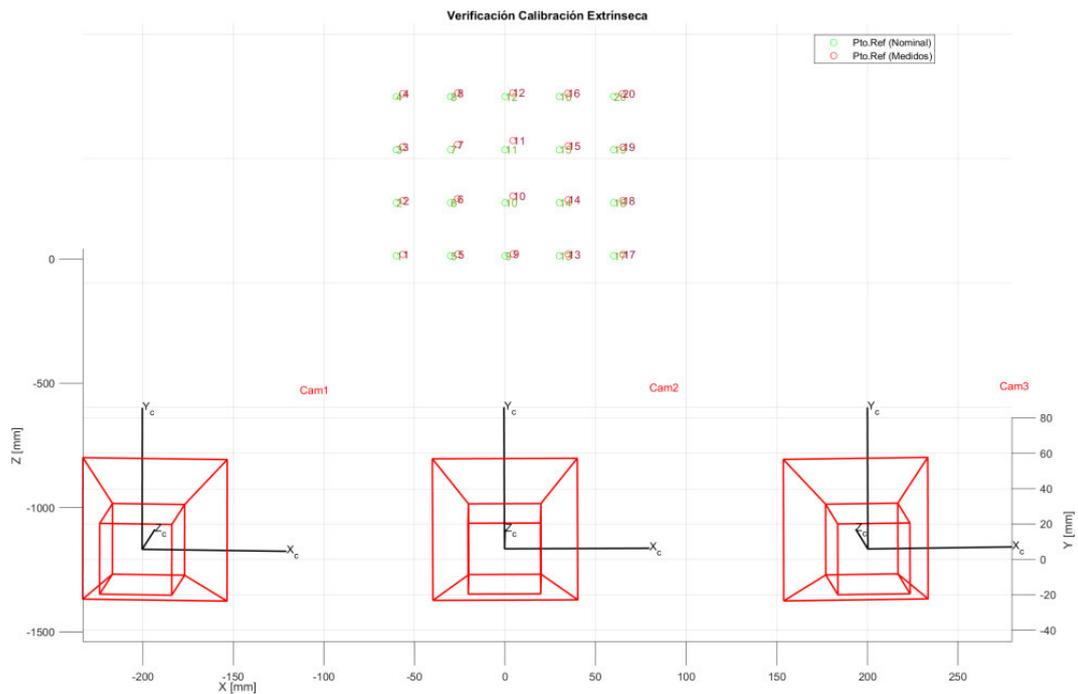


Figura 2.41. Visualización de las poses de las cámaras calculadas, y de los puntos de referencia nominales y medidos por triangulación

- Pulsar botón “GUARDAR”: se habilita el botón “Método” y “Preparación triangulación”(por defecto) en el menú de medición (Figura 2.42).

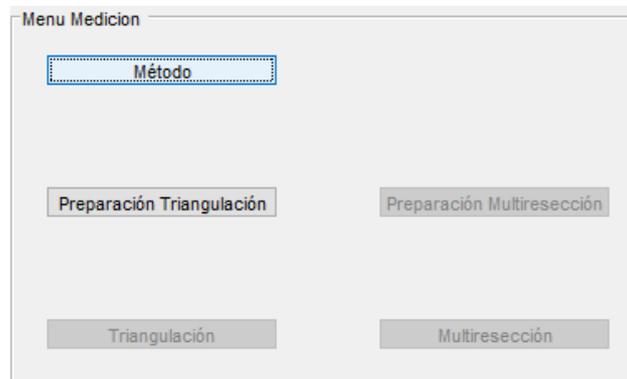


Figura 2.42. Habilitación de los botones “Método” y Preparación triangulación” en el menú de medición.

Notas:

- Si la calibración extrínseca se realiza con un *chessboard*, la forma más rápida de generar los puntos de referencia es mediante una red de puntos.
- Colocar los puntos de referencia lo más cerca posible de la visión de las cámaras, para obtener las poses de las cámaras con mayor precisión.

Capacidad de estudio de los siguientes factores en la influencia de la calibración extrínseca:

1. Distribución de los puntos de referencia.
2. Número de puntos de referencia.
3. Incertidumbre asociada a los puntos de referencia.
4. Número de cámaras.
5. Distribución de las cámaras.
6. Error de posición de las cámaras.
7. Error de orientación de las cámaras.
8. Error de píxel.
9. Método de cálculo: minimización del error individual o conjunta.
10. Calibración intrínseca.

**2.1.2.3. EDITAR PARÁMETROS INTRÍNSECOS Y EXTRÍNSECOS**

Los parámetros de la calibración intrínseca y extrínseca se pueden editar una vez que se haya completado la pestaña “Config óptica-cámara”. De esta forma, si dichos valores son conocidos, se puede saltar todas las fases de calibración.

**Parámetros intrínsecos**

Pasos:

1. Completar la pestaña “Config óptica-cámara” (ver apartado 2.1.1. PESTAÑA: “Config óptica cámara”): se habilita dentro de la pestaña “Calibración” el ítem “Editar Parámetros intrínsecos” (Figura 2.43).

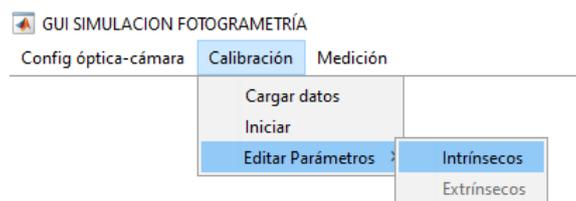


Figura 2.43. Acceso a la edición de los parámetros intrínsecos.

2. Activar la casilla “Editar parámetros”.
3. Rellenar campos obligatorios (Figura 2.44):
  - Distancia focal.
  - Punto principal.
  - Coeficientes de distorsión radial: K1, K2.
  - Incertidumbres: se consideran solamente valores positivos.

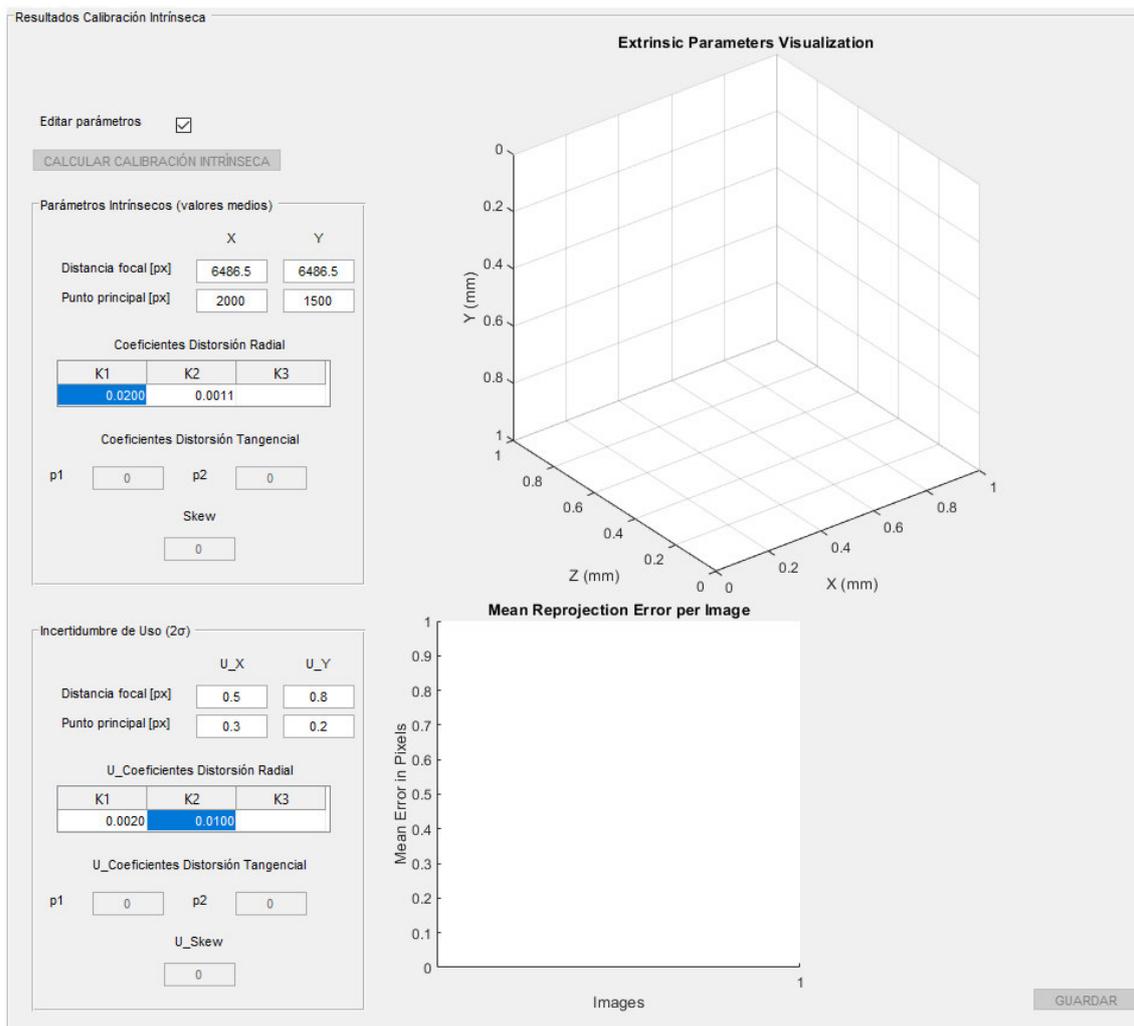


Figura 2.44. Edición de los parámetros intrínsecos.

