UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

Escuela Politécnica Superior

Departamento de Tecnología Electrónica

MÁSTER EN SISTEMAS ELECTRÓNICOS AVANZADOS

Tesis de Máster

Mejora de Algoritmos DoA para Seguimiento de Vehículos Espaciales

Alberto Carrasco Casado

Septiembre de 2010

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID
Escuela Politécnica Superior
Departamento de Tecnología Electrónica

Máster en Sistemas Electrónicos Avanzados
Tesis de Máster

Mejora de Algoritmos DoA para Seguimiento de Vehículos Espaciales

Autor: Alberto Carrasco Casado
Director: Ricardo Vergaz Benito

TRIBUNAL:

Presidenta: Carmen Vázquez García
Vocal: Ramón Zaera Polo
Secretaria: Isabel Pérez Garcilópez

CALIFICACIÓN: .....
FECHA: ...28 de septiembre de 2010....

Índice

ÍNDICE ..... **I**

ACRÓNIMOS ..... **III**

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES ..... **V**

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA **1**

1.1. RED DE SEGUIMIENTO DE LA ESA 2
1.2. FASE DE LANZAMIENTO Y ÓRBITA TEMPRANA 4
1.3. DIVERGENCIA DE UNA ANTENA 5
1.4. SISTEMA DE AYUDA A LA ADQUISICIÓN EN BANDA X 7
1.5. ESTIMACIÓN ADAPTATIVA DE DIRECCIÓN DE LLEGADA 9
1.6. ARRAYS DE ANTENAS 12
1.7. PROYECTO CAMSA 14
1.8. REQUISITOS DE LA SOLUCIÓN REQUERIDA A LA UC3M 15
1.9. PLANIFICACIÓN, ENTREGABLES Y OTRAS OBLIGACIONES 17

2. FOTOGRAMETRÍA DE CAMPO CERCANO **19**

2.1. INTRODUCCIÓN Y RANGOS DE APLICACIÓN 20
2.2. ESCALADO Y ESTIMACIÓN DE LA PRECISIÓN 21
2.3. ORIENTACIÓN INTERIOR DE UNA CÁMARA 23
2.4. CALIBRACIÓN DE UNA CÁMARA 25
2.5. PATRONES CODIFICADOS 26
2.6. ORIENTACIÓN EXTERIOR Y ECUACIONES DE COLINEALIDAD 29
2.7. RESECCIÓN ESPACIAL 31
2.8. TRIANGULACIÓN DE MÚLTIPLES IMÁGENES 32

3. REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE **37**

3.1. MEDIDA FOTOGRAMÉTRICA DE UNA ANTENA DE 12 METROS 38
3.2. MEDIDA DE LA ANTENA APEX DE 12 METROS 39
3.3. MEDIDA DE UNA ANTENA DE 22 METROS 40
3.4. MEDIDA DEL RADIOTELESCOPIO DE ARECIBO DE 300 METROS 41
3.5. MEDIDA DE UNA ANTENA INFLABLE DE 5 METROS 43
3.6. MEDIDA DE UNA ANTENA ESPACIAL DE 6,73 METROS 44
3.7. CONSISTENCIA Y ESTABILIDAD DE CÁMARAS COMERCIALES 45
3.8. SISTEMA DE FOTOGRAMETRÍA CON CÁMARAS COMERCIALES 46
3.9. CONCLUSIONES 47

4. DISEÑO PRELIMINAR DEL SISTEMA **51**

4.1. CONSIDERACIONES DEL SISTEMA DE CAPTURA 52
4.2. CÁMARAS FOTOGRÁFICAS 53
4.3. ÓPTICA DE LAS CÁMARAS 56
4.4. SOFTWARE DE FOTOGAMETRÍA 58
4.5. SOFTWARE DE AUTOMATIZACIÓN 65
4.6. ESTRATEGIA DE TRABAJO 66

5. JUSTIFICACIÓN DE COMPRAS **69**

5.1. CÁMARAS FOTOGRÁFICAS 69
5.2. ADAPTADORES Y TRÍPODES 74
5.3. MATERIALES PARA EL PROTOTIPO FINAL 75
5.4. ORDENADOR PORTÁTIL 77
5.5. SOFTWARE DE FOTOGRAMETRÍA 78
5.6. DESGLOSE DE COSTES 79

6. AUTOMATIZACIÓN DEL SISTEMA 81

6.1. ENTORNO DE DESARROLLO DE CANON 82
6.2. PROGRAMACIÓN BAJO PS-REC-SDK 84
6.3. CONSIDERACIONES DE DISEÑO DE CAPTURA DE IMÁGENES 85
6.4. FLUJO DE EJECUCIÓN DEL SOFTWARE DE CAPTURA 86
6.5. IMPLEMENTACIÓN DE LA CAPTURA DE IMÁGENES 95
6.6. PROGRAMACIÓN DE LA CONEXIÓN CÁMARAS-PC 96
6.7. PROGRAMACIÓN DE LA CAPTURA MULTICÁMARA 98
6.8. PROGRAMACIÓN DDE EN PHOTOMODELER 102
6.9. FLUJO DE EJECUCIÓN DEL PROCESADO FOTOGRAMÉTRICO 104

7. RESULTADOS EXPERIMENTALES DEL PROTOTIPO 115

7.1. DISEÑO DE LA PRUEBA EN LABORATORIO 116
7.2. DEMOSTRADOR DE LABORATORIO 117
7.3. RESULTADOS DEL DEMOSTRADOR 119
7.4. ENTORNO DE TRABAJO DEL PROTOTIPO FINAL 122
7.5. DISEÑO E INSTALACIÓN DEL PROTOTIPO 125
7.6. RESULTADOS DEL PROTOTIPO: 4 ANTENAS 128
7.7. RESULTADOS DEL PROTOTIPO: 8 ANTENAS 130
7.8. DISCUSIÓN DE RESULTADOS Y POSIBLES MEJORAS 137

8. EXTENSIÓN DEL PROTOTIPO A UNA ANTENA DE 15 METROS 141

8.1. SISTEMA DE CAPTURA FOTOGRÁFICA 142
8.2. CÁLCULO DEL CAMPO DE VISIÓN 145
8.3. DIFERENTES TOPOLOGÍAS 146
8.4. MEJORAS EN EL PROCESADO FOTOGRAMÉTRICO 150
8.5. PROPUESTA PARA DISPONIBILIDAD DEL 100% 152
8.6. PRESUPUESTO 153

9. CONCLUSIONES 155

BIBLIOGRAFÍA 159

Acrónimos

Acrónimo	Inglés	Español
APEX	Atacama Pathfinder Experiment	Experimento de Exploración de Atacama
APS	Advanced Photo System	Sistema avanzado de fotografía
BENGE	Bundle ENGinE	Motor de ajuste fotogramétrico multicámara
CAD	Computer-Aided Design	Diseño asistido por ordenador
CAMSA	-	Comunidad Autónoma de Madrid Sistema de Adquisición
CCD	Charge-Coupled Device	Dispositivo de carga acoplada
CMOS	Complementary Metal-Oxide Semiconductor	Semiconductor óxido-metal complementario
DDE	Dynamic Data Exchange	Intercambio dinámico de datos
DIGIC	Digital Imaging Core	Núcleo digital de imagen
DLL	Dinamic-Link Library	Biblioteca de enlace dinámico
DOA	Direction Of Arrival	Dirección de llegada
DSLR	Digital Single Lens Reflex	Réflex digital de lente única
ED-SDK	Digital EOS Software Development Kit	Kit de desarrollo software para EOS digital
ESA	European Space Agency	Agencia espacial europea
ESOC	European Space Operations Centre	Centro europeo de operaciones espaciales
ESPRIT	Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Techniques	Estimación de parámetros de señal por técnicas de invarianza rotacional
ESTRACK	European Space Tracking	Red europea de estaciones de tracking espacial
ETSI	-	Escuela Técnica Superior de Ingeniería
EV	Exposure Value	Valor de exposición
EXIF	Exchangeable Image File Format	Formato de archivo de imágenes intercambiable
FFF	Full Frame Format	Sensor de formato completo
FOV	Field Of View	Ángulo de visión
FSS	Fixed-Satellite Service	Servicio fijo por satélite
GTO	Geostationary Transfer Orbit	Órbita de transferencia geoestacionaria
INSA	-	INgeniería y Servicios Aeroespaciales
ISO	International Organization for Standarization	Organización Internacional de Estandarización
ITU	International Telecommunications Union	Unión internacional de las telecomunicaciones
LEOP	Launch and Early Orbit Phase	Fase de lanzamiento y órbita temprana
MUSIC	MUltiple SIgnal Classification	Clasificación de múltiples señales
PS-ReC-SDK	PowerShot Remote Capture Software Development Kit	Kit de desarrollo software de captura remota para PowerShot
SDK	Software Development Kit	Kit para desarrollo software
SSS	Space Science Services	Servicios de ciencia espacial
UC3M	-	Universidad Carlos III de Madrid
UPM	-	Universidad Politécnica de Madrid
USB	Universal Serial Bus	Bus serie universal
VBA	Visual Basic for Applications	Visual basic para aplicaciones
XAA	X-band Acquisition Aid	Ayuda a la adquisición en banda X

Índice de ilustraciones

ILUSTRACIÓN 1. RED DE ESTACIONES DE SEGUIMIENTO ESTRACK DE LA ESA. 2
ILUSTRACIÓN 2. ANTENA VIL-1 DE 15 METROS DE LA RED ESTRACK EN VILLAFRANCA, MADRID. 3
ILUSTRACIÓN 3. FASE LEOP DE UNA MISIÓN ESPACIAL GENÉRICA. 5
ILUSTRACIÓN 4. PATRÓN DE DIFRACCIÓN PRODUCIDO POR UNA APERTURA CIRCULAR (DISCO DE AIRY). 6
ILUSTRACIÓN 5. LÍMITE DE DIFRACCIÓN DE UNA ANTENA. 7
ILUSTRACIÓN 6. SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE SATÉLITES XAA EN ANTENA DE 15 M. 8
ILUSTRACIÓN 7. ANTENA DE 1,3 M ACOPLADA A UNA DE 15 M [15]. 9
ILUSTRACIÓN 8. PSEUDO ESPECTROS DE BARTLETT, CAPON, PREDICCIÓN LINEAL Y DE MÁXIMA ENTROPÍA PARA Θ=±5º [2]. 10
ILUSTRACIÓN 9. COMPARACIÓN DE PSEUDO ESPECTROS DE PISARENKO Y DE MIN-NORM PARA Θ=±5º [2]. 11
ILUSTRACIÓN 10. ARRAY DE ANTENAS EN TORNO A LA PARÁBOLA VIL-2 DE LA ESA. 12
ILUSTRACIÓN 11. DEFORMACIONES GRAVITATORIAS EN LA PARÁBOLA DE 15 METROS. 13
ILUSTRACIÓN 12. DOS POSIBLES CONFIGURACIONES PARA EL PROTOTIPO. 15
ILUSTRACIÓN 13. ERROR ANGULAR EN LOS PLANOS DE REFERENCIA DEL ARRAY Y DEL PARABOLOIDE. 16
ILUSTRACIÓN 14. RELACIÓN ENTRE OBJETOS A MEDIR Y SU PRECISIÓN SEGÚN LA TÉCNICA DE MEDIDA [14]. 21
ILUSTRACIÓN 15. MODELO SIMPLIFICADO DE CÁMARA ESTENOPEICA. 21
ILUSTRACIÓN 16. DEPENDENCIA DEL NÚMERO DE ESCALADO CON LA DISTANCIA AL OBJETO Y LA LONGITUD FOCAL. 22
ILUSTRACIÓN 17. ESTIMACIÓN DE LA PRECISIÓN DE UN MODELO A PARTIR DEL ESCALADO. 23
ILUSTRACIÓN 18. ORIENTACIÓN INTERIOR DE UNA CÁMARA. 23
ILUSTRACIÓN 19. CAMPO DE VISIÓN 2Ω, LONGITUD FOCAL F Y DISTANCIA PRINCIPAL C DE UNA CÁMARA. 24
ILUSTRACIÓN 20. DISTORSIÓN RADIAL SIMÉTRICA EN UN SISTEMA DE IMAGEN. 24
ILUSTRACIÓN 21. SISTEMAS MALLADOS CALIBRADOS PARA TRANSFORMACIÓN DE PLANOS. 25
ILUSTRACIÓN 22. TRANSFORMACIÓN DE PLANOS BIDIMENSIONALES AFÍN, BILINEAL Y POLINÓMICA. 26
ILUSTRACIÓN 23. EXCENTRICIDAD DE UN PATRÓN CIRCULAR PROYECTADO. 27
ILUSTRACIÓN 24. VARIOS EJEMPLOS DE PATRONES CODIFICADOS. 28
ILUSTRACIÓN 25. ORIENTACIÓN EXTERIOR. 29
ILUSTRACIÓN 26. RESECCIÓN ESPACIAL. 32
ILUSTRACIÓN 27. DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO FOTOGRAMÉTRICO COMPLETO. 33
ILUSTRACIÓN 28. EJEMPLO DE CONFIGURACIÓN DE IMÁGENES EN FOTOGRAMETRÍA DE DISTANCIAS CERCANAS. 35
ILUSTRACIÓN 29. MATRIZ DE CONEXIONES PUNTO-IMAGEN DEL EJEMPLO. 36
ILUSTRACIÓN 30. PATRONES SOBRE LA PARÁBOLA (IZQUIERDA) Y CAPTURA DE IMÁGENES (DERECHA) [21]. 39
ILUSTRACIÓN 31. ANTENA DE 12 METROS DEL PROYECTO APEX [8]. 40
ILUSTRACIÓN 32. ANTENA DE 22 METROS DEL *AUSTRALIA TELESCOPE COMPACT ARRAY* [25]. 41
ILUSTRACIÓN 33. RADIOTELESCOPIO DE 300 METROS DE DIÁMETRO (ARECIBO, PUERTO RICO) [24]. 42
ILUSTRACIÓN 34. ANTENA INFLABLE DE 5 METROS DE LA NASA CON PATRONES SOBRE SU SUPERFICIE [18]. 44
ILUSTRACIÓN 35. ANTENA DE RF+COLECTOR DE ENERGÍA SOLAR DESPLEGABLE DE 6,73 METROS [12]. 45
ILUSTRACIÓN 36. OBJETO DE PRUEBAS PARA EVALUACIÓN DE LAS MEDIDAS FOTOGRAMÉTRICAS [27]. 46
ILUSTRACIÓN 37. SISTEMA DE CAPTURA PARA PROCESADO FOTOGRAMÉTRICO [20]. 47
ILUSTRACIÓN 38. FOTOGRAMETRÍA ESCENAS DE UN CRÍMENES (IZQUIERDA) O ACCIDENTES (DERECHA). 53
ILUSTRACIÓN 39. COMPARATIVA DE UNA MISMA CAPTURA CON DIFERENTES SENSIBILIDADES. 54
ILUSTRACIÓN 40. ÁREA DEL SENSOR DE DISTINTAS CÁMARAS DIGITALES. 55
ILUSTRACIÓN 41. DIFERENTES FORMATOS DE SENSOR COMERCIALES. 56
ILUSTRACIÓN 42. FOV A FOCALES LARGAS (TELE ZOOM) Y FOCALES CORTAS (GRAN ANGULAR). 57
ILUSTRACIÓN 43. SISTEMA *V-STARS* DE *GEODETIC SYSTEMS* DE 2 CÁMARAS. 58
ILUSTRACIÓN 44. *POLYWORKS* DE *INNOVMETRIC SOFTWARE INC.* Y *IMAGEMODELER* DE *AUTODESK, INC.* 59
ILUSTRACIÓN 45. SOFTWARE *BINGO* DE *GIP GEOINFORMATICS AND PHOTOGRAMMETRIC ENGINEERING.* 60
ILUSTRACIÓN 46. SOFTWARE *SHAPEMONITOR* DE *SHAPEQUEST, INC* EN UN SISTEMA DUAL DE 4 CÁMARAS. 61
ILUSTRACIÓN 47. SOFTWARE *IWITNESS* DE *DECHANT CONSULTING SERVICES.* 62
ILUSTRACIÓN 48. SOFTWARE DE ANÁLISIS FOTOGRAMÉTRICO *PHDIAS* DE *PHOCAD.* 63
ILUSTRACIÓN 49. DIAGRAMA DE FLUJO DE UN SOFTWARE PROGRAMADO USANDO *BENGE*. 64
ILUSTRACIÓN 50. SOFTWARE *PHOTOMODELER* DE *EOS SYSTEMS, INC.* 65
ILUSTRACIÓN 51. SMART CAMERA DE NATIONAL INSTRUMENTS. 70
ILUSTRACIÓN 52. LIFECAM VX-5500 DE MICROSOFT. 71

ILUSTRACIÓN 53. SLIM-54 DE WERLISA. 71
ILUSTRACIÓN 54. POWERSHOT SX110 IS DE CANON. 72
ILUSTRACIÓN 55. COMPARATIVA DE IMÁGENES CAPTADAS POR LAS DIFERENTES CÁMARAS PROBADAS. 73
ILUSTRACIÓN 56. ADAPTADOR CANON ACK 800. 74
ILUSTRACIÓN 57. TRÍPODES UTILIZADOS EN LAS PRUEBAS DE LABORATORIO. 74
ILUSTRACIÓN 58. ARRAY DE ANTENAS EN LA AZOTEA DEL EDIFICIO C DE LA ETSI DE TELECOMUNICACIÓN DE LA UPM. 75
ILUSTRACIÓN 59. CÁMARAS EN SU SOPORTE Y ANCLAJE A LA ESTRUCURA. 76
ILUSTRACIÓN 60. ARQUETAS ELÉCTRICAS JUNTO A LOS POSTES. 76
ILUSTRACIÓN 61. ORDENADOR PORTÁTIL HP DV6-2080ES 77
ILUSTRACIÓN 62. *PHOTOMODELER* DE *EOS SYSTEMS, INC.* 78
ILUSTRACIÓN 63. COMPARACIÓN ENTRE DIFERENTES VALORES DE EXPOSICIÓN EV (*EXPOSURE VALUE*) 86
ILUSTRACIÓN 64. DIAGRAMA DE FLUJO DEL SOFTWARE DE CAPTURA. 88
ILUSTRACIÓN 65. VENTANA PRINCIPAL DEL SOFTWARE DE CAPTURA AL INICIARSE LA APLICACIÓN. 95
ILUSTRACIÓN 66. VENTANA PRINCIPAL DEL SOFTWARE DE CAPTURA TRAS EJECUTARSE LA CONEXIÓN CÁMARAS-PC. 96
ILUSTRACIÓN 67. FLUJO DE PROGRAMACIÓN EN PS-REC-SDK Y FLUJO DESARROLLADO PARA LA CAPTURA MULTICÁMARA. 99
ILUSTRACIÓN 68. DIAGRAMA DE LA APLICACIÓN DESARROLLADA. 103
ILUSTRACIÓN 69. DIAGRAMA DE FLUJO DE COMANDOS DDE PARA PROCESADO FOTOGRAMÉTRICO EN *PHOTOMODELER*. 104
ILUSTRACIÓN 70. MODELO A ESCALA DE ANTENAS PARA EL DEMOSTRADOR DE LABORATORIO. 116
ILUSTRACIÓN 71. DISEÑO DEL DEMOSTRADOR DE LABORATORIO. 117
ILUSTRACIÓN 72. MONTAJE BAJO EL CUAL SE DESARROLLÓ EL SOFTWARE DE CAPTURA. 118
ILUSTRACIÓN 73. SISTEMA DEMOSTRADOR DE LABORATORIO CON EL MODELO DEL ARRAY DE 4 ANTENAS. 118
ILUSTRACIÓN 74. EJEMPLO DE UNA SERIE DE IMÁGENES CAPTURADAS POR EL DEMOSTRADOR DE LABORATORIO. 120
ILUSTRACIÓN 75. TRES PERSPECTIVAS DEL MODELO 3D GENERADO DEL ARRAY DEL LABORATORIO. 120
ILUSTRACIÓN 76. MODELO 3D GENERADO DEL ARRAY DEL LABORATORIO Y POSICIÓN DE LAS 7 CÁMARAS. 121
ILUSTRACIÓN 77. TIEMPO DE PROCESADO PARA DISTINTOS TAMAÑOS DE IMAGEN. 122
ILUSTRACIÓN 78. PLATAFORMA PARA EL ARRAY DE ANTENAS Y SISTEMA DE FOTOGRAMETRÍA. 123
ILUSTRACIÓN 79. ANTENA PAR160-120 DE LAMBDA ANTENAS (IZQUIERDA) Y SISTEMA DE SUJECCIÓN (DERECHA). 124
ILUSTRACIÓN 80. MONTAJE INICIAL DEL ARRAY DE ANTENAS EN LA ETSI DE TELECOMUNICACIÓN DE LA UPM. 124
ILUSTRACIÓN 81. SISTEMA DE SUJECCIÓN DE CÁMARAS MEDIANTE MÁSTILES Y ELEMENTOS AJUSTABLES. 125
ILUSTRACIÓN 82. SISTEMA RESISTENTE A VIENTOS Y LLUVIAS. 126
ILUSTRACIÓN 83. ASPECTO DEL PROTOTIPO FINAL MONTADO Y EN FUNCIONAMIENTO. 127
ILUSTRACIÓN 84. NUMERACIÓN (EN ROJO) DE LOS PATRONES EN FUNCIÓN DEL NÚMERO DE ANTENA (EN VERDE). 128
ILUSTRACIÓN 85. MODELO 3D DE LA MITAD DEL ARRAY DE ANTENAS. 129
ILUSTRACIÓN 86. MODELO 3D DEL ARRAY COMPLETO DE ANTENAS. 132
ILUSTRACIÓN 87. SERIE DE DIEZ CAPTURAS PARA GENERAR EL MODELO 3D DEL ARRAY DE ANTENAS. 133
ILUSTRACIÓN 88. VISTA LATERAL IZQUIERDA DEL MODELO 3D DEL ARRAY DE ANTENAS. 134
ILUSTRACIÓN 89. VISTA LATERAL DERECHA DEL MODELO 3D DEL ARRAY DE ANTENAS. 134
ILUSTRACIÓN 90. VISTA SUPERIOR DEL MODELO 3D DEL ARRAY DE ANTENAS. 135
ILUSTRACIÓN 91. COMPARACIÓN ENTRE UNA LENTE ESTÁNDAR (50 MM; ARRIBA) Y UN GRAN ANGULAR (18 MM; ABAJO). 138
ILUSTRACIÓN 92. CÁLCULO DEL CAMPO DE VISIÓN DE UNA CÁMARA. 145
ILUSTRACIÓN 93. ANTENA VIL-1 DE 15 METROS DE LA RED ESTRACK EN VILLAFRANCA, MADRID. 146
ILUSTRACIÓN 94. MODELO GRÁFICO DE LA ANTENA VIL-1. 147
ILUSTRACIÓN 95. SOLUCIÓN FOTOGRAMÉTRICA DÉBIL USANDO CANON 550D CON OBJETIVOS DE 15MM. 148
ILUSTRACIÓN 96. SOLUCIÓN FOTOGRAMÉTRICA ROBUSTA USANDO CANON 550D CON OBJETIVOS DE 15MM. 148
ILUSTRACIÓN 97. SOLUCIÓN FOTOGRAMÉTRICA MIXTA USANDO CANON 550D Y 5D MARK II CON OBJETIVOS DE 15MM. 149
ILUSTRACIÓN 98. DIAGRAMA DE BLOQUES DEL SISTEMA FINAL PARA DISPONIBILIDAD 100%. 153

1. Planteamiento del problema

La Sociedad de la Información del siglo XXI, en un mundo cada vez más globalizado, se apoya en una compleja red de tecnologías, de las cuales la espacial, pese a su breve historia, se ha convertido en un pilar básico. De entre las tecnologías espaciales, las comunicaciones por satélite han conocido un despliegue espectacular y una evolución ininterrumpida desde los comienzos de la era espacial. Esta evolución ha venido siempre determinada por un aumento de la frecuencia de las señales de radiofrecuencia, cuyo objetivo ha sido satisfacer cada vez mayores necesidades de comunicación.

Cada nuevo avance conlleva nuevos retos y en el caso particular del mencionado aumento de la frecuencia de las señales portadoras, uno de los principales retos se deriva del hecho de que la radiación electromagnética emitida es cada vez más directiva y por ello cada vez más difícil de apuntar sobre los pequeños y muy distantes vehículos

espaciales. En este proyecto se aporta una solución que pretende integrar calidad y bajo coste para dar respuesta a las necesidades de una nueva técnica para el apuntamiento de las grandes antenas de la ESA.

Este capítulo se dedica a mostrar el planteamiento del problema a resolver, enmarcándolo en su contexto y explicando brevemente las soluciones propuestas para dar respuesta al mismo. En los sucesivos capítulos se estudiará el sustrato teórico en el que se basan las soluciones presentadas, así como todas las fases del diseño e implementación de las mismas, incluyendo los resultados experimentales finales que se han obtenido con el sistema desarrollado, así como un estudio de extensión del prototipo a una antena real de 15 metros de la red ESTRACK de la ESA.

1.1. RED DE SEGUIMIENTO DE LA ESA

La red europea de estaciones de seguimiento espacial ESTRACK (*European Space Tracking*) es un sistema distribuido por toda la tierra consistente en estaciones terrestes cuyo objetivo es proveer a las misiones de la ESA de enlaces de comunicación entre satélites en órbita y el Centro Europeo de Operaciones Espaciales ESOC (*European Space Operations Centre*). El núcleo de la red ESTRACK lo componen 10 estaciones localizadas en distintos puntos de la geografía terrestre (Ilustración 1).

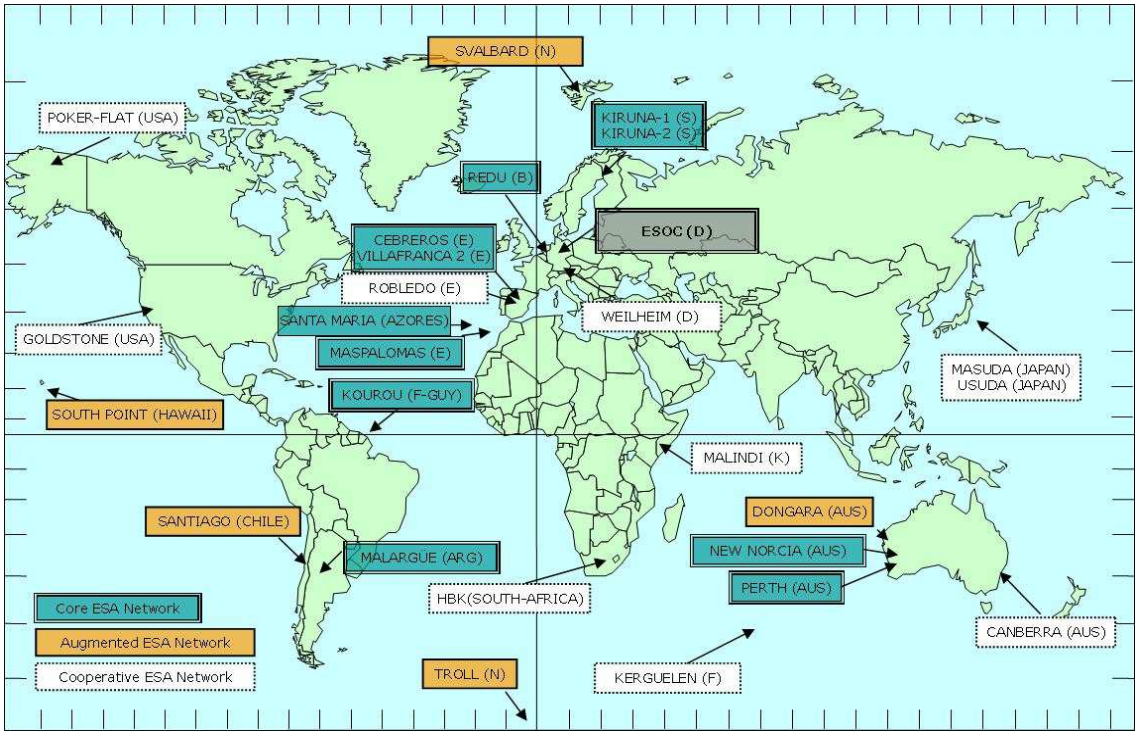

Ilustración 1. Red de estaciones de seguimiento ESTRACK de la ESA.

La tarea principal de las estaciones de seguimiento es facilitar la comunicación con las misiones espaciales proporcionando enlaces de subida para telecomandos y enlaces de bajada para descarga de datos científicos, así como recepción de telemedidas con las que se recopilan distintos tipos de información que ayudan a los controladores de la misión a conocer, entre otras cosas, la posición, trayectoria y velocidad de las naves espaciales. Las estaciones de la red ESTRACK proporcionan además otros servicios tales como la búsqueda y adquisición de las sondas recién lanzadas y auto seguimiento de las mismas.

Cada estación de la red ESTRACK está compuesta por uno o más terminales, cada uno de ellos compuestos por una antena y su equipo de procesamiento de señal asociado. Con una tasa de disponibilidad del 99% del tiempo, estas estaciones pueden dar soporte a múltiples misiones y los recursos de la red se comparten con otras agencias espaciales y operadores de satélites.

Ilustración 2. Antena Vil-1 de 15 metros de la red ESTRACK en Villafranca, Madrid.

El núcleo de la red ESTRACK lo componen 10 estaciones operadas por la ESA: Kourou (Guayana Francesa), Maspalomas, Villafranca y Cebreros (España), Redu (Bélgica), Santa Maria (Portugal), Kiruna (Suecia), Perth y New Norcia (Australia) y Malargüe

(Argentina). Además la red incluye otras estaciones operadas por agencias externas, que proporcionan un soporte adicional para ciertas misiones.

Todas las estaciones incorporan antenas de 12, 13 ó 15 metros (Ilustración 2), excepto las estaciones de New Norcia, Cebreros y Malargüe equipadas con antenas de espacio profundo de 35 metros. Las estaciones más antiguas utilizan una combinación de banda S, banda Ka y banda X (2.025-2.300 MHz, 18,1-32,3 GHz, 7.145-8.500 MHz respectivamente) y las más modernas utilizan únicamente la banda X, todas operando en las bandas de frecuencias asignadas a SSS (*Space Science Services*) y FSS (*Fixed-Satellite Service*) por la Unión Internacional de las Telecomunicaciones ITU (*International Telecommunications Union*).

1.2. FASE DE LANZAMIENTO Y ÓRBITA TEMPRANA

De todas las operaciones llevadas a cabo durante la vida útil de un satélite o nave espacial, la fase de lanzamiento y órbita temprana conocida como LEOP (*Launch and Early Orbit Phase*) es la fase más crítica. Durante esta fase (Ilustración 3) se produce el lanzamiento del satélite y se toma el control justo después de que éste se separe del vehículo lanzador. Este periodo sólo terrmina cuando el satélite se sitúa en su órbita definitiva.

Durante esta fase el equipo de operaciones trabaja de forma continua para monitorizar y controlar los distintos subsistemas involucrados. Estas funciones incluyen el despliegue de antenas, paneles solares, etc. que incorpora el satélite y la ejecución de las maniobras de transferencia orbital que sean necesarias en cada caso. Por ejemplo, en el caso de un satélite geoestacionario, el vehículo de lanzamiento deja al satélite en una órbita de transferencia GTO (*Geostationary Transfer Orbit*), que es elíptica. La fase LEOP incluye además una serie de encendidos y apagados de los motores para alcanzar la órbita geoestacionaria definitiva, que es circular.

Durante la fase LEOP el vehículo espacial es controlado por el ordenador de a bordo, que inicia una serie de operaciones automáticas conocidas como secuencia de adquisición. Al finalizar todos los pasos de esta secuencia el satélite quedará apuntando hacia la Tierra y su configuración interna estará muy próxima a la requerida para su operación rutinaria.

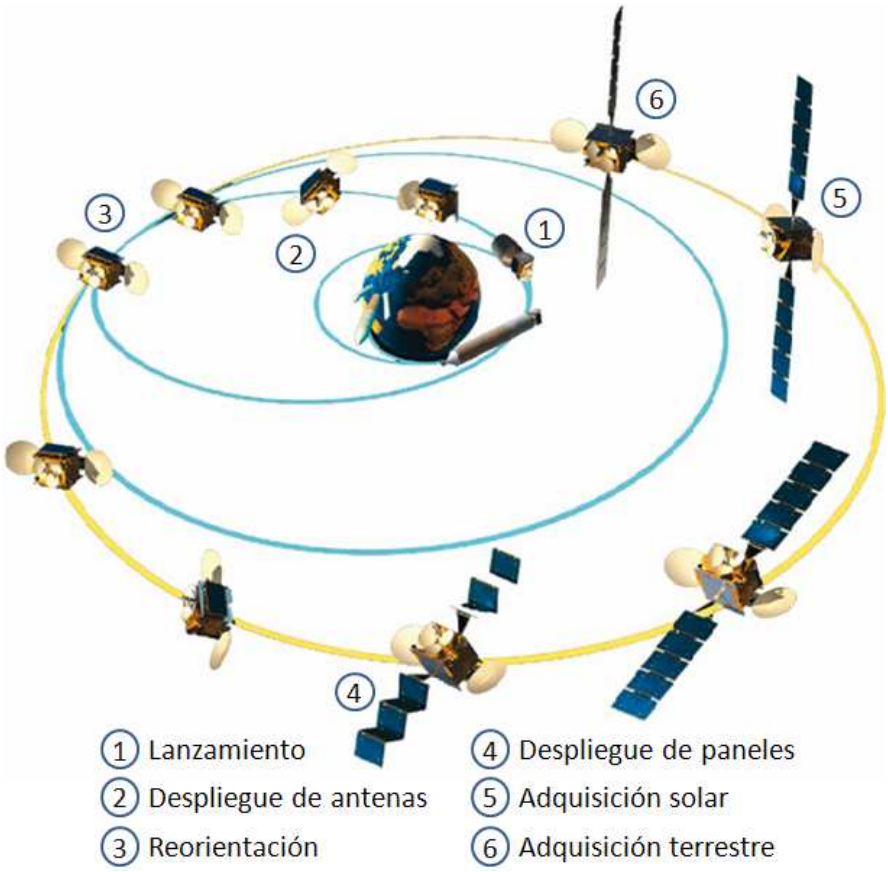

Ilustración 3. Fase LEOP de una misión espacial genérica.

1.3. DIVERGENCIA DE UNA ANTENA

Desde el punto de vista de una fuente de radiación electromagnética, una antena parabólica de microondas como las usadas en comunicaciones por satélite puede ser considerada una abertura circular, ya que produce radiación dentro del círculo que describe la antena. El patrón de difracción de menor apertura angular se produce cuando dicha abertura se ilumina homogéneamente con una onda plana desde el foco de la parábola, y consiste en un conjunto de anillos concéntricos conocido como disco de Airy (Ilustración 4).

Si el diámetro de la antena es D y λ la longitud de onda de la radiación electromagnética, la variación angular de la intensidad de radiación viene dada por la ecuación (1-1) [11].

$$\frac{I(\theta)}{I(0)} = \left[2 \frac{J_1\left(\frac{\pi D}{\lambda}\operatorname{sen}(\theta)\right)}{\frac{\pi D}{\lambda}\operatorname{sen}(\theta)} \right]^2 \qquad \textbf{(1-1)}$$

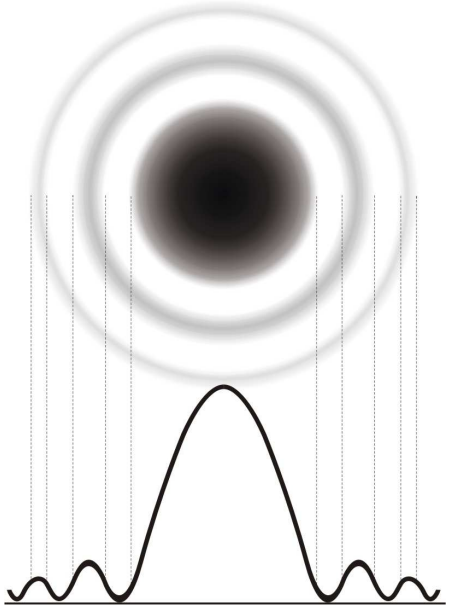

Ilustración 4. Patrón de difracción producido por una apertura circular (disco de Airy).

donde $J_1\left(\frac{\pi D}{\lambda}\text{sen}(\theta)\right)$ es la función de Bessel de primer orden de $\frac{\pi D}{\lambda}\text{sen}(\theta)$. El primer cero corresponde a $\frac{\pi D}{\lambda}\text{sen}(\theta)$=3,832. Utilizando la aproximación $\text{sen}(\theta) \approx \theta$ se obtiene el límite de difracción de la antena, que viene dado por la ecuación (1-2).

$$\theta = 1{,}22\left(\frac{\lambda}{D}\right)\ (\text{rad}) \qquad \textbf{(1-2)}$$

La fórmula del límite de difracción calculada se corresponde con el criterio del primer cero de la función de Bessel. Si se usara otro criterio, el factor multiplicador de λ/D sería diferente. Por ejemplo, si en lugar de tomar el punto en el que se encuentra el primer cero, se tomase el punto en el que la potencia cae a la mitad, el factor multiplicador sería 1,03 en lugar de 1,22.

Este límite determina el mínimo ángulo de difracción y por lo tanto la mínima divergencia del haz con el aumento de la distancia al propagarse la onda electromagnética. En la Ilustración 5 puede apreciarse una representación del límite de difracción en una fuente. Se observa cómo la anchura (sea cual sea el criterio para su medición) del lóbulo principal de la función de Bessel aumenta al disminuir la abertura D y/o aumentar la longitud de onda λ.

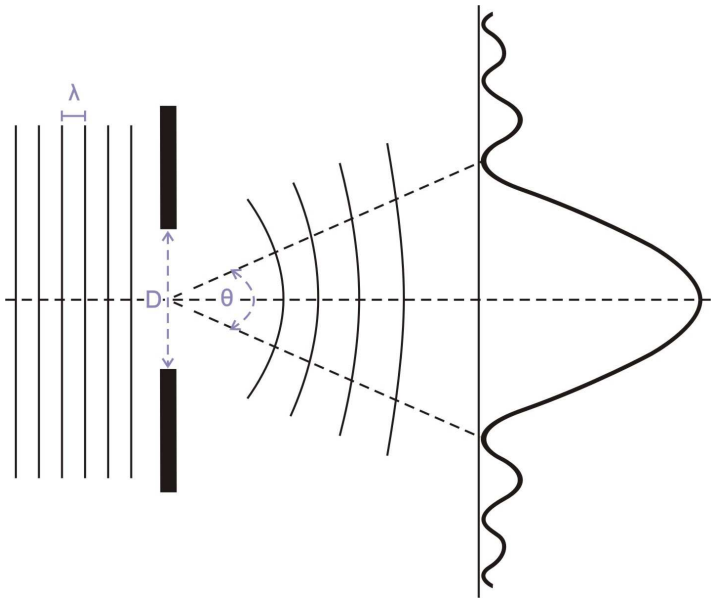

Ilustración 5. Límite de difracción de una antena.

1.4. SISTEMA DE AYUDA A LA ADQUISICIÓN EN BANDA X

El error tolerable para la fase de adquisición y seguimiento de un vehículo espacial que puede permitirse una antena basada en un reflector parabólico es proporcional a su tamaño de haz en la posición de dicho vehículo. Este tamaño de haz es proporcional a la divergencia de la antena, y como se ha visto en el apartado anterior, ésta a su vez es inversamente proporcional al diámetro de la misma y a la frecuencia de la onda electromagnética.

En las futuras misiones a las que dará soporte la red ESTRACK no se usará más la banda S (2 GHz) para la fase LEOP, sino que se usará la banda X (8 GHz). Esto significa que la divergencia será aproximadamente cuatro veces menor, y así también el tamaño del spot recibido será cuatro veces menor. A esto se le une la necesidad de utilizar las grandes antenas de 15 metros de la red ESTRACK con el objetivo de obtener las necesarias figuras de mérito G/T (definida como la relación entre la ganancia de la antena con respecto a la temperatura de ruido del sistema y que cuantifica la sensibilidad de una estación terrena en un sistema de comunicaciones por satélte) para que el enlace de comunicación pueda llevarse a cabo según los requisitos de este tipo de comunicaciones. El gran tamaño de estas parábolas impone una gran dificultad en lo relativo a la adquisición y seguimiento de vehículos espaciales cuya posición no es perfectamente conocida previamente. Como se vió en el apartado 1.2, éste es precisamente el caso durante la fase LEOP y la dificultad se debe al hecho de que unas

aperturas tan grandes proporcionan unas divergencias muy pequeñas, por lo que el haz en la posición del satélite es también muy reducido, lo que exige márgenes de error muy bajos.

Ilustración 6. Sistema de adquisición de satélites XAA en antena de 15 m.

Las grandes antenas de 15 metros de la red ESTRACK actualmente proporcionan errores de seguimiento de aproximadamente 0,03º cuando operan en banda S. Sin embargo, en banda X, con haces más estrechos, este error aumenta hasta los 0,14º, lo que es suficiente cuando se apunta a satélites situados en órbitas bien definidas y estables. Sin embargo, durante la fase LEOP las predicciones orbitales no pueden ser tan precisas debido a la alta incertidumbre respecto a la posición instantánea exacta del vehículo lanzador.