4. Pulsar botón “GUARDAR”: se habilita dentro de la pestaña “Calibración” el ítem “Editar Parámetros extrínsecos”.

### **Introducir parámetros adicionales**

1. Pulsando el botón “Parametrización” del panel “Menú Calibración” e indicarlo (ver apartado Parametrización).

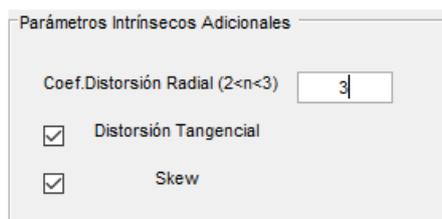


Figura 2.45. Parámetros intrínsecos adicionales.

2. Acceder de nuevo a la edición de los parámetros intrínsecos a través del ítem “Editar Parámetros intrínsecos”.
3. Activar la casilla “Editar parámetros”.
4. Rellenar campos adicionales (Figura 2.46)
5. Pulsar botón “GUARDAR”.

Resultados Calibración Intrínseca

Editar parámetros

CALCULAR CALIBRACIÓN INTRÍNSECA

Parámetros Intrínsecos (valores medios)

	X	Y
Distancia focal [px]	6846.5	6846.5
Punto principal [px]	2000	1500

Coefficientes Distorsión Radial

K1	K2	K3
0.0200	0.0011	0.0020

Coefficientes Distorsión Tangencial

p1: 0.42    p2: 0.13

Skew: 0.32

Incertidumbre de Uso (2σ)

	U_X	U_Y
Distancia focal [px]	0.5	0.8
Punto principal [px]	0.3	0.2

U\_Coefficientes Distorsión Radial

K1	K2	K3
0.0020	0.0100	0

U\_Coefficientes Distorsión Tangencial

p1: 0.15    p2: 0.8

U\_Skew: 0.002

GUARDAR

Figura 2.46. Edición de los parámetros intrínsecos adicionales.

### Parámetros extrínsecos

#### Pasos:

1. Completar la calibración intrínseca, bien realizando sus fases (ver apartado

CALIBRACIÓN INTRÍNSECA) o introduciendo los parámetros intrínsecos (ver apartado Parámetros intrínsecos).

2. Acceder al ítem “Editar Parámetros extrínsecos” (Figura 2.47).

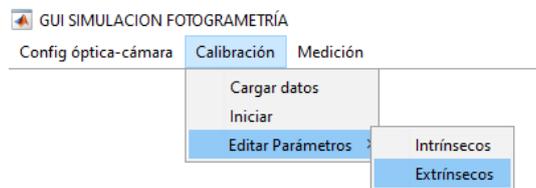


Figura 2.47. Acceso a la edición de los parámetros extrínsecos.

3. Activar la casilla “Editar parámetros”.

4. Introducir el número de cámaras (“Cant.Cam”)

5. Rellenar campos obligatorios (Figura 2.48):

- **Poses de las cámaras:** posición [mm] y orientación [°]
- **Incertidumbre de uso de las poses de las cámaras:** posición [mm] y orientación [°].

6. Pulsar botón “GUARDAR”: se habilita el botón “Método” y “Preparación Triangulación” del panel “Menú Medición” (ver apartado 2.1.3. PESTAÑA: “Medición”).

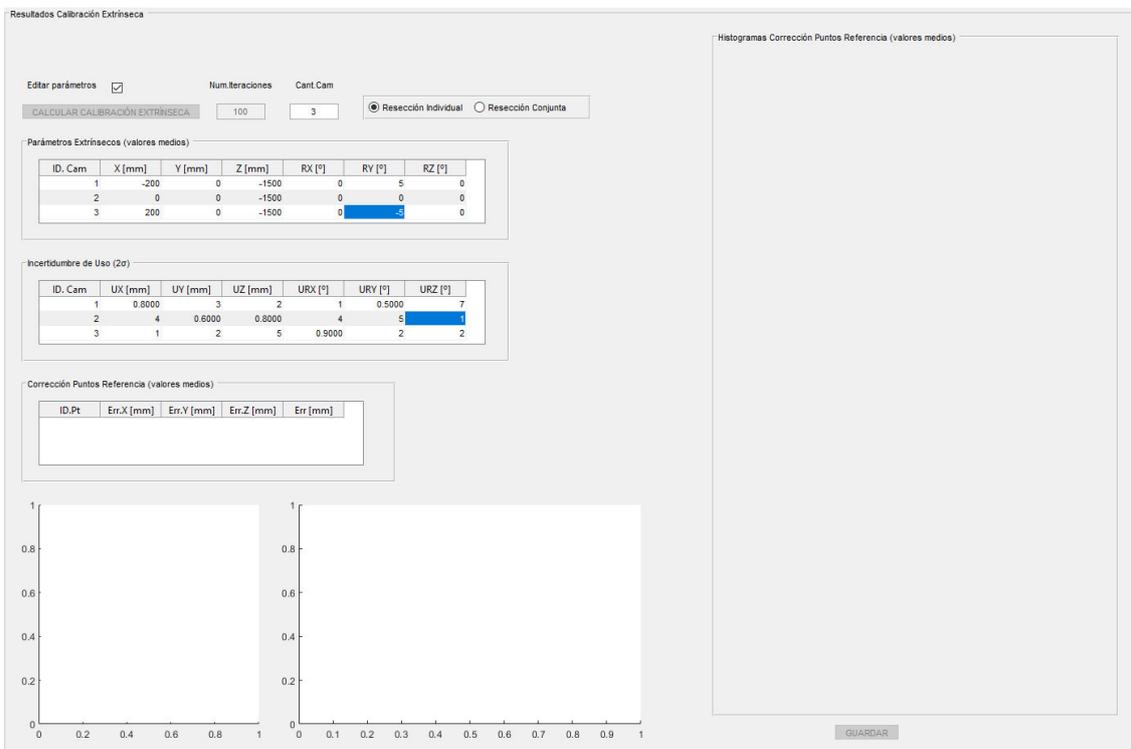


Figura 2.48. Edición de los parámetros extrínsecos.

### Funciones adicionales:

- Editar los resultados de los parámetros intrínsecos después de la calibración intrínseca.
- Editar los resultados de los parámetros extrínsecos después de la calibración extrínseca.

### Pasos:

1. Completar la calibración correspondiente
2. Activar la casilla de editar parámetros.
3. Editar los parámetros
4. Pulsar botón “GUARDAR”.

### **2.1.3. PESTAÑA: “Medición”**

En este software, existen dos tipos de mediciones: medición de puntos (triangulación) y medición de poses de un objeto (multiresección). Por defecto está habilitada la medición de puntos.

#### **2.1.3.1. MÉTODO DE MEDICIÓN**

Cuando se cambia de método de medición, se habilitan los botones correspondientes en el menú de medición (Figura 2.49).

### Pasos:

1. Pulsar el botón “Método” del menú de medición.
2. Seleccionar el método que no esté activado actualmente.

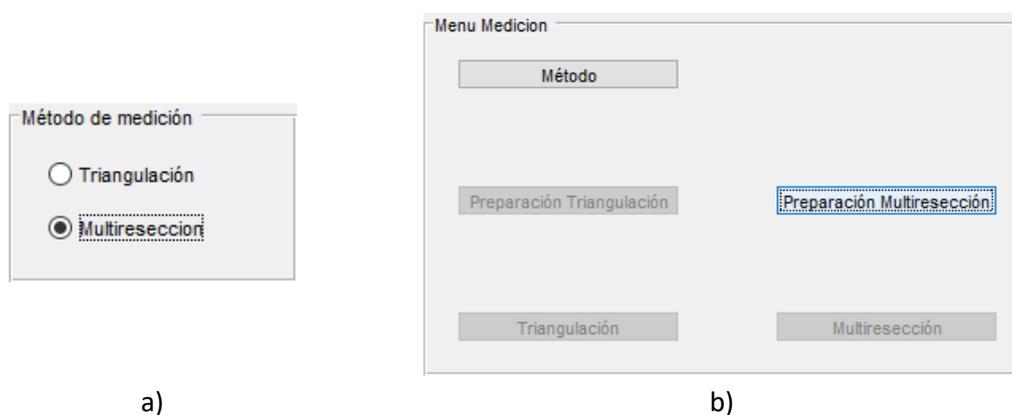


Figura 2.49. Método de medición: a) selección del método; b) habilitación del botón correspondiente a la preparación.

### 2.1.3.2. MEDICIÓN DE PUNTOS (TRIANGULACIÓN)

#### Preparación de los puntos a medir

Los puntos para medir se pueden generar de dos formas: importación desde el fichero “CargarPuntosMedir.mat” y generación manual de las coordenadas. Estos puntos están referenciados al sistema de referencia global (Figura 2.50).

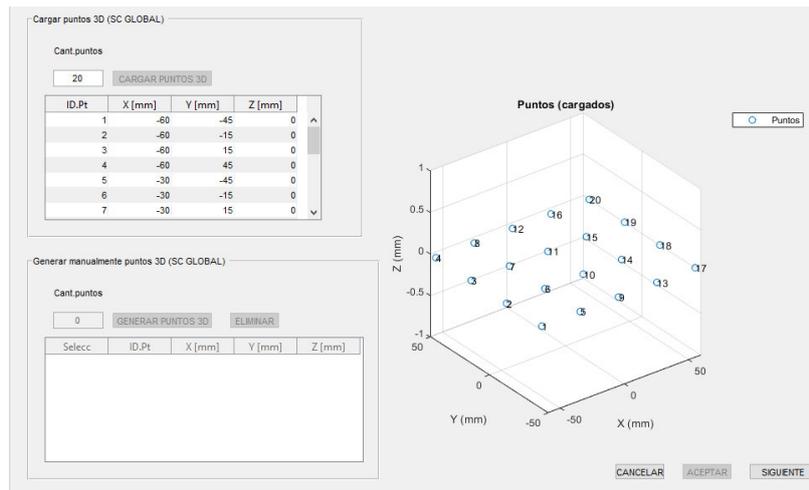


Figura 2.50. Panel “Preparación de los puntos a medir por triangulación (SC global)”.

#### Pasos:

1. Cargar/generar los puntos a medir (ver apartado 3.1.2. PREPARACIÓN DE LOS PUNTOS).
2. Pulsar botón “ACEPTAR” y el botón “SIGUIENTE”: se continúa con la preparación de los puntos (Figura 2.51).
3. Rellenar campos obligatorios:
  - Error píxel.
4. Pulsar botón “REPROYECCIÓN”: los puntos se re proyectan y se ordenan para indicar la cantidad de cámaras que visualizan cada punto e identificar las que no lo hacen (Figura 2.52).

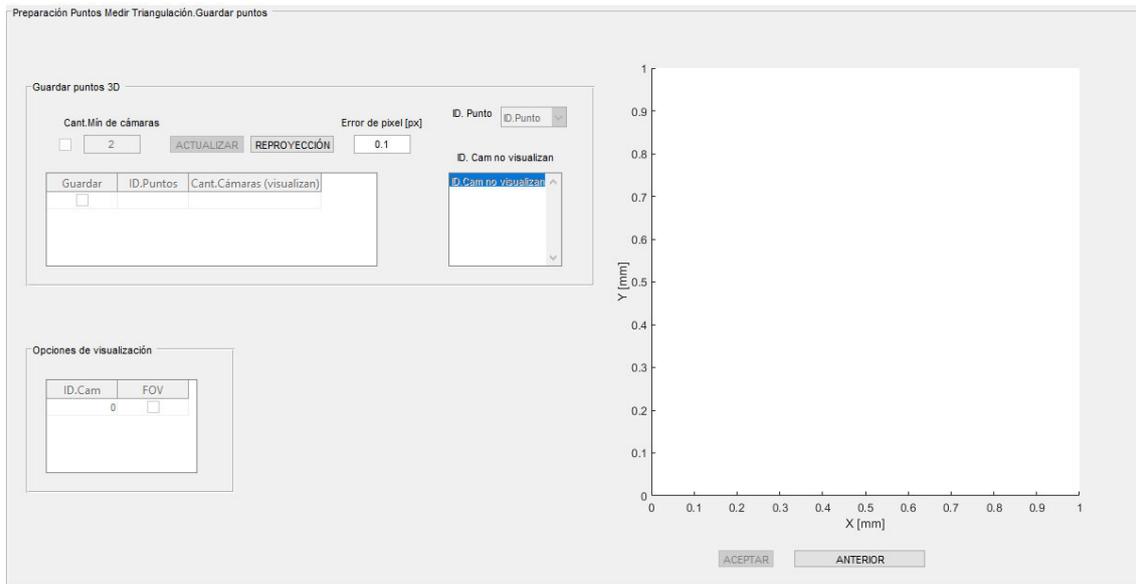


Figura 2.51. Panel “Preparación de los puntos a medir por triangulación (SC global)”.

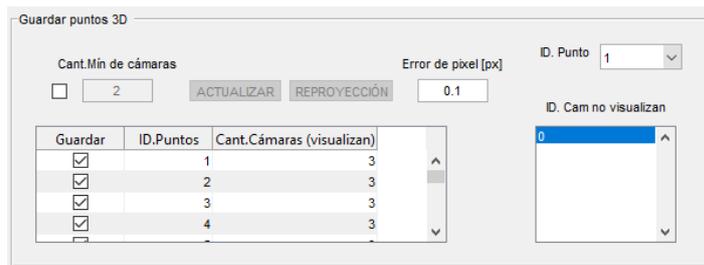


Figura 2.52. Selección de los puntos a medir por triangulación.

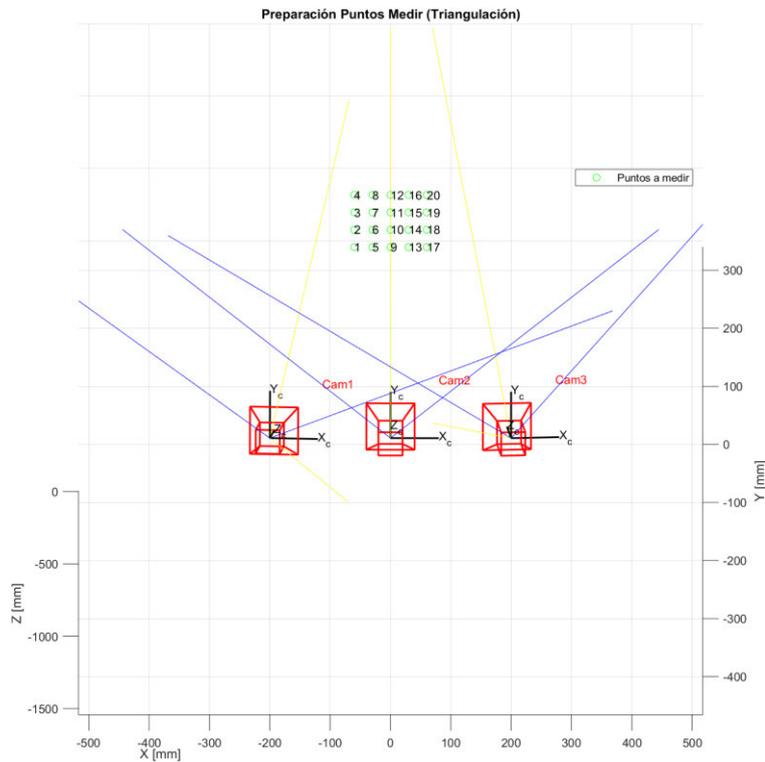


Figura 2.53. Visualización del escenario de medición.

5. Pulsar el botón “ACEPTAR”: se habilita el botón “Triangulación” del menú de medición (Figura 2.54).

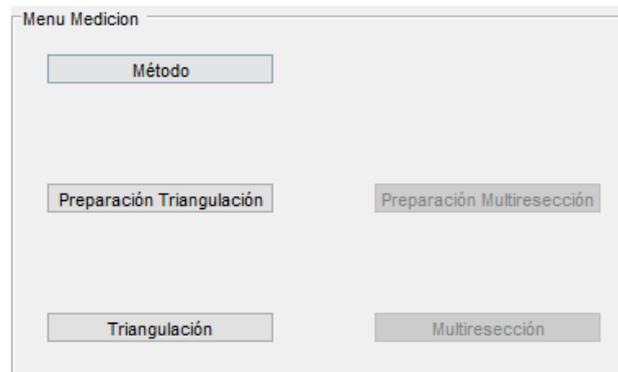


Figura 2.54. Habilitación del botón “Triangulación en el menú de medición.

### Funciones adicionales

- Incluyen las funcionalidades que aparecen en la preparación de la calibración extrínseca (ver apartado 0. Preparación de las cámaras), excepto el Menú desplegable “ID Cámara. Los conos de visión se pueden mostrar u ocultar con la siguiente tabla (Figura 2.55).

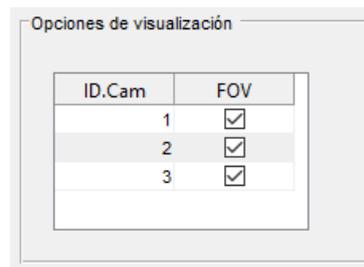


Figura 2.55.Activar/desactivar conos de visión.

### Triangulación

Los resultados que se obtienen son los siguientes (Figura 2.56):

- **Posición 3D de los puntos medidos [mm].**
- **Estimación de la incertidumbre de uso de la medición [mm]:** se estima con un nivel de confianza del 95% ( $2 \cdot \sigma$ ).
- **Otros resultados:**
  - Visualización de los puntos nominales, de los medidos y de las poses de las cámaras.
  - Histogramas: corrección media de los puntos medidos en magnitud y descompuestos en la dirección X, Y, Z y desviación estándar [mm].

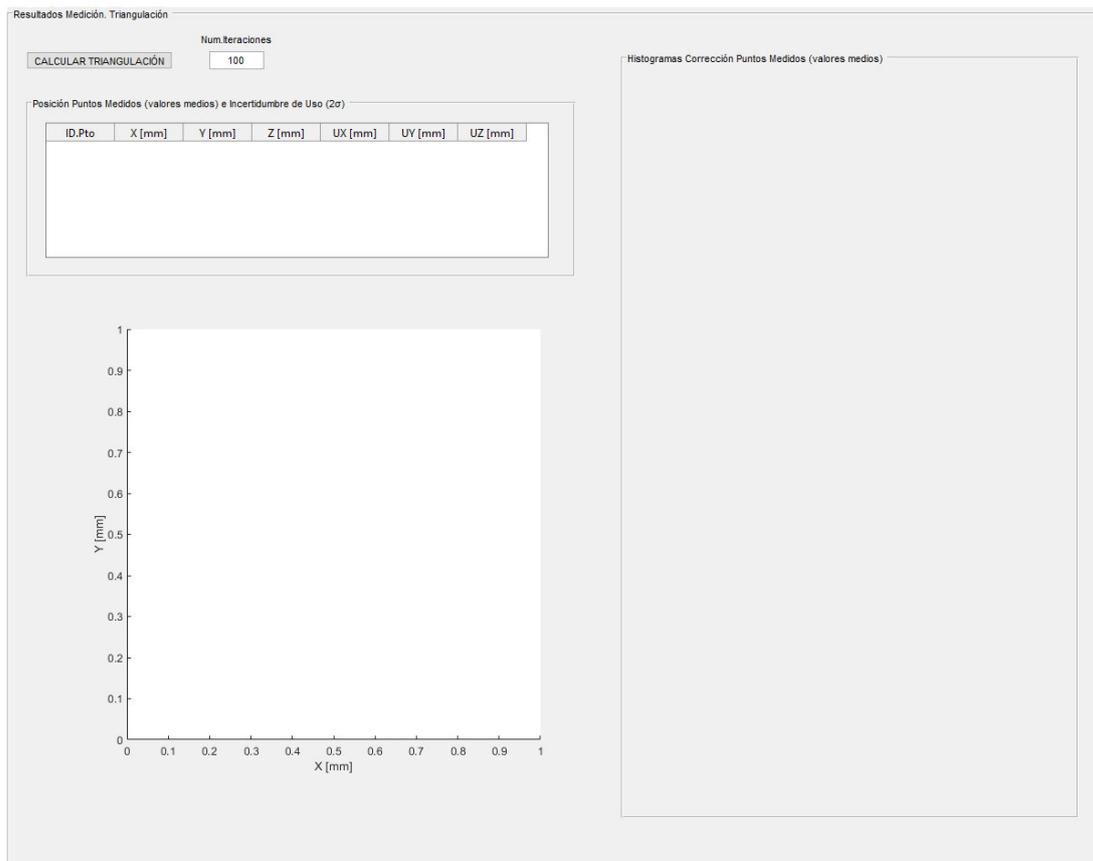


Figura 2.56. Panel "Resultados medición. Triangulación".