El sistema de ayuda a la adquisición en banda X o XAA (*X-band Acquisition Aid*) [15], propuesto por la ESA para facilitar el proceso de adquisición y seguimiento, consiste en usar antenas más pequeñas con el objetivo de aumentar el margen de error a

base de aprovechar las mayores divergencias que proporcionan menores aberturas en la propagación de la señal radioeléctrica en comparación con una antena más grande como las de 15 metros (Ilustración 6). Ambas antenas se comportarían de forma solidaria en relación a los ejes móviles de forma que el apuntamiento de la antena de 15 metros sería proporcional al de la antena pequeña.

Ilustración 7. Antena de 1,3 m acoplada a una de 15 m [15].

Estas antenas deberían ser lo más pequeñas posible con el objetivo de ensanchar el haz para disminuir el margen de error en la adquisición y seguimiento. Sin embargo, dado que la comunicación debe realizarse sobre largas distancias y con las dificultades habituales de las comunicaciones por satélite, es necesario que el diámetro de las antenas sea suficiente para satisfacer unas figuras de mérito G/T mínimas. Por ello, la solución de compromiso propuesta por la ESA, en la que por otra parte se emplean las últimas tecnologías relativas a construcción de antenas, amplificadores de bajo ruido o control de temperatura con el fin de aumentar la figura de mérito, contempla utilizar antenas de 1,3 metros de diámetro (Ilustración 7).

1.5. ESTIMACIÓN ADAPTATIVA DE DIRECCIÓN DE LLEGADA

Una vez identificado el problema que conllevan los estrechos haces de las grandes antenas de la red ESTRACK de la ESA a la hora de realizar el seguimiento de vehículos

espaciales en la fase LEOP, se hace evidente la necesidad de mejorar los métodos de apuntamiento de estas antenas. El método que ha motivado el desarrollo de este proyecto se basa en emplear un array de pequeñas antenas para mejorar dicho apuntamiento. La teoría de estimación adaptativa de dirección de llegada o DoA (*Direction of Arrival*) se encuentra muy desarrollada, pudiéndose encontrar en la literatura numerosas referencias que en general parten de los estudios realizados en su momento por Schmidt y Roy, que dieron lugar respectivamente a los algoritmos MUSIC (*MUltiple SIgnal Classification*) [22] y ESPRIT (*Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Techniques*) [19]. Estos métodos, en un modelo ideal, presentan la atractiva propiedad de super-resolución, es decir, permiten estimar la dirección de llegada de una señal con una precisión mayor que utilizando procedimientos anteriores basados en la estimación espacial.

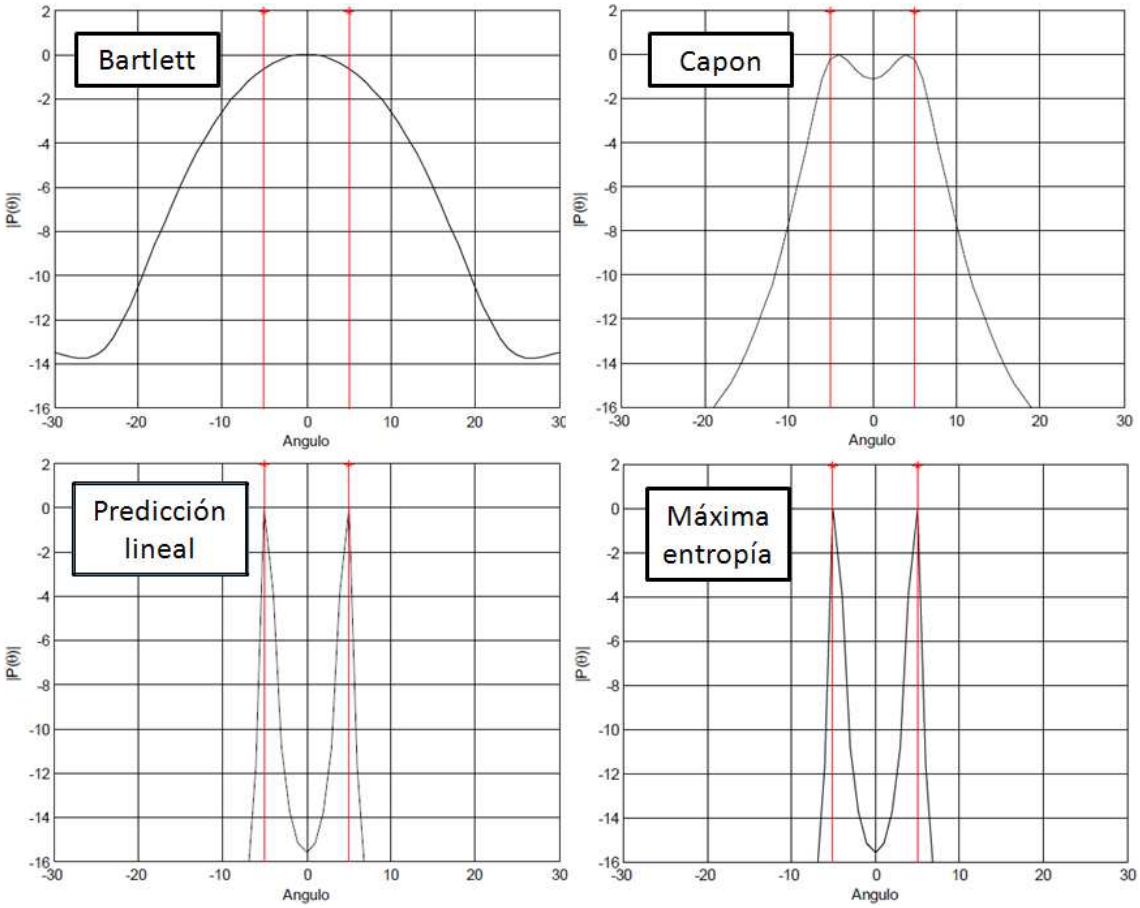

Ilustración 8. Pseudo espectros de Bartlett, Capon, predicción lineal y de máxima entropía para θ=±5º [2].

En general las técnicas de DoA ayudan a definir una función que proporciona una indicación del ángulo de llegada de las señales que inciden sobre un array de antenas. Esta precisión es tanto mayor cuanto más separadas estén las antenas entre sí. A la

función que definen estas técnicas se le denomina tradicionalmente pseudo espectro y para definir dicho pseudo espectro existen muchos métodos diferentes: a través de la formación de haz, de la matriz de correlación, análisis de autovalores, predicción lineal, etc. Los dos grupos de métodos de estimación de DoA son los basados en la estimación espacial y los basados en la autoestructura. Los primeros requieren el cálculo del espectro espacial en función de la potencia media recibida por un array de antenas en función del ángulo θ y posteriormente determinar los máximos de dicho espectro mediante diferentes tipos de estimaciones como Bartlett, Capon, lineal o de máxima entropía (Ilustración 8) [2].

Los métodos basados en la autoestructura aportan mayor precisión que los basados en la estimación espacial. Estos métodos se basan en las propiedades de la matriz de correlación del array y el espacio generado por sus autovectores en dos subespacios, el de la señal y el de ruido. El subespacio de la señal es generado por los autovectores asociados con sus principales autovalores de la matriz de correlación y el subespacio de ruido es generado por los autovectores asociados a los autovalores más pequeños. Se han propuesto muchos métodos basados en la autoestructura de la matriz de correlación del array como son el Pisarenko, Min-norm (Ilustración 9) [2], MUSIC, ESPRIT, Root-MUSIC, etc. De entre todos estos métodos, los de alta resolución más utilizados son MUSIC y ESPRIT.

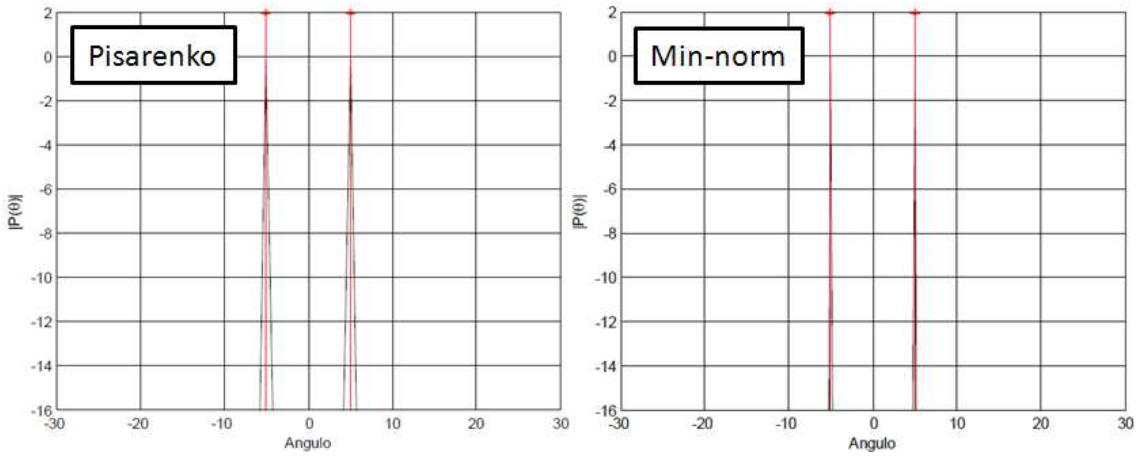

Ilustración 9. Comparación de pseudo espectros de Pisarenko y de Min-norm para θ=±5º [2].

Los métodos de estimación adaptativa de dirección de llegada ofrecen unos resultados muy precisos si se usa un array de antenas. No obstante, su aplicación en escenarios reales, donde entran en juego diversas fuentes de error, implica una degradación muy severa de sus prestaciones si no se toman las debidas precauciones. Una de las más

importantes es la correcta calibración del array y, más concretamente, la calibración de posiciones de los centros de fase de cada elemento radiante individual, especialmente si se está tratando con arrays de grandes dimensiones.

1.6. ARRAYS DE ANTENAS

Como se ha visto, la actual propuesta de la ESA emplea una antena parabólica de 1,3 metros de diámetro adherida a la de mayor tamaño. Esta segunda antena, dotada de mayor ancho de haz, se encarga de la estimación precisa del ángulo de llegada mediante técnicas de escaneo cónico. La principal desventaja de este método es su lentitud de convergencia, perdiéndose varias tramas de señal antes de conseguir cerrar el lazo de comunicación. La propuesta de la empresa INSA (Ingeniería y Servicios Aeroespaciales), a petición de la ESA, consiste en reemplazar la antena parabólica de 1,3 metros por un array de 16 antenas de menor coste combinado con algoritmos de procesado digital adaptativo para estimación de DoA, como los que se han descrito en el apartado anterior. Estos elementos radiantes serían mucho más pequeños y ligeros, y estarían situados uniformemente en el perímetro del paraboloide de 15 metros, tal como muestra el diagrama de bloques de la Ilustración 10.

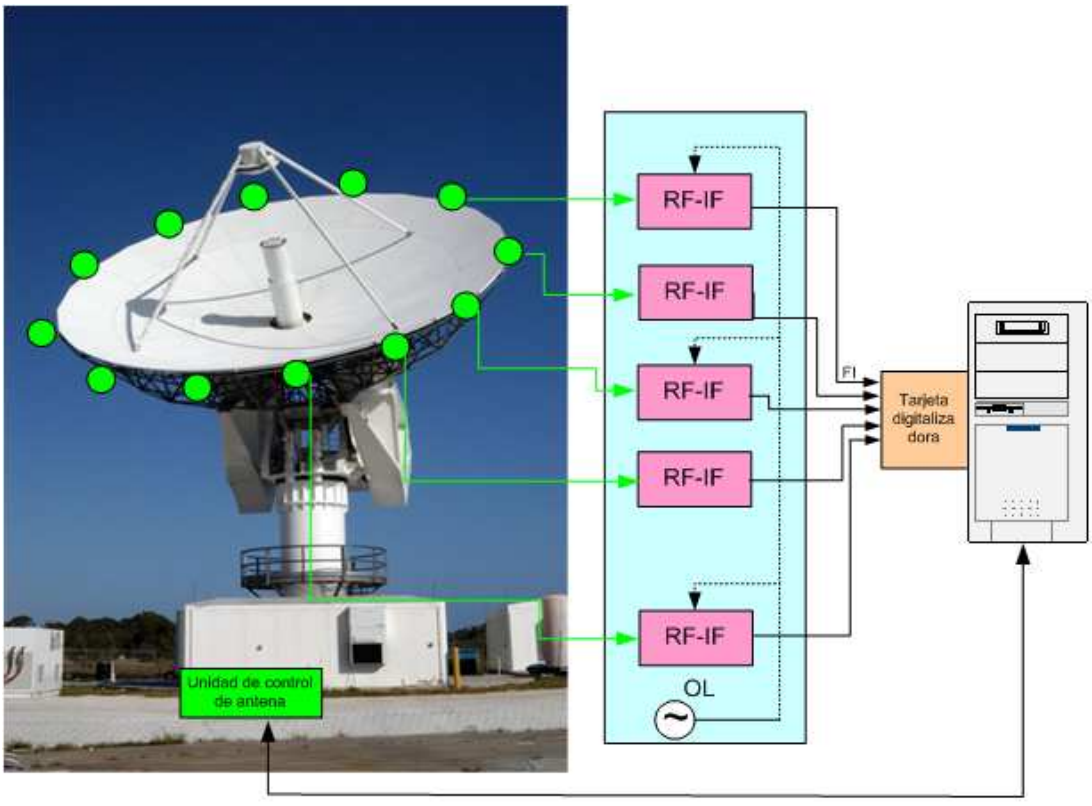

Ilustración 10. Array de antenas en torno a la parábola VIL-2 de la ESA.

La gran distancia que media entre cada elemento radiante hace que la calibración de la posición tridimensional de su centro de fase con respecto a una referencia común sea extremadamente importante para el correcto funcionamiento de algoritmos como MUSIC.

Además es importante reseñar que no es suficiente un método de calibración estático, es decir, de puesta en marcha inicial. En efecto, dado el gran tamaño del paraboloide y puesto que el array estaría adherido al mismo (por lo que se comportaría de forma solidaria), entran en juego deformaciones gravitatorias dinámicas que dependen de la elevación de la dirección de apuntamiento (Ilustración 11) y que no pueden modelarse con precisión. Estas deformaciones por efectos de la gravedad pueden llegar a añadir hasta 0,3º al error de apuntamiento del sistema.

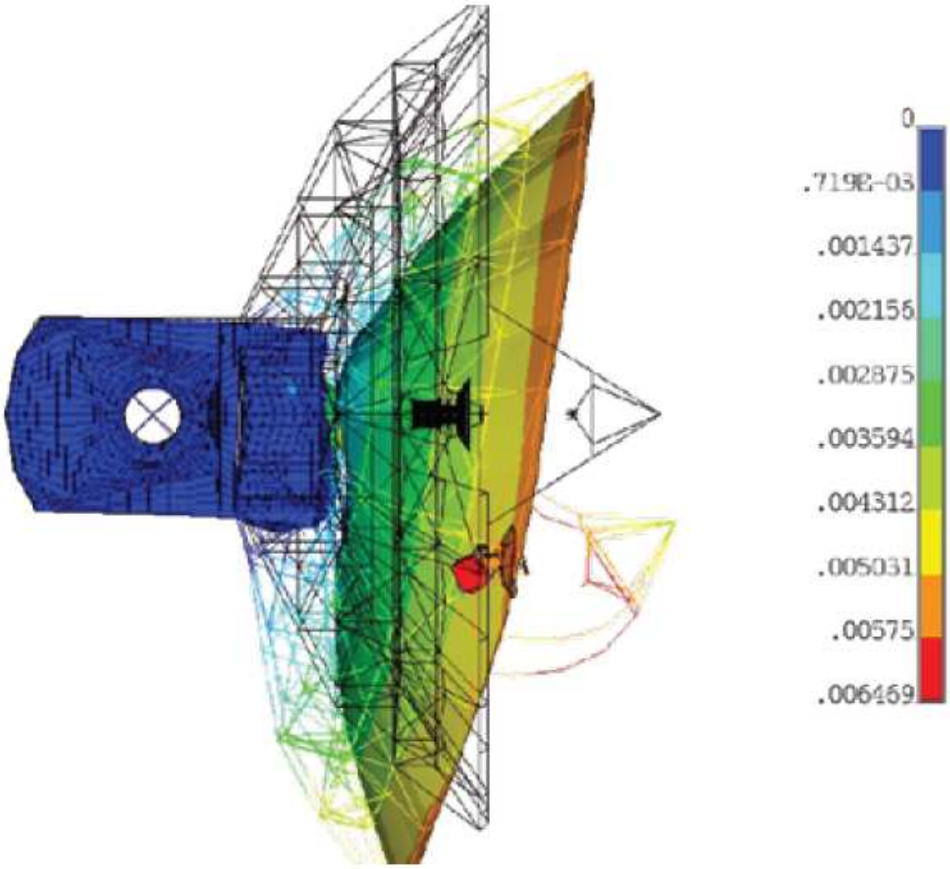

Ilustración 11. Deformaciones gravitatorias en la parábola de 15 metros.

Tras diversos estudios, se ha llegado a la conclusión de que el mejor procedimiento para resolver este problema es el de la fotogrametría, consistente en obtener una serie de distancias tridimensionales relativas de una serie de puntos determinados a priori a través de un conjunto de imágenes bidimensionales. Con esta técnica se espera no solo

llegar a obtener un modelo tridimensional suficientemente preciso que proporcione a los algoritmos DoA la calibración de posiciones de los centros de fase de cada elemento radiante, sino que además se pretende poder independizar la eficiencia de estos algoritmos del problema de las deformaciones gravitatorias mediante el diseño del sistema fotogramétrico con el requisito de que funcione en tiempo real, es decir, proporcionando un modelo tridimensional de forma dinámica cada ciertos intervalos de tiempo.

1.7. PROYECTO CAMSA

El objetivo particular del proyecto CAMSA (Comunidad Autónoma de Madrid, Sistema de Adquisición), liderado por la empresa INSA (Ingeniería y Servicios Aeroespaciales) consiste en el desarrollo, simulación y prueba de un sistema preciso, rápido y fiable de estimación de ángulos o dirección de llegada DoA de señales provenientes de satélites, vehículos de lanzamiento espacial, y similares, utilizando a tal efecto arrays o agrupaciones de antenas.

En este proyecto se detallan los trabajos necesarios para determinar la viabilidad de un sistema de calibración de las posiciones de antenas de un array de gran tamaño mediante fotogrametría. Para ello se ha contemplado el diseño, programación, implementación y medición del rendimiento de los sistemas y algoritmos propuestos. Dicho trabajo ha sido subcontratado a la Universidad Carlos III de Madrid.

El objetivo del trabajo desempeñado por la Universidad Carlos III de Madrid fue el desarrollo de un método dinámico de calibración de posiciones de un array de antenas mediante técnicas de fotogrametría, cuyas fases comprenderían:

- Investigación del problema e identificación de soluciones a desarrollar.
- Diseño y construcción de un demostrador para pruebas en laboratorio.
- Pruebas y validación en exterior del método general con un prototipo.

Las pruebas finales se acordaron realizar con un prototipo de 8 ó 16 antenas parabólicas, para comunicación con satélites geoestacionarios operando en banda S. Aunque en este caso las deformaciones dinámicas no tienen lugar, el sistema fotogramétrico debió presentarse en su versión definitiva, con operatividad en tiempo real. La topología del array se diseñó inicialmente como una disposición en cruz o en una matriz de 4×4, tal

como se observa en la Ilustración 12. Las hileras podrían tener distintas alturas con el objetivo de evitar el ocultamiento entre parábolas. El emplazamiento elegido para el prototipo es la azotea del edificio C de la ETSI de Telecomunicación de la Universidad Politécnica de Madrid.

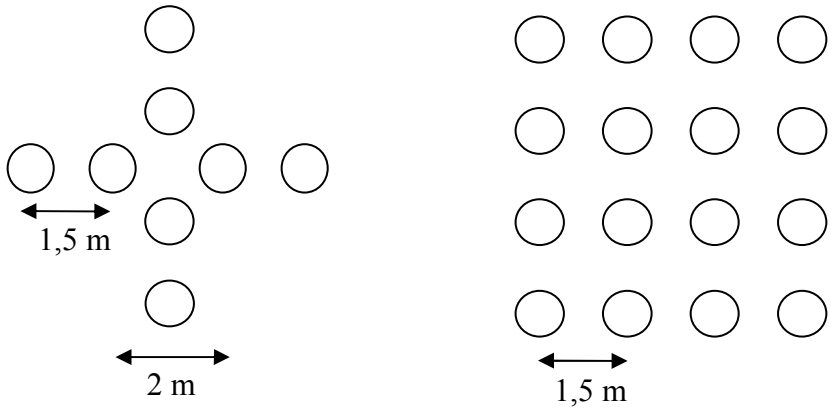

Ilustración 12. Dos posibles configuraciones para el prototipo.

1.8. REQUISITOS DE LA SOLUCIÓN REQUERIDA A LA UC3M

El método de calibración mediante fotogrametría subcontratado a la Universidad Carlos III de Madrid se pactó para plantearse de tal forma que:

- Alcance una precisión de calibración de posiciones del orden del centímetro o inferior. Si bien un centímetro de error puede resultar aceptable en banda S, se tiene por objetivo exportar esta solución a bandas mayores de frecuencia, donde la precisión mínima necesaria es mayor.
- Utilice el hardware de coste mínimo tal que se cumpla la anterior condición.
- No impida el correcto funcionamiento de la parábola de 15 metros.
- Permita obtener una correcta estimación de posiciones de todas las antenas en un tiempo inferior a los 10 segundos.
- Tenga en cuenta el diseño del sistema de cámaras para captación de imágenes, tal que siempre cuente con un marco fijo de referencia y pueda compensar pequeñas perturbaciones de la posición y orientación de las mismas.

- Pueda operar tanto de día como de noche y en condiciones climáticas adversas (lluvia). Es importante resaltar que el equipo procesador de datos no tiene por qué cumplir esta condición.
- Siga funcionando sin importar el azimut y elevación a los que esté apuntando la antena principal.

Las posiciones calibradas serán relativas a una antena de referencia escogida arbitrariamente. Puesto que las antenas del array estarán perfectamente calibradas y su centro de fase completamente caracterizado, resultará indiferente el punto o los puntos de cada elemento radiante cuyas posiciones estime el algoritmo de fotogrametría, siempre y cuando estén rigurosamente determinados.

Sí será necesario, no obstante, referenciar el sistema de coordenadas local del array con respecto al sistema absoluto de la antena parabólica, para la correcta estimación de ángulos de azimut y elevación. En efecto, es de esperar que los planos formados por el paraboloide y el array en sí presenten una ligera rotación que podría traducirse en errores inaceptables en la estimación de la DoA. Esto se puede observar en la Ilustración 13.

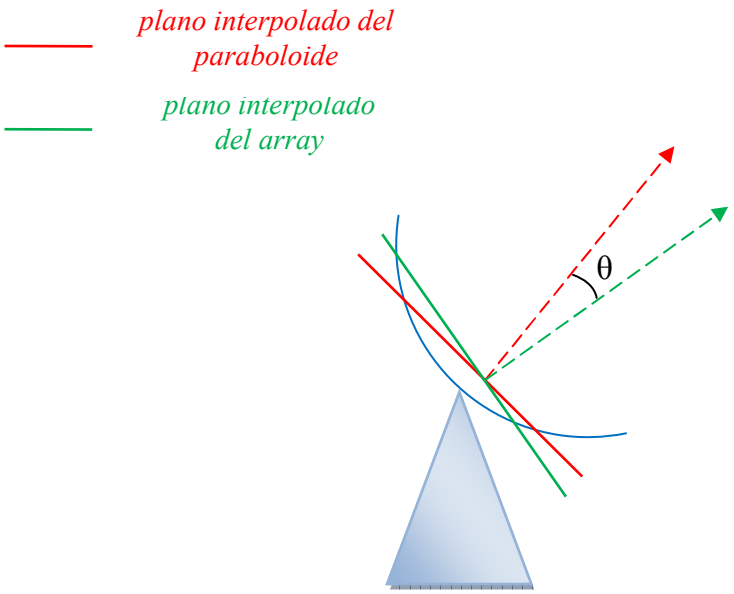

Ilustración 13. Error angular en los planos de referencia del array y del paraboloide.

Para evitar estos errores es imprescindible calibrar la posición de varios puntos de la propia parábola, estimar ambos planos por interpolación y determinar el ángulo de rotación θ pertinente. Esto es equivalente a hacer coincidir los ejes X e Y del plano de

coordenadas del array, donde están definidas las posiciones calibradas, con el que utiliza el sistema de apuntamiento de la antena parabólica.

1.9. PLANIFICACIÓN, ENTREGABLES Y OTRAS OBLIGACIONES

La fecha de realización de un primer demostrador en laboratorio se acordó para enero de 2.010 y la puesta en marcha del sistema completo para prueba con el prototipo en la azotea de la UPM a lo largo de junio del mismo año.

Los entregables se establecieron de la siguiente manera:

- Sistema completo de calibración por fotogrametría, tanto hardware como software.
- Informes de diseño, construcción y pruebas.
- Ficheros de diseño, simulación y de campañas de pruebas que hayan sido utilizados durante el desempeño de los trabajos. Se suministrarán en CD-DVD y con posibilidad de modificación por parte de INSA.
- Informe de viabilidad del sistema de calibración para su aplicación en una antena parabólica de 15 metros con un array de 16 elementos adherido a la misma.

Adicionalmente se fijaron otras obligaciones a cumplir por el subcontratista, la Universidad Carlos III de Madrid:

- Realizar un informe que justifique la elección relativa a la parte software de fotogrametría.
- Adquirir el equipo hardware directamente relacionado con la fotogrametría (cámaras comerciales, patrones de medidas, etc.).
- Entregar informes de progreso tres días antes de las reuniones mensuales que tuvieron lugar en las instalaciones de INSA.
- Dar un entrenamiento de al menos dos días sobre los trabajos desarrollados que faciliten la comprensión y utilización del hardware y software.
- Mantener copia de todos los programas e informes durante un tiempo no inferior a 5 años desde la finalización de los trabajos.

- Permitir el seguimiento y la colaboración en el diseño y pruebas del sistema por parte de un empleado de INSA.
- Custodiar las estaciones y todos sus elementos durante la vigencia del contrato INSA-UC3M.

El presente trabajo resume las tareas realizadas por el autor en el desarrollo de este sistema.

2. Fotogrametría de campo cercano

La capacidad de llevar a cabo medidas tridimensionales de forma muy precisa siempre ha sido fundamental para las ciencias físicas y la ingeniería, así como para otras muchas disciplinas como la medicina, arquitectura, arqueología, etc. Para ello se han desarrollado multitud de técnicas muy especializadas que normalmente han visto su ámbito de trabajo y aplicación limitado a un reducido contexto para el que fueron creadas originalmente. Por el contrario, la fotogrametría trasciende estas limitaciones ya que puede ser empleada en una enorme variedad de aplicaciones dentro de ámbitos muy alejados entre sí. Los mismos fundamentos se aplican, por ejemplo, en la creación de mapas tridimensionales mediante captura de imágenes desde el espacio y en la medida microtopográfica de la piel humana. Además la fotogrametría es ya una ciencia bien

establecida que está disponible para ingenieros u otros profesionales que precisen de medidas tridimensionales de alta precisión.

Dentro de la disciplina conocida como fotogrametría se integran una serie de métodos de medida y análisis de imágenes con la finalidad de deducir formas, posiciones, texturas, etc. de objetos reales a partir de fotografías de los mismos. En principio las técnicas fotogramétricas pueden utilizarse en cualquier situación en la que los objetos de estudio puedan ser fotografiados. El principal objetivo de las medidas fotogramétricas se centra en la reconstrucción tridimensional de los objetos fotografiados.

En este capítulo se ofrece una revisión de los fundamentos teóricos en los que se apoya la fotogrametría, centrándose en la fotogrametría de campo cercano, por ser la de interés en el ámbito del presente proyecto.

2.1. INTRODUCCIÓN Y RANGOS DE APLICACIÓN

La fotografía se basa en convertir objetos tridimensionales en imágenes bidimensionales. Por lo tanto, en el proceso existe una pérdida de información. El objetivo de la fotogrametría es revertir el proceso para llevar a cabo medidas tridimensionales sobre dichas capturas bidimensionales. Sin embargo, debido a la pérdida de información, no es posible reconstruir fielmente la información tridimensional a partir de solo una imagen. Como mínimo se requieren dos imágenes, aunque se pueden utilizar más imágenes y usar la información extra existente en ellas para mejorar el proceso de medida.

La fotogrametría, al igual que la percepción de la profundidad en la visión, se basa en la triangulación para llevar a cabo mediciones tridimensionales a partir de imágenes bidimensionales, mediante la intersección de líneas convergentes.

En la Ilustración 14 se puede observar una relación entre el tamaño de un objeto que se desea medir y la precisión alcanzable en dicha medición, según las distintas técnicas disponibles en cada caso. Aunque los límites son imprecisos, se puede decir que la fotogrametría de campo cercano es de aplicación cuando los objetos a medir tienen tamaños entre 1 y 100 metros y las precisiones que se pueden alcanzar van desde 0,01 mm hasta 1 cm, respectivamente [14].

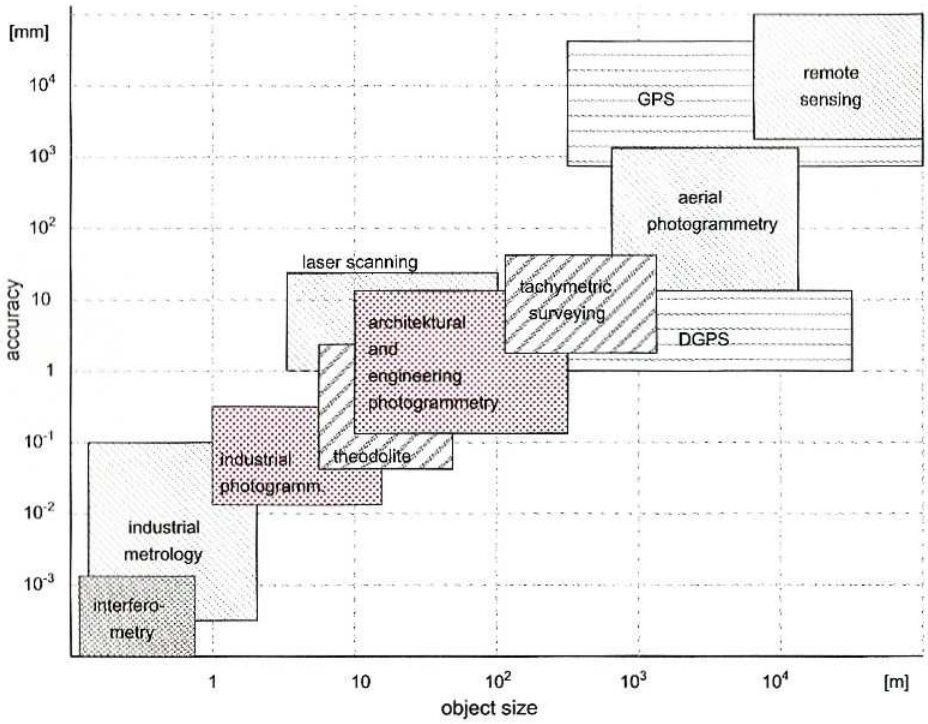

Ilustración 14. Relación entre objetos a medir y su precisión según la técnica de medida [14].

2.2. ESCALADO Y ESTIMACIÓN DE LA PRECISIÓN

El número de escalado m se define como el cociente entre la distancia al objeto h y la distancia principal c (que es la longitud focal sumándole la distancia necesaria para alcanzar un enfoque preciso con el objetivo formador de imagen) de la cámara utilizada. Además, esta relación también se puede expresar como el cociente entre distancias en el espacio X (relativo al objeto a medir) y el espacio x' (relativo al plano imagen) según el modelo simplificado de una cámara estenopeica (en la que la luz produce una imagen que pasa a través de un pequeño agujero, sin óptica asociada) (Ilustración 15).

$$m = \frac{h}{c} = \frac{X}{x'} = \frac{1}{M} \qquad \textbf{(2-1)}$$

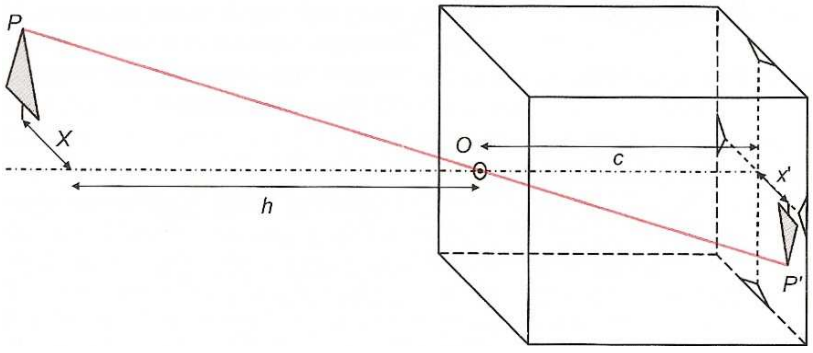

Ilustración 15. Modelo simplificado de cámara estenopeica.

El número de escalado m debe ser calculado correctamente con respecto a la cámara utilizada y las condiciones externas con el objetivo de poder llevar a cabo medidas precisas en el modelo 3D, ya que la precisión de dichas medidas se basará en último termino en este factor, haciendo uso de la equivalencia de h y c con X y x'.

Según se ha visto en la definición, este número cambia (Ilustración 16) en función de la distancia al objeto, que puede variar si el mismo tiene una gran información de profundidad o bien las capturas se han realizado con el objeto muy rasante, y también en función de la longitud focal de la cámara, por lo que se usan números de escalado variable entre un rango mínimo y máximo.

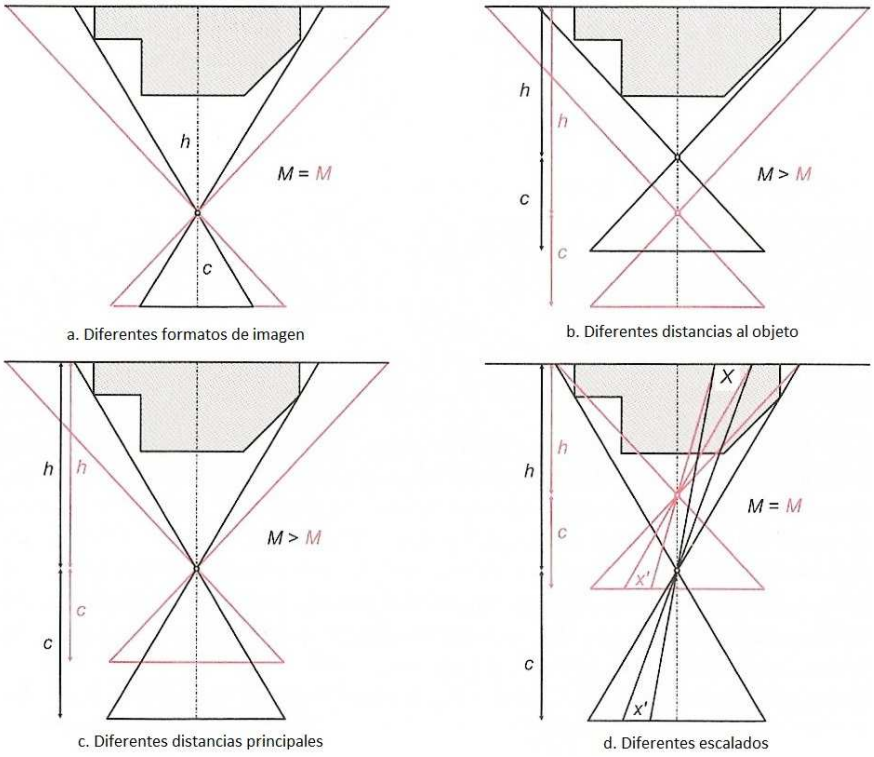

Ilustración 16. Dependencia del número de escalado con la distancia al objeto y la longitud focal.

La precisión que se puede conseguir en una medida de un modelo 3D requiere una evaluación contrastada con una medida externa, como por ejemplo una distancia calibrada conocida y capturada en la imagen, sin embargo es posible realizar estimaciones basadas en la aplicación de la equivalencia del número de escalado con X y x' mediante diferenciales (Ilustración 17). No obstante, estas estimaciones, al depender del factor de escalado (que puede ser el mismo para distintas combinaciones de h y c), solo dan estimaciones relativas de la precisión, que podrían servir, por ejemplo, en pruebas realizadas en las que se mantiene el parámetro m.

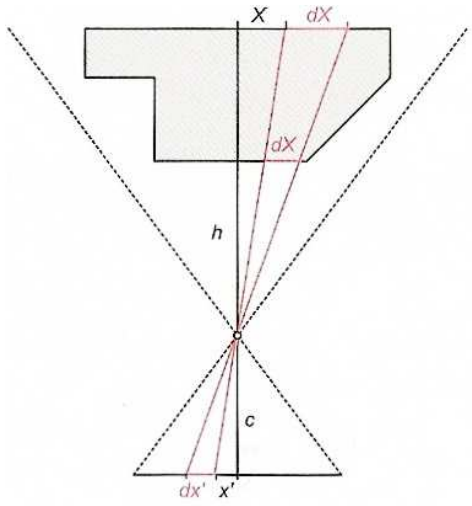

Ilustración 17. Estimación de la precisión de un modelo a partir del escalado.

2.3. ORIENTACIÓN INTERIOR DE UNA CÁMARA

Una cámara se puede modelar como un sistema consistente en un área plana de captura de imagen (el sensor en las cámaras digitales o la película en las analógicas) y un sistema de lente con un centro de proyección O. Los parámetros que engloban la orientación interior de una cámara definen la posición en el espacio del centro de proyección, la distancia principal c y la posición del punto principal H'. También incluye otros parámetros relativos a distorsiones radiales y tangenciales y otras desviaciones de los parámetros.

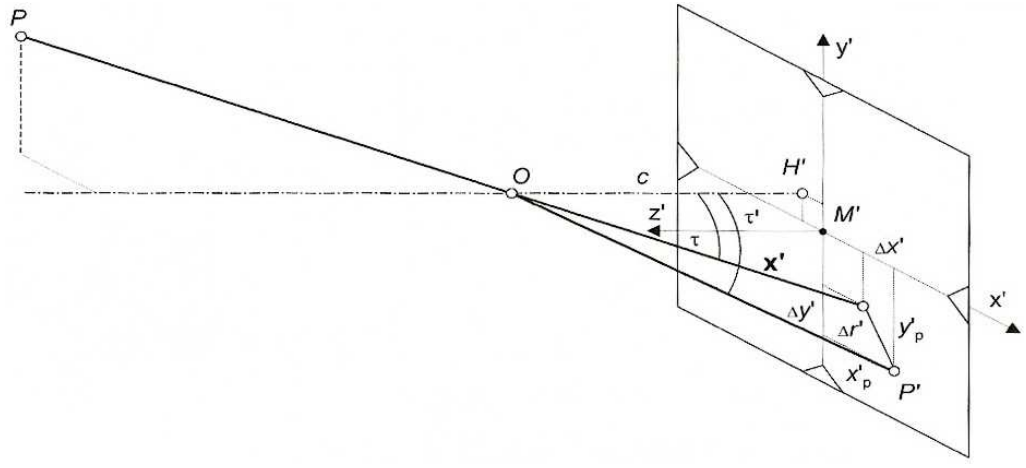

Ilustración 18. Orientación interior de una cámara.

Según se observa en la Ilustración 18, el punto principal H' (x'_0, y'_0) se refiere a la proyección en el plano imagen del centro de perspectiva O con la perpendicular a dicho plano. Normalmente, en cámaras bien construídas, se corresponde con el centro del

plano de imagen, es decir, H' ≈ M'. La distancia principapl c es la distancia normal desde el centro de perspectiva O hasta el plano imagen, que es igual a la longitud focal de la lente cuando ésta se enfoca al infinito, es decir, c ≈ f'. Esto puede verse en la Ilustración 19, donde además queda definido el FOV, o campo de visión de la cámara, denotado 2Ω.

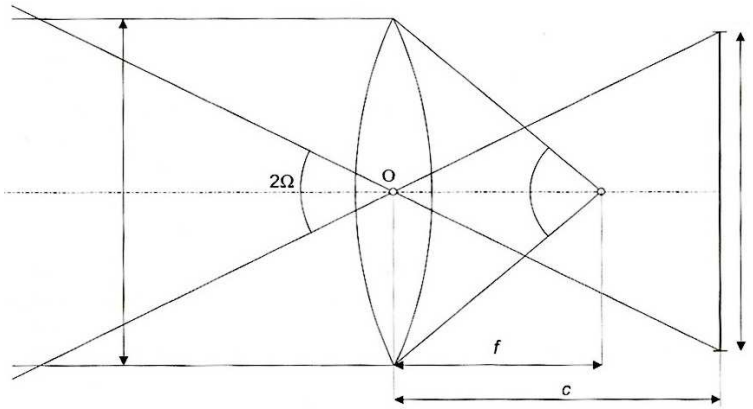

Ilustración 19. Campo de visión 2Ω, longitud focal f y distancia principal c de una cámara.

Por último, en el proceso de orientación interior de la cámara se definen unos parámetros de error relativos a desviaciones desde el centro de perspectiva, dominados por la distorsión radial denominada Δr', que se puede descomponer en Δx' y Δy'. La distorsión radial constituye la mayor fuente de error en los sistemas de imagen y se debe al diseño imperfecto de la lente, dando lugar a mayores desviaciones cuanto mayor es la distancia al punto principal H'. En lentes convencionales puede alcanzar errores de 100 μm en los extremos de la imagen (Ilustración 20). Existen otras distorsiones, como la tangencial y la de afinidad de mucha menor importancia (unos dos órdenes de magnitud de error por debajo) y todas ellas se suelen modelar con series polinómicas de Seidel.