Pasos:

1. Rellenar campos obligatorios:
  - **Núm. Iteraciones.**
2. Pulsar botón "CALCULAR TRIANGULACIÓN": se muestran los siguientes resultados (Figura 2.57, Figura 2.58, Figura 2.59):

ID.Pto	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	UX [mm]	UY [mm]	UZ [mm]
1	-60.0357	-45.0559	-0.0029	0.0970	0.1312	0.1455
2	-60.0377	-15.0536	-0.0023	0.1002	0.1272	0.1454
3	-60.0377	14.9503	-0.0017	0.1001	0.1209	0.1452
4	-60.0354	44.9524	-0.0011	0.0967	0.1180	0.1449
5	-30.0352	-45.0591	-0.0048	0.0957	0.1367	0.1456
6	-30.0422	-15.0578	-0.0049	0.1067	0.1344	0.1461
7	-30.0422	14.9544	-0.0043	0.1067	0.1142	0.1458

Figura 2.57. Valores medios de las posiciones 3D de los puntos medios por triangulación y estimación de la incertidumbre de uso.

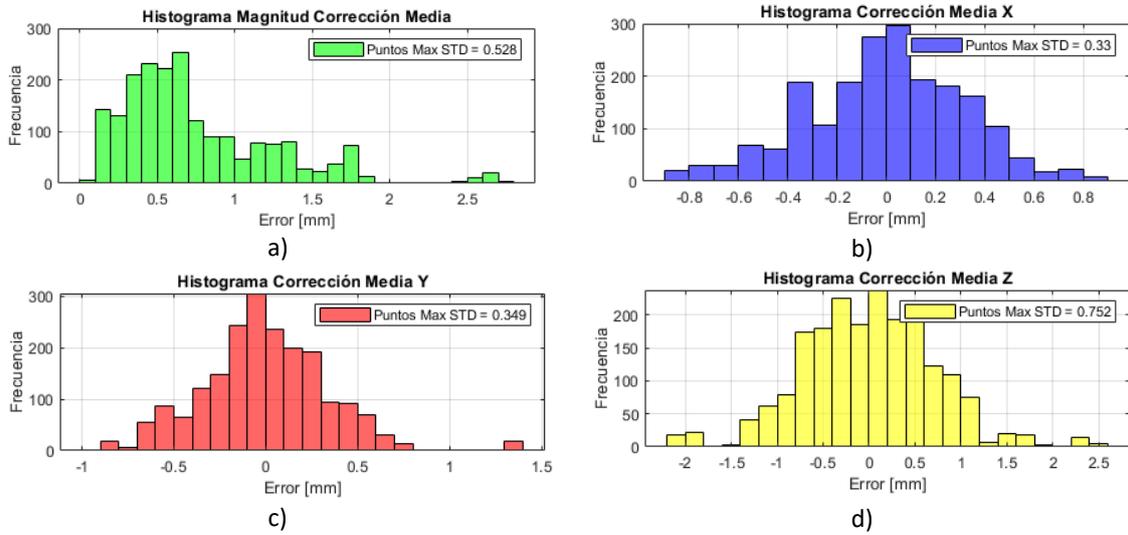


Figura 2.58. Histogramas de la corrección media de los puntos de referencia medidos por triangulación: a) Magnitud, b) Eje X; c) Eje Y; d) Eje Z.

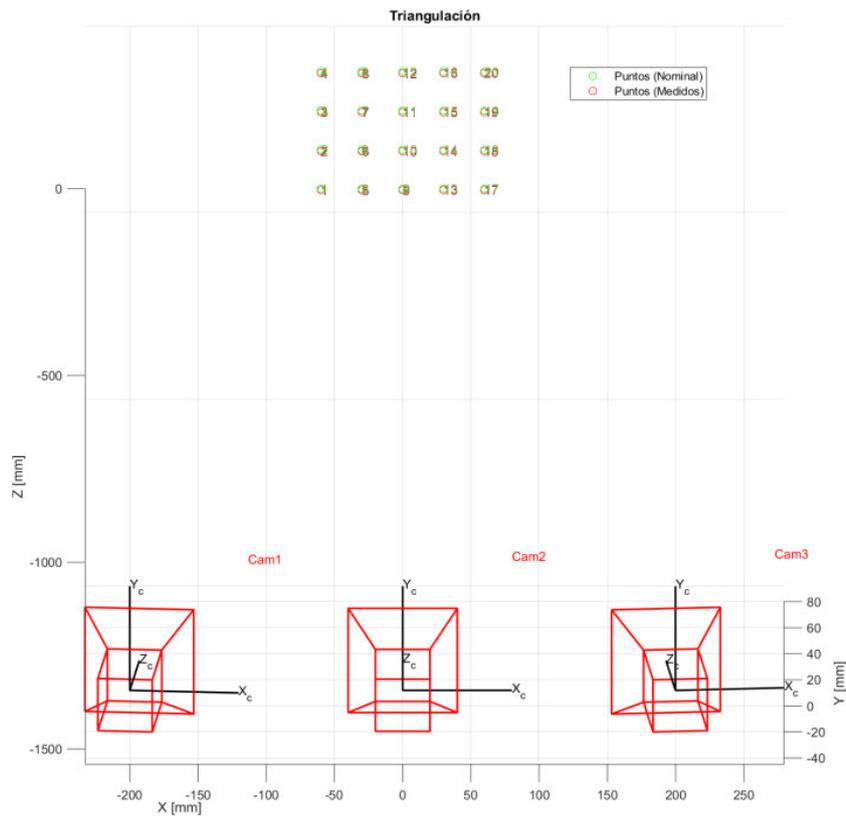


Figura 2.59. Visualización de los puntos nominales, de los medidos y de las poses de las cámaras.

Capacidad de estudio de los siguientes factores en la influencia de la medición por triangulación:

1. Distribución de los puntos a medir.
2. Error de píxel.
3. Calibración intrínseca.
4. Calibración extrínseca.

### 2.1.3.3. MEDICIÓN DE PUNTOS (MULTIRRESECCIÓN)

#### Preparación de los puntos de control

Los puntos de control se pueden generar de dos formas: importación desde un fichero "CargarPuntosMedir.mat" y generación manual de las coordenadas. Estos puntos están referenciados al sistema de referencia local del objeto (Figura 2.60).

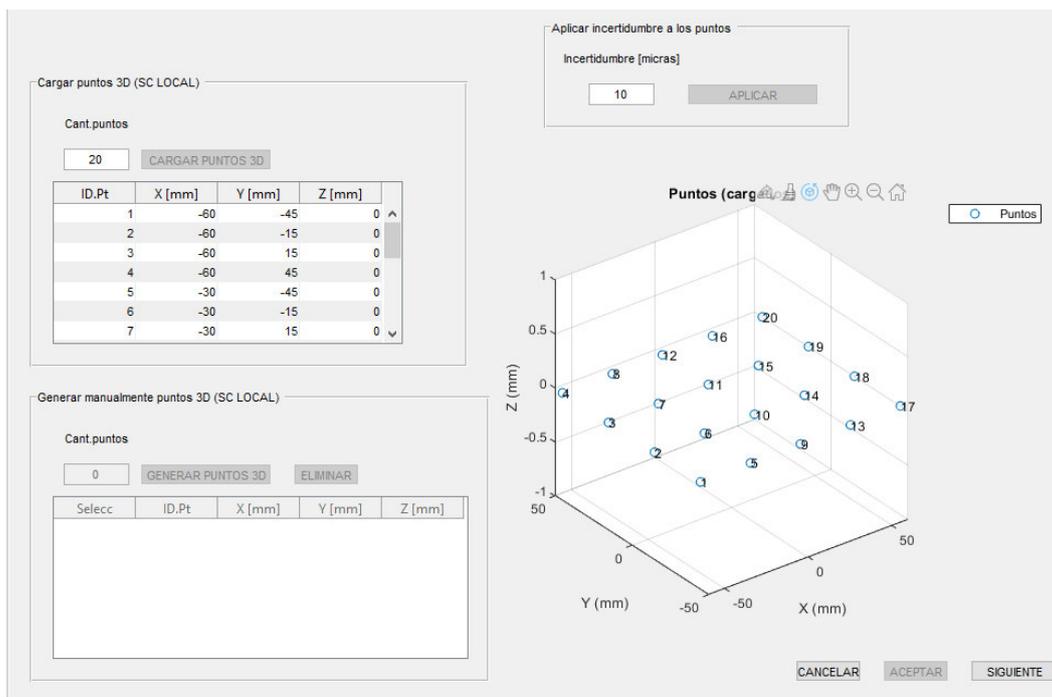


Figura 2.60. Panel "Preparación de los puntos de control".

#### Pasos:

1. Cargar/generar los puntos a medir (ver apartado 3.1.2. PREPARACIÓN DE LOS PUNTOS).
2. Aplicar la incertidumbre asociada a los puntos de control (ver apartado 3.1.2. PREPARACIÓN DE LOS PUNTOS ).

3. Pulsar botón “ACEPTAR” y el botón “SIGUIENTE”: se continúa con la preparación de las poses del objeto (Figura 2.61).

Preparación de los puntos a medir. Puntos de control

Cargar poses del objeto

ID.Pose	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	RX[°]	RY[°]	RZ[°]
1	0	0	0	0	0	5
2	0	200	0	0	0	10
3	200	0	0	0	5	10
4	0	0	1000	0	0	0
5	50	50	1000	2	5	10

Cant.Poses

Error posición [mm]

Error orientación [°]

Puntos de control

Posición puntos SC Local

ID.Pt	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]
1	-60	-45	0
2	-60	-15	0
3	-60	15	0
4	-60	45	0
5	-30	-45	0
6	-30	-15	0
7	-30	15	0

Posición puntos SC Global

ID.Pt Transf	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]
1	-65.8497	-50.0581	0
2	-68.4643	-20.1723	0
3	-61.0790	9.7136	0
4	-63.6937	39.5994	0
5	-25.9638	-47.4434	0
6	-28.5785	-17.5576	0
7	-31.1932	12.3282	0

Pose1

Figura 2.61. Panel "Preparación de las poses del objeto".

6. Rellenar campos obligatorios:

- **Cant. poses:** número de poses a medir.
- **Error de posición:** diferencia entre el valor real y el nominal de la posición [mm].
- **Error de orientación:** diferencia entre el valor real y el nominal de la orientación [°].

7. Pulsar botón “CARGAR”: se selecciona el fichero “CargarPosesObjeto.mat” donde se encuentran las poses del objeto (ver apartado 3.1.2. PREPARACIÓN DE LOS PUNTOS).
8. Pulsar el botón “APLICAR ERRORES”: se aplican los errores introducidos.
9. Pulsar el botón “TRANSFORMAR”: se referencia los puntos de control en el sistema de coordenadas global.

#### Funciones adicionales

- Menú desplegable “ID. Pose”: se muestran las coordenadas de los puntos de control referenciados al sistema de coordenadas global, en función de la pose seleccionada (Figura 2.61).

10. Pulsar botón “ACEPTAR” y el botón “SIGUIENTE”: se continúa con la preparación de los puntos de control (Figura 2.62).

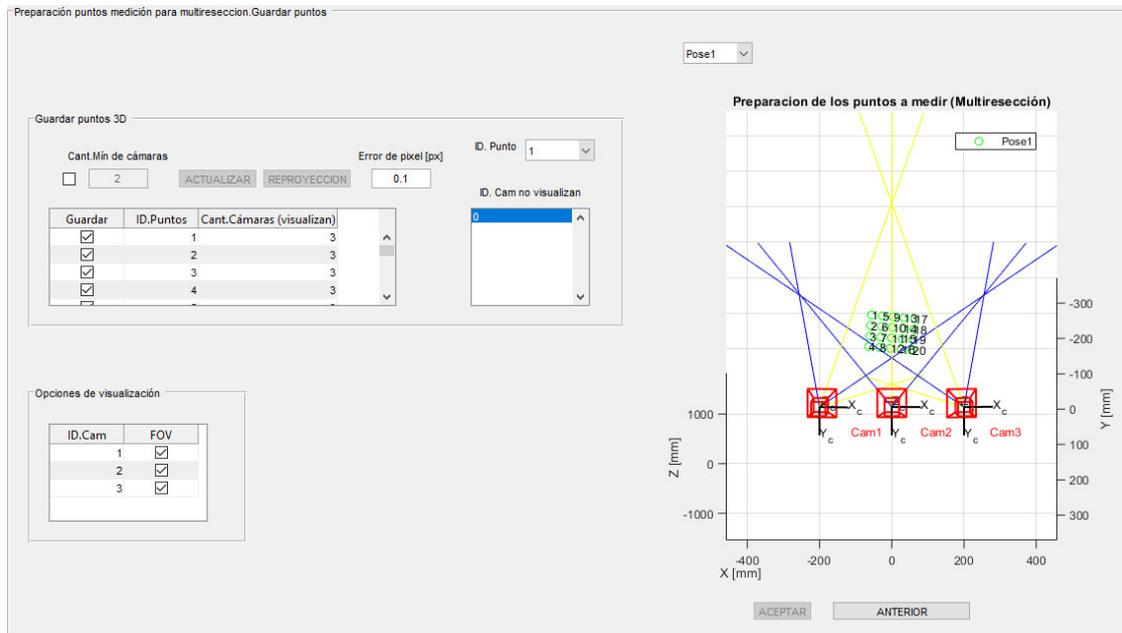


Figura 2.62. Panel "Preparación de los puntos de control".

11. Rellenar campos obligatorios:

- Error píxel.

12. Pulsar el botón “REPROYECCIÓN”: los puntos se re proyectan y se ordenan para indicar la cantidad de cámaras que visualizan cada punto e identificar las demás.

13. Pulsar el botón “ACEPTAR”: se habilita el botón “Multirresección” del menú de medición (Figura 2.63).

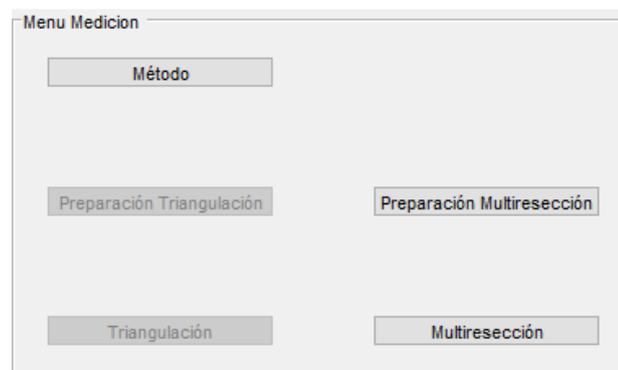


Figura 2.63. Habilitación del botón " Multirresección".

### Funciones adicionales

7. Incluyen las funcionalidades que aparecen en la preparación de la calibración extrínseca (ver apartado 0. Preparación de las cámaras), excepto elMenú desplegable “ID Cámara.
8. Menú desplegable “ID. Pose”: se selecciona la pose del objeto que se visualiza en el gráfico (Figura 2.64).

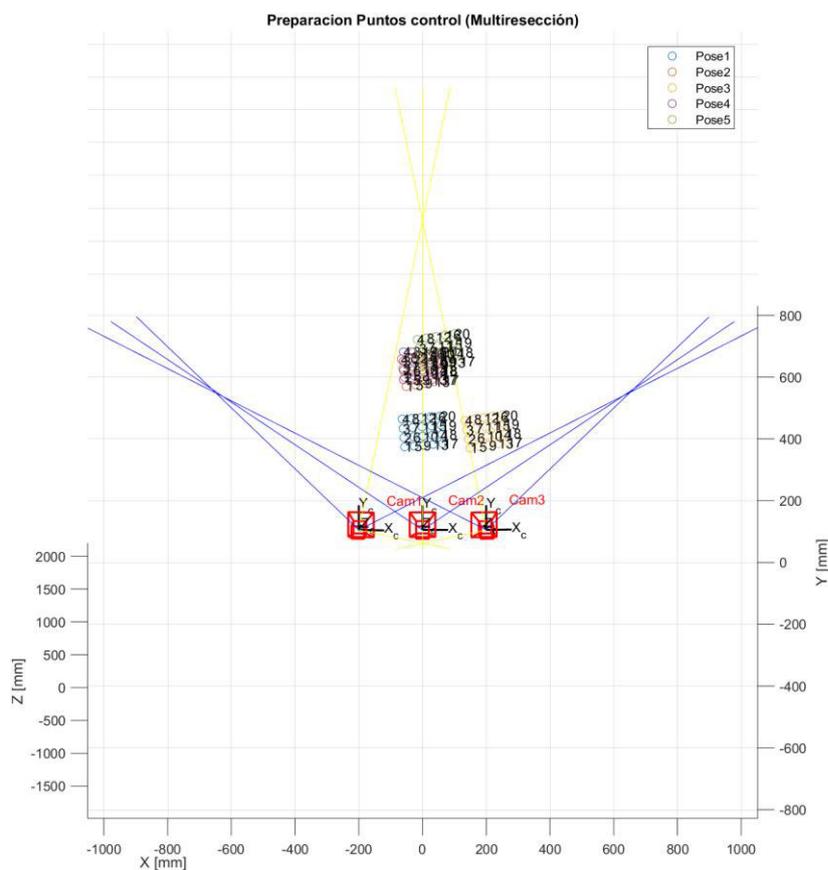


Figura 2.64. Visualización de todas las poses del objeto.

### Multiresección

Los resultados que se obtienen son los siguientes (Figura 2.65):

- **Pose del objeto:** posición [mm] y orientación [°].
- **Estimación de la incertidumbre de uso de la medición [mm]:** se estima con un nivel de confianza del 95% ( $2 \cdot \sigma$ ).
- **Otros resultados:**

- Visualización de las poses nominales, de los medidos y de las poses de las cámaras.
- Histogramas: corrección media de las poses medidas en magnitud y descompuestos en la dirección X, Y, Z y desviación estándar [mm].