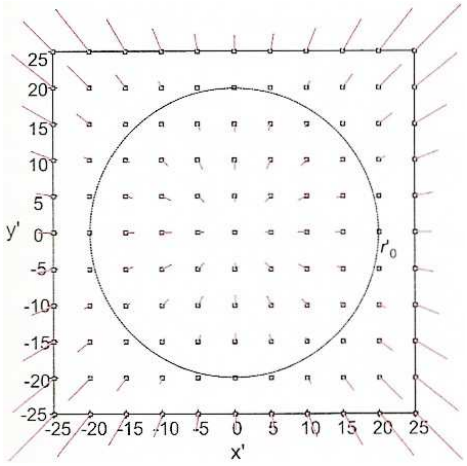

Ilustración 20. Distorsión radial simétrica en un sistema de imagen.

Cuando todos los anteriores parámetros son conocidos, se puede definir el vector real de imagen x' con respecto al centro de perspectiva:

$$x' = \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x'_p - x'_0 - \Delta x' \\ y'_p - y'_0 - \Delta y' \\ -c \end{bmatrix} \qquad \textbf{(2-2)}$$

donde:

- (x'_p, y'_p) son las coordenadas medidas del punto imagen P'.
- (x'_0, y'_0) son las coordenadas del punto principal H'.
- $(\Delta x', \Delta y')$ son la corrección por errores de la imagen.

2.4. CALIBRACIÓN DE UNA CÁMARA

Para llevar a cabo la calibración de una cámara se precisan los valores que definen la orientación interior de la misma vistos en el apartado 2.3. Con ellos, la calibración puede completarse relacionando el sistema de coordenadas de la cámara con el de la imagen obtenida mediante una transformación de planos. Para ello se relaciona la captura de un sistema de marcas o mallado previamente calibrado (Ilustración 21, izquierda) con otro adherido físicamente frente al sensor o proyectado sobre el mismo (Ilustración 21, derecha), o bien, en cámaras digitales, conocidas las dimensiones del sensor y su número de píxeles, se utiliza la relación unívoca que existe entre la imagen capturada y la topología del sensor CMOS o CCD.

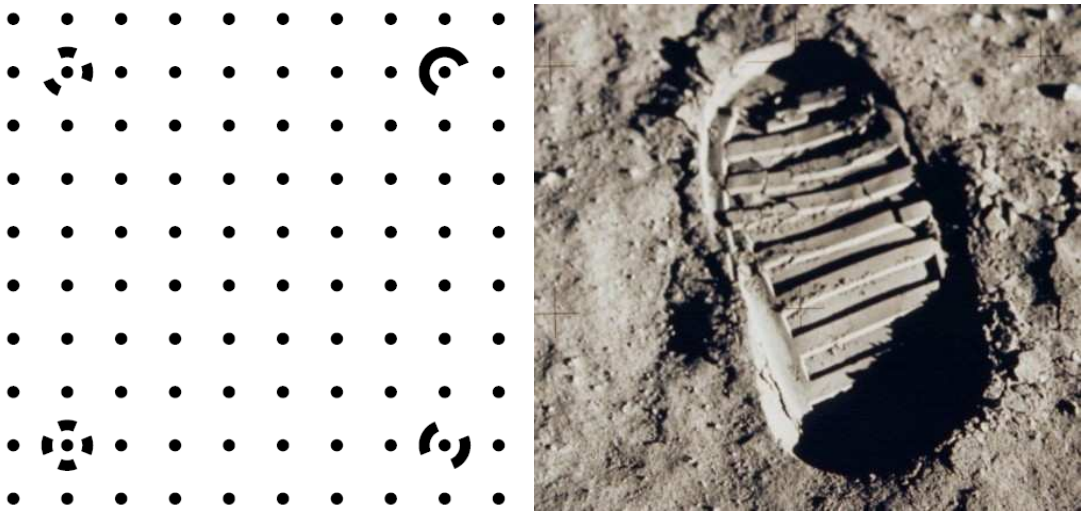

Ilustración 21. Sistemas mallados calibrados para transformación de planos.

Para la relación de ambos sistemas de coordenadas se lleva a cabo algún tipo de transformación de planos como la afín, la bilineal y la polinómica (Ilustración 22), en función de cuántos parámetros se quieran tener en cuenta en la transformación y de la carga computacional asumida.

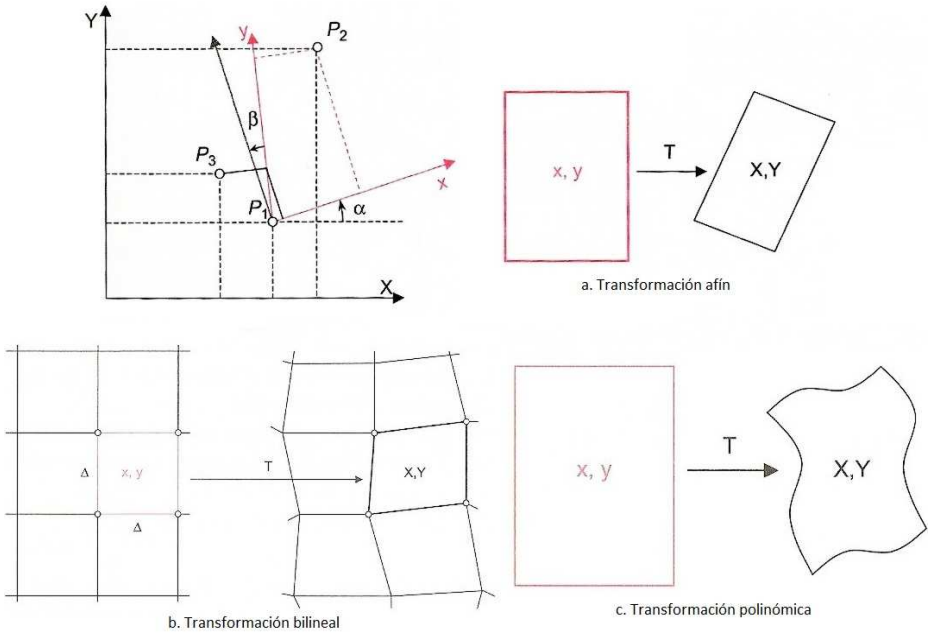

Ilustración 22. Transformación de planos bidimensionales afín, bilineal y polinómica.

Si el requisito de precisión en las medidas es alto, es posible utilizar cámaras fotogramétricas, que son cámaras fotográficas, cuyos parámetros han sido medidos de forma exacta durante la fabricación, y normalmente tienen una lente no intercambiable de foco fijo y con mínimas distorsiones. Este tipo de cámaras incorporan los mallados descritos previamente y es posible llevar a cabo el autocalibrado en tiempo real. Permiten máximas precisiónes, pero a un coste elevado. Eran la alternativa preferente en el pasado, cuando se requerían altas precisiones, sin embargo, con la tecnología de fotografía digital y los nuevos sistemas optoelectrónicos es posible conseguir muy altas precisiones utilizando cámaras convencionales de uso fotográfico, siempre que se lleve a cabo un adecuado proceso de calibración.

2.5. PATRONES CODIFICADOS

El uso de patrones codificados para la señalización de posiciones a medir aporta dos ventajas importantes: Por un lado, son indispensables si se pretende automatizar el proceso de medidas fotogramétricas, como es el caso en este proyecto, y por otro,

permiten aumentar la precisión de las medidas realizadas sobre los patrones. Los patrones circulares son los más empleados ya que su simetría radial permite medir de forma muy precisa el centro de los mismos (incluso lográndose precisiones menores al tamaño del pixel con algoritmos de interpolación), que correspondería con el punto 3D generado en cada modelo.

Si se pretende realizar medidas muy precisas utilizando patrones, el diámetro de los mismos debe ser establecido previamente para su consideración en el proceso de detección y medida. En sistemas digitales se ha comprobado que el tamaño mínimo para un patrón es de unos 5 píxeles en el sensor. El tamaño máximo viene limitado por la excentricidad máxima permitida existente entre la posición real del centro del círculo y la posición del centro en la imagen.

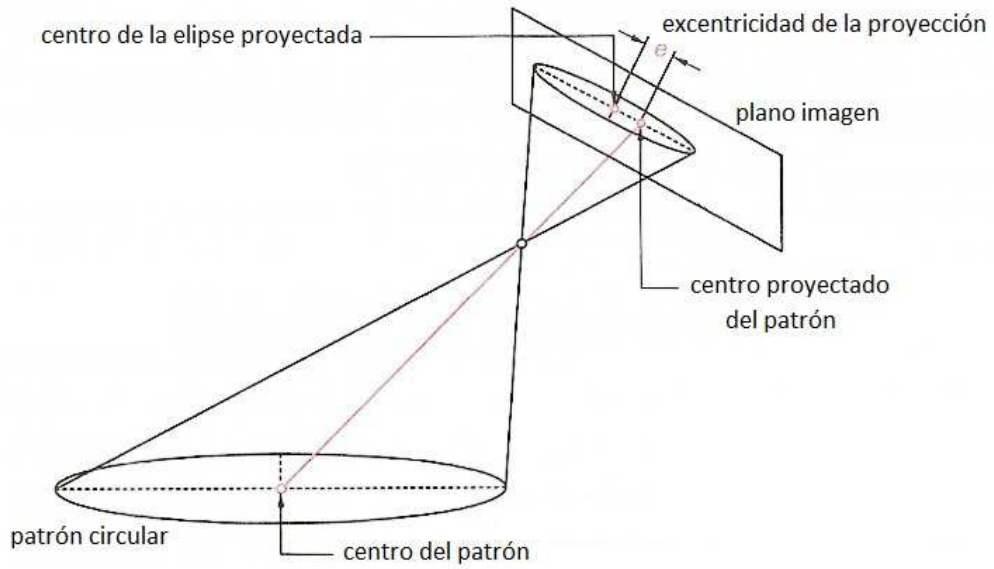

Ilustración 23. Excentricidad de un patrón circular proyectado.

Como se puede observar en la Ilustración 23, un patrón circular inclinado proyectado en una imagen bidimensional forma una elipse. Si bien es posible equiparar el centro de la elipse con el centro del patrón, existe una desviación que es necesario calcular para obtener altas precisiones. Esta desviación se obtiene mediante la excentricidad e que se puede calcular como:

$$e = r_m - \frac{c}{2}\left(\frac{R_m + \frac{d}{2} sen(90-\alpha)}{Z_m - \frac{d}{2} cos(90-\alpha)} + \frac{R_m - \frac{d}{2} sen(90-\alpha)}{Z_m + \frac{d}{2} cos(90-\alpha)} \right) \qquad \textbf{(2-3)}$$

donde:

- e es la excentricidad de la proyección elíptica.
- d es el diámetro real del patrón.
- r_m es el radio del patrón proyectado.
- α es el ángulo entre el plano imagen y el plano del patrón.
- Rm es el desplazamiento lateral del patrón hasta el eje óptico.
- Z_m es la distancia hasta el patrón.
- c es la distancia principal de la cámara.

En la Ilustración 24 se puede ver el aspecto de diferentes tipos de patrones codificados. Como se observa, este tipo de patrones consisten en una serie de líneas, anillos o regiones diferentes para cada patrón que lo definen unívocamente. Con este tipo de codificación, cuya identificación es posible mediante las muy desarrolladas técnicas de reconocimiento de patrones, es posible utilizar varios cientos de ellos en una misma medida fotogramétrica, si fuera necesario, por ejemplo en modelos que requieran el uso de un gran número de imágenes relacionadas entre sí, en el caso de objetos de gran tamaño. Existen otros patrones codificados basados en reconocimiento de caracteres alfanuméricos, sin embargo las técnicas de detección introducen grandes retardos en su identificación.

Ilustración 24. Varios ejemplos de patrones codificados.

Actualmente es posible emplear patrones retrorreflectivos. Este tipo de patrones están fabricados en un material retrorreflectante (una distribución muy densa de bolas de decenas de micras) que permite devolver la luz hacia la misma dirección que la fuente. Esto posibilita situar los patrones en cualquier orientación y mediante una iluminación

que no precisa gran potencia, puede detectarse el patrón en la imagen en condiciones ambientales de baja o muy baja luminosidad.

2.6. ORIENTACIÓN EXTERIOR Y ECUACIONES DE COLINEALIDAD

La orientación exterior en fotogrametría consiste en la determinación de seis parámetros que describen la posición en el espacio y la orientación del sistema de coordenadas de la cámara con respecto al sistema de coordenadas del objeto a medir. El modelo estandar desarrollado para fotogrametría aérea se utiliza de la misma forma en fotogrametría de distancias cercanas.

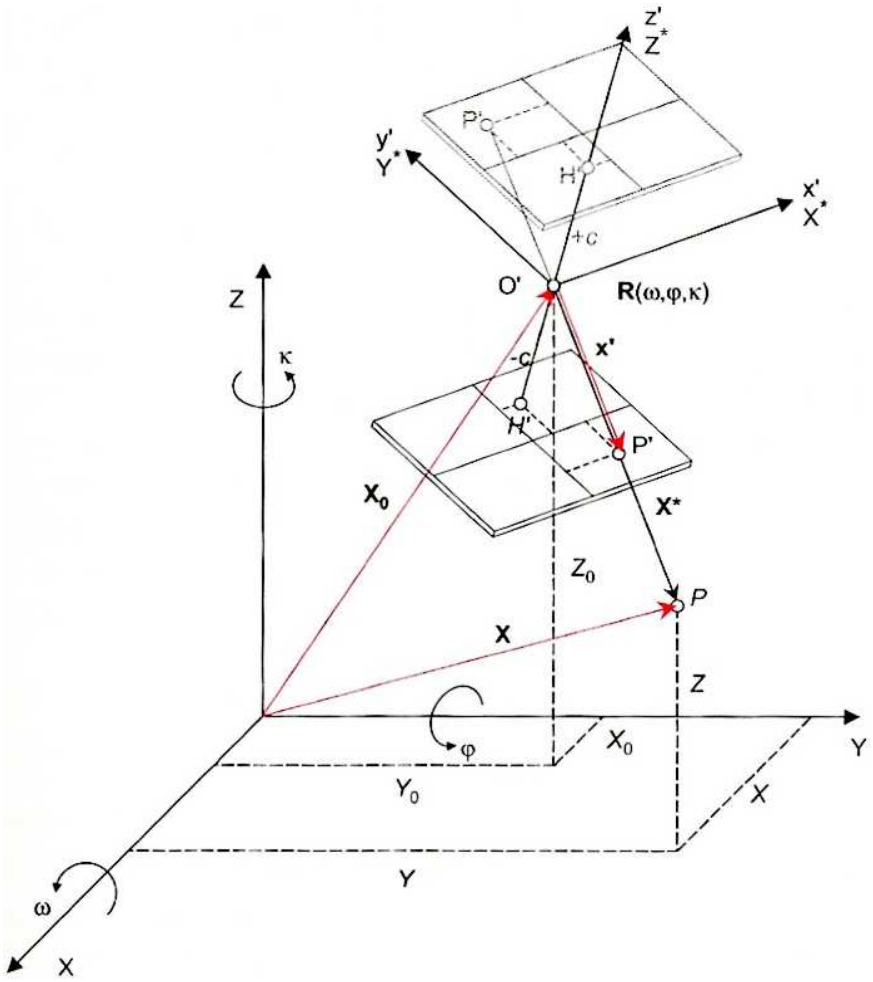

Ilustración 25. Orientación exterior.

Para determinar la posición tridimensional P del objeto a medir es necesario conocer el vector X_0 que relaciona el centro de perspectiva O, que es el origen del sistema de coordenadas de la cámara, como se vió en el apartado 2.3, con el centro de perspectiva O', que es el origen del sistema de coordenadas del objeto, y también es necesario

conocer el vector X*, que relaciona el centro de perspectiva O' y el punto P (Ilustración 25). Estas transformaciones se pueden llevar a cabo mediante la matriz ortogonal de rotación R:

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} = R_\omega R_\varphi R_\kappa = \tag{2-4}$$

$$= \begin{bmatrix} \cos\varphi\cos\kappa - sen\varphi sen\omega sen\kappa & -sen\varphi sen\omega & \cos\varphi sen\kappa + sen\varphi sen\omega\cos\kappa \\ sen\varphi\cos\kappa + \cos\varphi sen\omega sen\kappa & \cos\varphi\cos\omega & sen\varphi sen\kappa - \cos\varphi sen\omega\cos\kappa \\ -\cos\omega sen\kappa & sen\omega & \cos\omega\cos\kappa \end{bmatrix}$$

Entonces el vector de interés X se puede obtener como la suma del vector X_0 y del vector X*. Este último vector viene dado en el sistema de coordenadas del objeto y el vector X_0 en el sistema de coordenadas de la cámara.

$$X = X_0 + X^* \tag{2-5}$$

Por lo tanto, para poder realizar la relación el vector X* debe expresarse en términos del sistema de coordenadas de la cámara. Esto se puede lograr mediante la matriz de rotación R y un factor de escalado m (que varía en función de cada punto P), ya que ambos poseen la misma dirección.

$$X = X_0 + mR_x' = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} + m \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} \tag{2-6}$$

Si se invierte la ecuación anterior, se sustituye el punto principal H' (x'_0, y'_0), a partir de la orientación interior, vista en el apartado 2.3, y se introducen los términos de corrección $\Delta x'$ y $\Delta y'$, también vistos en el mismo apartado, las coordenadas vienen dadas por:

$$x' - x_0' - \Delta_x' = \frac{1}{m} R^{-1}(X - X_0) = \begin{bmatrix} x' - x_0' - \Delta_x' \\ y' - y_0' - \Delta_y' \\ z' \end{bmatrix} = \frac{1}{m} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{21} & r_{31} \\ r_{12} & r_{22} & r_{32} \\ r_{13} & r_{23} & r_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{bmatrix} \tag{2-7}$$

Dado que la matriz R es ortogonal, la inversa es igual a la traspuesta, y por lo tanto dividiendo la primera y segunda ecuación entre la tercera, el factor de escalado m se puede eliminar y dan lugar a las ecuaciones de colinealidad:

$$x' = x_0' + z' \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} + \Delta_x'$$

$$y' = y_0' + z' \frac{r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} + \Delta_y' \qquad \textbf{(2-8)}$$

Estas ecuaciones describen la transformación de las coordenadas del objeto (X, Y, Z) en las coordenadas de la imagen (x', y') en función de los parámetros de la orientación interior (x'_0, y'_0, c, $\Delta x'$, $\Delta y'$) y en función de los parámetros de la orientación exterior (X_0, Y_0, Z_0, ω, φ, κ). Las ecuaciones de colinealidad demuestran que cada punto del objeto es proyectado en un único punto de la imagen y constituyen las ecuaciones fundamentales de la fotogrametría, que se emplean para la posterior intersección espacial, resección y triangulación.

2.7. RESECCIÓN ESPACIAL

La resección es el método utilizado para calcular los parámetros de la orientación exterior en una imagen. El proceso requiere al menos tres posiciones de referencia P'_i conocidas en la imagen, que no estén distribuidas en una misma línea recta, siempre que se conozcan los parámetros de la orientación interior de la cámara. De lo contrario, se requieren al menos cinco posiciones de referencia, ya que el número de incógnitas en la resolución asciende de tres a nueve.

Si se utiliza la información de la orientación interior de la cámara, utilizando además las ecuaciones de colinealidad vistas anteriormente, se puede plantear un sistema de ecuaciones como el siguiente, en el que los parámetros subrayados son las incógnitas (los correspondientes a la orientación exterior) y que puede ser resuelto mediante series de Taylor y ajustes por mínimos cuadrados.

$$x' + vx' = F(\underline{X_0, Y_0, Z_0, \omega, \varphi, \kappa}, x_0', z', \Delta_x', X, Y, Z)$$

$$y' + vy' = F(\underline{X_0, Y_0, Z_0, \omega, \varphi, \kappa}, y_0', z', \Delta_y', X, Y, Z) \qquad \textbf{(2-9)}$$

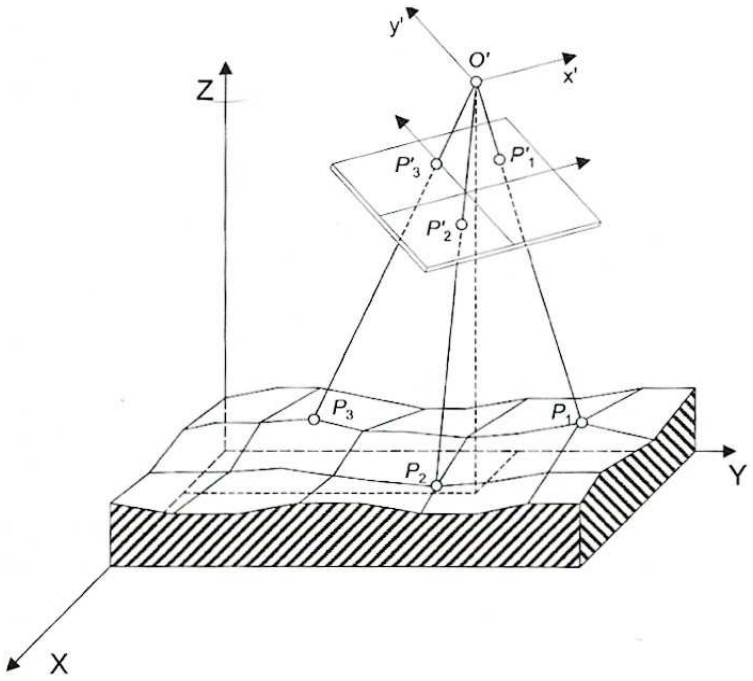

Ilustración 26. Resección espacial.

Existen otros métodos más elaborados y costosos en términos de cálculo en los que no es necesario conocer los parámetros relativos a la orientación interior de la cámara, e incluso éstos pueden ser aproximados. Estos métodos se usan si es necesario realizar mediciones sobre imágenes de las que no se posee información y en general ofrecen precisiones menores.

2.8. TRIANGULACIÓN DE MÚLTIPLES IMÁGENES

La triangulación multi-imagen es la técnica más importante en fotogrametría ya que permite orientar simultáneamente un número ilimitado de imágenes distribuidas espacialmente haciendo uso de todos los parámetros vistos hasta ahora y todo ello en un solo cálculo. Se puede entender la triangulación de múltiples imágenes como la generalización de la resección espacial extendida a un número ilimitado de imágenes, con la introducción de incógnitas adicionales.

La formulación matemática de este método, pese a ser muy compleja, está bien establecida y los problemas prácticos que presenta se refieren a la resolución de grandes sistemas de ecuaciones (con hasta cientos de incógnitas), la generación de valores aproximados para las incógnitas y la detección y eliminación de errores. Por ello, el desarrollo de la fotogrametría de distancias cercanas ha estado directamente relacionado con el desarrollo de la potencia de cálculo en los ordenadores.

Debido a esta complejidad de formulación y resolución en la que entran en juego multitud de técnicas algebráicas, geométricas, numéricas, etc., la posibilidad de desarrollar una solución fotogramétrica personalizada para un proyecto es frecuentemente inviable y se recurre al uso de uno de los paquetes de cálculo fotogramétrico ya existentes de forma comercial.

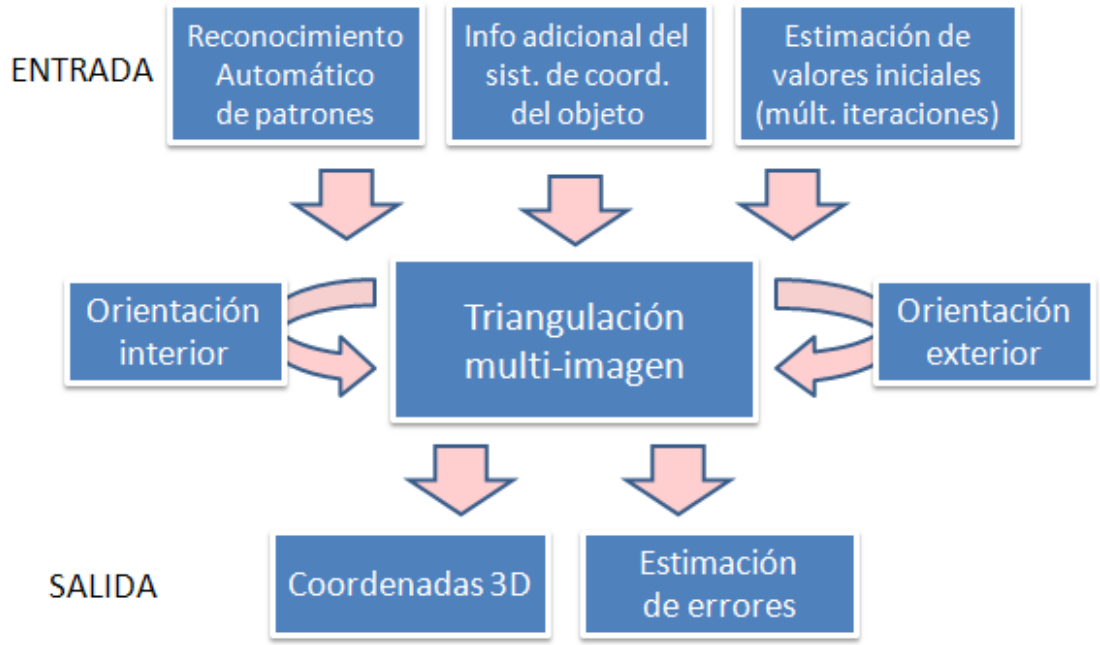

Ilustración 27. Diagrama de flujo del proceso fotogramétrico completo.

En la Ilustración 27 se muestra un diagrama básico del proceso fotogramétrico completo, que incluye como la parte fundamental del mismo la triangulación multi-imagen. Esta última recibe, como datos de entrada fundamentales, mediciones en el sistema de coordenadas de la imagen (x'e y'), sea de forma manual o, en caso de que sea necesario, como en este proyecto, de forma automática, mediante reconocimiento de patrones codificados. Adicionalmente se puede incluir información sobre el objeto, como distancias de referencia, ángulos medidos con teodolito, líneas conocidas, etc., con los que se proporcionan referencias absolutas en el sistema de coordenadas del objeto. Por último, con el objetivo de linealizar el ajuste se lleva a cabo un proceso iterativo de estimación de valores iniciales para ofrecer soluciones aproximadas, por ejemplo igualando la distancia princial c a la longitud focal f o haciendo cero las distorsiones y situando el punto principal en el centro de la imagen. Durante el procesado se determinan los parámetros de la orientación exterior e interior y el

principal resultado de la triangulación son las coordenadas tridimensionales (X, Y, Z) de los patrones de referencia del objeto.

La formulación matemática de la triangulación de múltiples imágenes está basada en las ecuaciones de colinealidad, explicadas en 2.6:

$$x' = x_0' + z' \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} + \Delta_x'$$

$$y' = y_0' + z' \frac{r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} + \Delta_y' \qquad \textbf{(2-10)}$$

La estructura de dichas ecuaciones permite la formulación de las coordenadas de la imagen en función de todas las incógnitas del proceso fotogramétrico vistas hasta ahora. Por lo tanto, mediante múltiples iteraciones las siguientes incógnitas se van calculando en función de las coordenadas medidas en el sistema de referencia de la imagen:

- Coordenadas 3D del objeto para cada punto (u_p, 3 incógnitas para cada punto).
- Orientación exterior para cada imagen (u_i, 6 incógnitas para cada imagen).
- Orientación interior para cada cámara (u_c, de 0 a 3 incógnitas para cada cámara).

Por lo tanto la triangulación multi-imagen puede entenderse como una generalización de la resección espacial, en la que en este caso, se hace uso de múltiples imágenes y múltiples cámaras, además de múltiples puntos de referencia.

$$x'_i + vx'_i = F(X_{0j}, Y_{0j}, Z_{0j}, \omega_j, \varphi_j, \kappa_j, x_0'_k, y_0'_k, c_k, \Delta_x'_k, X_i, Y_i, Z_i)$$

$$y'_i + vy'_i = F(X_{0j}, Y_{0j}, Z_{0j}, \omega_j, \varphi_j, \kappa_j, x_0'_k, y_0'_k, c_k, \Delta_y'_k, X_i, Y_i, Z_i) \qquad \textbf{(2-11)}$$

donde el subíndice i representa a los distintos puntos de referencia, el subíndice j representa las distintas imágenes y el subíndice k representa las distintas cámaras empleadas.

Como se mencionó, las ecuaciones de colinealidad pueden ser resueltas por ajustes de mínimos cuadrados. Sin embargo, dichas ecuaciones son no lineales, por lo que previamente es necesario linealizarlas mediante series de Taylor utilizando

estimaciones como valores iniciales para todas las incógnitas. El número de incógnitas de este proceso puede ser calculado de la siguiente manera.

$$u = n_i \cdot u_i + n_p \cdot u_p + n_c \cdot u_c \qquad (2\text{-}12)$$

donde n_i se refiere al número de imágenes, $u_i = 6$, n_p se refiere al número de puntos de referencia, $u_p = 3$, n_c es igual al número de cámaras utilizadas y $u_c = 0... \geq 3$.

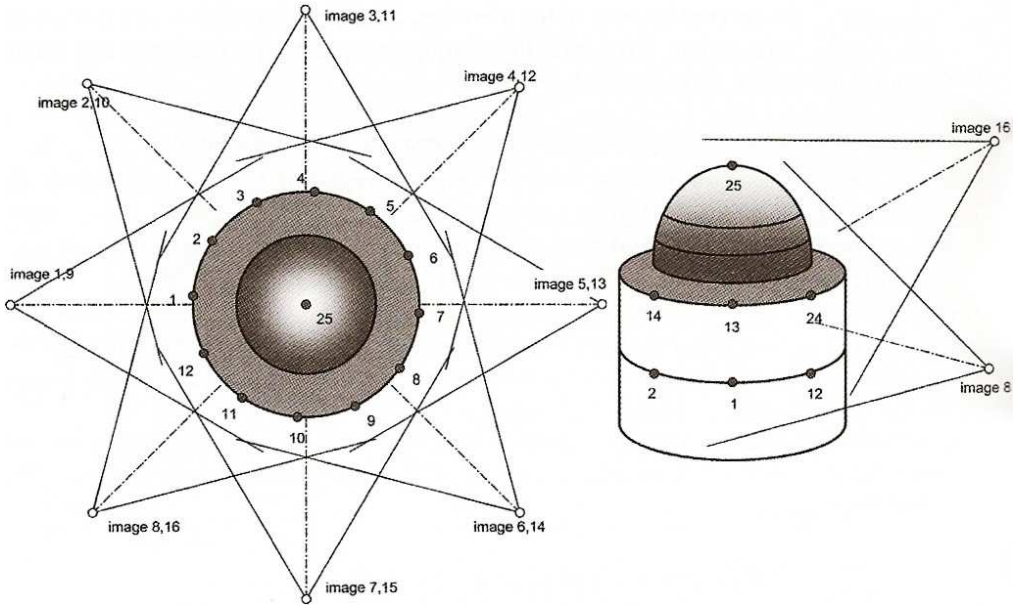

Ilustración 28. Ejemplo de configuración de imágenes en fotogrametría de distancias cercanas.

En la Ilustración 28 se muestra un ejemplo de distribución de imágenes para generar un modelo 3D del objeto de la figura. La adquisición de imágenes se realiza de forma que en cada ubicación se capturan dos fotografías, una orientada hacia arriba y otra hacia abajo (como se puede observar en la parte derecha de la Ilustración 28), para capturar y relacionar la parte superior e inferior del objeto (las superiores son las imágenes 1-8 y las inferiores las 9-16). El punto de referencia superior (punto 25) aparece en las 16 imágenes. En la captura se utilizan 16 cámaras con orientación interior conocida. Como se aprecia en la Tabla 1, un total de 219 incógnitas deben ser resueltas.

Tabla 1. Número de incógnitas a resolver en el ejemplo.

n_i	u_i	n_p	u_p	n_c	u_c	u
16	6	25	3	16	3	**219**

La matriz de conexiones de la Ilustración 29 muestra qué punto de referencia se mide en qué imagen. Se comprueba que de media cada punto se mide en 7,7 imágenes, lo que, junto a la correcta y estable geometría de las capturas, con orientaciones casi ortogonales dos a dos, confiere una gran robustez al proyecto, a costa de aumentar la carga computacional del procesado.

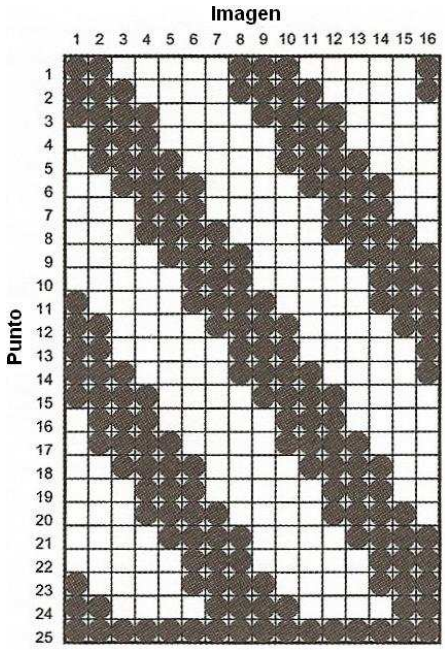

Ilustración 29. Matriz de conexiones punto-imagen del ejemplo.

3. Revisión del estado del arte

Se ha rastreado la literatura científica en busca de resultados representativos de trabajos similares al llevado a cabo en este proyecto, es decir, trabajos en los que se haya utilizado la fotogrametría como base para medir deformaciones de grandes antenas de radiofrecuencia. Son escasos los trabajos publicados sobre este tema, pues tradicionalmente se han empleado otros métodos, en especial la holografía de microondas [13] o los teodolitos situados en el reflector secundario mediante una estructura ad hoc. En muchos trabajos se menciona la calibración detallada en fábrica. Sin embargo, aquí se han seleccionado los que tratan de medir la deformación cuando la antena ya está en uso, por constituir un caso más cercano al tratado en este proyecto. Además se han eliminado de esta revisión referencias más antiguas con cámaras ya muy obsoletas.

Normalmente los errores aceptables debidos a deformaciones gravitatorias sobre la superficie de las parábolas en antenas de RF se estiman en aproximadamente $\lambda/20$,

siendo λ la longitud de onda utilizada en las señales captadas/emitidas por las antenas. Por ejemplo, a 5 GHz debería existir una deformación gravitatoria con un error menor a 3 mm. Por ello, las precisiones exigidas a la solución fotogramétrica en este tipo de sistemas debe estar por debajo del error que se desea medir.

El objetivo de estas campañas de medición de deformaciones gravitatorias suele ser el de incluir el modelo de la antena en algoritmos que realicen rectificaciones en su modo de trabajo normal o bien, mediante sucesivas campañas de medición, llevar a cabo correcciones en la misma estructura física de la antena, con el fin de evitar dichas deformaciones o mantenerlas dentro de los márgenes de error aceptables correspondientes a la longitud de onda de trabajo.

A continuación se comenta brevemente la metodología y resultados obtenidos en los trabajos más relevantes encontrados en la bibliografía.

3.1. MEDIDA FOTOGRAMÉTRICA DE UNA ANTENA DE 12 METROS

En este proyecto [21] se midieron las deformaciones gravitatorias de una antena funcional de 12 metros (Ilustración 30) en Bangalore, India. Inicialmente se obtuvieron errores de 4,1 mm usando un número total de patrones igual a 864 y un teodolito en el centro de la parábola, mirando al cenit. Este sistema era inoperativo en el resto de posiciones, por lo que se llevó a cabo otro montaje. En el nuevo montaje se usaron 5.052 targets retroreflectantes y varias barras de escala. Las barras de escala se usan para establecer una referencia de distancia, ya que las distancias obtenidas por fotogrametría son, en principio, distancias relativas que hay que referenciar con valores absolutos para obtener las distancias reales.

Para llevar a cabo el procesado fotogramétrico se utilizó el sistema comercial *V-Stars* de *Geodetic Systems*, aplicado en fotografías realizadas con una cámara digital de alta resolución desarrollada específicamente para el sistema *V-Stars*.

La campaña final de mediciones se llevó a cabo en una noche de enero de 2008 y en ella se midieron deformaciones en ángulos de elevación de 15º, 30º, 45º, 60º, 75º y 90º. En cada uno de los ángulos de elevación se tomaron entre 60 y 80 imágenes, tomando el proceso aproximadamente una hora en cada posición. Las capturas fueron llevadas a cabo desde una jaula atada a una grúa, a distancias mayores de 10 metros del

centro de la antena. Los errores finales obtenidos resultaron ser de 11 mm con la antena a 90º y 31 mm con la antena a 15º.

La referencia del artículo descrito es: N. Udaya Shankar, R. Duraichelvan, C. M. Ateequlla, Arvind Nayak, A. Krishnan, M. K. S. Yogi, C. Koteshwar Rao, K. Vidyasagar, Rohit Jain, Pravesh Mathur, K. V. Govinda, R. B. Rajeev y T. L. Danabalan, *Photogrammetric Measurements of a 12-metre Preloaded Parabolic Dish Antenna*, National Workshop on the Design of Antenna & Radar Systems DARS, Bangalore, India, Mayo 2009.

Ilustración 30. Patrones sobre la parábola (izquierda) y captura de imágenes (derecha) [21].

3.2. MEDIDA DE LA ANTENA APEX DE 12 METROS

En el proyecto APEX (*Atacama Pathfinder Experiment*) se realizaron mediciones sobre una antena de 12 metros situada en los Andes Chilenos a 5.107 metros de altitud [8]. El sistema fotogramétrico utilizado es el VERTEX.

Para llevar a cabo las mediciones se utilizan un total de 1.320 patrones y se aplica holografía de microondas para mejorar los resultados obtenidos mediante fotogrametría. Se obtienen precisiones máximas absolutas de unas 40 µm, sin embargo estos resultados se deben a la combinación de las técnicas fotogramétricas y de holografía de microondas, por lo que no pueden extraerse conclusiones en cuanto a la precisión alcanzada independientemente por el sistema de fotogrametría utilizado.

Como se ve en la Ilustración 31, los *targets* son retrorreflectores y se colocan en cada panel de la antena en cinco puntos: esquinas y centro. Las medidas se hacen mediante campañas de capturas realizadas desde grúa.

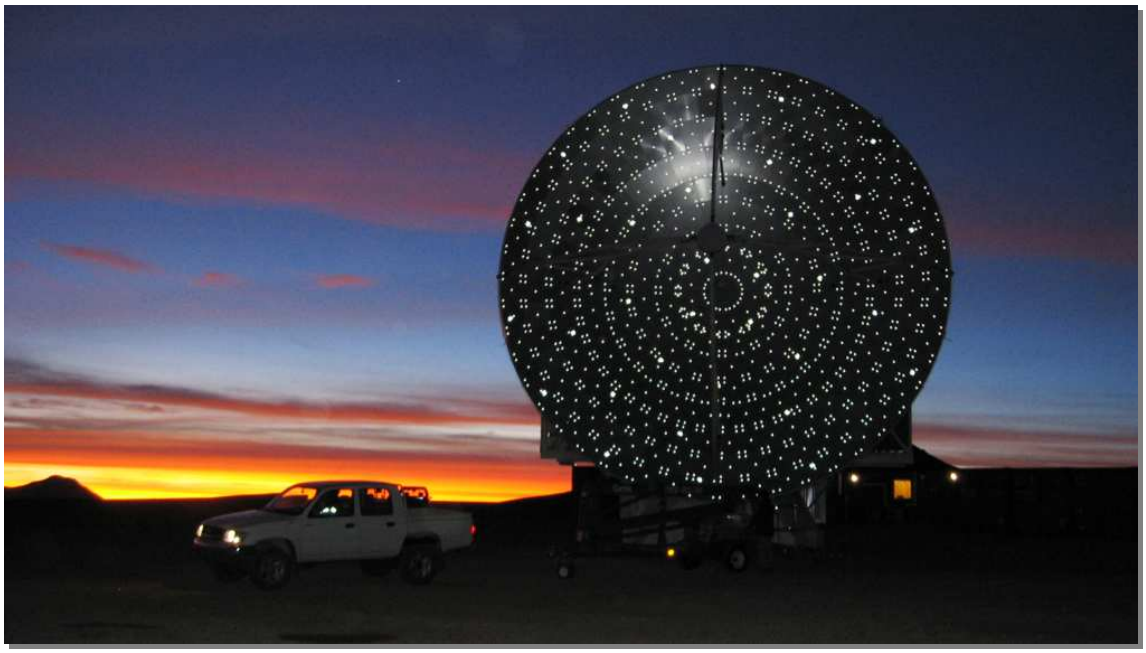

Ilustración 31. Antena de 12 metros del proyecto APEX [8].

La referencia del artículo descrito es: Rolf Güsten, Lars-Åke Nyman, Karl Menten, Catherine Cesarsky, Roy S. Boo y Peter Schilke, *The Atacama Pathfinder Experiment – a new submillimeter facility for southern skies –,* Telescopes and Instrumentation. The Messenger, Volume 104, Junio 2006.

3.3. MEDIDA DE UNA ANTENA DE 22 METROS

En este proyecto [25] se utiliza la fotogrametría para medir la deformación gravitatoria en la superficie del reflector primario de una antena de 22 metros del *Australia Telescope Compact Array* (Ilustración 32). Para dicha medición se utiliza el sistema fotogramétrico *V-Stars* con una sóla cámara de las desarrolladas para dicho sistema.