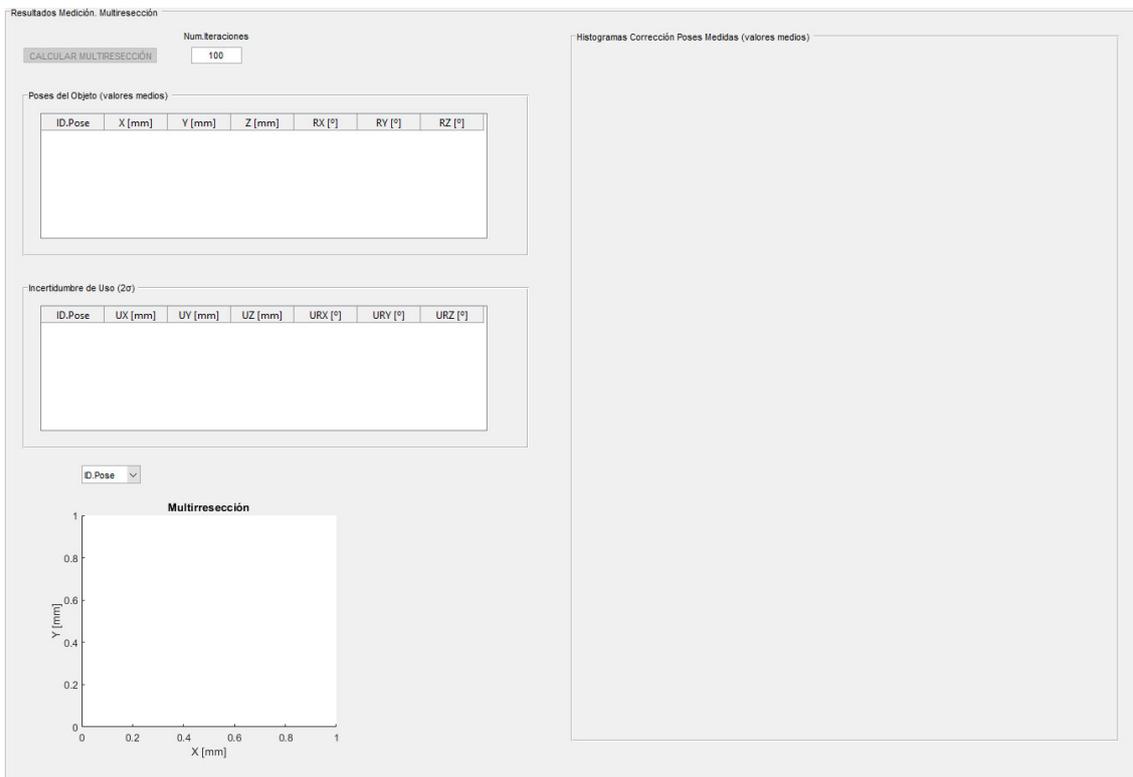


Figura 2.65. Panel “Resultados medición. Multiresección”.

**Pasos:**

3. Rellenar campos obligatorios:

- **Núm. Iteraciones.**

4. Pulsar botón “CALCULAR MULTIRESECCIÓN”: se muestran los siguientes resultados (Figura 2.66, Figura 2.67, Figura 2.68, Figura 2.69, Figura 2.70):

Poses del Objeto (valores medios)						
ID.Pose	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	RX [°]	RY [°]	RZ [°]
1	-0.0081	0.0059	-100.0053	500.3768	-0.0060	-500.3768
2	5.6292e-04	-0.0444	-0.0168	-131.5735	0.0041	131.5732

Figura 2.66. Medición de las poses de un objeto.

Incertidumbre de Uso ( $2\sigma$ )

ID.Pose	UX [mm]	UY [mm]	UZ [mm]	URX [°]	URY [°]	URZ [°]
1	0.0469	0.0564	0.0924	1.5782e+03	0.0144	1.5782e+03
2	0.0669	0.1149	0.1327	413.3193	0.0110	413.3190

Figura 2.67. Incertidumbre de uso de las poses de un objeto.

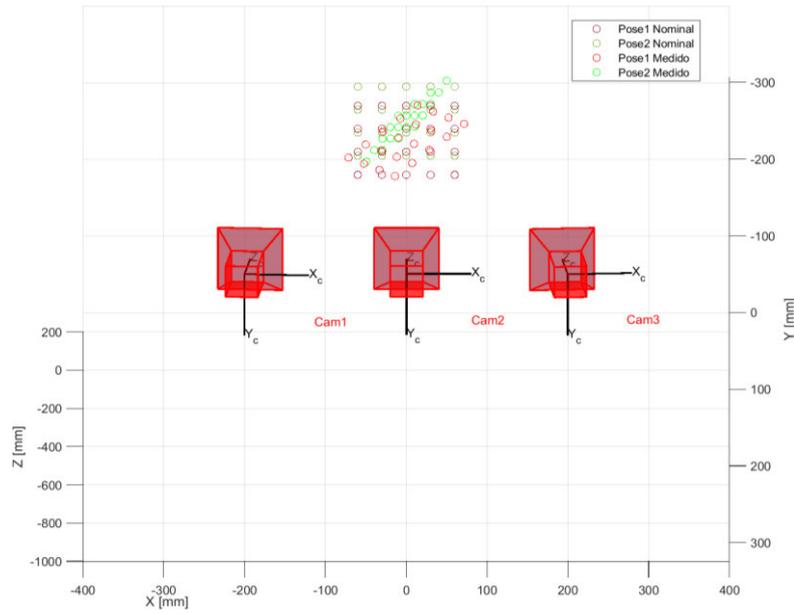


Figura 2.68. Representación de las poses 1 y 2 nominales y medidos.

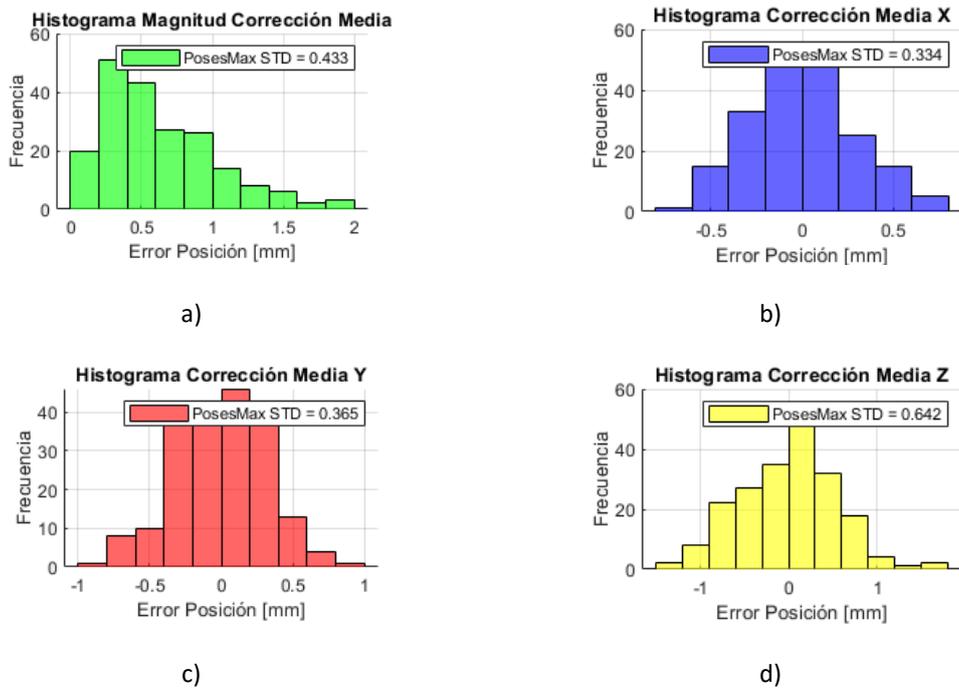


Figura 2.69. Histogramas de la corrección media de la posición medida del objeto y de la desviación estándar [mm]. a) Magnitud, b) Corrección en X, c) Corrección en Y, d) Corrección en Z.

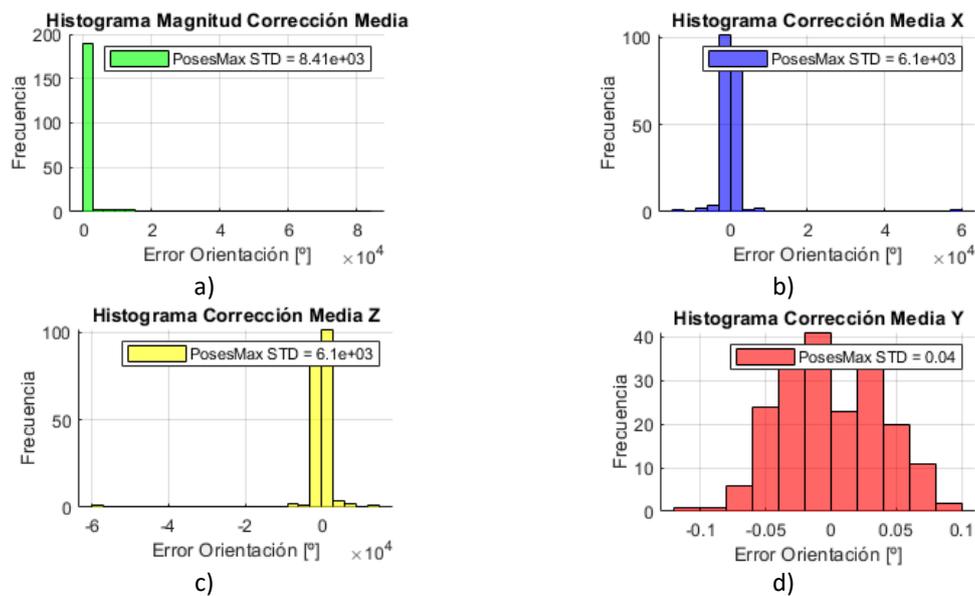


Figura 2.70. Histogramas de la corrección media de la orientación medida del objeto y de la desviación estándar [°]. a) Magnitud, b) Corrección en X, c) Corrección en Y, d) Corrección en Z.