Se utilizan 398 targets retroreflectores adhesivos, realizando las mediciones durante una campaña de una noche de febrero de 2.002, a elevaciones de 15º, 30º, 45º, 60º, 75º y 90º. A cada elevación se capturan entre 100 y 140 capturas fotográficas. Se realizan desde la cubeta de una plataforma elevadora a unos 17 metros de distancia, rotando la antena en acimut para cada valor de elevación. Se superponen también dos barras de escala con error de longitud de 0,016 mm.

Se asumía un sistema de referencia sin deformaciones, que eran los 3 anillos de paneles centrales de la parábola principal y se llega a resolver las posiciones relativas de los patrones con errores de alrededor de 0,05 mm.

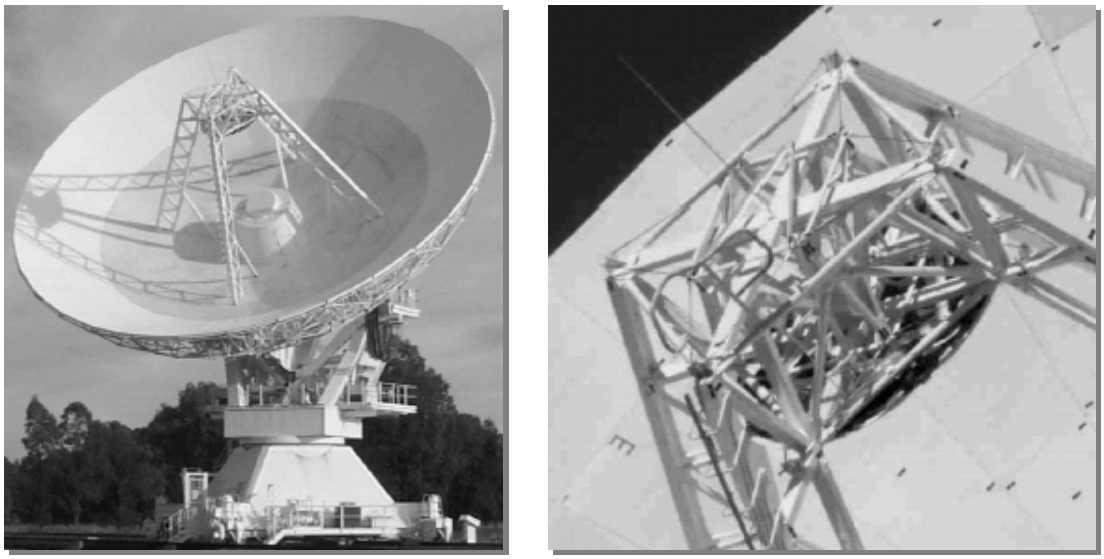

Ilustración 32. Antena de 22 metros del *Australia Telescope Compact Array* [25].

La referencia del artículo descrito es: Ravi Subrahmanyan, *Photogrammetric Measurement of the Gravity Deformation in a Cassegrain Antenna,* IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Volume 53, No. 8, Agosto 2005.

3.4. MEDIDA DEL RADIOTELESCOPIO DE ARECIBO DE 300 METROS

El objetivo de esta medición fotogramétrica es la mayor antena parabólica del mundo: el radiotelescopio de Arecibo, en Puerto Rico, de 305 metros (Ilustración 33). En este caso las deformaciones gravitatorias no se dan por movimientos de la parábola, ya que permanece estática, sino por desplazamientos en el terreno, que introducen errores significativos en la deformación de la antena. El objetivo de estas campañas de mediciones fotogramétricas era el de llevar a cabo recificaciones en la estructura de la parábola con el fin de disminuir el error introducido por dichos desplazamientos del terreno.

Para las medidas iniciales de 2001 [7] se usó el sistema fotogramétrico comercial *V-Stars*, obteniendo una precisión de entre 5 y 15 mm, tras varias campañas de medición. En dicho sistema se utilizaron unos 2.000 patrones retrorreflectivos en total, cada uno de 3 pulgadas de diámetro.

En lugar de cámaras digitales, se optó por una cámara de película analógica de gran formato para tener, a 500 metros de distancia, píxeles de 1 mm de resolución, con iluminación artificial estroboscópica muy potente para mejorar el contraste de los

targets y minimizar el tiempo de exposición evitando vibraciones de la parábola. Las campañas de capturas se realizaron, tras la puesta de sol, desde cada una de las torres de soporte y a distintas alturas, durante varios días consecutivos.

Dicha campaña se realizó para corregir las deformaciones de la parábola y permitir al telescopio trabajar a 5 GHz (lo que significa errores máximos de unos 3 mm). En 2005 se quiso ampliar el rango de trabajo hasta los 10 GHz, con lo que una nueva campaña fotogramétrica fue necesaria [24].

La nueva medición fue cualitativamente similar, pero cuantitativamente mucho más ambiciosa. De nuevo se empleó una cámara de gran formato desarrollada por *Geodetic Systems* para su sistema *V-Stars* y patrones retrorreflexivos de 3 pulgadas de diámetro. Sin embargo, esta vez se utilizaron unos 40.000 targets, en lugar de los 2.000 de la primera medición. En el procesado fotogramétrico final se utilizaron 47 fotografías y se obtuvo una precisión de alrededor de 0,25 mm.

Ilustración 33. Radiotelescopio de 300 metros de diámetro (Arecibo, Puerto Rico) [24].

Las referencias de los artículos descritos son:

Paul Goldsmith, *Resetting the Arecibo Primary Reflector Surface,* National Astronomy and Ionosphere Center/Arecibo Observatory Newsletter, No. 32, Marzo 2001.

Ravi Subrahmanyan, *Photogrammetric Measurement of the Arecibo Primary Reflector Surface,* IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Volume 53, No. 8, Agosto 2005.

3.5. MEDIDA DE UNA ANTENA INFLABLE DE 5 METROS

En este proyecto [18] se realizó la medida fotogramétrica de una antena inflable, para despliegue en el espacio, de 5 metros de diámetro (Ilustración 34) usando el software comercial *Photomodeler* de *EOS Systems* y cámaras digitales no fotogramétricas.

Se utilizaron varias cámaras, utilizando en el procesado fotogramétrico siempre imágenes provenientes de cámaras diferentes con el objetivo de investigar las precisiones alcanzables en un futuro sistema sincronizado automático. Dicho sistema nunca se construyó, pero se expresó un gran interés por un sistema en tiempo real que realizara mediciones en sistemas dinámicos como el de la antena inflable y similares estructuras desplegables en el espacio.

Utilizando un total de 525 patrones retrorreflectores de 6,35 mm de diámetro, dos escalas de referencia con patrones en los extremos e imágenes de cuatro cámaras distintas se consiguieron precisiones de 1,3 mm. Las campañas de medición se realizaron siempre en un ambiente de iluminación artificial controlada y las capturas se hicieron a una distancia de 8 metros con el objetivo de detectar todos los patrones en cada una de las imágenes, con lo que aunque el número de cámaras era pequeño, la redundancia de patrones detectados era alta, con lo que se mantenía una alta precisión en los modelos.

Los diversos pasos del procesado fotogramétrico se realizaron a mano imagen a imagen y patrón a patrón, por lo que supuso un proceso prolongado en el tiempo, razón adicional que motivó el interés de un futuro sistema de medición automático en tiempo real.

La referencia del artículo descrito es: Richard S. Pappa, Louis. R. Giersch y Jessica. M. Quagliaroli, *Photogrammetry of a 5 m Inflatable Space Antenna with Consumer Digital Cameras*, National Aeronautics and Space Administration, NASA: Washington (DC). Report No. NASA/TM-2000-210627, Diciembre 2000.

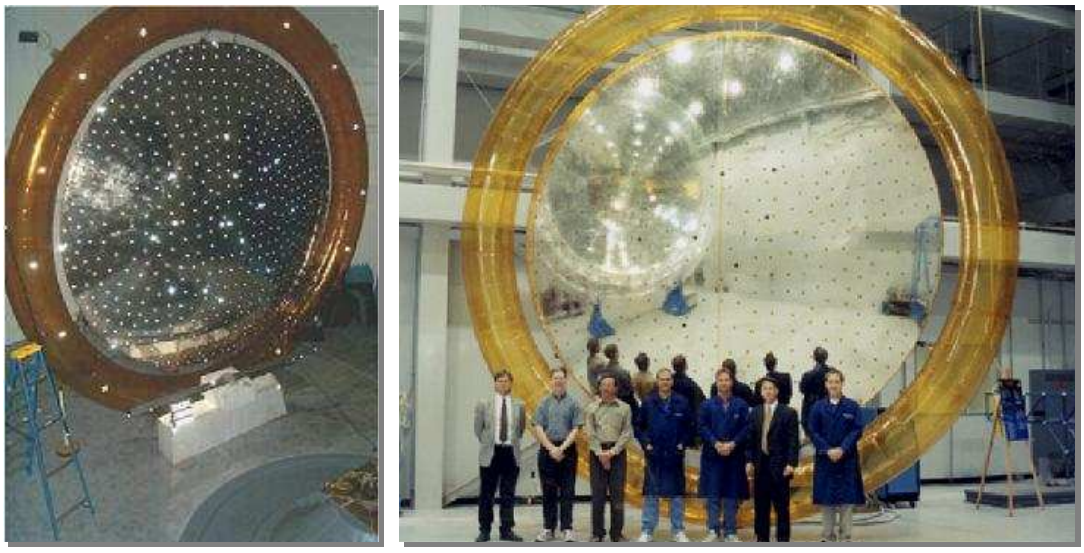

Ilustración 34. Antena inflable de 5 metros de la NASA con patrones sobre su superficie [18].

3.6. MEDIDA DE UNA ANTENA ESPACIAL DE 6,73 METROS

En este proyecto [12] se llevó a cabo la medición de una antena desplegable de 6,73 metros de diámetro (Ilustración 35). Esta antena se diseñó como sistema de recolección de energía solar para misiones de espacio profundo, presentado como una alternativa de bajo peso a los tradicionales generadores termoeléctricos de radioisótopos, con la adicional ventaja de que puede ser reutilizada como antena de comunicaciones de alta ganancia. El tamaño se diseñó de acuerdo con las exigencias en cuanto a potencia requerida y peso permitido en una posible misión a Júpiter. Con un peso de 21,9 Kg sería capaz de proporcionar 75 W de potencia eléctrica.

Para llevar a cabo las medidas fotogramétricas de la superficie de la antena se utilizó el sistema *V-Stars* con una sola cámara, unos 90 patrones retrorreflectores circulares dispuestos sobre la superficie de la antena y en los extremos de una barra de escala de referencia de longitud aproximadamente el diámetro de la antena. Se llevaron a cabo mediciones a diferentes presiones aplicadas a la superficie de la antena para calibrar sus deformaciones obteniendo en dichas medidas precisiones submilimétricas de alrededor de 0,5 mm.

La referencia del artículo descrito es: David Lichodziejewski y Costas Cassapakis, *Inflatable Power Antenna Technology*, 37th American Institute of Aeronautics and Astronautics AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, No. 1074, Enero 1999.

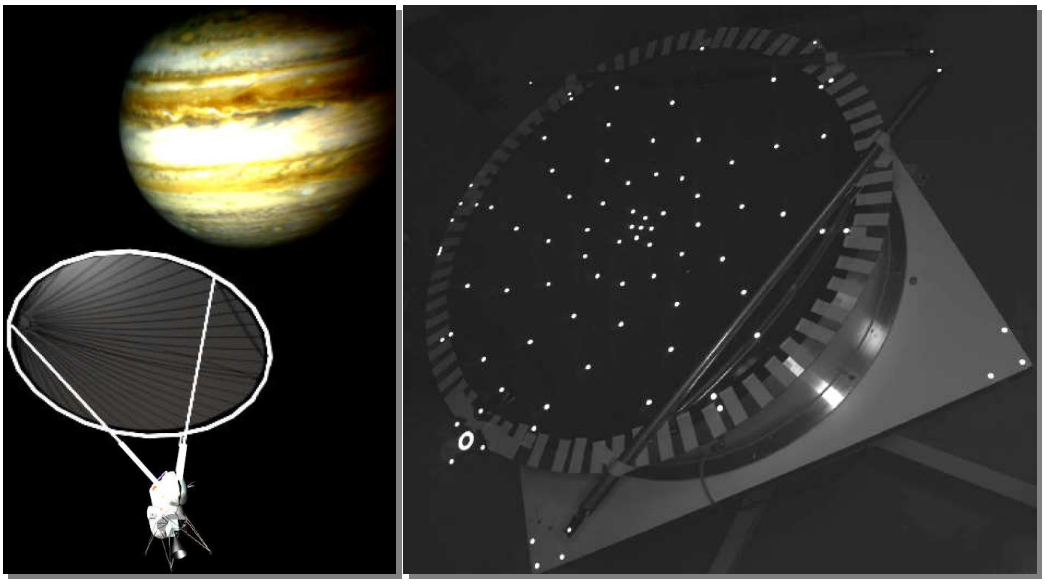

Ilustración 35. Antena de RF+Colector de energía solar desplegable de 6,73 metros [12].

3.7. CONSISTENCIA Y ESTABILIDAD DE CÁMARAS COMERCIALES

En este proyecto [27] no se lleva a cabo la medición fotogramétrica de una antena, sino de un objeto de 1,2×0,9 metros (Ilustración 36) y el objetivo no es la generación de su modelo 3D, sino la evaluación del rendimiento de cámaras comerciales de bajo coste para mediciones precisas.

La finalidad de dicho estudio era comprobar si llevando a cabo un buen proceso de orientación interior para deducir los parámetros internos de la cámara se pueden emplear cámaras no fotogramétricas para obtener resultados de alta precisión tridimensional, así como estudiar la estabilidad del proceso de calibración a lo largo del tiempo, considerando periodos de hasta un año de duración entre mediciones.

Para las medidas se utilizaron 28 patrones y se hicieron cálculos de referencia usando dos teodolitos para su comparación con los resultados fotogramétricos. Con cada una de las cámaras se realizaron 6 capturas a 1,5 metros y se generaron modelos con hasta 0,3 mm de resolución, lo que equivale a precisiones de aproximadamente 0,1 veces el tamaño del pixel. Comparando los resultados de las mismas cámaras a lo largo de un periodo de hasta un año se llegaron a muy pequeñas variaciones en la precisión obtenida, aunque en función de la aplicación debería evaluarse la importancia de dichas variaciones, que fueron de como máximo 0,3 mm entre mediciones realizadas en distintos instantes, para repetir el proceso de calibración de las cámaras en caso de necesitar de muy altas precisiones. También se compararon resultados entre distintas

cámaras del mismo modelo para evaluar la consistencia en la fabricación, llegando a conclusiones positivas en lo relativo a los resultados fotogramétricos, si bien es aconsejable realizar la calibración por separado de cada cámara, siempre atendiendo a los requisitos de precisión de cada aplicación.

La referencia del artículo descrito es: Rene Wackrow, Jim H. Chandler y Paul Bryan, *Geometric consistency and stability of consumer-grade digital cameras for accurate spatial measurement*, The Photogrammetric Record, Volume 22, No. 118, Junio 2007.

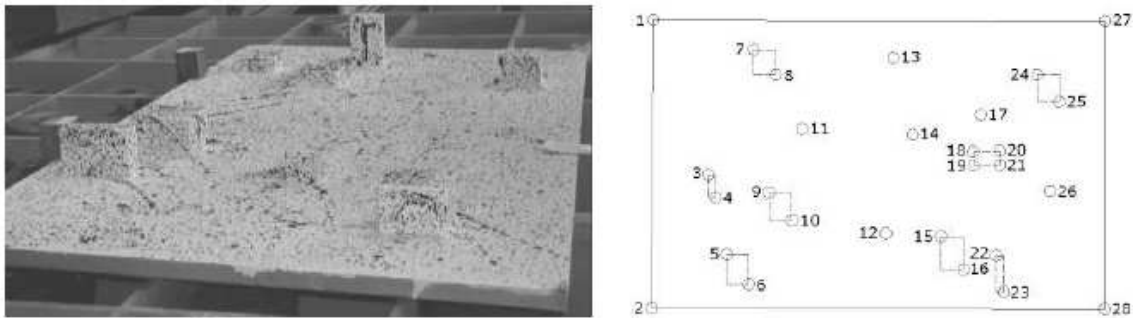

Ilustración 36. Objeto de pruebas para evaluación de las medidas fotogramétricas [27].

3.8. SISTEMA DE FOTOGRAMETRÍA CON CÁMARAS COMERCIALES

Un estudio reciente de las Universidades de León y Vigo [20] consistió en el desarrollo de un sistema de captura de imágenes para su posterior procesado fotogramétrico formado por una estructura ajustable montada en un trípode (Ilustración 37). Dicha estructura la constituyen cuatro brazos regulables en cruz en cuyos extremos hay cuatro cámaras digitales comerciales. Con dicho sistema es posible realizar medidas fotogramétricas de objetos dentro de un rango de tamaños desde algunos centímetros a dos metros.

Las cámaras utilizadas se eligieron de tal forma que incorporaran un sistema inalámbrico de disparo automático, estableciendo de forma manual el resto de parámetros de captura. Cada una de ellas fue calibrada independientemente y en las campañas de pruebas se utilizaron 121 patrones circulares de 6 mm de diámetro distanciados entre sí 1,061 mm formando una matriz de medidas 75×75 cm. Las capturas se hicieron de forma que todos los targets entraran en las imágenes tomadas por cada una de las cuatro cámaras.

Para el procesado fotogramétrico se utilizó el software *Photomodeler* de *EOS Systems*. Se consiguieron precisiones submilimétricas en el orden de 0,01 mm en el mejor de los casos trabajando siempre en un entorno de iluminación controlada, distancias cortas y alta redundancia en la detección de patrones.

La referencia del artículo descrito es: Enoc Sanz-Ablanedo, José Ramón Rodríguez-Pérez, Pedro Arias-Sánchez y Julia Armesto, *Metric Potential of a 3D Measurement System Based on Digital Compact Cameras,* Journal of Sensors, Volume 9, No. 6, Junio 2009.

Ilustración 37. Sistema de captura para procesado fotogramétrico [20].

3.9. CONCLUSIONES

En el rastreo de la literatura científica realizado se han obtenido las siguientes conclusiones relativas a un número de puntos en común que caracteriza este tipo de proyectos:

- En ningún caso se desarrolla algoritmia propia de fotogrametría y se centran en la optimización de diversos factores que afectan al análisis fotogramétrico final, como ubicación de patrones codificados, características de los mismos, control de la iluminación, topología de las capturas, etc.
- En todo caso, siempre es necesario un proceso de calibración de las cámaras, para conocer los parámetros de la orientación interior de las mismas y así corregir los resultados obtenidos por el procesado fotogramétrico posterior.

Este proceso se realiza *offline* llevando a cabo múltiples capturas y aplicando determinados cálculos y algoritmos para extraer los parámetros necesarios.

- Todos utilizan patrones retroreflectantes o al menos muy contrastados, a fin de aumentar el contraste en las fotografías entre target y superficie, factor muy importante si las medidas se realizan en exteriores. Cabe mencionar que el tiempo de cómputo puede verse reducido por este medio, ya que el tiempo de procesado para la detección de patrones en cada imagen es menor.
- Ninguno usa patrones codificados. En su lugar utilizan patrones circulares convencionales, de forma que no es posible distinguir un patrón de otro. En un sistema automático es imprescindible poder discriminar patrones, identificándolos para que los algoritmos sean capaces de trabajar con ellos en los modelos sin intervención humana.
- Todos usan un software comercial de fotogrametría aplicado al caso de estudio. Las prestaciones de dichos programas, tradicionalmente usados en otras aplicaciones fotogramétricas, son suficientes para acometer con garantías dicho trabajo. Sin embargo, V-Stars, el más usado, es extremadamente caro (cercano a los $200.000 para un sistema de una sola cámara o muchos cientos de miles de dólares en sistemas multicámara).
- Una conclusión muy importante es que en todos los casos el estudio fotogramétrico se produce sin aplicar la condición de tiempo real. Ello posibilita:
    - Que las medidas se hagan durante campañas nocturnas o bien en interiores, siempre con iluminación artificial controlada. Ello facilita la detección de patrones en las imágenes y elimina el factor variable presente en la iluminación natural.
    - Que se utilice un número de ángulos de visión altamente redundante por medio de usar una o muy pocas cámaras tomando un gran número de fotografías, normalmente desde la cesta de una grúa. Ello permite un proceso de optimización posterior para la obtención de resultados de mayor precisión en los modelos.

- Que se puedan hacer con suma redundancia las medidas de cada campaña, habitualmente usando al menos una hora y unas 120 fotos por cada ángulo de elevación de la antena. Gracias a ello es posible una optimización de los modelos, consecuencia de un exhaustivo proceso de selección de las mejores capturas.
- Que se pueda llevar a cabo el procesado fotogramétrico sin límite de tiempo, realizado por un experto solamente una o muy pocas veces y optimizando cada paso del proceso, lo que redunda también en mayores precisiones en los modelos obtenidos.
- Que el despliegue durante las campañas de medición sea mínimo. Normalmente es suficiente con una grúa y un profesional que realice las capturas a mano, no siendo necesaria la instalación de una infraestructura para dar soporte al sistema de captura.
- Por último, el hecho de emplear una sola cámara hace posible un aumento de la precisión total de los modelos, así como una disminución del tiempo de procesado, ya que se emplea en todos los casos un único modelo de calibración.

4. Diseño preliminar del sistema

Una vez identificados los requisitos a cumplir en el prototipo final que se ha de desarrollar, llevado a cabo un estudio de la teoría sobre la que se sustentan los conceptos básicos de la fotogrametría y realizado un rastreo de la literatura científica con el objetivo de conocer el estado del arte referente a proyectos similares, en este capítulo se lleva a cabo un diseño preliminar del sistema. En este diseño se explican las decisiones principales que se llevaron a cabo en la primera fase del proyecto y que determinarían en gran parte las líneas de trabajo a seguir durante el mismo. Nótese que en este capítulo solo se describen conceptos relacionados con el diseño previo y que en ningún caso se detallan aspectos específicos de la implementación del demostrador, que se explicará en capítulos posteriores.

4.1. CONSIDERACIONES DEL SISTEMA DE CAPTURA

Un elemento clave de todo sistema de fotogrametría lo constituye el sistema de captura de las imágenes a procesar por el software. En el sistema a desarrollar se prevé la utilización de un número elevado de cámaras, ya que se trata de un sistema automático de cámaras fijas, donde no es posible la reutilización de las mismas en más que un plano estático permanente. Además, dado que la topología prevista en del sistema a medir, tanto del demostrador de laboratorio como del prototipo final, presenta cierta complejidad y, en el caso de las mediciones de antenas reales, involucra grandes distancias (para tratarse de un sistema de fotogrametría de campo cercano), puede establecerse con claridad que será necesaria la utilización de muchas cámaras.

Por ello, un aspecto clave en el diseño del sistema es la escalabilidad. Dado que no se puede determinar a priori un número exacto de cámaras necesarias en el demostrador y en el prototipo final, habrá que suponer que el número pueda ser muy variable, por lo que una buena escalabilidad proporcionará robustez al sistema en lo referente a evitar futuros crecimientos inasumibles de coste y/o complejidad durante el desarrollo del sistema. Además, en el contrato firmado entre INSA y UC3M, fue explícitamente especificado que las cámaras deberían ser de bajo coste, por lo que un factor fundamental a la hora de desarrollar el sistema será la utilización de cámaras que no hagan aumentar en exceso el coste del sistema total.

Cabe señalar que el sistema de captura se basará siempre en cámaras digitales, dado que actualmente ofrecen costes reducidos y muy alta calidad de imagen, además de otros factores imprescindibles como los relativos a la automatización del sistema. El hecho de utilizar cámaras digitales puede parecer obvio pero hasta hace no mucho, dentro del ámbito de la fotogrametría, se seguían utilizando cámaras analógicas en lugar de digitales por ofrecer resultados superiores en las medidas fotogramétricas. Y aún en la actualidad se utilizan cámaras analógicas en determinados ámbitos de la fotogrametría, como en mediciones tridimensionales de escenarios de un crimen o de un accidente (Ilustración 38), en el que la fotografía constituye una prueba y la única forma de garantizar su validez, derivada de su imposibilidad de falsificación, es la presencia de un negativo en película fotográfica; o en proyectos como el mencionado en el apartado 3.4, en el que se realizó la medición de deformaciones gravitatorias del radiotelescopio

de Arecibo, donde se precisa un tamaño de película (o sensor, en el caso digital) extremadamente grande.

Ilustración 38. Fotogrametría escenas de un crímenes (izquierda) o accidentes (derecha).

4.2. CÁMARAS FOTOGRÁFICAS

Como se ha establecido, el número de cámaras podría ser elevado en el sistema de capturas, por lo que hay que asumir que una parte considerable del coste del sistema final lo supondrán las cámaras; de ahí la importancia de emplear cámaras de bajo coste. Sin embargo, este requisito se opone a la especificación más importante del resultado a obtener por el sistema de fotogrametría: muy alta precisión en el modelo 3D. Hay una relación directa entre la cámara utilizada y la precisión alcanzable, por lo que será vital llegar a un compromiso entre la calidad óptica del sistema de captura y su coste.

Este compromiso, sin embargo, no solo se basa en mantener bajo el coste utilizando ópticas de suficiente calidad. Existen otros requisitos que el sistema de captura deberá satisfacer. Un requisito muy importante es la interoperabilidad de las cámaras, fundamental dado que el sistema debe ser automático, lo que exige que las cámaras deban poder comunicarse sin intervención del usuario por medio de un ordenador. Como se verá en el siguiente capítulo, este requisito directamente descarta la mayor parte de la oferta fotográfica comercial disponible.

Hay una serie de parámetros que es importante observar porque influyen de una forma u otra en el resultado fotogramétrico final. A continuación se describen algunos de ellos, cuya importancia deberá evaluarse para determinar si compensa el coste extra que suponen en el aumento de prestaciones del sistema. Más adelante podrá

comprobarse que algunos deberán tenerse en cuenta desde el principio y otros podrán aplazarse para el futuro sistema real de medición del array instalado en la antena de 15 metros de la ESA.

Un tamaño grande de sensor permitirá realizar búsquedas de patrones mucho más precisas en las imágenes capturadas, con el consiguiente aumento en la precisión final de los modelos generados. Además, sensores más grandes aportan ventajas adicionales como mayor rango dinámico y menos ruido.

El rango dinámico puede cobrar importancia en situaciones en las que la iluminación ofrezca mucho contraste y no se pueda actuar para disminuirlo. Por otra parte, el ruido captado por un sensor de una cámara fotográfica se suele referir como la sensibilidad del sensor y se cuantifica en casi todos los casos con la escala ISO. Normalmente una cámara compacta convencional de bajo coste tiene valores que llegan hasta unos 400 ISO, con muy altos niveles de ruido. La menor cantidad de ruido captada por un sensor de gran tamaño adquiere mayor importancia cuando se llevan a cabo capturas con condiciones de iluminación escasa (Ilustración 39). Actualmente los sensores más avanzados pueden llegar hasta los 102.400 ISO (en el caso de la cámara Nikon D3S, con un coste aproximado de 5.000€), lo que permite realizar capturas en condiciones cercanas a la oscuridad.

Ilustración 39. Comparativa de una misma captura con diferentes sensibilidades.

Un factor importante también lo constituye la resolución del sensor, medida en número de píxeles: Un mayor número de píxeles proporciona en general mayores precisiones, siempre que el tamaño del sensor se mantenga. Por otra parte, un sensor de, por ejemplo, 9 Megapíxeles de un tamaño determinado, tendrá más sensibilidad que otro de la misma resolución pero de la mitad de tamaño, ya que el tamaño de los píxeles en el segundo caso será menor, al tener la misma cantidad total en la mitad de espacio.

Estrechamente relacionado con el tamaño del sensor, está el tipo de cámara: Compacta o DSLR (*Digital Single Lens Reflex*, también conocidas como réflex). En general, se puede afirmar que las cámaras réflex disponen de tamaños de sensor mayores que las compactas, con las ventajas que se acaban de ver. Como se puede apreciar en la Ilustración 40, se puede observar que hay una gran diferencia en el tamaño de sensor de una cámara compacta con el tamaño de sensor de una réflex. Esta diferencia se aprecia en la discontinuidad localizada en la mitad de la gráfica, correspondiente a los mejores modelos de compactas (parte derecha de la curva) con los peores de réflex (a la izquierda). Nótese además que se trata de una escala logarítmica, por lo que las diferencias son notables.

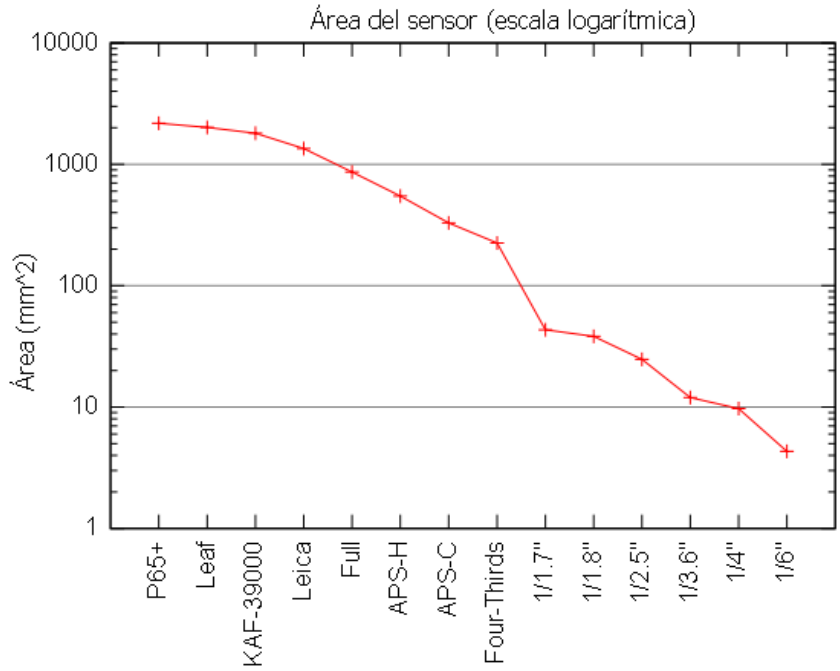

Ilustración 40. Área del sensor de distintas cámaras digitales.

El formato del sensor (Ilustración 41) determina la longitud focal efectiva de la cámara. En el caso de los sensores de formato completo FFF (*Full Frame Format*), permite aplicar un factor multiplicador de 1× a la distancia focal. En sensores que no son de formato completo, como el clásico APS (*Advanced Photo System*), con un factor multiplicador entre 1,25× y 1,74× (en función del tamaño físico del sensor), o del formato 4/3, con un factor de 2×, es necesario multiplicar por ese factor la distancia focal del objetivo para obtener la distancia focal equivalente a un sensor analógico de 35 mm (la tradicional película fotográfica, usada frecuentemente como referencia), lo que da lugar a que la mínima distancia focal sea tanto mayor cuanto mayor sea el factor multiplicador.

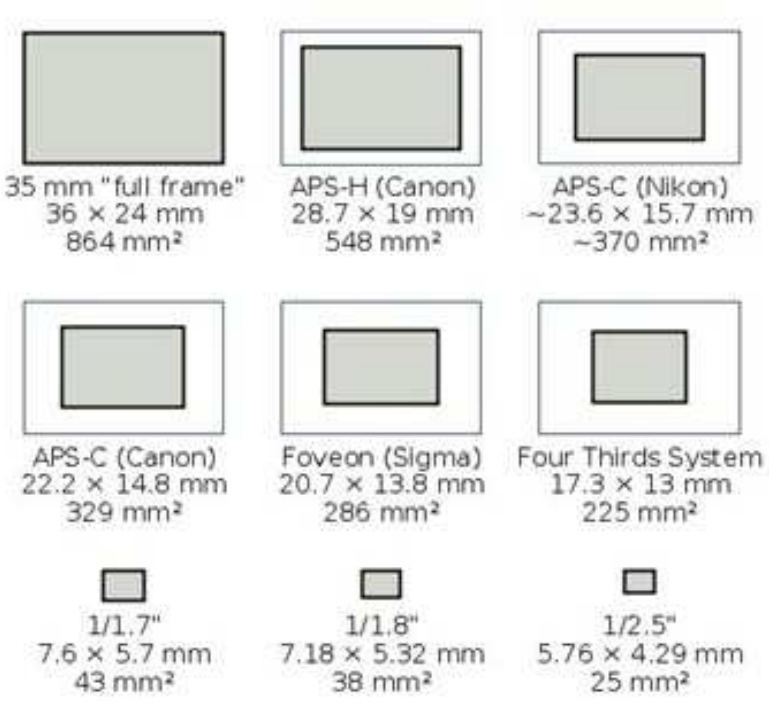

Ilustración 41. Diferentes formatos de sensor comerciales.

4.3. ÓPTICA DE LAS CÁMARAS

En el apartado anterior se detallaron los aspectos electrónicos de las cámaras del sistema de captura. En este apartado se describen varios aspectos relativos a la parte óptica de las mismas, que en el caso de las réflex se podrá establecer de forma independiente a la cámara. En el caso de las cámaras compactas, al no poder intercambiar lentes, los requisitos relativos a la elección de la cámara van unidos a los relativos a los de la óptica asociada.

Una vez corregida con el factor multiplicador correspondiente al formato del sensor, como se explicó en el apartado anterior, la distancia focal de la lente impone el campo de visión (*field of view*, FOV) de la cámara. En el apartado 8.2 se muestra esta dependencia y el modo de calcularla. En general, en un proyecto en el que se van a realizar medidas de grandes superficies, se tenderá a elegir pequeñas longitudes focales, ya que de esta manera se obtienen grandes campos de visión que permiten captar una mayor cantidad de patrones (Ilustración 42). De esta forma la redundancia en el procesado fotogramétrico es máxima, optimizándose así la precisión alcanzable.

Además, objetivos con focales cortas aportan elevadas luminosidades máximas (o mayores aperturas máximas), lo que permite llevar a cabo las capturas a mayores

velocidades de obturación, o de forma equivalente, a iguales velocidades de obturación es posible captar menos ruido que usando focales más largas, mejorando de nuevo la sensibilidad. Por ello, dentro de lo posible, en este proyecto, se emplearán las focales más cortas que sea posible, llegando a usar grandes angulares si existe la opción de hacerlo. Aunque objetivos con deformaciones tan grandes del campo de visión puedan parecer contraproducentes en el procesado fotogramétrico, si se realiza un buen calibrado de la cámara, esto no conlleva consecuencias negativas.

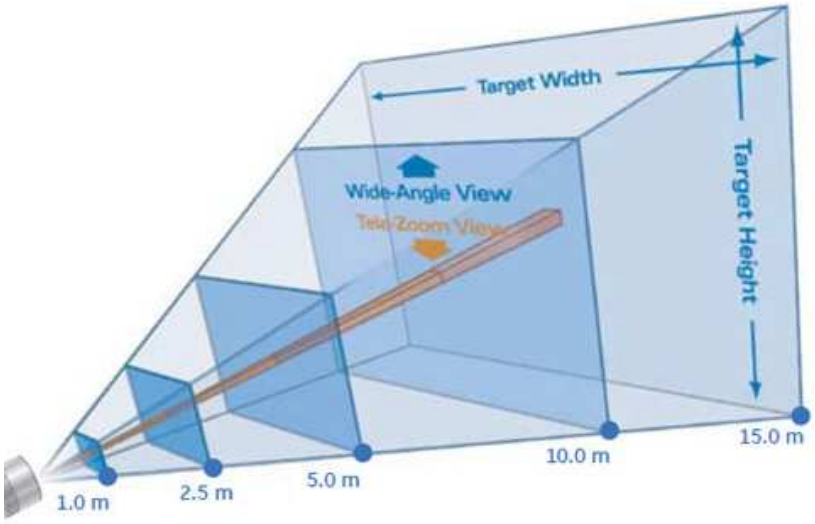

Ilustración 42. FOV a focales largas (tele zoom) y focales cortas (gran angular).

Otro factor relativo a la óptica utilizada en las cámaras se refiere a la posibilidad de usar ópticas con distancias focales fijas o bien objetivos de focal variable. En general, el hecho de usar lentes fijas es ventajoso en el procesado fotogramétrico, ya que garantiza una calibración más robusta y duradera. Como se ha visto en el capítulo 2, el empleo de cámaras previamente calibradas permite usar los parámetros de orientación interior en el procesado fotogramétrico, lo que proporciona un aumento de la precisión de los modelos. El hecho de usar focales fijas asegura que la calibración es válida durante largos periodos de tiempo (en el capítulo anterior se revisó un estudio en el que se concluía que la calibración de cámaras comerciales se conserva dentro de errores muy bajos durante periodos de hasta un año), eliminando además el riesgo de la descalibración debida a diferencias en los parámetros del objetivo por motivos mecánicos, aspecto común en lentes de tipo zoom variable. En este sentido, la naturaleza de las cámaras réflex de objetivos intercambiables las hace idóneas para el empleo de objetivos de focales fijas, ya que las compactas siempre disponen de focales variables. Sin embargo, es preciso tener en cuenta que las cámaras réflex serán en todos

los casos más costosas que las compactas, por lo que de nuevo será necesario buscar un compromiso entre coste y prestaciones.

4.4. SOFTWARE DE FOTOGAMETRÍA

Otra parte fundamental del sistema a desarrollar lo constituye el software encargado de llevar a cabo el procesado fotogramétrico. Básicamente será responsable de generar el modelo tridimensional de las antenas, consistente en una serie de puntos 3D correspondientes con patrones codificados dispuestos sobre la superficie de las antenas, a partir de las fotografías tomadas por el sistema de captura.

Como se dedujo en el capítulo 2, relativo a la teoría fotogramétrica, y se confirmó en el capítulo 3, de revisión del estado del arte, el desarrollo de una algoritmia propia, que llevara a cabo todo el procesado de fotogrametría necesario en este proyecto, superaría con mucho los recursos económicos y temporales contractualmente disponibles. Por ello, desde las primeras fases del proyecto los esfuerzos se concentraron en localizar la alternativa software comercial que mejor se adaptara a los requisitos establecidos en el capítulo 1.

Ilustración 43. Sistema *V-Stars* de *Geodetic Systems* de 2 cámaras.

Desgraciadamente, pronto se descubrió que la solución fotogramétrica más utilizada en proyectos similares, como se explicó en el capítulo 2, es, con diferencia, el sistema *V-Stars* de *Geodetic Systems* (Ilustración 43). Esta empresa es líder en el sector y ofrece un servicio integral de solución fotogramétrica a medida adaptada a multitud de aplicaciones. Puestos en contacto con el representante de la compañía en Europa, y tras exponerle las necesidades del proyecto, el presupuesto estimado alcanzaba el orden de

los cientos de miles de euros. Según documentos internos de *Geodetic Systems* encontrados en su página web, un sistema multicámara *V-Stars/M8* (como el recomendado por el representante contactado) tiene un coste inicial de $275.000 contando únicamente con dos cámaras, a lo que hay que añadir $90.000 extras por cada cámara adicional. Si el prototipo a desarrollar necesitara, por ejemplo, ocho cámaras, el coste total de dicho sistema ascendería a unos $815.000, un orden de magnitud sobre el presupuesto inicial y dos órdenes de magnitud sobre el coste final del protoripo, como se detallará en adelante.

Una vez establecido que los presupuestos de *Geodetic Systems* superaban sobradamente los recursos económicos disponibles para el proyecto, se hizo necesario buscar una alternativa de bajo coste que satisficiera los requisitos exigidos. Tras un exhaustivo rastreo del software comercialmente disponible, se identificaron varias alternativas, de las cuales finalmente solo una resultó viable. A continuación se detalla el proceso de búsqueda llevado a cabo, con las principales opciones que se barajaron.

Existen varios programas de procesado fotogramétrico en el mercado que, si bien presentan un gran potencial en cuanto a procesamiento y medidas en 3D, carecen de funcionalidades imprescindibles en este proyecto, tales como el análisis de imágenes y la detección de patrones codificados y su uso en la generación de los modelos. Ejemplos de este tipo de software son (Ilustración 44) *PolyWorks Inspector* de *InnovMetric Software Inc.*, capaz de generar modelos 3D mediante fotogrametría y proporcionando capacidad de automatización mediante un lenguaje de macros, pero sin ofrecer el proceso de detección de patrones; o *ImageModeller* de *Autodesk, Inc.*, con el que es posible generar modelos 3D a partir de fotografías, pero mediante métodos manuales, lo que hace imposible su automatización.

Ilustración 44. *PolyWorks* de *InnovMetric Software Inc.* y *ImageModeler* de *Autodesk, Inc.*

También existen aplicaciones específicas de fotogrametría como *SOCET SET* de *BAE Systems*, que fue el primer software de fotogrametría disponible de forma comercial, viendo la luz en 1991; sin embargo su desarrollo estuvo más orientado a fotogrametría aérea, con lo que no es directamente aplicable en el caso de campo cercano. No obstante, existe una herramienta también de fotogrametría aérea, pero con capacidades adicionales para procesado en campo cercano, compatible dentro del entorno de *SOCET SET*. Se trata de *BINGO* de *GIP Geoinformatics and Photogrammetric Engineering*. Sin embargo, su aplicación tampoco es directa, requiere altos conocimientos de fotogrametría y carece de varias funcionalidades importantes, sobre todo en relación con la automatización, como el hecho de no trabajar con patrones codificados. Si los patrones no son codificados, no existe posibilidad de distinguir unos de otros mediante el reconocimiento automático de patrones.

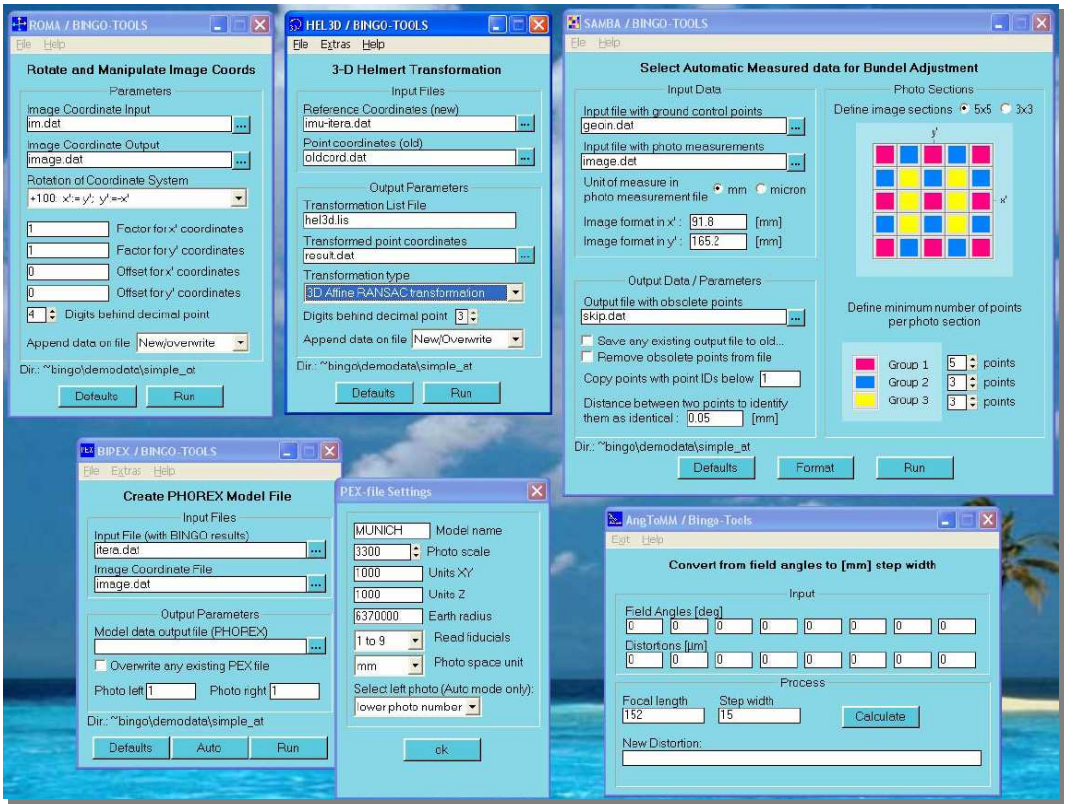

Ilustración 45. Software *BINGO* de *GIP Geoinformatics and Photogrammetric Engineering*.

Una *primera* opción, más centrada en fotogrametría de campo cercano, es el software *ShapeMonitor* de *ShapeQuest, Inc.* Está directamente orientado a funcionamiento en tiempo real y permite actualizaciones de los modelos muy rápidas. Dado que el objetivo del sistema es la generación de modelos en tiempo real, las cámaras utilizadas son de

video y de baja resolución, por lo que las precisiones no son las máximas. Además, se integra un sistema dual de cámaras, por lo que de ser necesarias más de dos, habría que usar varios sistemas en paralelo con la consiguiente complejidad de sincronización e integración de los modelos de cada sistema. Por último, utilizan patrones circulares convencionales, por lo que la automatización no es posible.

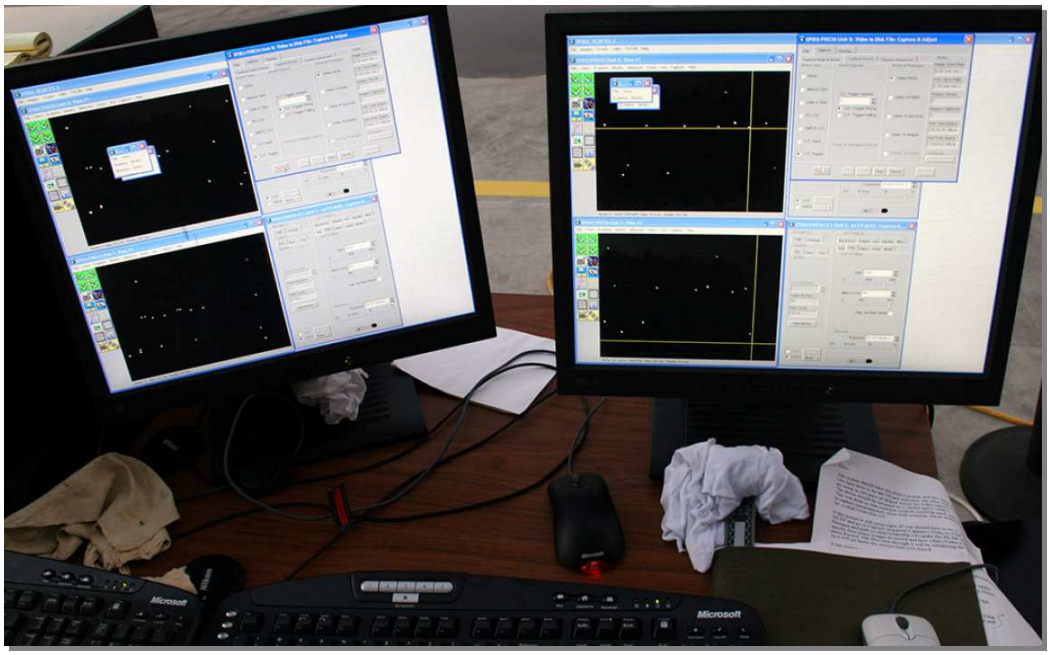

Ilustración 46. Software *ShapeMonitor* de *ShapeQuest, Inc* en un sistema dual de 4 cámaras.

Dos alternativas mucho más interesantes las representan los dos siguientes entornos de procesado fotogramétrico: *iWitness* de *DeChant Consulting Services* y *PHDIAS*, de *Phocad*. El primero, *iWitness*, es un software independiente que permite realizar búsqueda de patrones codificados y obtener precisiones de hasta 1:50.000 el tamaño de los objetos. Los patrones codificados están diseñados específicamente para *iWitness*, con el objetivo de aumentar el rendimiento del sistema, y consisten, a diferencia de los tradicionales circulares con anillo concéntrico, en matrices de puntos rojos, siendo todos retrorreflectantes. Con la versión *iWitnessPro* se proporcionan 48 patrones codificados retrorreflectantes, y ofrecen otros tres juegos de 48 patrones adicionales, cada uno por un precio de $139, también disponibles en versión magnética. El precio de la versión *iWitnessPro* (la única que permite el uso de patrones codificados) es de $1.995. *iWitness* es una alternativa muy interesante, sin embargo presenta un gran inconveniente: no es posible su automatización ya que no admite ningún lenguaje de programación para controlar sus funciones de forma interna.

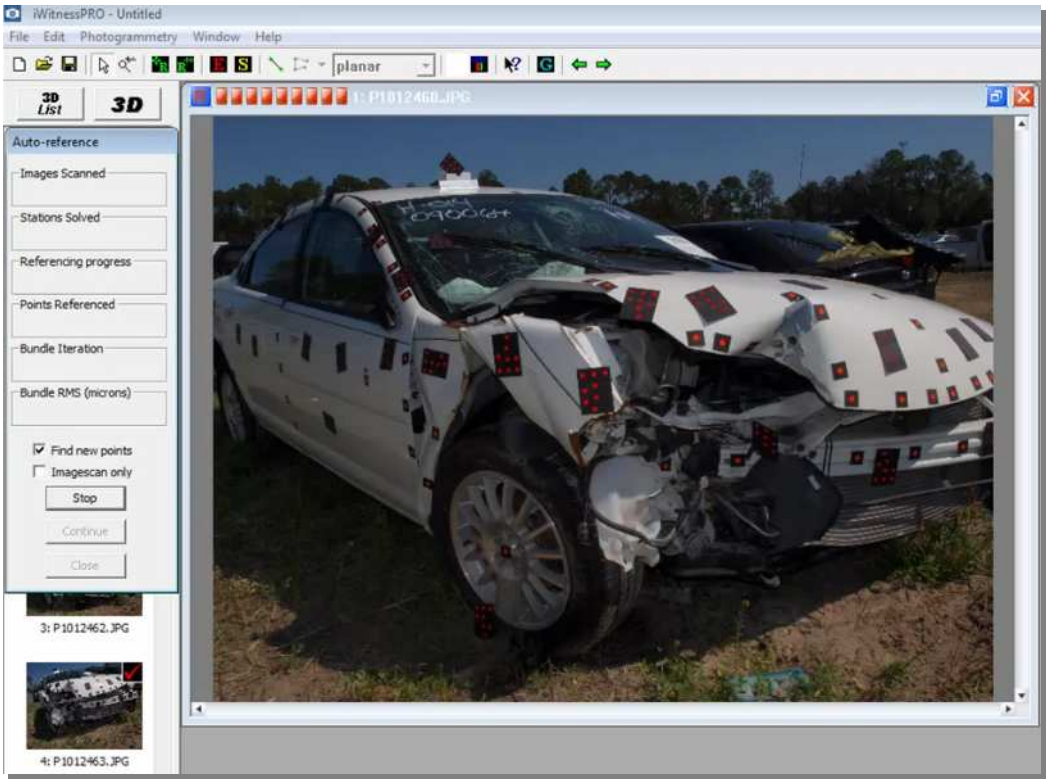

Ilustración 47. Software *iWitness* de *DeChant Consulting Services*.

La segunda aplicación de las mencionadas, *PHDIAS,* no es una aplicación independiente, sino que trabaja dentro del entorno *MicroStation* de *Bentley Systems*, que es un entorno de diseño CAD 3D. Permite altas precisiones (hasta 0,03× tamaño del píxel o, en función del tamaño de los objetos, hasta 1:30.000) y alta velocidad de procesado, utilizando patrones codificados circulares con anillos y reconocimiento automático de los mismos para su uso en el procesado fotogramétrico (Ilustración 48). En principio no ofrece un procesado automático, sin embargo permite la creación de macros mediante el lenguaje de programación VBA (*Visual Basic for Applications*). Como principal inconveniente está su coste, consecuencia del hecho de tener que adquirir también el entorno *MicroStation*: El precio a fecha de 2.008 del paquete *PHDIAS* independiente (a falta de *MicroStation*) es de 9.000 euros + 19% de IVA, lo que resulta en 10.710 euros, si bien existe una licencia académica con un coste de 2.250 euros + 19% de IVA, lo que hacen 2.677,50 euros. A este precio hay que sumarle el de *MicroStation,* que añade unos 6.000 euros adicionales al coste total.

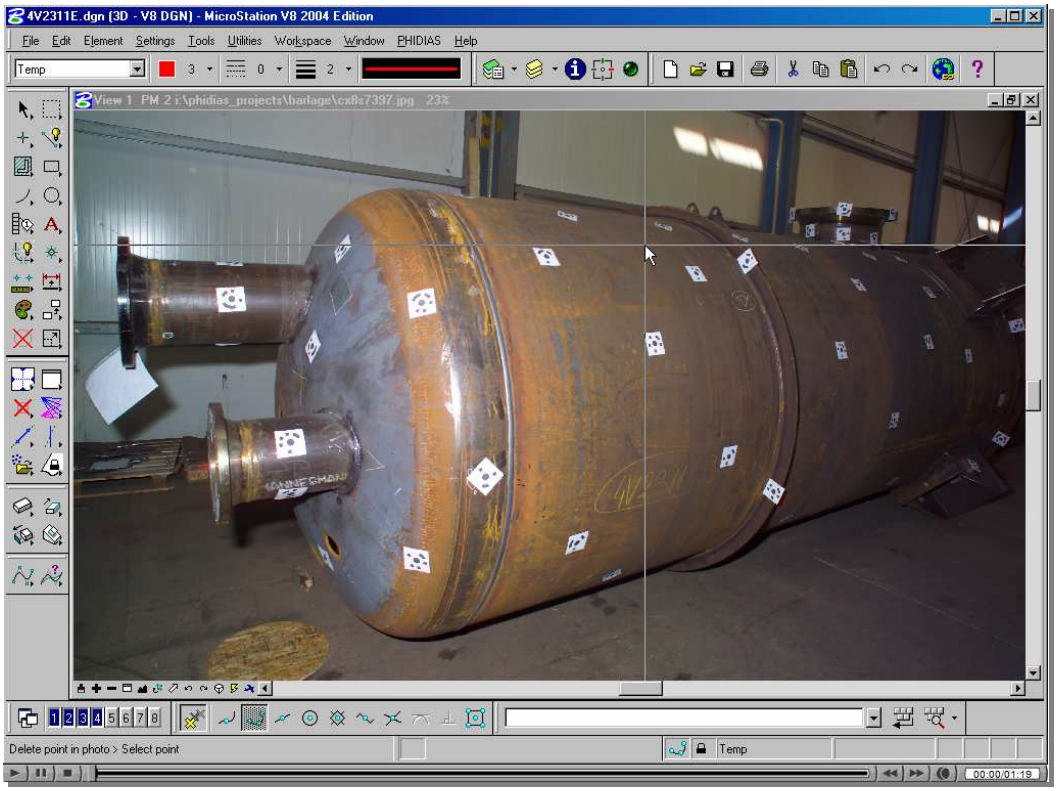

Ilustración 48. Software de análisis fotogramétrico *PHDIAS* de *Phocad*.

Existe una opción alternativa a los paquetes de software comercial vistos hasta ahora. Se trata de *Benge*, desarrollado por *Photometrix*, una división de *Geodetic Systems, Inc. Benge* (del inglés, *Bundle ENGinE*) es un motor de fotogrametría que consiste en una librería de funciones básicas, dentro de un entorno de programación C++, incluyendo procesos como orientación interior, resección espacial, triangulación multicámara, etc. La gran ventaja que aporta esta solución es que permite la automatización total del procesado, ya que se puede controlar cada paso del proceso fotogramétrico y optimizarlo para los requisitos de la aplicación particular. Sin embargo, carece de algoritmia de detección de patrones codificados, por lo que sería necesario desarrollarla específicamente e integrarla con la librería existente. Otro inconveniente que presenta esta solución es su alto coste, de $15.000, directamente mayor que cualquier otra solución software (a excepción de *V-Stars*), y también mayor indirectamente, ya que sería la alternativa que más trabajo adicional necesitaría, tanto en cuanto a la prolongada curva de aprendizaje inicial (debido a la necesidad de conocer con detalle cada paso del proceso fotogramétrico), como en cuanto a la carga adicional de trabajo de programación para llevar a cabo todas las tareas de automatización (Ilustración 49), además de para desarrollar específicamente una solución para la detección de patrones e integración de los mismos dentro del resto del proceso fotogramétrico.

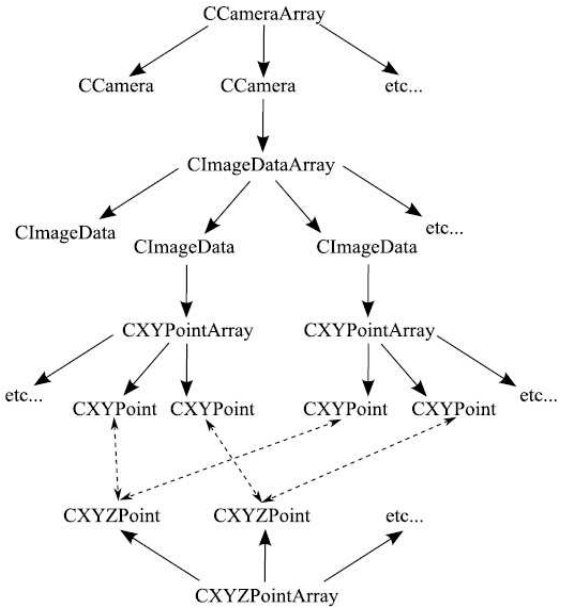

Ilustración 49. Diagrama de flujo de un software programado usando *BENGE*.

Por último, la única alternativa que reunía todos los requerimientos con solo algunos problemas menores la constituye *Photomodeler* de *EOS Systems, Inc*. *Photomodeler* es una aplicación integral de fotogrametría de campo cercano que cubre todos los procesos, desde calibración de cámaras, detección de patrones codificados, ajuste multicámara hasta generación y visualización de los modelos 3D y sus puntos XYZ. Además, permite su automatización mediante el protocolo DDE (*Dynamic Data Exchange*), con lo que es posible utilizar a *Photomodeler* como un cliente DDE y utilizar sus funciones como si de una librería de funciones se tratara, dentro de un entorno de programación C++. Existen tres versiones de *Photomodeler*: *Standard*, *Automation* y *Scanner*. La versión *Standard* es insuficiente por no integrar reconocimiento de patrones codificados y la versión *Scanner* es innecesaria porque su aportación es que permite generar texturas, por lo que la versión de interés será *Photomodeler Automation*, cuyo precio es de 1.645 dólares canadienses, lo que equivale a unos 1.070 euros. A esta cantidad hay que sumarle gastos de envío y 16% de IVA, con lo que resulta en 1.356 euros.

La precisión de *Photomodeler* puede superar los 1:30.000 el tamaño físico de los objetos a modelar. Es importante resaltar que cuando se habla de las precisiones máximas en este tipo de software se están dando por supuestas condiciones de trabajo ideales: iluminación controlada, óptica de alta calidad, buenas calibraciones, uso óptimo de patrones codificados retrorreflectantes, tanto en número como en disposición,

correcta topología de captura de imágenes para optimizar la triangulación, alta redundancia en detección de patrones, alto número de imágenes, etc. En este caso, teniendo en cuenta la precisión máxima ofrecida por *Photomodeler*, una antena de 15 metros como la que se pretende medir en el futuro con el prototipo de este proyecto, podría modelarse con precisiones de 0,0005 m, es decir, medio milímetro, con lo que será necesario aproximarse al caso ideal en la implementación del sistema de fotogrametría para conseguir las precisiones requeridas, que como se estableció en el capítulo 1, deben permanecer en todo momento por debajo de los 10 milímetros y aproximarse al milímetro, con el objetivo de exportar la solución a sistemas futuros de banda X.

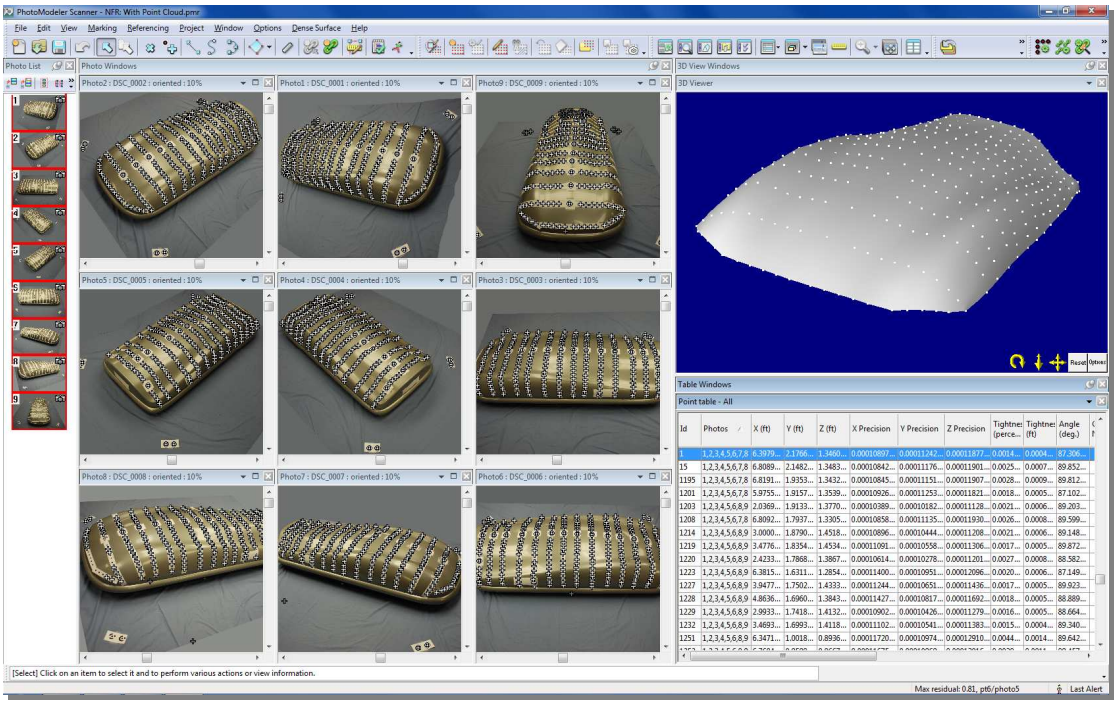

Ilustración 50. Software *Photomodeler* de *EOS Systems, Inc.*

4.5. SOFTWARE DE AUTOMATIZACIÓN

El software de automatización lo constituye cualquier desarrollo necesario llevado a cabo con el objetivo de hacer del sistema de fotogrametría un sistema automático capaz de funcionar sin supervisión. Se trata de un aspecto clave, ya que, junto al hecho de basarse en dispositivos de bajo coste, supone la mayor innovación en este proyecto, que lo diferencia de otros similares ya presentados en el capítulo anterior.

Los requisitos en cuanto a automatización se dividen básicamente en dos partes: Por un lado se deberá automatizar el sistema de captura multicámara, de forma que cada

cierto tiempo se lleven a cabo los disparos de todas las cámaras fotográficas, de forma sincronizada, y se transfieran automáticamente al software de fotogrametría. Por otra parte, el software de procesado fotogramétrico deberá funcionar también de forma automática recibiendo los resultados del sistema de captura, procesando las imágenes y llevando a cabo todos los cálculos necesarios para generar el modelo 3D requerido.

La primera parte del software de automatización se desarrollará en C++ en el entorno de programación *Canon PowerShot Remote Capture Software Development Kit* (PS-ReC-SDK), que pone Canon a disposición de los desarrolladores que utilicen los modelos de cámaras Canon que soporten este SDK. Como se verá en el apartado 5.1, una parte muy importante en la elección de las cámaras fotográficas elegidas para este proyecto la supuso el hecho de la existencia de un entorno de programación de estas características. La segunda parte del software de automatización se desarrollará también en C++, por compatibilidad con la primera parte, y se basará en el protocolo de comunicación DDE (*Dynamic Data Exchange*), que soporta *PhotoModeler Automation*. Como se vió en el apartado 4.4, una razón fundamental para elegir este software se basó en la existencia de esta funcionalidad, que permite controlar el procesado fotogramétrico interno de *PhotoModeler* como si de primitivas de una librería de fotogrametría se tratara, facilitando su automatización.

En la fase de diseño preliminar basta con establecer la importancia de automatizar el sistema, teniendo en cuenta esta necesidad para su diseño desde el principio, y en facilitar las herramientas que hagan posible su implementación. El capítulo 6 está dedicado íntegramente a especificar todos los aspectos de ambos procesos de automatización recién descritos, por lo que aquí no se entrará a discutirlos en mayor detalle.

4.6. ESTRATEGIA DE TRABAJO

Una vez establecidos los requisitos a satisfacer por el sistema final, revisados los aspectos fundamentales involucrados en el funcionamiento exigido al sistema de captura, así como a la óptica que lo complementa, de gran importancia dentro del procesamiento posterior, fijados los parámetros para la elección de un entorno de procesado fotogramétrico que satisfaga todos los requerimientos discutidos, y determinados los entornos que harán posible la automatización total del sistema, la

estrategia de trabajo que se siguió a lo largo del proyecto, descrita detalladamente en los siguientes capítulos, consistió en:

- Elección del software de procesado fotogramétrico que cumpla mejor con los requisitos revisados (ya descrito en este capítulo).
- Elección de las cámaras fotográficas que conformarán el sistema de captura final a utilizar.
- Elección del sistema hardware encargado de procesar todo el software desarrollado, tanto en laboratorio como en el entorno final de pruebas.
- Desarrollo del software de captura multicámara, con funcionamiento automático y respetando requisitos de tiempo real.
- Desarrollo del software de automatización del procesado fotogramétrico en colaboración con el software de captura multicámara.
- Integración de todas las partes software desarrolladas y verificación mediante múltiples pruebas.
- Construcción de un modelo de array de antenas para llevar a cabo la demostración del sistema en laboratorio.
- Construcción de la infraestructura de apoyo al sistema de fotogrametría en el entorno de pruebas final.
- Despliegue del sistema, incluyendo soporte para alimentación contínua a la intemperie, y cableado de comunicación con ordenador.
- Realización de campañas de pruebas en situaciones de trabajo reales y extracción de resultados finales.
- Elaboración de un informe de extensión del prototipo desarrollado a una antena de 15 metros de la ESA.

5. Justificación de compras

En este capítulo se ofrece una justificación completa de las compras más importantes realizadas para dar soporte a este proyecto. Si bien el presupuesto disponible por el contrato entre INSA y la Universidad Carlos III de Madrid hacía posible la compra holgada de suficiente cantidad de material, desde el inicio del proyecto se especificó contractualmente el objetivo del bajo coste. Esta característica del sistema se identificó como muy importante de cara a hacer posible la escalabilidad del sistema para una futura implantación de uno similar adaptado a las antenas de 15 metros de la ESA.

5.1. CÁMARAS FOTOGRÁFICAS

En el proceso de elección de las cámaras óptimas ha primado el coste por encima de todo, dado que el sistema debería ser escalable, siempre cumpliendo con las

especificaciones técnicas buscadas. Partiendo de que a priori se desconocía el número de cámaras necesarias, sí se sabía que a mayor número de antenas a medir o mayor complejidad en su topología, mayor número de cámaras sería necesario utilizar, por lo que fue fundamental minimizar el coste de las mismas, manteniendo los requisitos en todo momento. Por ello, pese a que existen en el mercado alternativas de uso muy directo para los objetivos de este proyecto, como pueden ser las cámaras de *National Instruments* (Ilustración 51), que son manejadas de forma nativa con el software *LabView*, su alto coste (entre 2.000 y 4.000 euros cada cámara, a lo que habría que sumar el software *LabView* y sus complementos de adquisición y manipulación de imágenes, lo que supondrían otros varios miles de euros) impuso su descarte desde el principio. Por ello, se consideraron inicialmente las opciones de más bajo coste y se fue aumentando hasta satisfacer las necesidades del proyecto.

Ilustración 51. Smart Camera de National Instruments.

Inicialmente se optó por la opción de utilizar cámaras web (Ilustración 52) para la adquisición de las imágenes. Las ventajas proporcionadas por estas cámaras son las del muy bajo coste que suponen, lo que a su vez permitiría usar una gran cantidad de ellas, y su facilidad de comunicación con un ordenador. Sin embargo, las cámaras web tienen un problema irresoluble: el de su baja calidad de imagen. Debido a su diseño orientado a transmitir video en tiempo real a través de Internet, la resolución de sus imágenes en todos los casos resultó insuficiente.

Se hicieron pruebas con las siguientes cámaras web de coste creciente.

- Trust HiRes (1,3 Megapíxeles) de foco fijo. 15€.
- Woxter i-cam 80 (2 Megapíxeles) de foco fijo. 30€.
- Microsoft LifeCam VX-5500 (1,3 Megapíxeles) de foco automático. 50€.

Ilustración 52. LifeCam VX-5500 de Microsoft.

La conclusión que se obtuvo de las pruebas realizadas con estas cámaras fue siempre que la resolución era insuficiente para un reconocimiento de patrones adecuado, por lo que, junto a otros motivos de menor importancia, tuvo que descartarse su uso.

La siguiente opción que se consideró fue la utilización de cámaras fotográficas que proporcionaban la función webcam. Sin embargo las únicas que soportan este modo son las de gama muy baja por lo que la variedad es muy escasa. Solo se pudo encontrar y probar una cámara que cumplía las especificaciones:

- Werlisa SLIM-54 (5 Megapíxeles) de foco automático. 39€.

Ilustración 53. SLIM-54 de Werlisa.

Tras llevar a cabo las pruebas con dicha cámara (Ilustración 53) se obtuvieron las siguientes conclusiones: La resolución que ofrecían las imágenes era adecuada (hasta 2560x1920 píxeles), sin embargo surgieron varios problemas que hicieron que se descartara su uso. Por una parte, la captura a alta resolución era muy lenta, llegando a tardar unos 6 ó 7 segundos, lo que imponía un hándicap inasumible ya fuera realizando una adquisición en serie (opción descartada directamente) o en paralelo (lo que forzaría a adquirir con un número demasiado alto de equipos a la vez, lo que a su vez haría que la ventaja del bajo coste no fuera tal al multiplicar el número de procesadores). Adicionalmente los drivers de esta cámara eran de muy baja calidad y no permitían al sistema operativo el reconocimiento simultáneo de más de una cámara, con lo que

habría sido necesaria la programación de un driver propio, con el gasto y esfuerzo adicional que ello supondría.

Finalmente se averiguó que tanto Nikon y Olympus como Canon proporcionaban sendos entornos de desarrollo con los que tomar el control por ordenador de todos los parámetros de las cámaras que soportan sus respectivos SDK (*Software Development Kit*). Olympus eliminó hace algunos años esta funcionalidad en toda su gama de cámaras compactas, soportándola únicamente las cámaras réflex de gama alta. El SDK de Nikon solo soporta cámaras réflex. Y del mismo modo, Canon ha tomado la misma decisión este año, por lo que en adelante únicamente las cámaras réflex soportarán SDK.

Ilustración 54. PowerShot SX110 IS de Canon.

Aprovechando que aún estaban a la venta cámaras compactas Canon que soportan su entorno de desarrollo, se optó por la gama *PowerShot* de Canon, y en particular por el modelo SX110 IS (Ilustración 54), que proporciona simultáneamente una serie de características que se identificaron como ventajosas, descritas a continuación:

- Alta calidad de imagen debido a su sensor de 9 Megapíxeles. Esta característica es fundamental ya que el reconocimiento de patrones codificados precisa de la máxima fidelidad entre el patrón original y el capturado en la fotografía. Un sensor de 9 Megapíxeles proporciona una muy alta calidad y fija una barrera, por encima de la cual el procesado se hace mucho más lento. A mayor resolución de la imagen, mayor fidelidad de los patrones pero mayor carga computacional en su reconocimiento.
- Bajo coste. Se trata de una cámara compacta de gama alta, que ofrece al mismo tiempo un precio bajo (alrededor de 200 €) y una calidad por encima de las cámaras compactas convencionales.

- Toma de corriente continua que permite instalar un sistema de alimentación de las cámaras, con el objetivo de no depender de la continua sustitución de sus baterías para su operación continuada.
- Objetivo con un amplio rango de focales (36-360 mm) que proporciona una gran versatilidad a la hora de elegir la disposición de las cámaras en el emplazamiento del experimento. En el reconocimiento de patrones, un parámetro importante es el ruido que añaden objetos cercanos a los patrones que no se desean capturar durante el proceso de búsqueda de patrones. Esto se puede evitar si en la imagen únicamente están los patrones a capturar, lo que se consigue acercando la cámara a los objetos a medir (lo que no siempre es posible) o bien por medio de acercar la imagen mediante un zoom. En todo caso, si tal estrategia se sigue, es muy importante calibrar las cámaras para dichas distancias focales, porque, como se explicó, es importante que este parámetro se mantenga fijo.
- Fácil acceso al flash integrado en la cámara. Esto permite obtener de un modo simple una sincronización perfecta entre el sistema de iluminación (necesario por la insuficiencia de los flashes que incorporan la cámaras, válidos únicamente para objetos muy cercanos al mismo) y la captura de las imágenes. Haciendo uso de la sincronización interna de la cámara se obtiene un significativo ahorro energético ya que no es necesario mantener el objetivo iluminado permanentemente durante los intervalos nocturnos o de baja visibilidad.
- Permite la migración a cámaras réflex en el futuro, sin más que realizar cambios menores en el software, dado que ambas se basan en el mismo SDK de Canon.

En la Ilustración 55 se muestra la comparativa de una imagen de un patrón codificado tomada con las diferentes cámaras utilizadas en las pruebas.

Trust HiRes (1,3 Mpíxeles) | **Woxter i-cam 80 (2 Mpíxeles)** | **Microsoft LifeCam VX-5500 (1,3 Mpíxeles)** | **Werlisa SLIM-54 (5 Mpíxeles)** | **Canon PowerShot SX110 IS (9 Mpíxeles)**

Ilustración 55. Comparativa de imágenes captadas por las diferentes cámaras probadas.

Elegida la cámara que se usaría a lo largo del proyecto, se adquirieron inicialmente siete para llevar a cabo las primeras pruebas en laboratorio. Tal como se tenía planeado desarrollar el sistema en términos de escalabilidad, la posible adición de más cámaras, en caso de necesitarse, sería simple y directa, siempre teniendo en cuenta que a mayor número de cámaras, mayor fiabilidad en la generación de los modelos 3D, pero mayor procesamiento y por lo tanto mayor retardo. En las últimas etapas del proyecto se identificó que, debido a diferencias entre la topología de las antenas propuesta en el contrato y la topología que se empleó en el montaje real, se necesitaban más cámaras, con lo que se añadieron otras 4 más al sistema, que finalmente contó con 11 cámaras.

5.2. ADAPTADORES Y TRÍPODES

Una vez adquiridas las cámaras, se optó por la instalación de un sistema de alimentación permanente, con el objetivo de no depender de la continua sustitución de sus baterías. Para ello se eligieron los adaptadores Canon ACK 800 (Ilustración 56) que permitían proporcionar alimentación continua a todas las cámaras.

Ilustración 56. Adaptador Canon ACK 800.

Con el objetivo de llevar a cabo las pruebas de laboratorio, se optó por la utilización de trípodes convencionales de fotografía (Ilustración 56), que proporcionan suficiente estabilidad y control de la posición y orientación de las cámaras por un bajo coste (11€).

Ilustración 57. Trípodes utilizados en las pruebas de laboratorio.

5.3. MATERIALES PARA EL PROTOTIPO FINAL

Dado que se debía diseñar un sistema que se pudiera dejar desatendido en funcionamiento automático a la intemperie, se hizo necesario el desarrollo de estructuras más estables y firmes para dar soporte a las cámaras y evitar cualquier tipo de movimiento de las mismas que el utilizado en el laboratorio. El prototipo debía funcionar en la azotea del edificio C de la ETSI de Telecomunicación de la Universidad Politécnica de Madrid, un entorno al aire libre y expuesto a vientos y demás inclemencias meteorológicas (Ilustración 58).

Ilustración 58. Array de antenas en la azotea del edificio C de la ETSI de Telecomunicación de la UPM.

En un entorno como este se debía diseñar un sistema suficientemente estable como para no transmitir vibraciones a las imágenes tomadas por las cámaras, pero suficientemente flexible como para poder fijar cada cámara en su posición deseada, tanto en altura, ubicación respecto a las antenas y orientación hacia las mismas.

Con todos estos requisitos en mente se optó por la utilización de material de instalación de antenas en exteriores y combinando diversos elementos de este tipo se consiguió un soporte para las cámaras muy robusto y estable, así como con una gran variedad de grados de libertad para situar y orientar cada cámara según sus necesidades (Ilustración 59).

Ilustración 59. Cámaras en su soporte y anclaje a la estrucura.

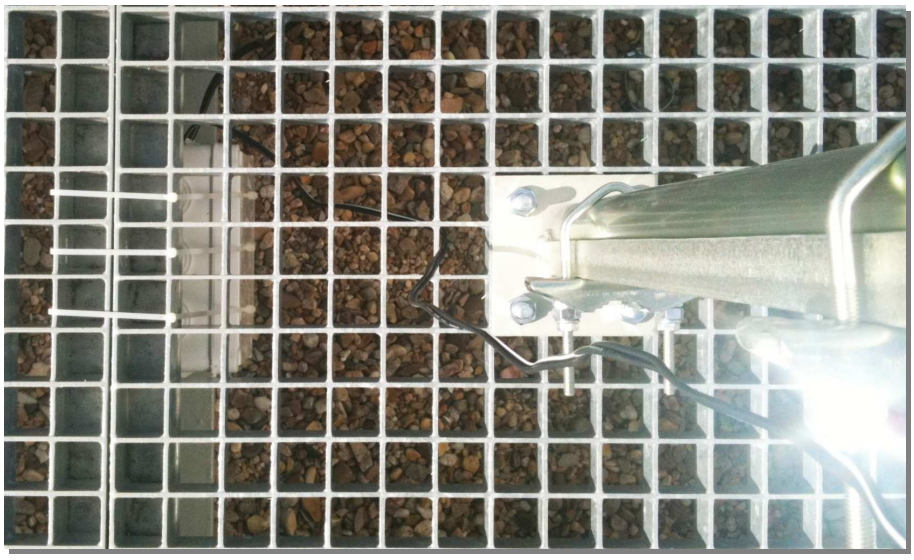

Ilustración 60. Arquetas eléctricas junto a los postes.

Además, dado que el prototipo debía funcionar en intemperie se instaló el sistema de comunicación con el ordenador y de alimentación en arquetas estancas como en la Ilustración 60.

5.4. ORDENADOR PORTÁTIL

El ordenador es una pieza clave en el sistema, dado que se encarga, además del control de la captura sincronizada de imágenes a través de las cámaras, de todo el procesado fotogramétrico. Debe ser un ordenador portátil, ya que la movilidad era un requisito importante durante la fase de desarrollo del proyecto, al tener que usar el mismo equipo como plataforma de trabajo (ya que solo se adquirió una licencia del software) y en las sucesivas campañas de medidas experimentales, ya fueran en el laboratorio o en el emplazamiento final del prototipo.

El requisito de generación de modelos 3D cada 10 segundos impone una gran cantidad carga de procesamiento en el ordenador, por lo que es fundamental disponer de un procesador que pueda hacerse cargo de esta tarea. Para ello se ha optado por el procesador Intel i7 de 4 núcleos, que en la fecha de adquisición era el más avanzado del mercado de informática de consumo. En dicha fecha, existían muy pocos portátiles disponibles comercialmente que incorporaran dicho procesador, y sus precios eran muy elevados. Esta decisión se reveló clave en fases posteriores del proyecto, al poderse disminuir significativamente el tiempo de procesado mediante la paralelización de varios procesos, especialmente el de detección de patrones codificados. El portátil HP DV6-2080es combinaba unas altas prestaciones y un precio moderado (999 euros).

Ilustración 61. Ordenador portátil HP DV6-2080es

Características técnicas:

Procesador: Intel Core i7-720QM (1,60 GHz-2,80 GHz / FSB 1333 MHz / 7 MB Caché)
Memoria: 4 Gb. DDR3 (Ampliable a 8 GB)
Disco Duro: 500 GB. 7200 RPM
Sistema Operativo: Windows 7 Home Premium 64 bits
Red: Gigabit Ethernet, Compatible Wifi-N y Bluetooth
Tarjeta Gráfica: nVidia Geforce GT230M (con 1 GB de memoria DDR3)
Pantalla: 15,6 HD (1366x768) Brightview con tecnología LED
Otros: 3 puertos USB, puerto USB+eSata, salida HDMI, salida VGA, ExpressCard/54, firewire, infrarrojos, webcam VGA, mando a distancia, teclado numérico.
Peso: 2,88 kg

Estas características convierten al HP DV6-2080es en uno de los portátiles más potentes en su momento, por lo que de precisar una capacidad de procesamiento superior para hacer frente al requisito de los 10 segundos en la actualización de los modelos 3D, sería necesario dar un salto a otros sistemas de mucha más capacidad y mayor coste, como estaciones de trabajo avanzadas.

5.5. SOFTWARE DE FOTOGRAMETRÍA

La elección del software de análisis fotogramétrico se detalló en el apartado 4.4, y como se vió, *PhotoModeler* está disponible en tres versiones, de las que se ha optado por la intermedia: *Automation*. La razón es que la versión básica no ofrece reconocimiento de patrones codificados, prestación indispensable para llevar a cabo el análisis requerido. Por su parte, la versión superior (*Scanner*), con un coste de casi el doble respecto a la versión *Automation*, está orientada a otros usos distintos ya que ofrece generación de texturas en los modelos 3D, característica que, por una parte no es necesaria para los requisitos de nuestro sistema, y por otra, supone una carga adicional de procesamiento, lo que haría inviable la actualización de los modelos 3D en periodos cortos de tiempo.

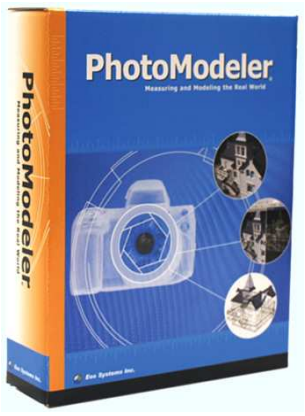

Ilustración 62. *PhotoModeler* de *EOS Systems, Inc.*

5.6. DESGLOSE DE COSTES

A continuación se muestra un desglose de los principales costes del sistema desarrollado. Empleando componentes comerciales, se pudo desarrollar un sistema de altas prestaciones y de muy bajo coste. Extremadamente bajo coste si se compara con otro tipo de sistemas profesionales similares, como puede ser el ampliamente utilizado *V-Stars* de *Geodetic Systems*, cuyo presupuesto para un sistema de similares características está en el orden de los cientos de miles de euros, lo que supone un presupuesto casi dos órdenes de magnitud por encima del empleado en este proyecto.