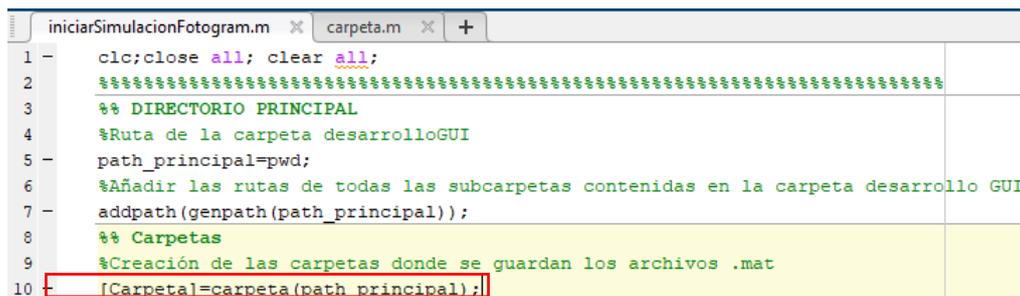
Capacidad de estudio de los siguientes factores en la influencia de la medición por multiresección:

1. Distribución de los puntos de control.
2. Pose del objeto.
3. Incertidumbre de los puntos de control
4. Error de píxel.
5. Error posición.
6. Error orientación.
7. Calibración intrínseca.
8. Calibración extrínseca.

### 3. INFORMACIÓN ADICIONAL

#### 3.1.1. MODIFICACIÓN DE LA UBICACIÓN DE LA CARPETA “testJsons”

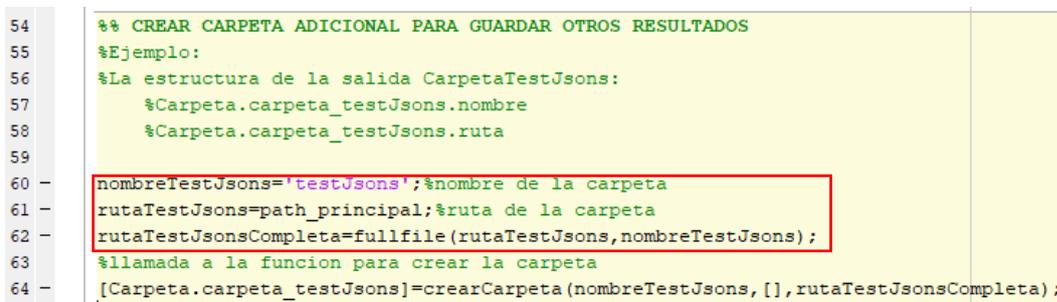
1. Abrir el script principal “iniciarSimulacionFotogram” (Figura 3.1).
2. Abrir la función “carpeta”.



```
1 -   clc;close all; clear all;
2   %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
3   %% DIRECTORIO PRINCIPAL
4   %Ruta de la carpeta desarrolloGUI
5 -   path_principal=pwd;
6   %Añadir las rutas de todas las subcarpetas contenidas en la carpeta desarrollo GUI
7 -   addpath(genpath(path_principal));
8   %% Carpetas
9   %Creación de las carpetas donde se guardan los archivos .mat
10  [Carpeta]=carpeta(path_principal);
```

Figura 3.1. Código del script “iniciarSimulacionFotogram” y función “carpeta”.

3. Cambiar el valor de la variable “rutaTestJsons” por la ruta deseada (Figura 3.2).
4. Opcional: cambiar el nombre de la carpeta con la variable “nombreTestJsons”.
5. Ejecutar de nuevo la función “iniciarSimulacionFotogram”.



```
54   %% CREAR CARPETA ADICIONAL PARA GUARDAR OTROS RESULTADOS
55   %Ejemplo:
56   %La estructura de la salida CarpetaTestJsons:
57   %Carpeta.carpeta_testJsons.nombre
58   %Carpeta.carpeta_testJsons.ruta
59
60 -   nombreTestJsons='testJsons';%nombre de la carpeta
61   rutaTestJsons=path_principal;%ruta de la carpeta
62 -   rutaTestJsonsCompleta=fullfile(rutaTestJsons,nombreTestJsons);
63   %llamada a la funcion para crear la carpeta
64 -   [Carpeta.carpeta_testJsons]=crearCarpeta(nombreTestJsons, [], rutaTestJsonsCompleta);
```

Figura 3.2. Variables que modifican la ruta y el nombre de la carpeta donde se guardan los jsons.

#### 3.1.2. PREPARACIÓN DE LOS PUNTOS

##### 3.1.2.1. CARGAR UN FICHERO \*.mat

Se disponen de tres ficheros \*.mat en la carpeta “datosPrueba”, para realizar la preparación de la calibración y de la medición.

- “CargarPuntosRef.mat”: puntos de referencia usados en la calibración extrínseca.
- “CargarPuntosMedir.mat”: puntos a medir usados en la medición (triangulación y multirresección).
- “CargarPosesObjeto.mat”: poses del objeto a medir (multirresección).

Pasos:

1. Rellenar campos obligatorios:
  - **Cantidad de puntoso poses:** debe coincidir con el número de puntos o poses a cargar.
2. Pulsar botón “CARGAR” para seleccionar el archivo \*.mat y visualizar los puntos. En este caso, en la carpeta “datosPrueba” se encuentra el fichero “CargarPuntosRef.mat”, donde se definen 20 puntos para la calibración extrínseca (Figura 3.3).

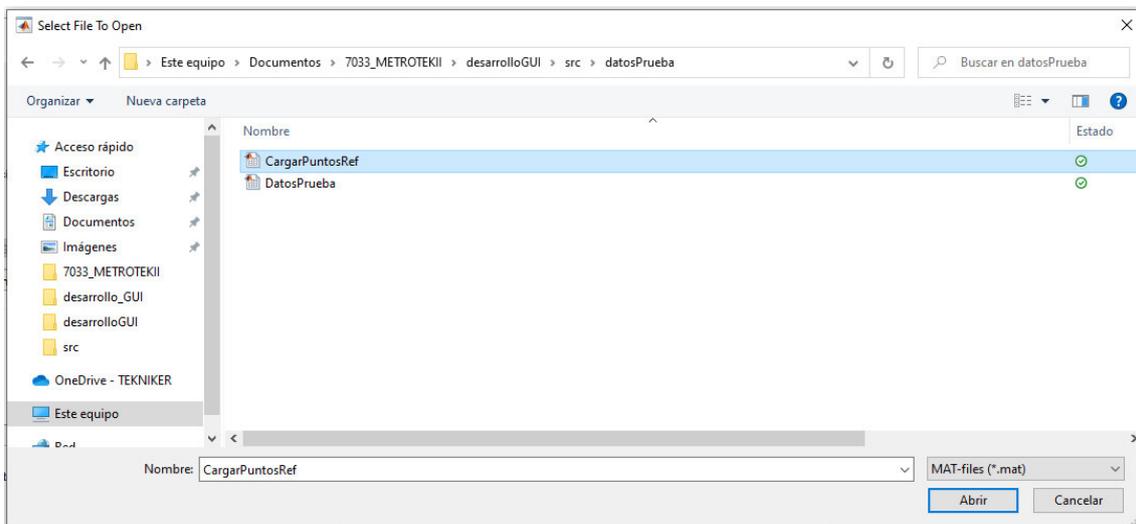


Figura 3.3. Selección del fichero “CargarPuntosRef.mat”.

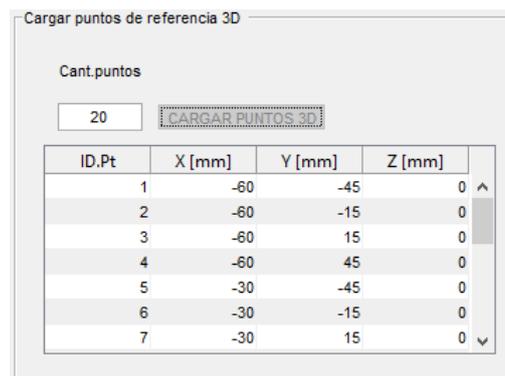


Figura 3.4. Cargar puntos de referencia.

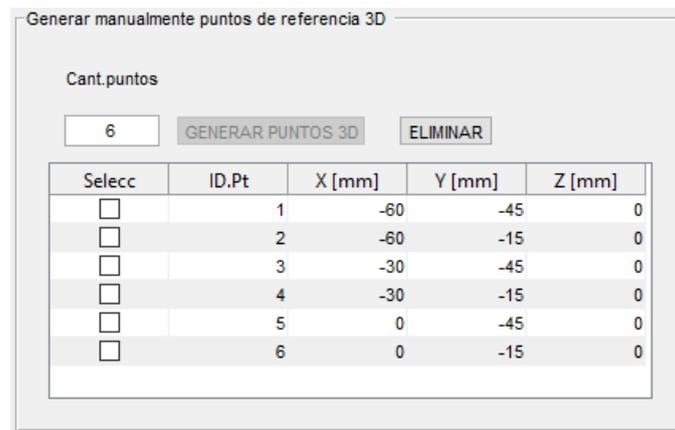
### 3.1.2.2. GENERACIÓN MANUAL DE LOS PUNTOS

Pasos:

1. Rellenar campos obligatorios:

- **Cantidad de puntos:** número de puntos a definir.
- **Coordenadas de los puntos:** X, Y, Z.

2. Pulsar botón “GENERAR PUNTOS 3D”: para generarlos y visualizarlos.



Selecc	ID.Pt	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]
<input type="checkbox"/>	1	-60	-45	0
<input type="checkbox"/>	2	-60	-15	0
<input type="checkbox"/>	3	-30	-45	0
<input type="checkbox"/>	4	-30	-15	0
<input type="checkbox"/>	5	0	-45	0
<input type="checkbox"/>	6	0	-15	0

Figura 3.5. Generar puntos de referencia manualmente.

En caso de querer eliminar algún punto:

Pasos:

1. Activar la casilla del punto a eliminar en la columna “Selecc”
2. Pulsar botón “ELIMINAR”

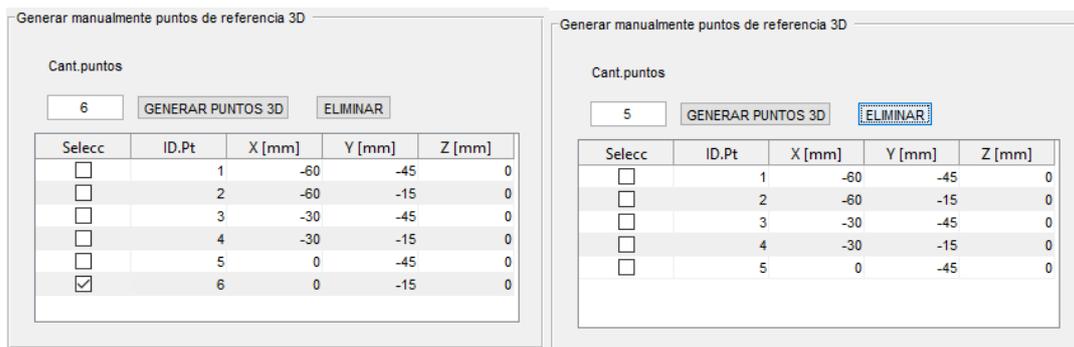


Figura 3.6. Eliminación del punto ID Pto 6.

3. Pulsar botón “GENERAR PUNTOS 3D”.

**3.1.2.3. GENERAR RED DE PUNTOS DE REFERENCIA**

Esta opción solamente se encuentra disponible en la calibración extrínseca.

1. Rellenar campos obligatorios:

- **Nombre:** nombre de la red de puntos.
- **Mín:** coordenada inicial de la red de puntos [mm].
- **Máx:** coordenada final de la red de puntos [mm].
- **NºPuntos:** número de puntos

2. Pulsar el botón “GENERAR RED”.

Por ejemplo, según la Figura 3.7, se crea una red de puntos en el plano XY:

- en el eje X se distribuye 5 puntos desde X=-60 mm a X= 60 mm
- en el eje Y se distribuye 4 puntos desde Y=-45 mm a Y= 45 mm
- en el eje Z, todos los puntos tienen Z=0 mm.

	Mín [mm]	Máx [mm]	NºPtos
X	-60	60	5
Y	-45	45	4
Z	0	0	1

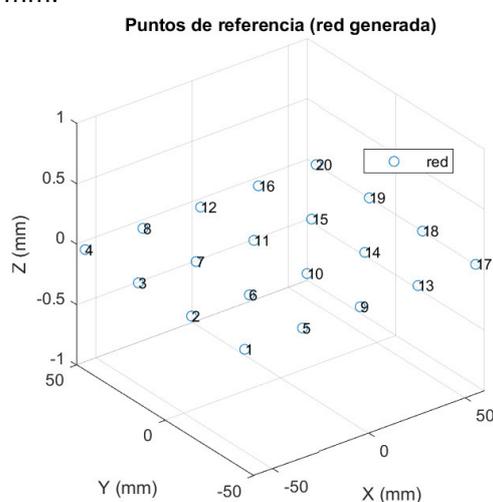


Figura 3.7. Generación de los puntos de referencia mediante una red de puntos.

### 3.1.2.4. APLICAR INCERTIDUMBRE A LOS PUNTOS

Esta opción solamente está disponible en la calibración extrínseca y en la medición por multirresección (Figura 3.8).

1. Rellenar campos obligatorios:
  - **Incetidumbre:** incertidumbre asociada a la medición de los puntos de referencia realizada por el instrumento de medida [micras].
2. Pulsar botón “APLICAR”.

Aplicar incertidumbre a los puntos de referencia

Incertidumbre [micras]

10 APLICAR

Figura 3.8. Incertidumbre asociada a los puntos de referencia.

### 3.1.2.5. MODIFICACIÓN DE LOS FICHEROS \*.mat DE LOS “datosPrueba”

Para definir otros datos de prueba, en el directorio “auxiliar\scriptCrearDatosPrueba” (Figura 3.9), se pueden editar copiar los scripts y editarlos.

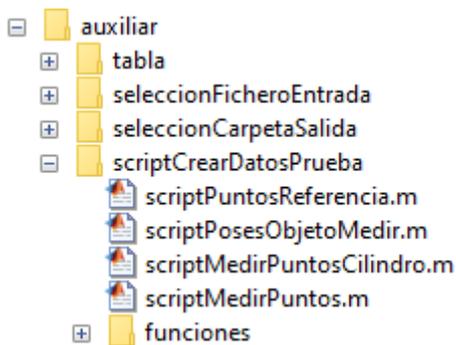


Figura 3.9. Ubicación de los scripts editables.

#### Pasos:

1. Modificar las variables:

Script: Puntos de referencia (Figura 3.10) y puntos a medir (Figura 3.11):

- “num\_pto\_total” y “posición\_pto”.

Script: Poses del objeto a medir (Figura 3.12):

- “num\_poses\_total”, “posición\_objeto” y “orientación\_objeto”.

2. Guardar y ejecutar el script.

3. Seleccionar la carpeta donde se quiere guardar.

```

scriptPuntosReferencia.m  x  +
%% DEFINICIÓN DE LOS PUNTOS DE REFERENCIA PARA CARGARLOS POSTERIORMENTE
$numero de puntos
num_pto_total=20;
$posicion de los puntos
posicion_pto=[-60 -45 0;-60 -15 0;-60 15 0;-60 45 0;-30 -45 0;-30 -15 0;-30 15
-30 45 0;0 -45 0;0 -15 0;0 15 0;0 45 0;30 -45 0;30 -15 0;30 15 0;
30 45 0;60 -45 0;60 -15 0;60 15 0;60 45 0];%mm [X Y Z]
$identificación de los puntos (ID)
id_puntos=1:num_pto_total;%NO EDITAR
$ruta de la carpeta
rutaCarpeta=uigetdir();%NO EDITAR
$nombre del archivo .mat
nombreMat='CargarPuntosRef.mat';%NO EDITAR
$ruta completa del fichero
rutaMat=fullfile(rutaCarpeta,nombreMat);%NO EDITAR
$llamada a la función DatosPuntosReferencia
DatosPuntosReferencia (rutaMat,num_pto_total,posicion_pto,id_puntos);
    
```

Figura 3.10. “scriptPuntosReferencia”. Genera el fichero CargarPuntosRef.mat

```

scriptMedirPuntos.m  X +
1  %% DEFINICIÓN DE LOS PUNTOS DE REFERENCIA PARA CARGARLOS POSTERIORMENTE
2  %numero de puntos
3  num_pto_total=20;
4  %posicion de los puntos
5  posicion_pto=[-60 -45 0;-60 -15 0;-60 15 0;-60 45 0;-30 -45 0;-30 -15 0;-30 15 0;
6  -30 45 0;0 -45 0;0 -15 0;0 15 0;0 45 0;30 -45 0;30 -15 0;30 15 0;
7  30 45 0;60 -45 0;60 -15 0;60 15 0;60 45 0];%mm [X Y Z]
8  %Identificación de los puntos (ID)
9  id_puntos=1:num_pto_total;%NO EDITAR
10 nube_puntos=pointCloud(posicion_pto);%NO EDITAR
11 rutaCarpeta=uigetdir();
12 nombreMat='CargarPuntosMedir.mat';
13 rutaMat=fullfile(rutaCarpeta,nombreMat);
14
15 %% GENERACIÓN Y GUARDADO DE LOS PUNTOS
16 %llamada a la función DatosPuntosReferencia
17 DatosPuntosMedir (rutaMat,num_pto_total,posicion_pto,id_puntos,nube_puntos);
  
```

Figura 3.11. “scriptMedirPuntos”. Genera el fichero CargarPuntosMedir.mat

```

scriptPosesObjetoMedir.m  X +
1
2  %% DEFINICIÓN DE LAS POSES DEL OBJETO PARA CARGARLOS POSTERIORMENTE
3  %numero de puntos
4  num_poses_total=5;
5  %posicion del objeto
6  % posicion_objeto=[0 0 0;0 0 1500;0 0 0];%mm [X Y Z]
7  % orientacion_objeto=[0 0 0; 0 5 0; 5 0 0];%[deg]
8
9  posicion_objeto=[0 0 0; 0 0 -200; 0 0 -500; 0 0 500; 0 0 1000];%mm [X Y Z]
10 orientacion_objeto=[0 0 0;0 0 0;0 0 0;0 0 0;0 0 0];%[deg]
11
12 %Identificación de las poses (ID)
13 id_poses=(1:num_poses_total)';%NO EDITAR
14 rutaCarpeta=uigetdir();
15 nombreMat='CargarPosesObjeto.mat';
16 rutaMat=fullfile(rutaCarpeta,nombreMat);
17 %% GENERACIÓN Y GUARDADO DE LOS PUNTOS
18 %llamada a la función DatosPuntosReferencia
19 DatosPosesObjeto (rutaMat,num_poses_total,id_poses,posicion_objeto,orientacion_objeto);
  
```

Figura 3.12. “scriptPosesObjetoMedir”. Genera el fichero CargarPosesObjeto.mat