Tabla 2. Desglose de costes.

Producto	Coste
Portátil HP DV6-2080es	1.038,80 €
PhotoModeler 6.33 Automation	1.356,04 €
Canon Remote Capture SDK 1.1.0d	0,00 €
11 Cámaras Canon SX110 IS	2.151,82 €
11 Adaptadores Canon ACK 800	532,73€
11 mástiles, soportes, cajas estancas, etc.	298,57 €
Hubs, cables USB, alargadores, etc.	186,54 €
TOTAL	**5.564,50 €**

6. Automatización del sistema

Una parte fundamental para cumplir con las especificaciones contractuales establecidas al inicio de este proyecto, la constituye la automatización del sistema para que se permita a los algoritmos DoA trabajar de forma contínua y en tiempo real recibiendo periódicamente, como parámetros de entrada, los datos requeridos del modelo 3D generado por el sistema de fotogrametría desarrollado.

El sistema automático de fotogrametría constará básicamente de dos partes software bien diferenciadas, que operarán de forma cooperativa. Por una parte, se requiere un sistema que, de forma periódica, lleve a cabo la captura de fotografías sincronizadamente y por otra parte, estas fotografías, que serán los datos de salida de la primera parte software, supondrán los datos de entrada de la segunda, que estará compuesta por las rutinas necesarias para realizar todo el procesado fotogramétrico de

dichas fotografías necesario para obtener los modelos tridimensionales requeridos. Dado que ambas partes hacen uso de un hardware diferente (las cámaras y el procesador, respectivamente), y aprovechando la disponibilidad de varios núcleos en los procesadores actuales, deberían operar en lo posible de forma paralela si fuera necesario, realizando la captura simultáneamente al procesado fotogramétrico, que es la tarea más consumidora de tiempo de procesado.

En este capítulo se describen las tareas necesarias para implementar todo el desarrollo de software que permite la automatización del sistema de fotogrametría. La automatización del proceso de generación de modelos 3D es, junto con el desarrollo de un sistema de bajo coste que satisfaga los objetivos de precisión requeridos, la principal innovación de este proyecto frente a otros sistemas de calibración de antenas o arrays de antenas por fotogrametría, que para cumplir con sus objetivos precisan de largas campañas de calibración, medición, toma de fotografías, etc. que se prolongan en el tiempo, impidiendo la operación en tiempo real a partir de los resultados que proporcionan.

6.1. ENTORNO DE DESARROLLO DE CANON

Como se introdujo en el apartado 5.1, relativo a la elección de las cámaras fotográficas a utilizar a lo largo del proyecto, en dicha elección fue fundamental la disponibilidad del entorno de desarrollo *Canon Software Development Kit*. Este entorno de programación proporciona la capacidad de tomar el control por ordenador de todos los parámetros de las cámaras que lo soportan.

Actualmente Canon dispone de dos entornos de desarrollo separados para controlar sus cámaras fotográficas.

- *Canon Digital EOS SDK* (ED-SDK). Actualizado permanentemente, soporta los últimos modelos de la serie de cámaras réflex *Digital EOS* de Canon, con algunas excepciones.
- *Canon PowerShot Remote Capture Software Development Kit* (PS-ReC-SDK). Soporta determinados modelos de la serie de cámaras compactas *PowerShot* de Canon.

Ambos entornos de programación se diferencian en el tipo de cámaras a las que dan soporte (réflex o compactas) y en la funcionalidad que proporcionan para cada una de ellas. Dado que en el presente proyecto el requisito del bajo coste se presentó desde el principio como de importancia estratégica, inicialmente se optó por el uso del entorno PS-ReC-SDK, ya que permitía el uso de cámaras compactas, de mucho menor coste que las réflex. Entre las compactas pudo identificarse una adecuada en prestaciones para los requisitos del proyecto. No obstante, esta decisión no era crítica, ya que permitía que, si en futuros desarrollos se precisaba el empleo de cámaras réflex, se pudiera reutilizar gran parte del software de captura desarrollado, ya que se basa básicamente en el mismo entorno de desarollo de Canon, con diferencias menores.

Desgraciadamente Canon ha tomado la decisión durante el año 2010 de no continuar dando soporte al entorno de desarrollo PS-ReC-SDK, lo que si bien no presenta un gran inconveniente teniendo en cuenta que, aunque el soporte ofrecido anteriormente era deficiente, al menos el entorno de programación funcionaba aceptablemente bien, sí supone el gran problema de no poder reutilizar el software desarrollado con otras cámaras compactas nuevas diferentes a la elegida inicialmente. La importancia de esta decisión quedó patente en el momento en que la cámara adoptada para este proyecto (Canon SX110 IS) dejó de distribuirse para dar paso a un nuevo modelo, que no soportaba el interfaz de comunicación necesario para dialogar con el entorno PS-ReC-SDK. Por esta causa, en las últimas fases del proyecto, cuando, haciendo uso de la escalabilidad con la que se había programado el software, hicieron falta más cámaras a añadir al sistema, tuvo que recurrirse a la compra de restos de stock e incluso de modelos de segunda mano, ya que para entonces ni el modelo usado se seguía distribuyendo ni los nuevos modelos de cámaras compactas de Canon soportaban el entorno de programación PS-ReC-SDK.

El objetivo de este proyecto fue desarrollar un prototipo que demostrara que con un sistema de bajo coste y mediante el uso de técnicas fotogramétricas podían satisfacerse los requisitos impuestos por la necesidad de los algoritmos DoA. En este sentido, y atendiendo a las necesidades que presentaba el array de antenas que debía utilizarse para la demostración, el uso de las cámaras Canon SX110 IS y del entorno de desarrollo PS-ReC-SDK ha demostrado un funcionamiento más que suficiente para los objetivos establecidos inicialmente.

Sin embargo, otro objetivo implícito del demostrador desarrollado es el de la escalabilidad a un sistema como el descrito en el capítulo 1, en el que el sistema fotogramétrico debe obtener el modelo 3D de un array de antenas distribuido a lo largo del perímetro de una de las antenas de 15 metros de la ESA. Dicho objetivo siempre se tuvo presente y debido a su mayor magnitud podría requerir el uso de cámaras réflex de mayor resolución que las usadas. Si fuera necesario, dicho sistema podría implementarse sin más que sustituir unas cámaras por las otras y adaptar el software desarrollado para las nuevas cámaras réflex. Debido a que se trataría de un entorno de desarrollo diferente, las primitivas a utilizar podrían variar en su sintaxis, lo que requeriría de cierta labor de programación para su adaptación, si bien el flujo del programa desarrollado y toda la programación necesaria para controlar las cámaras y comunicarse con el software fotogramétrico sería esencialmente la misma, por lo que la adaptación no sería traumática y podría llevarse a cabo con relativa rapidez.

6.2. PROGRAMACIÓN BAJO PS-REC-SDK

Como se ha mencionado, el entorno de desarrollo *Canon PowerShot Remote Capture SDK* proporciona un interfaz entre ordenador y cámaras que permite controlar los distintos parámetros de las mismas mediante software. Usando dicho entorno de desarrollo es posible integrar toda la funcionalidad de las cámaras en un software propio haciendo uso de una serie de primitivas a las que se puede acceder a través de varias librerías disponibles.

Una vez registrado en programa de desarrolladores de Canon es posible descargarse de su web europea (*http://www.didp.canon-europa.com*) el entorno de programación que consiste en una serie de librerías DLL y sus archivos asociados, tales como los archivos de cabecera .h conteniendo las definiciones de las primitivas disponibles. También existe una breve guía de desarrollo en la que se detallan los parámetros de entrada/salida de las diferentes funciones.

Cabe destacar la ausencia de ningún tipo de soporte técnico por parte de Canon para desarrolladores que utilicen el entorno PS-ReC-SDK. Esto, unido a que la guía de desarrollo [3] es básicamente esquemática y únicamente ofrece información descriptiva sobre las primitivas, supone una dificultad adicional en la programación de un software que incorpore dichas librerías. En varias ocasiones se plantearon problemas irresolubles

solo atendiendo a la documentación de Canon. Por ejemplo, aunque en dicha documentación se especifique que el entorno de desarrollo que soporta la Canon SX110 IS es el PS-ReC v1.1.0e y, aunque se indique específicamente que la Canon SX110 IS no soporta el obsoleto entorno CD-SDK v7.3, determinadas bibliotecas incluídas en éste resultaron ser imprescindibles para la correcta compilación de los algoritmos escritos usando dicho entorno.

6.3. CONSIDERACIONES DE DISEÑO DE CAPTURA DE IMÁGENES

El principal objetivo del software desarrollado haciendo uso del entorno de programación PS-ReC-SDK es el de automatizar la captura de imágenes del array de antenas utilizando múltiples cámaras. El funcionamiento final del software debería ser muy simple: Cada cierto tiempo (en principio modificable como parámetro de entrada, más tarde fijo en función de los requisitos de los algoritmos DoA y del tiempo consumido por el procesado fotogramétrico), el procesador debería enviar la orden a las cámaras conectadas para que todas de forma simultánea tomaran una fotografía y la enviaran al ordenador para su posterior procesado.

El procesado fotogramétrico posterior a la captura de las fotografías depende de una gran variedad de factores. Los relacionados con las características de las fotografías se refieren a la resolución de la imagen y la compresión utilizada. Dichos parámetros deberán optimizarse a posteriori para minimizar el tiempo de procesado en función de la resolución alcanzada y la resolución requerida para el modelo 3D, y por lo tanto deberían también ser modificables como parámetros de entrada. Así mismo, la correcta identificación de patrones codificados en las fotografías depende de una variedad de aspectos, de los cuales los relacionados con la configuración de la cámara serían básicamente el tiempo de exposición o velocidad de obturación y la apertura de diafragma. Por lo tanto estos parámetros también deberían programarse como parámetros de entrada del software de captura. Por simplicidad, aprovechando la utilidad de los modos semiautomáticos que disponen las cámaras digitales, se ha programado la captura en modo automático P, o de compensación de la exposición. En este modo la cámara elige la velocidad de obturación y la apertura de diafragma para satisfacer la iluminación requerida mediante puntos de exposición desde -2 hasta +2, que serían el parámetro de entrada. Para esta aplicación carece de importancia qué

valores de tiempo de exposición y de apertura se empleen, ya que las cámaras se encuentran fijas y los parámetros estáticos, por lo que el modo de compensación de la exposición resulta adecuado a los requisitos impuestos por el procesado fotogramétrico, que únicamente exige que los patrones codificados se distingan bien contrastados y enfocados. De la misma forma, el enfoque del objetivo se ha establecido en modo automático, ya que los algoritmos de autoenfoque de las cámaras digitales tienen una eficiencia más que suficiente como para poder identificar las antenas como el objeto a enfocar. Además, a no ser que se usen distancias muy pequeñas, el efecto del enfoque sobre la calibración de la cámara no es significativo porque se realiza reordenando las lentes, sin modificar la distancia principal, siempre que la longitud focal sea fija.

Ilustración 63. Comparación entre diferentes valores de exposición EV (*Exposure Value*).

6.4. FLUJO DE EJECUCIÓN DEL SOFTWARE DE CAPTURA

En la Ilustración 64 se muestra el diagrama de flujo básico del software desarrollado para la captura de imágenes. En el diagrama se detallan las funciones imprescindibles desde que se inicia el software hasta que se termina, pasando por los pasos necesarios para llevar a cabo la conexión con una cámara y la captura de una imagen. La programación necesaria para dar soporte a múltiples cámaras de forma simultánea y atendiendo a requisitos de tiempo real se aborda en sucesivos apartados, si bien se utilizan los conceptos explicados en éste.

A continuación se describe brevemente cada una de las funciones necesarias para llevar a cabo una captura mediante el entorno de programación PS-ReC-SDK y cuyo flujo se puede observar en la Ilustración 64.

- PR_StartSDK(). Esta llamada es imprescindible para iniciar el entorno PS-ReC-SDK. Tras llamar a esta función se requiere un proceso de inicialización para que PS-ReC-SDK quede operativo, lo que incluye la reserva de la memoria necesaria para las siguientes operaciones. Syntaxis: prCAPI PR_StartSDK(prVoid). La función devuelve el tipo de error Error ID.

Error ID	Descripción
prNOT_SUPPORTED	Sistema operativo no soportado por el entorno PS-ReC-SDK.
prMEM_ALLOC_FAILED	Error por falta de memoria.
prINTERNAL_ERROR	Error interno genérico.
Other	Error accesible mediante llamada a la función GetLastError().

- PR_GetDeviceList(). Al invocar esta función se recibe información relativa a los dispositivos conectados al ordenador. La información de cada cámara se almacena en una estructura de tipo prDeviceList. Sintaxis: prCAPI PR_GetDeviceList(prUInt32* pBufferSize, prDeviceList* pDeviceList). La función devuelve el tipo de error Error ID, así como los parámetros pasados por referencia.

Error ID	Descripción
prINVALID_FN_CALL	No se ha llamado a la función PR_StartSDK().
prINVALID_PARAMETER	El parámetro especificado no es válido.
prMEM_ALLOC_FAILED	Error de falta de memoria.
prINSUFFICIENT_BUFFER	El tamaño de búfer especificado en el parámetro es de menor tamaño que el dato, o el puntero al búfer es NULL.
prINTERNAL_ERROR	Error interno genérico.
Other	Error accesible mediante llamada a la función GetLastError().

Parámetro	Descripción
pBufferSize	Este parámetro es de entrada-salida y especifica el tamaño del búfer del próximo parámetro. Si la función se ejecuta con éxito el tamaño del búfer se establece según el dato almacenado en este parámetro.
pDeviceList	Este parámetro es de salida y especifica el puntero al que apunta el búfer. La información relativa a la enumeración de cámaras se almacena en la estructura de tipo prDeviceList.

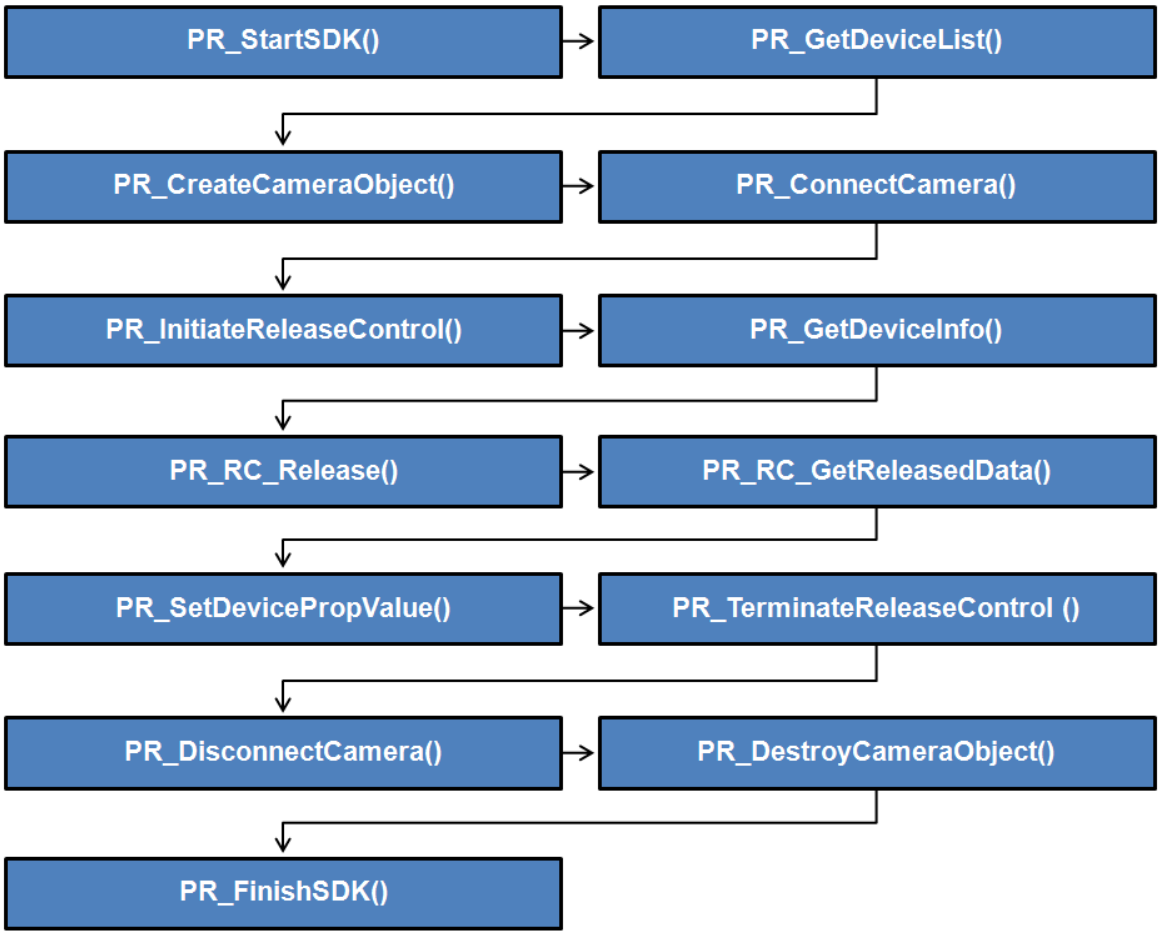

Ilustración 64. Diagrama de flujo del software de captura.

- PR_CreateCameraObject(). Crea un manejador de cámara a partir de la información obtenida en la llamada PR_GetDeviceList(). Después de llamar a esta función la cámara queda identificada con su manejador, que se usará cuando se invoquen funciones que requieran identificar la cámara, como PR_ConnectCamera() o PR_RC_Release(). Sintaxis: prCAPI PR_CreateCameraObject(prDeviceInfoTable* pDeviceInfo, prHandle* pCameraHandle). La función devuelve el tipo de error Error ID, así como los parámetros pasados por referencia.

Error ID	Descripción
prINVALID_FN_CALL	No se ha llamado a la función PR_StartSDK().
prINVALID_PARAMETER	El parámetro especificado no es válido.
prMEM_ALLOC_FAILED	Error de falta de memoria.
Other	Error accesible mediante llamada a la función GetLastError().

Parámetro	Descripción
pDeviceInfo	Este parámetro es de entrada y especifica la información del dispositivo.
pCameraHandle	Este parámetro es de salida y es un manejador correspondiente a la cámara cuya información está almacenada en el parámetro pDeviceInfo.

- PR_ConnectCamera(). Esta función conecta la cámara al ordenador. Tras llamarla se establece la comunicación con la cámara permitiendo ejecutar funciones tales como PR_RC_Release() o PR_SetDevicePropValue(). Sintaxis: prCAPI PR_ConnectCamera(prHandle CameraHandle). La función devuelve el tipo de error Error ID, así como el parámetro pasado por referencia.

Error ID	Descripción
prINVALID_FN_CALL	No se ha llamado a la función CreateCameraObject().
prINVALID_HANDLE	El manejador de cámara especificado por el parámetro no es válido.
prMEM_ALLOC_FAILED	Error de falta de memoria.
Other	Error accesible mediante llamada a la función GetLastError().

Parámetro	Descripción
CameraHandle	Este parámetro es de entrada y especifica el manejador de cámara correspondiente a la cámara que debe conectarse.

- PR_GetDeviceInfo(). Esta función se encarga de recibir información correspondiente a la cámara conectada. Sintaxis: prCAPI PR_GetDeviceInfo(prHandle CameraHandle, prUInt32* pBufferSize, prVoid* pDeviceInfo). La función devuelve el tipo de error Error ID, así como los parámetros pasados por referencia.

Error ID	Descripción
prINVALID_FN_CALL	No se ha llamado a la función CreateCameraObject().
prINVALID_HANDLE	El manejador de cámara especificado por el parámetro no es válido.
prINVALID_PARAMETER	El parámetro especificado no es válido.
prMEM_ALLOC_FAILED	Error de falta de memoria.
prINSUFFICIENT_BUFFER	El tamaño de búfer especificado por el parámetro es más pequeño que el tamaño del dato o el puntero del búfer es NULL.
Other	Error accesible mediante llamada a la función GetLastError().

Parámetro	Descripción
CameraHandle	Este parámetro es de entrada y especifica el manejador de cámara correspondiente a la cámara conectada.
pBufferSize	Este parámetro es de entrada-salida y especifica el tamaño del búfer del próximo parámetro. Si la función se ejecuta con éxito el tamaño del búfer se establece según el dato almacenado en este parámetro.
pDeviceInfo	Este parámetro es de salida y especifica el puntero que apunta al búfer. El tamaño de dato se almacena en el tipo de dato DeviceInfo (de longitud variable).

- PR_InitiateReleaseControl(). Esta función es necesaria para comenzar el modo de captura remota de imágenes. Sintaxis: prCAPI PR_InitiateReleaseControl(prHandle CameraHandle). La función devuelve el tipo de error Error ID, así como los parámetros pasados por referencia.

Error ID	Descripción
prINVALID_FN_CALL	No se ha llamado a la función ConnectCamera().
prINVALID_PARAMETER	El parámetro especificado no es válido.
prMEM_ALLOC_FAILED	Error de falta de memoria.
Other	Error accesible mediante llamada a la función GetLastError().

Parámetro	Descripción
CameraHandle	Este parámetro es de entrada y especifica el manejador de cámara correspondiente a la cámara conectada.

- PR_RC_Release(). La función captura una imagen enviando el comando necesario a la cámara. Sintaxis: prCAPI PR_RC_Release(prHandle CameraHandle). La función devuelve el tipo de error Error ID, así como los parámetros pasados por referencia.

Error ID	Descripción
prINVALID_FN_CALL	El dispositivo no está en modo captura remota de imágenes.
prINVALID_HANDLE	El manejador de cámara especificado por el parámetro no es válido.
prMEM_ALLOC_FAILED	Error de falta de memoria.
Other	Error accesible mediante llamada a la función GetLastError().

Parámetro	Descripción
CameraHandle	Este parámetro es de entrada y especifica el manejador de cámara correspondiente a la cámara conectada.

- PR_RC_GetReleasedData(). Esta función es necesario invocarla tras PR_RC_Release() para recuperar toda la información relativa a la imagen capturada por la cámara. Una vez ejecutada esta función PS-ReC-SDK almacena los datos de la imagen en el búfer reservado cada vez que el parámetro TransSize se recibe. Cuando el cliente recupera estos datos el entorno libera el búfer y repite este proceso hasta que todos los datos son recuperados. El cliente puede entonces salvar la imagen en un archivo. Sintaxis: prCAPI PR_RC_GetReleasedData(prHandle CameraHandle, prObjectHandle O bjectHandle, prptpEventCode EventCode, prUInt32 TransSize, prContext Conte xt, prGetFileDataCB* pGetFileDataCB). La función devuelve el tipo de error Error ID, así como los parámetros pasados por referencia.

Error ID	Descripción
prINVALID_FN_CALL	El dispositivo no está en modo captura remota de imágenes.
prINVALID_HANDLE	El manejador de cámara especificado por el parámetro no es válido.
prMEM_ALLOC_FAILED	Error de falta de memoria.
prINVALID_PARAMETER	El parámetro especificado no es válido.
Other	Error accesible mediante llamada a la función GetLastError().

Parámetro	Descripción
CameraHandle	Este parámetro es de entrada y especifica el manejador de cámara correspondiente a la cámara conectada.
ObjectHandle	Este parámetro es de entrada y especifica el manejador correspondiente a los datos de la imagen a ser recuperados.
EventCode	Este parámetro es de entrada y especifica el código de evento indicando el tipo de imagen (imagen completa o imagen en miniatura) que se desea recuperar: prPTP_FULL_VIEW_RELEASED para la imagen completa y prPTP_THUMBNAIL_RELEASED para la imagen en miniatura.
TransSize	Este parámetro es de entrada y especifica el tamaño de datos de una transferencia cuando los datos de la imagen son divididos y transferidos en múltiples veces.
Context	Este parámetro es de entrada y especifica los datos a pasar al parámetro en la función registrada.
pGetFileDataCB	Este parámetro es de entrada y especifica el puntero a la función para registrar.

- PR_SetDevicePropValue(). Modifica la actual configuración de cada propiedad de un dispositivo a un determinado valor que se pasa como argumento. Sintaxis: prCAPI PR_SetDevicePropValue(prHandle CameraHandle, prptpDevicePropCo

de DevicePropCode, prUInt32 DataSize, prVoid* pDeviceProperty). La función devuelve el tipo de error Error ID, así como los parámetros pasados por referencia. En la última tabla puede observarse qué propiedades de la cámara pueden modificarse con esta función. Esta lista es genérica y puede no aplicarse para todas las cámaras, por lo que para saber qué propiedades son aplicables a una cámara concreta es necesario invocar a la función PR_GetDevicePropDesc().

Error ID	Descripción
prINVALID_FN_CALL	No se ha llamado a la función CreateCameraObject().
prINVALID_HANDLE	El manejador de cámara especificado por el parámetro no es válido.
prINVALID_PARAMETER	El parámetro especificado no es válido.
prMEM_ALLOC_FAILED	Error de falta de memoria.
Other	Error accesible mediante llamada a la función GetLastError().

Parámetro	Descripción
CameraHandle	Este parámetro es de entrada y especifica el manejador de cámara correspondiente a la cámara conectada.
DevicePropCode	Este parámetro es de entrada y especifica el código relativo a la propiedad del dispositivo a modificar.
DataSize	Este parámetro es de entrada y especifica el tamaño de los datos del próximo parámetro.
pDeviceProperty	Este parámetro es de entrada y especifica el puntero indicando la propiedad del dispositivo a ser modificada.

pDeviceProperty	pDeviceProperty
prPTP_DEV_PROP_BUZZER	prPTP_DEV_PROP_BATTERY_KIND
prPTP_DEV_PROP_BATTERY_STATUS	prPTP_DEV_PROP_COMP_QUALITY
prPTP_DEV_PROP_FULLVIEW_FILE_FORMAT	prPTP_DEV_PROP_IMAGE_SIZE
prPTP_DEV_PROP_SELFTIMER	prPTP_DEV_PROP_STROBE_SETTING
prPTP_DEV_PROP_BEEP	prPTP_DEV_PROP_EXPOSURE_MODE
prPTP_DEV_PROP_IMAGE_MODE	prPTP_DEV_PROP_DRIVE_MODE
prPTP_DEV_PROP_EZOOM	prPTP_DEV_PROP_ML_WEI_MODE
prPTP_DEV_PROP_AF_DISTANCE	prPTP_DEV_PROP_FOCUS_POINT_SETTING
prPTP_DEV_PROP_WB_SETTING	prPTP_DEV_PROP_SLOW_SHUTTER_SETTING
prPTP_DEV_PROP_AF_MODE	prPTP_DEV_PROP_IMAGE_STABILIZATION
prPTP_DEV_PROP_CONTRAST	prPTP_DEV_PROP_COLOR_GAIN
prPTP_DEV_PROP_SHARPNESS	prPTP_DEV_PROP_SENSITIVITY
prPTP_DEV_PROP_PARAMETER_SET	prPTP_DEV_PROP_ISO
prPTP_DEV_PROP_AV	prPTP_DEV_PROP_TV
prPTP_DEV_PROP_EXPOSURE_COMP	prPTP_DEV_PROP_FLASH_COMP
prPTP_DEV_PROP_AEB_EXPOSURE_COMP	prPTP_DEV_PROP_AV_OPEN

prPTP_DEV_PROP_AV_MAX	prPTP_DEV_PROP_FOCAL_LENGTH
prPTP_DEV_PROP_FOCAL_LENGTH_TELE	prPTP_DEV_PROP_FOCAL_LENGTH_WIDE
prPTP_DEV_PROP_FOCAL_LENGTH_DENOMI	prPTP_DEV_PROP_CAPTURE_TRANSFER_MODE
prPTP_DEV_PROP_ZOOM_POS	prPTP_DEV_PROP_SUPPORTED_SIZE
prPTP_DEV_PROP_SUPPORTED_THUMB_SIZE	prPTP_DEV_PROP_FIRMWARE_VERSION
prPTP_DEV_PROP_CAMERA_MODEL_NAME	prPTP_DEV_PROP_OWNER_NAME
prPTP_DEV_PROP_CAMERA_TIME	prPTP_DEV_PROP_CAMERA_OUTPUT
prPTP_DEV_PROP_DISP_AV	prPTP_DEV_PROP_AV_OPEN_APEX
prPTP_DEV_PROP_EZOOM_SIZE	prPTP_DEV_PROP_ML_SPOT_POS
prPTP_DEV_PROP_DISP_AV_MAX	prPTP_DEV_PROP_AV_MAX_APEX
prPTP_DEV_PROP_EZOOM_START_POS	prPTP_DEV_PROP_FOCAL_LENGTH_OF_TELE
prPTP_DEV_PROP_EZOOM_SIZE_OF_TELE	prPTP_DEV_PROP_PHOTO_EFFECT
prPTP_DEV_PROP_AF_LIGHT	prPTP_DEV_PROP_FLASH_QUANTITY
prPTP_DEV_PROP_ROTATION_ANGLE	prPTP_DEV_PROP_ROTATION_SENSE
prPTP_DEV_PROP_IMAGE_FILE_SIZE	prPTP_DEV_PROP_CAMERA_MODEL_ID

- PR_TerminateReleaseControl(). La función termina el modo de captura remota de imágenes si se empleó la función PR_InitiateReleaseControl() para iniciarlo. Sintaxis: ceCAPI PR_TerminateReleaseControl(prHandle CameraHandle). La función devuelve el tipo de error Error ID, así como los parámetros pasados por referencia.

Error ID	Descripción
prINVALID_FN_CALL	El dispositivo no está en modo captura remota de imágenes.
prINVALID_PARAMETER	El parámetro especificado no es válido.
prMEM_ALLOC_FAILED	Error de falta de memoria.
Other	Error accesible mediante llamada a la función GetLastError().

Parámetro	Descripción
CameraHandle	Este parámetro es de entrada y especifica el manejador de cámara correspondiente a la cámara conectada.

- PR_DisconnectCamera(). Desconecta una cámara que fue conectada empleando la función PR_ConnectCamera(). Se debe usar esta función cuando la comunicación con una cámara deja de ser necesaria, de lo contrario pueden darse errores de memoria. Tras usar esta función el cliente no puede seguir comunicándose con la cámara, para lo cual debería de nuevo emplear PR_ConnectCamera(), incluso empleando el mismo manejador, siempre que no haya sido eliminado previamente. Sintaxis:

prCAPI PR_DisconnectCamera(prHandle CameraHandle). La función devuelve el tipo de error Error ID, así como el parámetro pasado por referencia.

Error ID	Descripción
prINVALID_FN_CALL	No se ha llamado a la función CreateCameraObject().
prINVALID_HANDLE	El manejador de cámara especificado por el parámetro no es válido.
Other	Error accesible mediante llamada a la función GetLastError().

Parámetro	Descripción
CameraHandle	Este parámetro es de entrada y especifica el manejador de cámara correspondiente a la cámara a desconectar.

- PR_DestroyCameraObject(). Elimina el manejador de cámara que se creó al llamar a la función PR_CreateCameraObject(). Esta función debe utilizarse cuando un manejador deje de ser necesario, ya que de lo contrario pueden darse problemas de memoria. Sintaxis: prCAPI PR_DestroyCameraObject(prHandle CameraHandle). La función devuelve el tipo de error Error ID, así como el parámetro pasado por referencia.

Error ID	Descripción
prINVALID_FN_CALL	No se ha llamado a la función PR_StartSDK().
prINVALID_HANDLE	El manejador de cámara especificado por el parámetro no es válido.

Parámetro	Descripción
CameraHandle	Este parámetro es de entrada y especifica el manejador a ser eliminado.

- PR_FinishSDK(). Esta llamada es necesaria para terminar el entorno PS-ReC-SDK. Tras llamar a esta función se lleva a cabo el proceso de terminación, que incluye la liberación de la memoria reservada al llamar a la función PR_StartSDK(). Si no se invoca esta función pueden darse errores de memoria. Sintaxis: prCAPI PR_FinishSDK(prVoid). La función devuelve el tipo de error Error ID:

Error ID	Description
prINVALID_FN_CALL	No se llamó a la función PR_StartSDK() has not been called.
Other	Error accesible mediante llamada a la función GetLastError().

6.5. IMPLEMENTACIÓN DE LA CAPTURA DE IMÁGENES

En el anterior apartado se ha descrito el flujo de funciones necesarias para realizar una única captura con una única cámara. En este proyecto se pretende llevar a cabo capturas sucesivas de forma periódica y además de forma simultánea usando múltiples cámaras conectadas al mismo ordenador. Para llevar a cabo dicha funcionalidad se ha desarrollado un software gráfico de ventanas en el entorno *Microsoft Visual C++ 6.0* con el objetivo de hacerlo intuitivo y fácilmente utilizable. El aspecto de la ventana principal del software de captura multicámara una vez se ejecuta la aplicación se puede observar en la Ilustración 65.

Ilustración 65. Ventana principal del software de captura al iniciarse la aplicación.

El software descrito se puede dividir conceptualmente en dos partes diferenciadas: la encargada del proceso de conexión de todas las cámaras con el ordenador y la encargada de la captura de las fotografías y su transferencia a ficheros. La primera parte se detalla

en el apartado 6.6 y la segunda en el apartado 6.7. La conexión cámaras-PC implica todas las acciones que tienen como resultado el dejar la aplicación en espera habiendo establecido la comunicación con todas las cámaras conectadas al bus USB, tras lo cual el aspecto con el que queda la aplicación es el de la Ilustración 66. En este contexto se ofrece una serie de parámetros a configurar tras lo cual el usuario ejecuta o bien la captura de una sola imagen multicámara o bienla captura de las imágenes de forma periódica. En cualquiera de los dos casos, las acciones que se llevan a cabo son básicamente las mismas, temporizadas o no, cuyo resultado es el de enviar a las cámaras conectadas la orden de realizar captura, recuperar dichas imágenes y almacenarlas en distintos archivos.

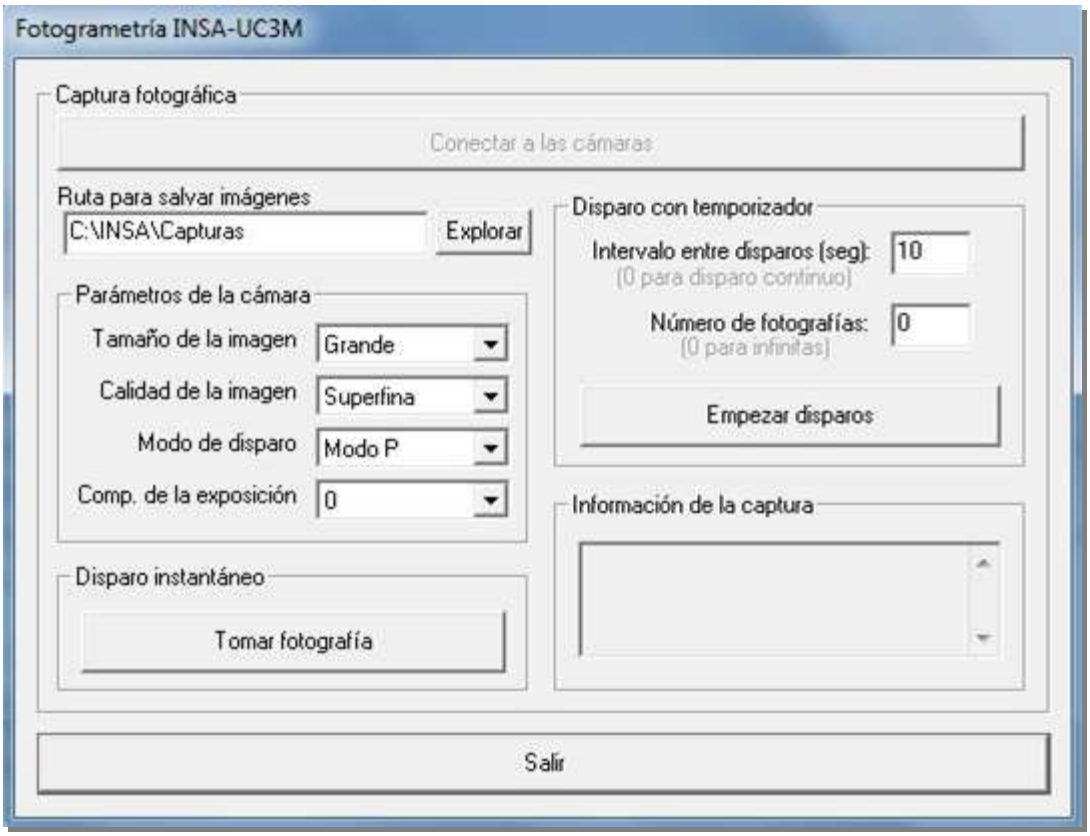

Ilustración 66. Ventana principal del software de captura tras ejecutarse la conexión cámaras-PC.

6.6. PROGRAMACIÓN DE LA CONEXIÓN CÁMARAS-PC

Esta parte del software de captura multicámara se ha programado de forma que se ejecute tras abrir la aplicación y pulsar el botón "Conectar las cámaras", que se puede observar en la Ilustración 65. La secuencia de acciones que se llevan a cabo entonces se basa en las primeras mostradas en el diagrama de flujo de la Ilustración 64. Inicialmente, al abrir la aplicación se invoca automáticamente a la función

PR_StartSDK(), que inicia el entorno PS-ReC-SDK, para atender a las siguientes llamadas a funciones. Tras esto, se inicializa el entorno gráfico y se definen las variables necesarias, quedando la aplicación con todos los botones deshabilitados excepto el de "Conectar las cámaras" y el de "Salir", a la espera de que el usuario pulse uno de los dos.

Al hacer click sobre "Conectar las cámaras", se invoca a una subrutina cuya primera tarea es la de reservar memoria para una variable de tipo prDeviceList* y de un tamaño de buffer necesario para llenarla con 16 cámaras. Se ha establecido este tamaño de buffer teniendo en cuenta las necesidades futuras y dejando cierto margen de seguridad, sin embargo el número de cámaras que se pueden conectar a este software solo viene limitado por el protocolo USB 2.0, que permite conectar a su bus hasta un máximo de 127 dispositivos de forma simultánea. Por lo tanto, si se necesitara ampliar el número de cámaras no habría más que incrementar este valor.

La variable de tipo prDeviceList* que se reserva al inicio de esta subrutina, y cuyo objetivo es almacenar la información de las cámaras conectadas que se ha de recibir tras llamar a la función PR_GetDeviceList(), tiene la siguiente estructura:

```
typedef struct{
            prUInt32                NumList;
            prDeviceInfoTable       DeviceInfo[prANY];
      }prDeviceList;
```

Miembro	Descripción
NumList	Número identificativo de la información de cada cámara.
DeviceInfo	Array conteniendo la información de las cámaras.

A su vez los elementos que contiene el array DeviceInfo son de tipo prDeviceInfoTable cuya estructura es la siguiente:

```
typedef struct{
      prWChar           DeviceInternalName[512];
      prWChar           ModelName[32];
      prUInt16          Generation;
      prUInt32          Reserved1;
      prUInt32          ModelID;
      prUInt16          Reserved2;
      prPorttype        PortType;
      prUInt32          Reserved3;
}prDeviceInfoTable;
```

Miembro	Descripción
DeviceInternalName	Nombre interno del dispositivo.
ModelName	Modelo de cámara.
Generation	Número de generación de la cámara (solo son significativos los 8 bits superiores).
Reserved1	Reservado.
ModelID	Identificador del modelo de la cámara.
Reserved2	Reservado.
PortType	Indica el tipo de puerto al cual está conectado la cámara. prPORTTYPE_WIA para un puerto WIA y prPORTTYPE_STI para uno STI.
Reserved3	Reservado.

Tras llamar a la función PR_GetDeviceList(), toda la información descrita anteriormente queda almacenada, para cada una de las cámaras conectadas al bus USB, en la variable tipo prDeviceList*, después de lo cual ya es posible acceder a la información necesaria para llevar a cabo la invocación a las funciones PR_CreateCameraObject(), PR_ConnectCamera(), PR_InitiateReleaseControl() y PR_GetDeviceInfo() para cada una de las cámaras, lo que se realiza mediante un bucle *for* que va recorriendo todas las cámaras disponibles. Por último, se habilita el resto de botones y se deja la aplicación en espera.

Se lleven a cabo capturas o no, al pulsar sobre el botón "Salir" se lleva a cabo la terminación del modo de captura, la desconexión de las cámaras y destrucción de sus identificadores y por último la finalización del entorno con las funciones PR_TerminateReleaseControl(), PR_DisconnectCamera(), PR_DestroyCameraObject(), PR_FinishSDK(), respectivamente.

6.7. PROGRAMACIÓN DE LA CAPTURA MULTICÁMARA

Una vez la parte de conexión cámaras-PC ha dejado la aplicación en espera con todos los botones habilitados, el usuario tiene varias opciones, como se puede ver en la Ilustración 66. La única diferencia entre el botón "Tomar fotografía" y el botón "Empezar disparos" estriba en que el primero realiza una única fotografía multicámara y el segundo lleva a cabo la captura periódica implementada mediante un bucle *for* que se repite según el número de iteraciones introducidas en la casilla "Número de fotografías" y según el intervalo de tiempo introducido en la casilla "Intervalo entre disparos". Esto último se consigue evaluando la hora con precisión de milisegundos (mediante la

función time(NULL)) al inicio de cada iteración y comparándola con la hora al finalizar las tareas de la subrutina. Este valor se compara con el establecido por el usuario y se produce un retardo (con la función Sleep(retardo)) igual a la diferencia entre ambos valores. Si bien esta estrategia básica de programación en tiempo real resulta suficiente para asegurar la periodicidad de las capturas, el sistema podría robustecerse con algoritmos más avanzados de tiempo real usando semáforos y niveles de prioridad.

Ya se realice la captura multicámara de forma única en el tiempo o periódicamente, a excepción del bucle comentado anteriormente, el flujo de estas subrutinas es idéntico y comienza estableciendo los parámetros elegidos por el usuario de la aplicación en la ventana de configuración "Parámetros de la cámara", cuyas opciones se pueden ver en la Ilustración 67. Para ello se utiliza un bucle *for* que va recorriendo cada una de las cámaras y estableciendo los distintos parámetros mediante la función PR_SetDevicePropValue().

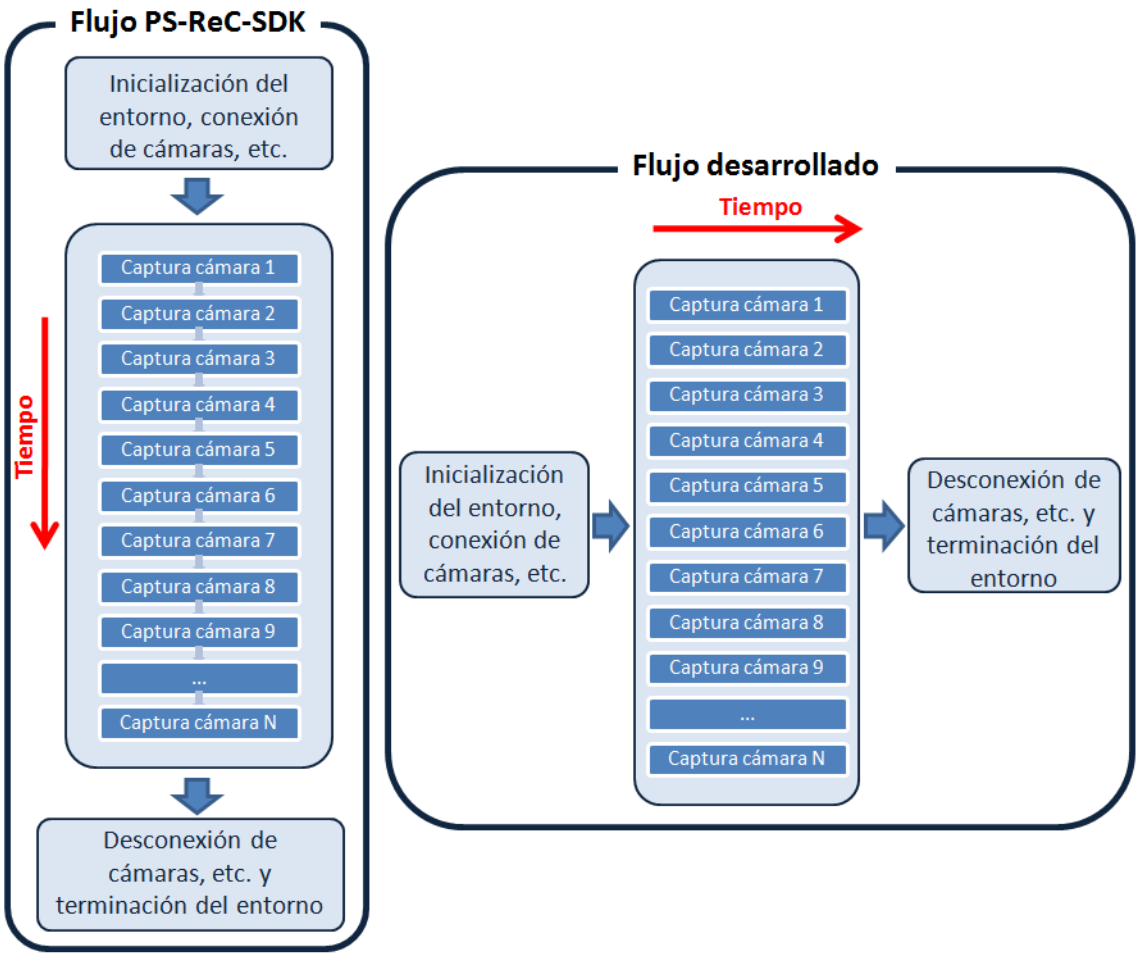

Ilustración 67. Flujo de programación en PS-ReC-SDK y flujo desarrollado para la captura multicámara.

Tras la configuración de las cámaras, el siguiente paso es el de la llamada a la función más importante: PR_RC_Release(), que es la encargada de enviar a las cámaras la orden de realizar la captura de imágenes. En este punto surgió el problema de que dicha captura debería idealmente ser simultánea en el tiempo sin importar el número de cámaras conectadas al bus USB. En el entorno PS-ReC-SDK no se contempla esta funcionalidad, por lo que no existen primitivas que la implementen. Esto obligó a investigar la forma de llevar a cabo múltiples capturas en paralelo bajo un entorno cuyo flujo natural es en serie, lo que produjo no pocas dificultades. Se concluyó que la forma óptima de resolver el problema era mediante técnicas de programación multihilo (Ilustración 67). Los hilos de ejecución o subprocesos permiten a las aplicaciones llevar a cabo varias tareas a la vez de forma concurrente. Normalmente la programación multihilo conlleva una serie de dificultades relacionadas con el hecho de que los hilos comparten recursos físicos. Sin embargo, en esta aplicación la única tarea de cada hilo es ejecutar de forma concurrente la función PR_RC_Release(). La implementación del disparo de forma concurrente se ha llevado a cabo mediante la función CreateThread() de la librería Windows.h, cuya sintaxis se muestra a continuación:

```
HANDLE WINAPI CreateThread(
        LPSECURITY_ATTRIBUTES  lpThreadAttributes,
        SIZE_T                 dwStackSize,
        LPTHREAD_START_ROUTINE lpStartAddress,
        LPVOID                 lpParameter,
        DWORD                  dwCreationFlags,
        LPDWORD                lpThreadId
);
```

Miembro	Descripción
lpThreadAttributes	Parámetro opcional de entrada que determina si el manejador puede ser heredado por procesos hijos. En caso negativo, se usa NULL.
dwStackSize	Parámetro de entrada cuyo contenido es el tamaño inicial de la pila en bytes. Para el tamaño por defecto se usa 0.
lpStartAddress	Parámetro de entrada cuyo contenido es un puntero a la función a ser ejecutada por el hilo. El puntero representa la dirección de comienzo del hilo.
lpParameter	Parámetro opcional de entrada que simboliza un puntero a una variable a pasar al hilo.
dwCreationFlags	Parámetro de entrada para especificar banderas o flags que controlan la creación del hilo. Se usa 0 para que se ejecute inmediatamente.
lpThreadId	Parámetro opcional de salida que simboliza a un puntero a variable que recibe el identificador del hilo. Para no recibir el identificador se usa NULL.

Como se puede ver en la descripción del miembro lpStartAddress, al crear cada hilo es necesario pasarle un puntero de la función a ejecutar. Por ello, se crean tantos hilos como cámaras estén conectadas al bus USB (cuyo número se puede obtener consultando la longitud del array DeviceInfo de la estructura prDeviceList, tras realizar la llamada a PR_GetDeviceList()), con las siguientes instrucciones para cada uno de ellos, en este caso para el hilo 0:

```
params->hilocamara[0] = m_hCameraARRAY[0];

HANDLE hHilo0 = CreateThread(NULL, 0, CapturarCamara0,
(LPVOID)(params), 0, NULL);

WaitForSingleObject(hHilo0, INFINITE);

CloseHandle(hHilo0);
```

La variable params->hilocamara[X] es una estructura en la que se almacena la información de cada cámara (que se encuentra en la variable m_hCameraARRAY[X], del tipo DeviceInfo) para pasarla a la función CapturarCamaraX(), a la que se llama desde la creación de cada hilo. Dicha función se define de la siguiente manera:

```
DWORD WINAPI CapturarCamara0(LPVOID pvoid)
{
   struct ThreadParams *params = (struct ThreadParams *)pvoid;

   PR_RC_Release( params->hilocamara[0] );

   return 0;
}
```

Como se puede comprobar, la única tarea de la función CapturarCamaraX es lanzar la orden para capturar imagen a la cámara invocando a PR_RC_Release() y especificando en su argumento de qué cámara se trata. Una vez lanzados todos los CapturarCamaraX, el programa se queda esperando que se ejecuten cada uno de ellos con la orden WaitForSingleObject() y una vez terminan se eliminan con CloseHandle() pasando el manejador de cada hilo como valor.

Cabe resaltar la escalabilidad del software de captura gracias a la programación multihilo, ya que la única limitación en cuanto a número de cámaras conectadas la impone el bus USB 2.0 con 127 dispositivos simultáneos. Dado que cada cámara se

maneja con un hilo de ejecución distinto, no se producen retardos significativos. De nuevo, como se especificó en el apartado 6.6 en relación al tamaño de buffer necesario en la variable prDeviceList*, la aplicación se ha programado de forma que dé soporte a 16 cámaras, ya que se crean hasta 16 hilos en cada ejecución. Si se necesitara ampliar la aplicación para dar soporte a un número mayor de cámaras, no habría más que repetir tantas veces como cámaras adicionales se necesiten el flujo descrito en este apartado (CreateThread(), WaitForSingleObject() y CloseHandle()) así como la definición de nuevas funciones CapturarCamaraX.

Una vez han finalizados todos los hilos, las imágenes se recuperan con un bucle *for* dentro del cual se establece la ruta introducida en la ventana "Ruta para salvar imágenes", creando la ruta si no existiera, e invocando a la función PR_RC_GetReleasedData() para recuperar la imagen capturada por cada cámara.

6.8. PROGRAMACIÓN DDE EN PHOTOMODELER

En la introducción de este capítulo se explicó que el sistema automático de fotogrametría consta básicamente de dos partes software bien diferenciadas, que operan de forma cooperativa. En los apartados anteriores se ha descrito la primera parte relativa a la captura de imágenes de forma sincronizada, múltiple y en tiempo real. La segunda parte de este software está compuesta por las rutinas necesarias para realizar todo el procesado fotogramétrico de dichas fotografías necesario para obtener los modelos tridimensionales requeridos.

Como ya se concluyó, la forma más eficiente de llevar a cabo el procesado fotogramétrico se identificó como el software *PhotoModeler Automation*. Una de las razones que llevaron a elegir este software es su capacidad de comunicación con otras aplicaciones mediante el protocolo de *Microsoft* DDE. *Dynamic Data Exchange* (DDE) es una tecnología de comunicación que permite dialogar entre sí a varias aplicaciones bajo el sistema operativo *Microsoft Windows*. En particular DDE ofrece la capacidad a una aplicación de abrir una sesión con otra, le envíe comandos y se puedan recibir las respuestas a dichos comandos. Un uso común de DDE se aplica para desarrollar software propio con la capacidad de controlar software ya disponible, por ejemplo, una aplicación escrita en C que usa el protocolo DDE para abrir un hoja de cálculo

Microsoft Excel y llenarla de datos por medio de una conversación con *Excel* y el envío de comandos DDE.

La comunicación o conversación DDE la establecen dos aplicaciones: la que inicia la comunicación es el cliente y la que responde a las peticiones del cliente es el servidor, si bien una aplicación puede mantener varias conversaciones simultáneas actuando en unas como cliente y en otras como servidor. *PhotoModeler* puede ser controlado y ser provisto de datos de otras aplicaciones mediante una comunicación DDE. En este caso *PhotoModeler* actúa como un servidor DDE que acepta comandos y responde ante ellos, para lo que es necesario disponer de un cliente DDE que controle el flujo, que en este caso será una aplicación programada en C++, continuación de la encargada de llevar a cabo la captura multicámara. En la Ilustración 68 se muestra un diagrama con la relación entre ambas aplicaciones.

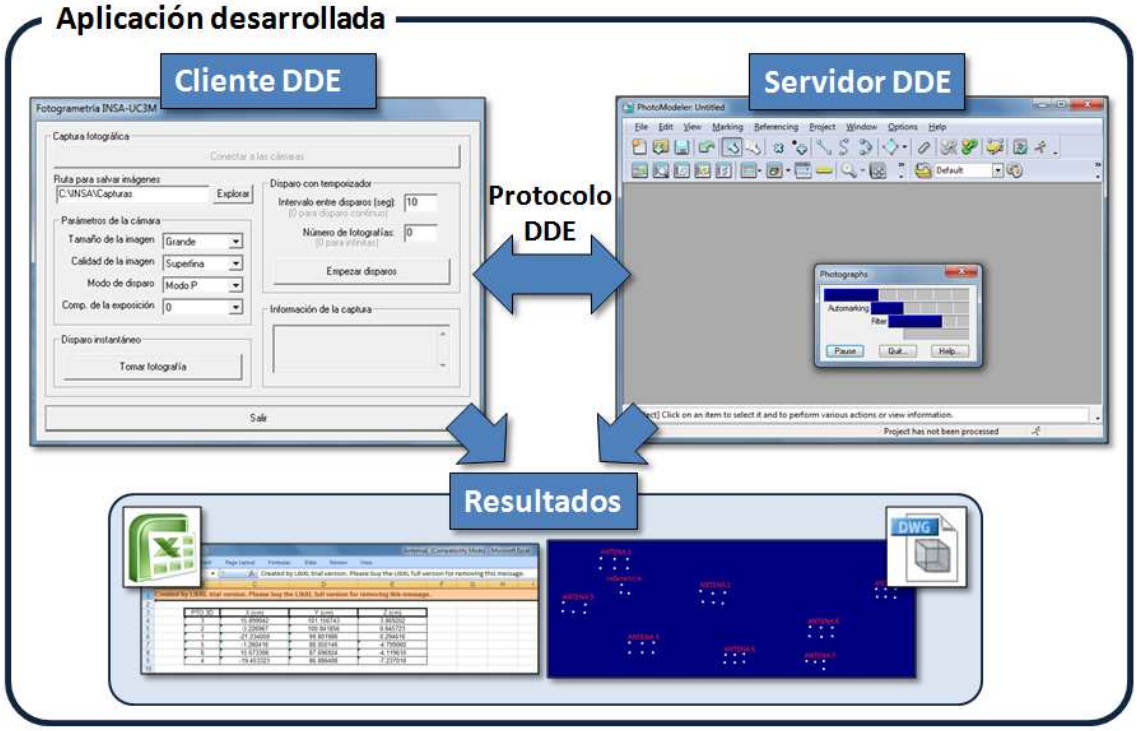

Ilustración 68. Diagrama de la aplicación desarrollada.

Existen básicamente tres tipos de comandos DDE que soporta *PhotoModeler*: DDE Initiate, DDE Request y DDE Terminate. Todos los comandos son cadenas de texto ASCII con un límite de 254 caracteres, no sensibles a mayúsculas y del tipo "NombreDeComando Parámetro1 Parámetro2 Parámetro3...". Todos ellos devuelven

valores como resultado además de un código indicando éxito o error. Para utilizar el interfaz DDE de *PhotoModeler* el flujo básico de ejecución debería ser:

1. Ejecutar *PhotoModeler* como servidor DDE.
2. Ejecutar el software propio como cliente DDE.
3. La aplicación cliente abre un canal DDE con el servidor usando el comando "DDE Initiate".
4. El cliente envía cuantos comandos DDE sean necesarios del tipo "DDE Request" al servidor y recibe las respuestas.
5. El cliente cierra el canal DDE con el servidor usando el comando "DDE Terminate".

6.9. FLUJO DE EJECUCIÓN DEL PROCESADO FOTOGRAMÉTRICO

En este apartado se presenta tanto el flujo de ejecución de la parte software relativa al cálculo fotogramétrico como la descripción de cada uno de los comandos utilizados en la programación del cliente para llevar a cabo el control del servidor *PhotoModeler*. En la Ilustración 69 se puede observar el diagrama de flujo correspondiente a la comunicación DDE con *PhotoModeler*.

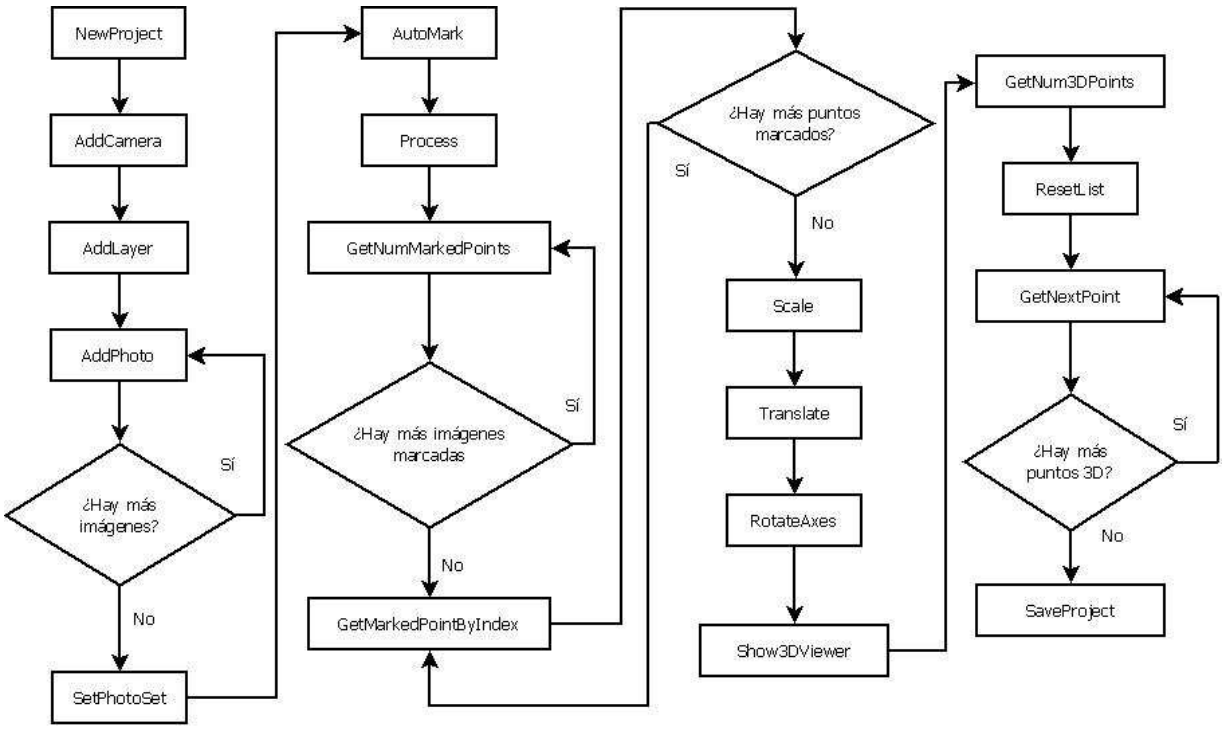

Ilustración 69. Diagrama de flujo de comandos DDE para procesado fotogramétrico en *PhotoModeler*.

Cada uno de los comandos se lanza una sola vez en cada generación de un nuevo modelo, salvo en el caso de “AddPhoto”, “GetNumMarkedPoints”, “GetMarkedPointByIndex” y “GetNextPoint”. Los dos primeros se lanzan un número de veces igual al número de imágenes a procesar que haya en el proyecto, consiguiendo así la escalabilidad del procesado fotogramétrico, que tendrá el mismo funcionamiento independientemente de cuántas cámaras simultáneas se estén utilizando en cada momento. En este sentido esta parte del software se limita a identificar las imágenes depositadas por el software de captura en una determinada ruta. El comando “GetMarkedPointByIndex” se lanza por cada imagen tantas veces como patrones marcados haya en la fotografía, y por último, “GetNextPoint” se lanza tantas veces como puntos 3D haya en el modelo generado.

A continuación se muestra la descipción y la sintaxis utilizada para cada uno de los comandos DDE que han servido en el proceso de automatización, así como los valores que devuelven al cliente. Además, se ofrecen ejemplos para un mejor entendimiento de la utilidad de cada uno de los comandos.

- NewProject

Descripción:	Crea un nuevo proyecto, cerrando previamente cualquier otro proyecto que hubiera abierto, sin guardarlo previamente.
Sintaxis:	"NewProject units [CTSet [numBits startRatio endRatio]]" • 'units' denota las unidades por defecto del proyecto creado y de los datos 3D que son pasados en las subsiguientes llamadas: 0-km, 1-m, 2-cm, 3-mm, 4-mi, 5-yd, 6-ft, 7-in. • 'CTSet' simboliza el patrón codificado establecido: 1=8-bit, 2=10-bit, 3=12-bit, 4=definido por el usuario. Si CTSet=4, las opciones de usuario para numBits, startRatio y endRatio se pasan dentro.
Valor devuelto:	"1" si tiene éxito ó "0" si no. Posibles errores: • número insuficiente de parámetros. • 'units' está fuera de rango.
Ejemplo:	"NewProject 3" devuelve: "1"

- AddCamera

Descripción:	Añade una nueva cámara al proyecto.
Sintaxis:	"AddCamera cName f fw fh pw ph xp yp K1 K2 K3 P1 P2 photo" • 'cName' es un nombre de cámara único (sin espacios). • 'f' es la distancia focal de la cámara en mm. • 'fw fh' indican el tamaño de formato en mm. • 'pw ph' indican el tamaño de la imagen esperada de la cámara en píxeles. • 'xp yp' son el punto principal en mm. • 'K1 K2 K3 P1 P2' son parámetros opcionales de distorsión de la lente. • 'photo' también es un parámetro opcional y es el número de imagen a la cual es asignada específicamente esta cámara.
Valor devuelto:	"1" si tiene éxito ó "0" si no. Posibles errores: • número insuficiente de parámetros. • no hay ningún proyecto abierto. • 'cName' ya existe en el proyecto.
Ejemplos:	"AddCamera kodak1 35.2 36.2 23.8 1280 1024 18.2 12.1" "AddCamera cam4 35.2 36.2 23.8 1280 1024 18.2 12.1 0.0003 0.000032 0.000012 0.002 -0.00005" "AddCamera cam4 35.2 36.2 23.8 1280 1024 18.2 12.1 0.0003 0.000032 0.000012 0.002 -0.00005 2" devuelve: "1"

- AddLayer

Descripción:	Añade una nueva capa al proyecto pasándole el nombre de la nueva capa.
Sintaxis:	“AddLayer layerName" • 'layerName' es una cadena de caracteres indicando el nombre de la capa (no puede incluir espacios).
Valor devuelto:	"1" si tiene éxito ó "0" si no. Posibles errores: • el nombre no es único.
Ejemplo:	"AddLayer layerName" devuelve "1"

- AddPhoto

Descripción:	Añade una nueva foto al proyecto.
Sintaxis:	• "AddPhoto ID cName imageFile" • 'ID' es un número identificador único para la foto (>=1). • 'cName' es el nombre de la cámara que será asignada a la foto (debe haber sido ya definida anteriormente). • 'imageFile' es opcional e indica el nombre de ruta para un archivo imagen.
Valor devuelto:	"1" si tiene éxito ó "0" si no. Posibles errores: • número insuficiente de parámetros. • no hay ningún proyecto abierto. • el identificador de foto 'ID' ya existe en el proyecto. • 'cName' no existe en el proyecto. • el archivo 'imageFile' no existe en disco.
Ejemplo:	"AddPhoto 1 kodak1" devuelve: "1"

- SetPhotoSet

Descripción:	Crea un conjunto de imágenes pasándole el nombre y la lista de imágenes a incluir.
Sintaxis:	"SetPhotoSet psName p1 p2 p3" • 'psName' es una cadena de caracteres para el nombre. • 'p1 p2...' son identificadores de imagen de las que hay en el proyecto.
Valor devuelto:	"1" si tiene éxito ó "0" si no. Posibles errores: • identificador de foto no encontrado. • ya existe el nombre del conjunto.
Ejemplo:	"SetPhotoSet pset 2 4 8" devuelve: "1"

- AutoMark

Descripción:	Lleva a cabo el auto-marcado o detección de los patrones codificados en la imagen especificada (ó 0 para todas) con los parámetros que se le especifiquen.
Sintaxis:	"AutoMark PhotoNumber X1 Y1 X2 Y2 MaxDiameter MinDiameter TargetType [FitError] [Layer] [Name]" • 'PhotoNumber' es la imagen a marcar ó '0' para todas las imágenes del proyecto. • 'X1 Y1' es la esquina superior izquierda de la región a marcar. • 'X2 Y2' es la esquina inferior derecha de la región a marcar. • Nota: La región es ignorada cuando todas las fotos están marcadas, en ese caso se usa la imagen completa. • 'MaxDiameter' es el tamaño máximo del patrón más grande en píxeles. • 'MinDiameter' es el tamaño mínimo del patrón más pequeño en píxeles. • 'TargetType' es el tipo de patrón a marcar: -1 (no especificado, se intentará marcar todos los tipos de patrones), 0 (patrones codificados RAD), 1 (puntos RAD), 2 (patrones de puntos), 3 (8 bits), 4 (10 bits), 5 (12 bits), 6 (especificado por el usuario). • Nota: El 'TargetType' y los parámetros siguientes son opcionales y son únicamente válidos si el módulo de patrones codificados está instalado. Si el módulo no está instalado, 'TargetType' será por defecto 2 para patrones de puntos. • 'FitError' indica el umbral de error permitido. • 'Layer' especifica la capa a la cual serán asignados los puntos automarcados. • 'Name' indica el nombre que se le asignará a los puntos que sean automarcados.
Valor devuelto:	"1 NumNewMarks" • 'NumNewMarks' es el número de los nuevos puntos marcados creados durante este automarcado ó "0" si el comando falla. Posibles errores: • número de parámetros incorrecto. • no hay ningún proyecto abierto. • el número identificador de la foto no existe. • el automarcado falló al ejecutarse.
Ejemplo:	"AutoMark 1 0 0 2000 1500 40 10 0 0.1 layerName amPt" devuelve "1 14"

- Process

Descripción:	Procesa el proyecto.
Sintaxis:	"Process flag" or "Process flag pmq rca" • 'flag' es la suma de: - 1 para reorientar todas las fotos. - 2 para reorientar sólo las fotos no orientadas. - 4 para optimizar (paquete de ajuste). - 8 para la auto-calibración durante el paquete. - 16 para la calibración de campo durante el paquete. - 32 para procesamiento limitado. ('1' y '2' no pueden establecerse al mismo tiempo, '8' y '16' no pueden establecerse al mismo tiempo, '8', '16' y '32' deben establecerse con '4' también, y '16' sólo funciona si hay una cámara en el proyecto que esté asignada a múltiples fotos. Si el proyecto tiene más de una cámara, '8' usa auto-calibración por defecto y tampoco se puede usar '16' para un proyecto multi-cámara. • 'pmq' es un parámetro opcional que representa la calidad de marcado del proyecto (para permitir la comprobación de puntos referenciados), donde -1 indica que está desactivado ó > 0 como el umbral residual marcado por encima del cual los puntos serán procesados (véase variable rca). • 'rca' = 0,1, 2 donde 0 = no se ejecuta, 1 = sin referencia, 2 = establecido para no usarse, 3 = volver a nombrar. • 'name' = el nombre de los puntos renombrados si rca=3.
Valor devuelto:	"1 iter i.e. fe" si tiene éxito ó "0" si no. • 'iter' es el número total de iteraciones necesarias para la solución. • 'i.e. ' es el error en la primera iteración del procesamiento. • 'fe' es el error final. Nota: si el paquete no se ejecuta (por ejemplo, sólo orientación) entonces "iter i.e. fe" será "-1 -1 -1". Nótese que este comando puede llevar algún tiempo para ejecutarse debido a que espera a devolver hasta que el procesamiento se complete. Posibles errores: • número insuficiente de parámetros. • no hay ningún proyecto abierto. • 'flag' está mal formado. • el proyecto falló al procesar/orientar.
Ejemplo:	"Process 13" devuelve "1 3 12.2 0.1" ó "Process 13 1 3 rc" Procesa y cada punto con una marca residual superior a 1 será renombrado como rc y devolverá "1 3 12.2 0.1"

- GetNumMarkedPoints

Descripción:	Devuelve el número de patrones marcados en una imagen.
Sintaxis:	"GetNumMarkedPoints PhotoID" • 'PhotoID' es un número identificador único para la foto (>=1).
Valor devuelto:	"1 Num" • 'Num' es el número de marcas en la foto ó "0" si este comando falló. Posibles errores: • número incorrecto de parámetros. • no hay ningún proyecto abierto. • el número de la imagen no es válido.
Ejemplo:	"GetNumMarkedPoints 4" devuelve "1 10"

- GetMarkedPointByIndex

Descripción:	Devuelve una estadística del punto marcado por índice.
Sintaxis:	"GetMarkedPointByIndex PhotoID Index " • 'PhotoID' es el número identificador de la imagen (>=1). • 'index' es el rango entre 1 y N (N es el número de puntos marcados en la imagen). Se usa dentro de un bucle, llamando a este comando, e incrementando el índice hasta que devuelva un código de error.
Valor devuelto:	"1 X Y ResidualX, ResidualY, ResidualLength OpNum" • 'X, Y' son las coordenadas de la imagen (en píxeles) de la posición de la marca. • 'ResidualX, ResidualY' son los valores X e Y del residuo de la marca. • 'ResidualLength' es la longitud del vector residual de la marca. • 'OpNum' es el número identificador del punto de objeto asociado a la marca ó "0" si este comando falló. Nótese que si el punto no es 3D los valores residuales serán devueltos como 0. Posibles errores: • número incorrecto de parámetros. • no hay ningún proyecto abierto. • el número de imagen no es válido. • el número del índice no es válido.
Ejemplo:	"GetMarkedPointByIndex 1 4" devuelve "1 939.565 1115.64 -0.0688 0.0572 0.0895 9"

- Scale

Descripción:	Establece la escala de la transformación afín del proyecto. La distancia de escalado debe estar en unidades de proyecto (las cuales se establecen con el comando NewProject).
Sintaxis:	"Scale pt1Id pt2Id distance" ó "Scale id1 id2 distance type1 type2" • 'pt1Id, pt2Id' son números identificadores para los puntos de objeto entre los cuales se define la escala. • Las variables opcionales "type1 type2" controlan qué tipo de objeto se usan para definir la escala, donde 1=punto, 2=borde, y 3=estación de cámara. El proyecto se escala para que la distancia entre esos dos parámetros llegue a ser 'distance' (en unidades por defecto del proyecto). Nótese que si cualquiera de los parámetros no es 3D ó es inválido, entonces el comando seguirá teniendo éxito pero el proyecto no será escalado hasta que ambos parámetros lleguen a ser 3D.
Valor devuelto:	"1" si tiene éxito ó "0" si no. Posibles errores: • número incorrecto de parámetros. • no hay ningún proyecto abierto. • 'pt1Id' ó 'pt2Id' no se corresponden con ningún punto existente. • 'distance' es cero o negativo.
Ejemplo:	"Scale 12 13 22.34" ó "Scale 1 2 22.34 1 3" devuelve: "1"

- Translate

Descripción:	Establece la traducción de la transformación afín del proyecto basándose en una posición definida por un punto o estaciones de cámara. Las coordenadas deben estar en unidades de proyecto (las cuales se establecen con NewProject).
Sintaxis:	"Translate id X Y Z itemType" • 'id' es el identificador del parámetro traductor (punto o estación de cámara, véase más abajo). • 'X, Y, Z' son las coordenadas 3D del punto de traducción (típicamente 0,0,0 pero podría ser cualquier posición 3D conocida). • 'itemType' es un parámetro opcional que por defecto es punto y cuyos posibles valores son 1 – punto, 2 – estación de cámara.
Valor devuelto:	Devuelve "1" si tiene éxito ó "0" si no.
Ejemplo:	"Translate 1 0 0 0" debería establecer la traducción usando punto#1 en (0, 0, 0). "Translate 1 10.0 10.0 10.0 2" debería establecer la traducción usando una estación de cámara en (10, 10, 10).

- RotateAxes

Descripción:	Establece la rotación de la transformación afín del proyecto basándose en dos conjuntos de ejes definidos por puntos o estaciones de cámara.
Sintaxis:	"RotateAxes axesType axis1ID1 axis1ID2 axis2ID1 axis2ID2 item1Type item2Type item3Type item4Type" • 'axesType' = 1 para ejes 'X' e 'Y' , 2 para ejes 'X' y 'Z' , 3 para ejes 'Y' y 'Z'. • 'axis1ID1' es el identificador del primer parámetro (punto o estación de cámara, véase más abajo) del primer eje. • 'axis1ID2' es el identificador del segundo parámetro (punto o estación de cámara, véase más abajo) del primer eje. • 'axis2ID1' es el identificador del primer parámetro (punto o estación de cámara, véase más abajo) del segundo eje. • 'axis2ID2' es el identificador del segundo parámetro (punto o estación de cámara, véase más abajo) del segundo eje. • Y opcional (por defecto es tipo punto): • 'item1Type' es el tipo del primer parámetro del primer eje – 1 para punto, 2 para estación de cámara. • 'item2Type' es el tipo del segundo parámetro del primer eje – 1 para punto, 2 para estación de cámara. • 'item3Type' es el tipo del primer parámetro del segundo eje – 1 para punto, 2 para estación de cámara. • 'item4Type' es el tipo del segundo parámetro del segundo eje – 1 para punto, 2 para estación de cámara.
Valor devuelto:	Devuelve "1" si tiene éxito ó "0" si no.
Ejemplo:	"RotateAxes 1 38 30 42 15" debería establecer un eje X usando los puntos 38 y 30, y un eje Y usando los puntos 42 y 15. "RotateAxes 2 1 30 2 3 1 2 2 2" debería establecer un eje X usando la estación de cámara 1 y el punto 30, y un eje Z usando la estación de cámara 2 y la estación de cámara 3.

- GetNum3DPoints

Descripción:	Devuelve el número de puntos 3D que hay en el proyecto abierto actualmente. Esto incluye puntos procesados, puntos aproximados y puntos con sólo 1 referencia.
Sintaxis:	"GetNum3DPoints"
Valor devuelto:	"1 n" • 'n' es el número de puntos 3D ó "0" si el comando no tuvo éxito. Posibles errores: • número incorrecto de parámetros. • no hay ningún proyecto abierto.
Ejemplo:	"GetNum3DPoints" devuelve "1 164"

- Show3DViewer

Descripción:	Muestra un visor 3D en el que se visualizan opciones solicitadas.
Sintaxis:	"Show3DViewer optBtn optDlg doRotate pts lines surfs cyls cyllines textures sd edges curves camstns perspective maximize" Nota: Los booleanos son (1 para verdadero, 0 para falso). • 'optBtn' – muestra el botón de opciones. • 'optDlg' – muestra el diálogo de opciones antes de visualizar el visor 3D. • 'doRotate' – aplica un giro de escala al modelo. • 'pts' – muestra puntos. • 'lines' – muestra líneas. • 'surfs' – muestra superficies. • 'cyls' – muestra cilindros. • 'cyllines' – muestra cilindros como líneas centrales. • 'textures' – muestra foto-texturas. • 'sd' – muestra un dibujo de superficies. • 'edges' – muestra bordes. • 'curves' – muestra curvas. • 'camstns' – muestra estaciones de cámara. • 'perspective' – muestra una perspectiva de texturas corregidas (por ejemplo, texturas de calidad). • 'maximize' – maximize la ventana.
Valor devuelto:	"1" si tiene éxito ó "0" si este comando falló.
Ejemplo:	"Show3DViewer 0 0 1 1 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 1" devuelve "1"

- ResetLists

Descripción:	Resetea los contadores de los comandos 'Next' (ej: GetNextPoint). Se le debería llamar antes que a los comandos 'Next' y en cualquier momento en que se desee empezar a obtener el primer ítem otra vez.
Sintaxis:	"ResetLists"
Valor devuelto:	"1" si tiene éxito, "0" si no. Posibles errores: • número incorrecto de parámetros. • no hay ningún proyecto abierto.
Ejemplo:	"ResetLists" devuelve "1"

- GetNextPoint

Descripción:	Devuelve un punto 3D siguiendo una secuencia.
Sintaxis:	"GetNextPoint"
Valor devuelto:	"1 n p c x y z" • 'n' es el identificador del punto. • 'p' es el indicador de procesado (1=el punto ha sido procesado, 0=el punto ha sido aproximado solamente). • 'c' es el indicador de control (1=el punto es un punto de control, 0=no es un punto de control). • 'x' es la coordenada X (en unidades de proyecto). • 'y' es la coordenada Y. • 'z' es la coordenada Z del punto 3D. Devuelve "0" si el comando falló. Posibles errores: • número incorrecto de parámetros. • no hay ningún proyecto abierto. • se ha alcanzado el final de la lista.
Ejemplo:	"ResetLists" "GetNextPoint" devuelve "1 1 1 0 4.2 14.3 34.2"

- SaveProject

Descripción:	Guarda en disco el proyecto PhotoModeler abierto actualmente.
Sintaxis:	"SaveProject fullPathOfPmrFile" • 'fullPathOfPmrFile' es la ruta DOS de un archivo PMR.
Valor devuelto:	"1" si el proyecto fue guardado satisfactoriamente ó "0" si no. Posibles errores: • número insuficiente de parámetros. • no hay ningún proyecto abierto. • el proyecto actual no pudo guardarse (no había espacio suficiente en disco, el nombre de archivo era ilegal, o no había ningún proyecto abierto).
Ejemplo:	"SaveProject c:\data\projects\p1\second.pmr" devuelve "1"

7. Resultados experimentales del prototipo

En este capítulo se muestran los resultados experimentales que se han extraído utilizando tanto el demostrador de laboratorio como el prototipo final en la generación de modelos 3D de una maqueta a escala de un array de cuatro antenas, en el caso del demostrador de laboratorio, y de un array funcional y operativo de ocho antenas instalado en la Universidad Politécnica de Madrid, en el caso del prototipo final.

En el contrato entre INSA y la UC3M se estableció que en enero de 2010 se llevara a cabo una prueba en laboratorio ante personal de INSA en la que un demostrador del sistema de fotogrametría produjera resultados como los esperados en la medición de los arrays de antenas descritos al inicio de este proyecto. Así mismo, se

estableció que el proyecto concluiría en junio de 2010 con un prototipo funcional operando en las instalaciones de la Universidad Politécnica de Madrid, donde se hallaría instalado el array de antenas a medir. A continuación se describen ambas demostraciones y por último se discuten los resultados obtenidos, así como las posibles mejoras del sistema desarrollado.

7.1. DISEÑO DE LA PRUEBA EN LABORATORIO

Tal como se acordó al inicio del proyecto, al final de la primera fase del desarollo del proyecto debía realizarse una demostración de un prototipo de pruebas en laboratorio. Bajo esta premisa, se construyó un modelo de un array de cuatro antenas con componentes de bajo coste (Ilustración 70), únicamente con el objetivo de emular la topología a escala de un array de antenas dentro del laboratorio.

Ilustración 70. Modelo a escala de antenas para el demostrador de laboratorio.

El prototipo de laboratorio tenía el objetivo de demostrar ante INSA por primera vez la capacidad de generación de modelos en 3D del modelo del array realizando para ello la captura multicámara simutánea y en tiempo real llevando a cabo el procesado fotogramétrico, tal como se diseñó en el capítulo 6, relativo a la automatización del

sistema. Con dichos requisitos el diseño de la prueba de laboratorio se realizó siguiendo el esquema mostrado en la Ilustración 71. Cabe señalar que, debido a tratarse de una fase temprana durante el desarrollo del proyecto, la demostración se centró en mostrar el funcionamiento por separado de ambos sistemas de automatización (sistema de captura multicámara en tiempo real y sistema automático de procesado fotogramétrico), no estando a esas alturas del proyecto integradas ambas partes de forma funcional.

Ilustración 71. Diseño del demostrador de laboratorio.

7.2. DEMOSTRADOR DE LABORATORIO

Como se ha explicado en el apartado 7.1, para desarrollar el demostrador de laboratorio se debía aplicar primeramente el software de captura multicámara que debería hacer uso de las siete cámaras que se utilizaron en las pruebas de laboratorio. El desarrollo de dicho software de captura se llevó a cabo con el montaje de la Ilustración 72, es decir, el ordenador portátil bajo el cual se ejecutaría el software, un hub USB con alimentación contínua, de siete puertos de E/S, mediante el cual las cámaras accederían al bus USB del ordenador y, por último, el sistema de alimentación de las cámaras (no mostrado en la Ilustración 71).

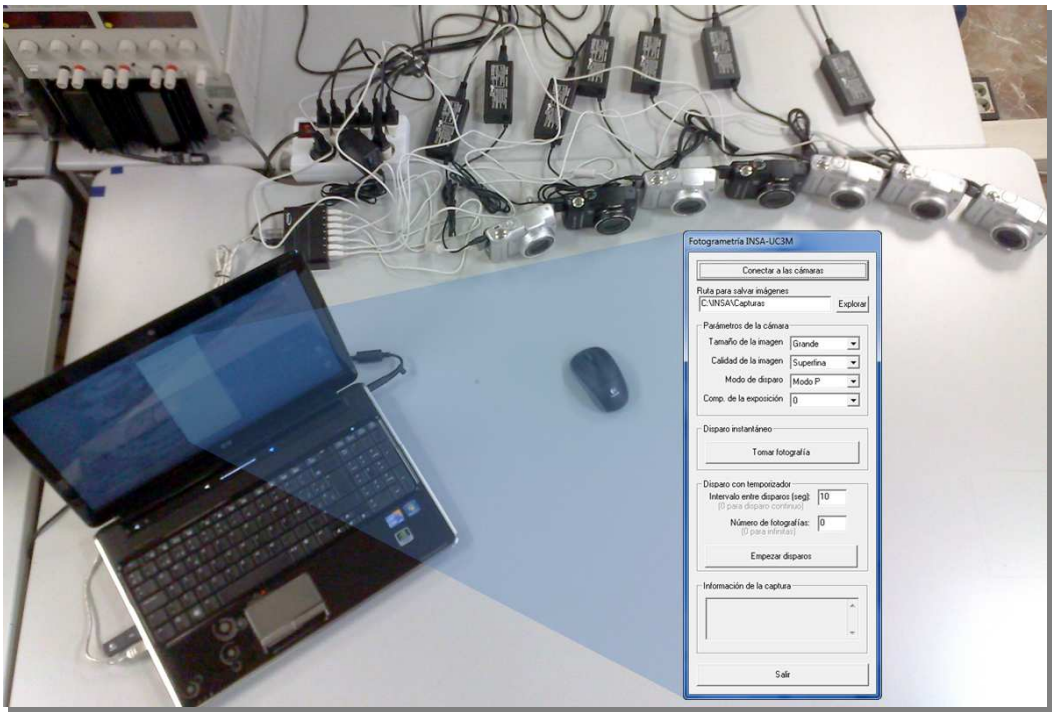

Ilustración 72. Montaje bajo el cual se desarrolló el software de captura.

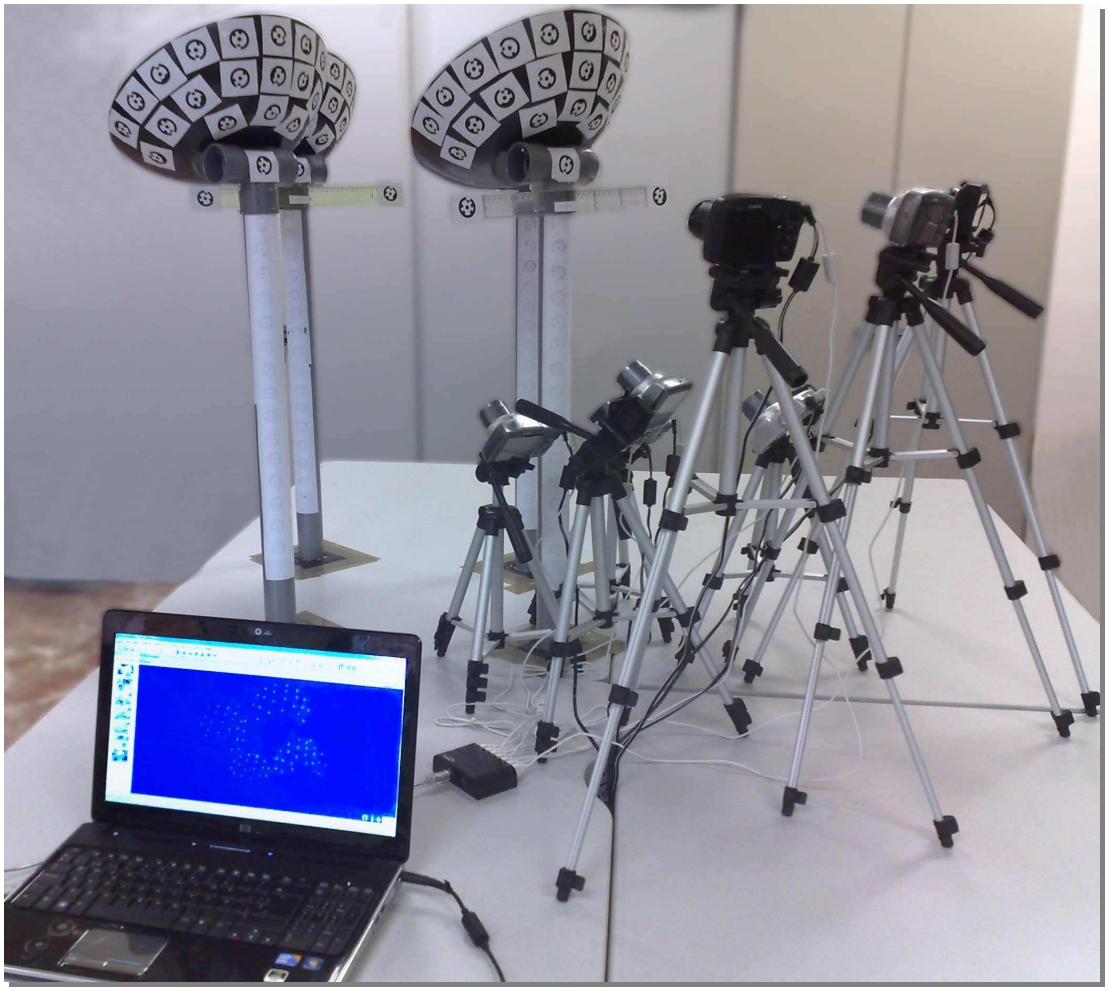

Ilustración 73. Sistema demostrador de laboratorio con el modelo del array de 4 antenas.

Una vez verificados el funcionamiento del software de captura y del software fotogramétrico automatizado de forma independiente, el montaje que se implementó para llevar a cabo las pruebas de laboratorio del demostrador fue el mostrado en la Ilustración 73. En ella se puede apreciar el modelo del array con sus respectivos patrones codificados, mediante los cuales se lleva a cabo el procesado fotogramétrico para la generación del modelo 3D. Para ello se utiliza el montaje de la Ilustración 72, esta vez distribuyendo las cámaras sobre trípodes fotográficos estables convenientemente orientados para la detección óptima de los patrones, tal como se muestra en la Ilustración 73.

7.3. RESULTADOS DEL DEMOSTRADOR

En la Ilustración 74 se puede apreciar una muestra de una serie de siete capturas como las que relizaron las cámaras del demostrador en las pruebas de laboratorio. Como puede observarse, la orientación de las cámaras se lleva a cabo con el objetivo de captar la mayor cantidad de patrones codificados en cada imagen. Sin embargo, lo realmente importante es que todos los patrones que se ven en una imagen, también se vean, en cada momento, en al menos otra imagen más de la serie. En las pruebas de laboratorio dicho objetivo pudo cumplirse sin mayores dificultades debido a la disponibilidad de un número suficiente de cámaras para captar un array de únicamente cuatro elementos a una distancia suficientemente cercana.

En la Ilustración 75 se muestra un resultado gráfico en el que puede observarse, desde tres perspectivas distintas, el modelo 3D generado del array de cuatro elementos del laboratorio. También puede verse dicho modelo en relación a la posición de las siete cámaras que realizaron las capturas (Ilustración 76).

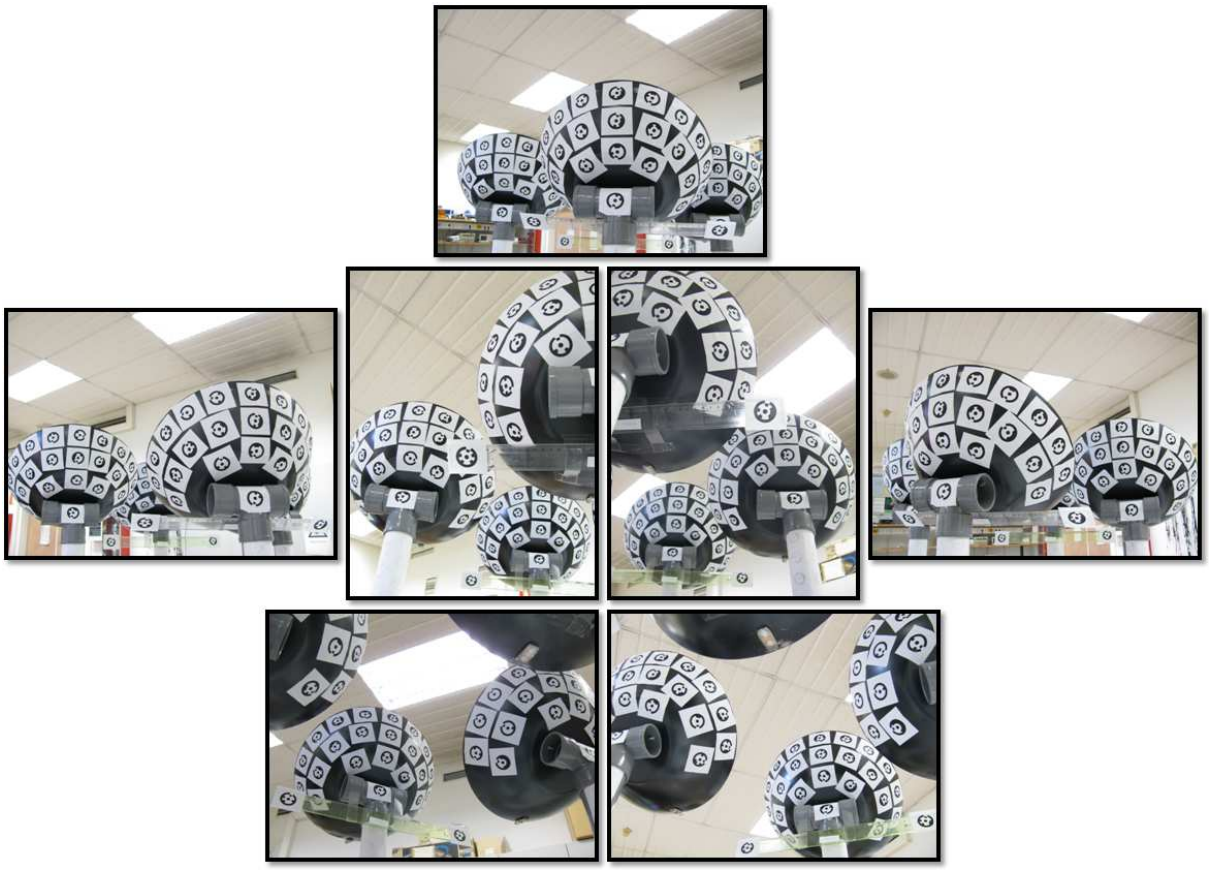

Ilustración 74. Ejemplo de una serie de imágenes capturadas por el demostrador de laboratorio.

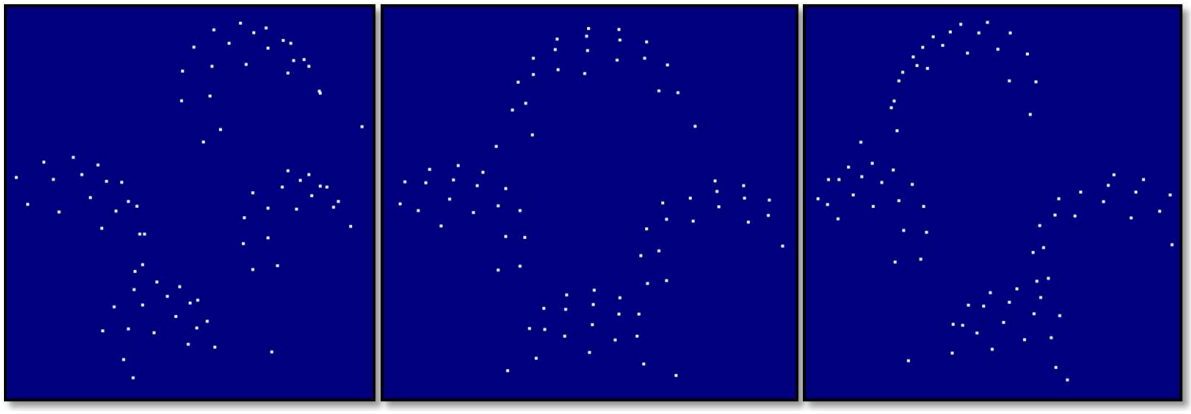

Ilustración 75. Tres perspectivas del modelo 3D generado del array del laboratorio.

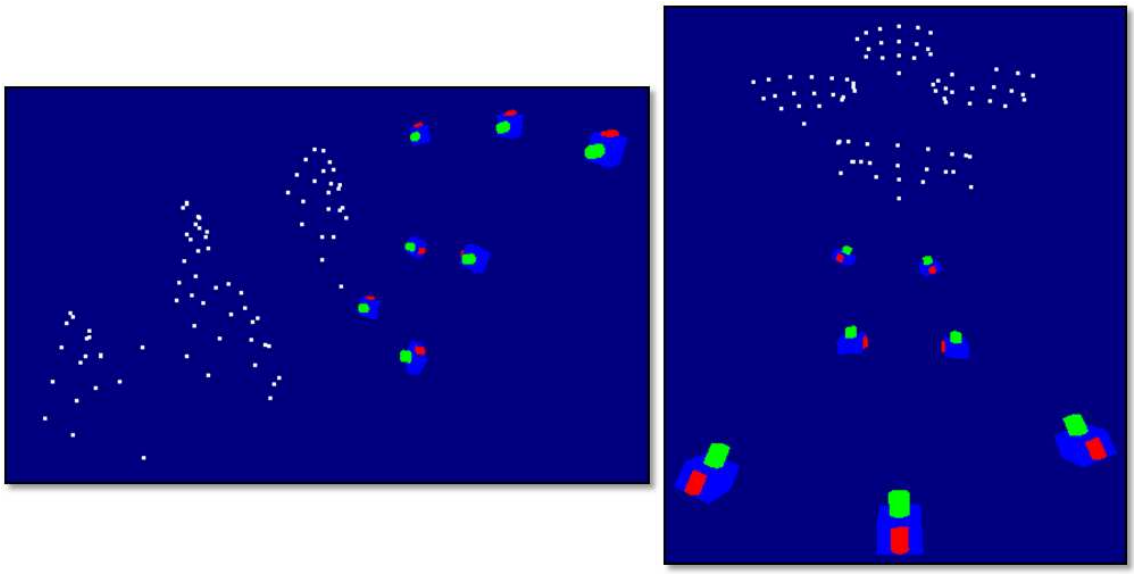

Ilustración 76. Modelo 3D generado del array del laboratorio y posición de las 7 cámaras.

En las ilustraciones anteriores del demostrador de laboratorio es posible observar, en la antena delantera y trasera, dos varas rectas en cuyos extremos hay dos patrones en cada una de ellas. Las distancias entre dichos patrones están calibradas de manera que puede estimarse el error del modelo generado en función de la diferencia entre las distancias proporcionadas por el modelo y las medidas a partir de los patrones calibrados. Este es el método más fiable para estimar la precisión de un modelo 3D. Según dicho método la precisión de los modelos generados en laboratorio es del orden del milímetro (se obtuvieron resultados variando en un rango de varios milímetros, siempre por debajo del centímetro), lo que sitúa al modelo generado casi un orden de magnitud por encima de la precisión requerida al inicio de este proyecto.

Dado que las condiciones en el laboratorio son ventajosas en relación a número de cámaras por antena, distancias involucradas en el modelo, condiciones ambientales, redundancia en la captura de patrones, etc. los objetivos para las pruebas de campo utilizando el prototipo final se establecieron en la línea de mantener los resultados obtenidos en el demostrador de laboratorio para satisfacer la condición de errores de menos de 1 cm, indispensable para el correcto funcionamiento de los algoritmos DoA a las frecuencias previstas de uso.

Por último, con el objetivo de ilustrar el tiempo de procesado requerido para generar un modelo 3D en el que se analizan las siete imágenes de cada serie, se muestra la Ilustración 77, en la que se puede observar las diferencias de tiempo al analizar diferentes resoluciones de imágenes captadas por las cámaras. Dado que los resultados

obtenidos en cuanto a precisión no varían significativamente entre unas resoluciones y otras, el objetivo será utilizar las menores imágenes que hagan posible la detección de patrones para así disminuir la carga computacional del sistema (de 1.600×1.200 ó 2.272×1.704 en el caso del demostrador de laboratorio y de 2.816×2.112 ó 3.456×2.592 en el caso del prototipo final). No obstante, por los valores medidos en la prueba de laboratorio se concluye que el requisito de los 10 segundos entre un modelo 3D y el siguiente se encuentra aún lejos, si bien en esa fase del proyecto se idearon varias técnicas para poder afrontar este reto. Dichas técnicas se explicarán más adelante.

Ilustración 77. Tiempo de procesado para distintos tamaños de imagen.

7.4. ENTORNO DE TRABAJO DEL PROTOTIPO FINAL

En la Ilustración 78 se puede observar la plataforma sobre la que se debió instalar tanto el array de antenas a medir como el sistema de fotogrametría. Dicha plataforma se encuentra ubicada en la azotea del edificio C de la ETSI de Telecomunicación de la Universidad Politécnica de Madrid.

Ilustración 78. Plataforma para el array de antenas y sistema de fotogrametría.

Aproximadamente un mes más tarde de la prueba del demostrador de laboratorio descrito en los apartados anteriores, se terminó por parte de INSA la instalación del array de antenas sobre la plataforma de la Ilustración 78. Dicho array está compuesto por ocho antenas modelo PAR160-120 del fabricante Lambda Antenas (Ilustración 79, izquierda) y están montadas sobre un soporte como el de la parte derecha de la Ilustración 79. Dado que el array tiene como objetivo apuntar a satélites geoestacionarios, las antenas estarán siempre fijas, por lo que el sistema de fotogrametría se optimizará teniendo en cuenta esta circunstancia.

Por último, en la Ilustración 80 se muestra una imagen del montaje inicial del array de antenas. Como puede observarse, la topología del array no se corresponde con ninguna de las dos posibilidades mostradas en Ilustración 12 del apartado 1.7, que se pretendían instalar al inicio del proyecto. La razón de esta diferencia en las condiciones del array se debió, según informaron miembros de INSA, a la dificultad que ofrecían dichas topologías en términos de ocultamiento de unas antenas a otras. Es de destacar la nueva dificultad impuesta sobre el sistema desarrollado al pasar de un array de topología regular, bajo la cual era posible realizar diseños previos en cuanto a la correcta posición y orientación de las cámaras, factor este de vital importancia en el

desempeño del sistema de fotogrametría, a un array totalmente irregular, con algunas distancias entre antenas bastante grandes, que exigió entre otras cosas, llevar a cabo un método de prueba y error a la hora de establecer los emplazamientos finales de cada una de las cámaras. No obstante, INSA realizó movimientos de algunas antenas para facilitar las tareas del sistema fotogramétrico, siempre bajo la máxima de mantener idénticas las prestaciones del array.

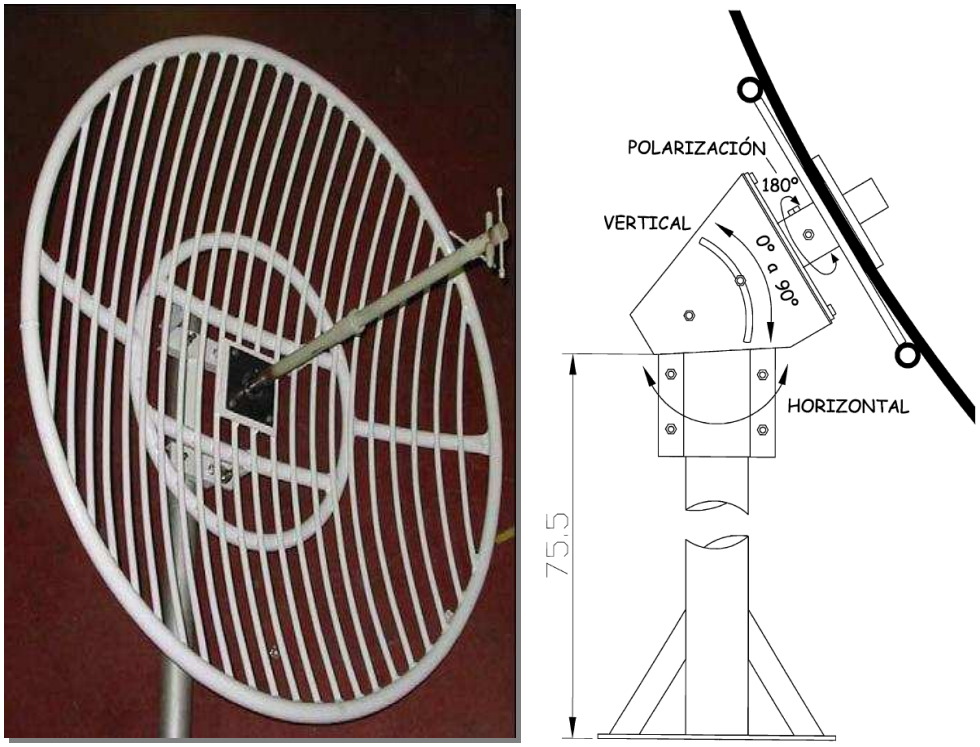

Ilustración 79. Antena PAR160-120 de Lambda Antenas (izquierda) y sistema de sujección (derecha).

Ilustración 80. Montaje inicial del array de antenas en la ETSI de Telecomunicación de la UPM.

7.5. DISEÑO E INSTALACIÓN DEL PROTOTIPO

Dada la irregular topología del array de antenas finalmente instalado, no pudo implementarse ningún diseño previo realizado para la distribución de cámaras en función de los ángulos de visión de las cámaras. En su lugar, la búsqueda de las posiciones óptimas para las cámaras se realizó por prueba y error, proceso más lento e ineficaz.

Para la instalación permanente de las cámaras sobre la plataforma, se diseñó un sistema de soportes construido con elementos habituales para sujección de antenas de RF, tal como se describió en el apartado 5.3. Esta elección resultó en un sistema de muy bajo coste y extremadamente estable, con múltiples grados de libertad en cuanto al posicionamiento de las cámaras y su orientación y altura. En la Ilustración 81 se puede observar en detalle una de las cámaras montada sobre la plataforma.

Ilustración 81. Sistema de sujección de cámaras mediante mástiles y elementos ajustables.

El sistema se diseñó de forma que fuera resistente a vientos, mediante soportes para las cámaras muy estables, y resistente a lluvia, para lo cual se instalaron arquetas, una por cámara, para el sistema de alimentación eléctrica y de comunicación con el software mediante USB (Ilustración 82).

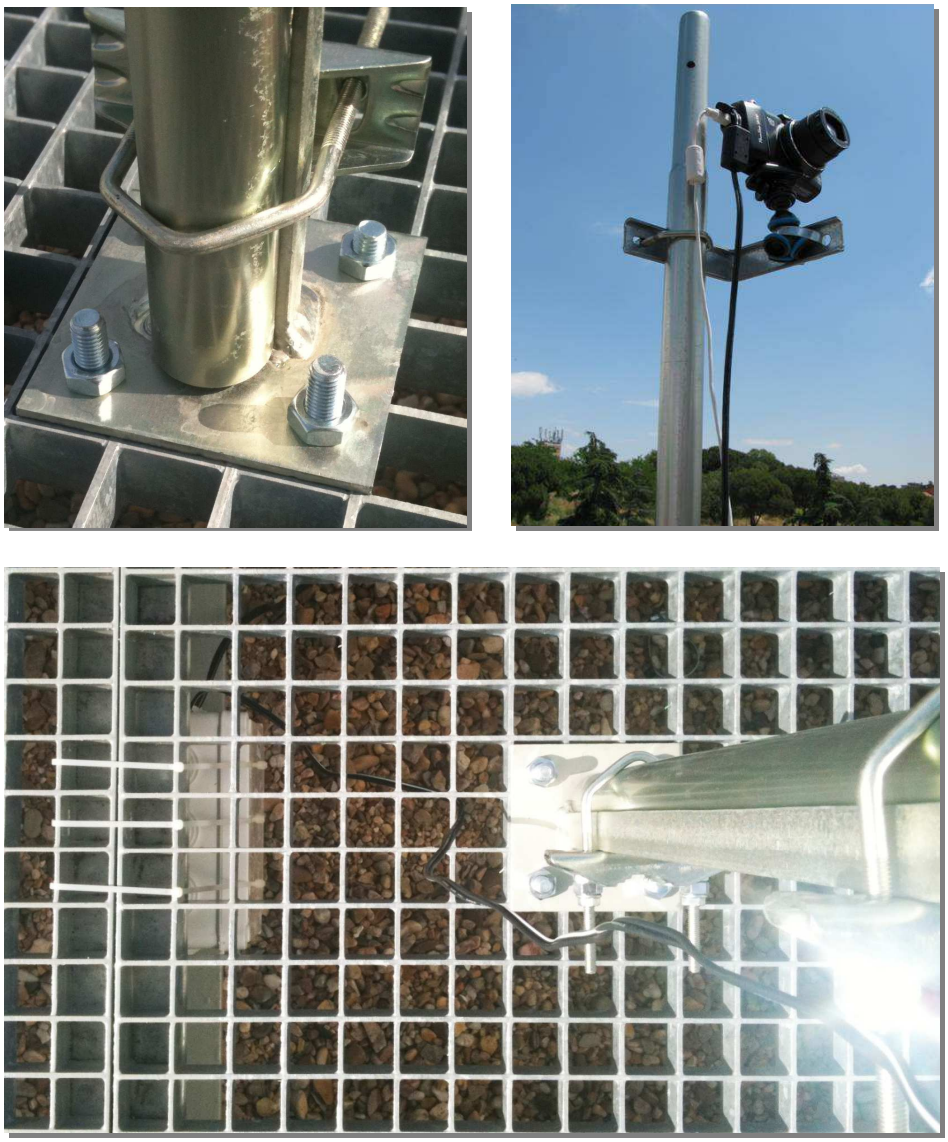

Ilustración 82. Sistema resistente a vientos y lluvias.

Finalmente, en la Ilustración 83 se muestra el resultado del prototipo final montado sobre la plataforma por detrás del array a medir. El prototipo está formado por diez cámaras Canon SX110 IS con alimentación de red conectadas mediante dos concentradores USB al ordenador portátil en el que se ejecuta en tiempo real el software de captura y de procesado fotogramétrico. El carácter automático del sistema desarrollado además permite una rápida puesta en funcionamiento y calibrado ya que la obtención de resultados es muy rápida.

Ilustración 83. Aspecto del prototipo final montado y en funcionamiento.

La numeración de los patrones codificados se hace siempre de la misma manera, puesto que así fue solicitado por INSA para su mayor comodidad en el procesado de los

mismos. En cada antena se utilizan seis patrones diferentes siguiendo una numeración consecutiva y distribuida en función del número de antena. Es decir, en la antena 1 se usan los patrones 1, 2, 3, 4, 5 y 6; en la antena 2 los patrones 10, 11, 12, 13, 14 y 15; en la antena 3 los patrones 20, 21, 22, 23, 24 y 25; en la antena 4 los patrones 30, 31, 32, 33, 34 y 35; en la antena 5 los patrones 40, 41, 42, 43, 44 y 45; en la antena 6 los patrones 50, 51, 52, 53, 54 y 55; en la antena 7 los patrones 60, 61, 62, 63, 64 y 65 y en la antena 8 los patrones 70, 71, 72, 73, 74 y 75. Por último, los patrones 80, 81 y 82 se utilizan como referencia para definir los ejes de coordenadas del sistema (los puntos 80 y 81 definen el eje X y los puntos 80 y 82 definen el eje Y). En la Ilustración 84 puede apreciarse la numeración (en rojo) y colocación de los patrones en tres de las antenas (en verde).

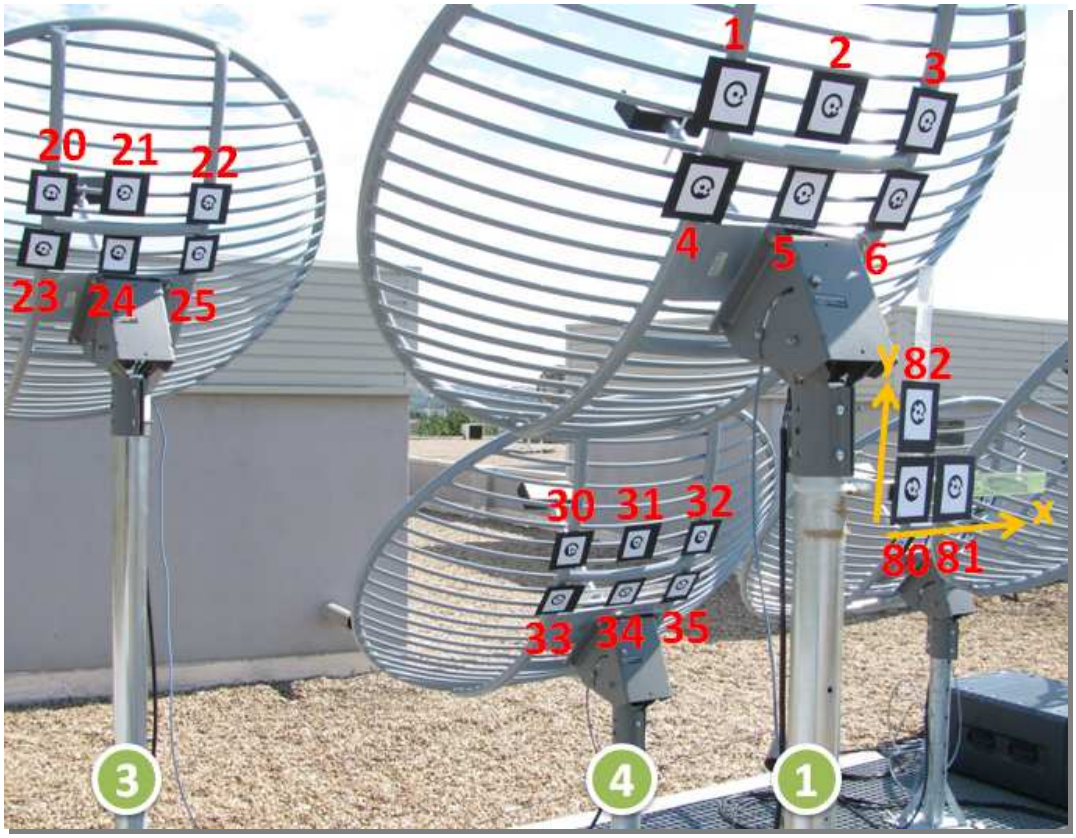

Ilustración 84. Numeración (en rojo) de los patrones en función del número de antena (en verde).

7.6. RESULTADOS DEL PROTOTIPO: 4 ANTENAS

Los primeros resultados experimentales que se obtuvieron con el prototipo tuvieron como objetivo la medición de la mitad del array, es decir, cuatro antenas. De esta manera se pudo empezar pronto a proporcionar a INSA resultados de las mediciones

necesarios para su aplicación en los algoritmos DoA. Además, esto permitió proceder, mientras tanto, a la adquisición de las cuatro cámaras adicionales, ya que siete cámaras resultaron insuficientes para la medición del array completo, dada su irregular topología.

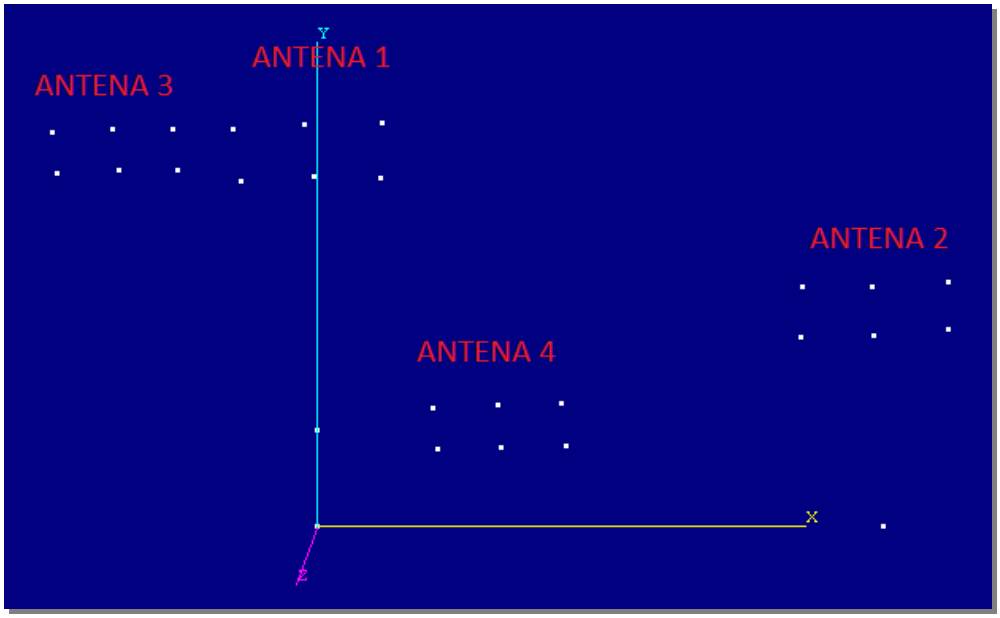

Ilustración 85. Modelo 3D de la mitad del array de antenas.

En la Ilustración 85 se muestra el resultado de la medición de la mitad del array de forma gráfica y en la Tabla 3 de forma numérica. Los resultados significativos para los algoritmos DoA ofrecidos por el software tras la generación del modelo son del tipo coordenadas XYZ para cada uno de los patrones de cada antena, a partir de los cuales INSA puede obtener las posiciones relativas entre los elementos del array.

La precisión de estos modelos se calcula de la misma forma que se explicó en el demostrador de laboratorio: se establecen unas distancias de referencia entre dos pares de patrones del array, en este caso entre los patrones 4 y 6 y entre los patrones 33 y 35, de las antenas 1 y 4 respectivamente, el software de forma automática escala el modelo 3D según la distancia de uno de los dos pares de patrones y el error cometido en la generación del modelo se obtiene como la diferencia entre la distancia del otro par de patrones medida en el modelo 3D y la distancia medida físicamente con un calibre digital pie de rey (lo que proporciona una resolución de 0,01 mm en las medidas de distancias reales). El error calculado en el modelo del array de cuatro antenas es de 2,01 mm, con lo que se mantiene el orden de magnitud de precisión lograda en laboratorio.

Tabla 3. Puntos XYZ obtenidos por el modelo 3D del array de 4 antenas.

Punto 3D	Antena	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)
3	1	16,82	102,18	-0,02
2	1	-2,20	101,89	-3,51
1	1	-20,09	101,22	-4,63
5	1	-0,37	88,77	-7,68
6	1	16,54	88,30	-6,62
4	1	-18,48	87,82	-10,85
10	2	123,38	60,83	0,60
12	2	158,73	61,66	1,40
11	2	141,02	60,51	-0,92
15	2	160,04	49,32	-5,14
13	2	124,24	47,54	-6,41
14	2	142,61	47,82	-7,74
20	3	-80,044	98,30	-156,15
23	3	-79,55	85,86	-162,92
21	3	-62,51	99,34	-157,28
24	3	-61,58	87,01	-164,00
25	3	-44,29	86,81	-163,86
32	4	68,82	18,62	-109,29
31	4	50,63	17,89	-112,15
30	4	31,63	17,07	-112,21
35	4	70,57	5,93	-116,18
33	4	32,87	4,83	-118,69
34	4	51,67	5,13	-117,26
82	Referencia	-0,15	24,45	0
80	Referencia	0	0	0
81	Referencia	144,09	0	0

7.7. RESULTADOS DEL PROTOTIPO: 8 ANTENAS

En este apartado se muestran los resultados obtenidos por el sistema de fotogrametría en relación a los modelos 3D generados en la medición del array completo de ocho antenas. En la Ilustración 87 se puede observar una de las series de diez imágenes

capturadas utilizadas en el procesado. Si bien, como se explicó en la descripción de los resultados del demostrador de laboratorio, la resolución de las imágenes no tiene un efecto significativo en la precisión de los modelos 3D siempre que que sea suficiente para detectar los patrones, dado que la velocidad de generación de modelos quedó relegada por INSA a un segundo plano a falta de 3 meses para acabar el proyecto, a fin de ser optimizada en el futuro, se utilizó una resolución de imagen máxima de 3.456×2.592 con una compensación de la exposición de +1 EV.

Para generar cada modelo del array inicialmente se realizan simultáneamente las diez capturas, se descargan al ordenador y se envían al software fotogramétrico para su procesado, tras lo cual se obtienen los resultados en forma de modelo 3D gráfico y de tablas de coordenadas relativas a los diferentes patrones codificados empleados. En la Ilustración 86, en la Ilustración 88, en la Ilustración 89 y en la Ilustración 90 se muestran diversos resultados gráficos del modelo 3D generado y en la Tabla 4 el resultado numérico de las coordenadas XYZ relativas a todos los patrones que forman el modelo 3D. El resultado final en cuanto a precisión obtenida en la generación de coordenadas 3D en el modelo del array completo se consigue mantener de nuevo en el orden del milímetro, llegando en algunos casos a lograrse precisiones submilimétricas (como en el caso del modelo de las siguientes imágenes, que se obtuvo con una precisión de 0,093cm), pero siempre por debajo del centímetro.

En lo relativo al periodo de generación de nuevos patrones 3D, los primeros resultados resultados fueron decepcionantes. Desde las fases muy iniciales del proyecto se identificó esta especificación como extremadamente difícil de conseguir. La dificultad se debe al elevado número de cámaras necesarias para realizar un modelo de tantas antenas. Esto obliga a realizar, en cada generación de un nuevo modelo, muchas búsquedas de patrones muy costosas en tiempo, además de los demás procesos fotogramétricos necesarios.

Las últimas medidas que se realizaron durante las campañas de pruebas con el prototipo final arrojaban duraciones aproximadas para la actualización de los modelos de alrededor de 200 segundos, muy por debajo de las especificaciones requeridas. No obstante, por indicación expresa de INSA, puestos al corriente de la problemática desde el principio, se centraron los esfuerzos en obtener las mayores resoluciones, dejando el asunto de la velocidad para más adelante. Además, se esperaba conseguir mejoras significativas en la velocidad del procesado fotogramétrico cuando *EOS Systems*

liberara la nueva versión de *PhotoModeler* (versión 7) en la que venían trabajando, de cuyas características nos habían puesto al corriente. La principal funcionalidad que se esperaba mejorase la velocidad del sistema consistía en la incorporación del procesado concurrente en diversas partes del software, tales como la búsqueda de patrones, proceso especialmente crítico en cuanto a velocidad de actualización de modelos. Dado que el ordenador adquirido para el proyecto se eligió fundamentalmente por su procesador de cuatro núcleos, la mejora podría ser considerable.

Tras finalizar el proyecto, finalmente una versión beta de *PhotoModeler 7* fue proporcionada por *EOS Systems*, lo que permitió realizar pruebas con series de imágenes de las campañas de pruebas. Tras realizar diversas adaptaciones en el software desarrollado para solucionar problemas de compatibilidad entre versiones, se pudieron realizar las pruebas con el nuevo software, consiguiéndose importantes mejoras. De los aproximadamente 200 segundos de actualización entre modelos se pasó a unos 50 segundos. Este resultado es perfectamente consistente con el hecho de que se pasó de realizar un procesamiento serie con un solo procesador a un procesamiento paralelo con cuatro, con lo que la mejora de la rapidez fue aproximadamente igual a dividir el tiempo por el número de núcleos del procesador. Si bien este resultado sigue estando por encima de los 10 segundos, se demuestra que es un problema estrictamente de falta de capacidad de procesamiento, que podría solucionarse con sistemas de mayor capacidad.

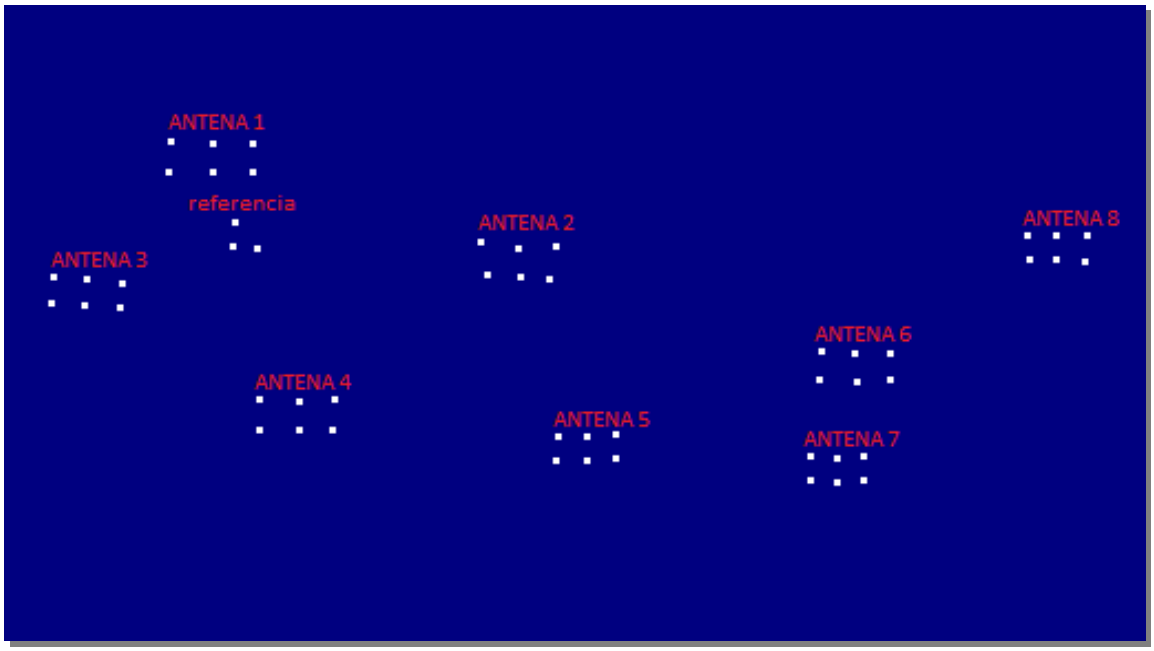

Ilustración 86. Modelo 3D del array completo de antenas.

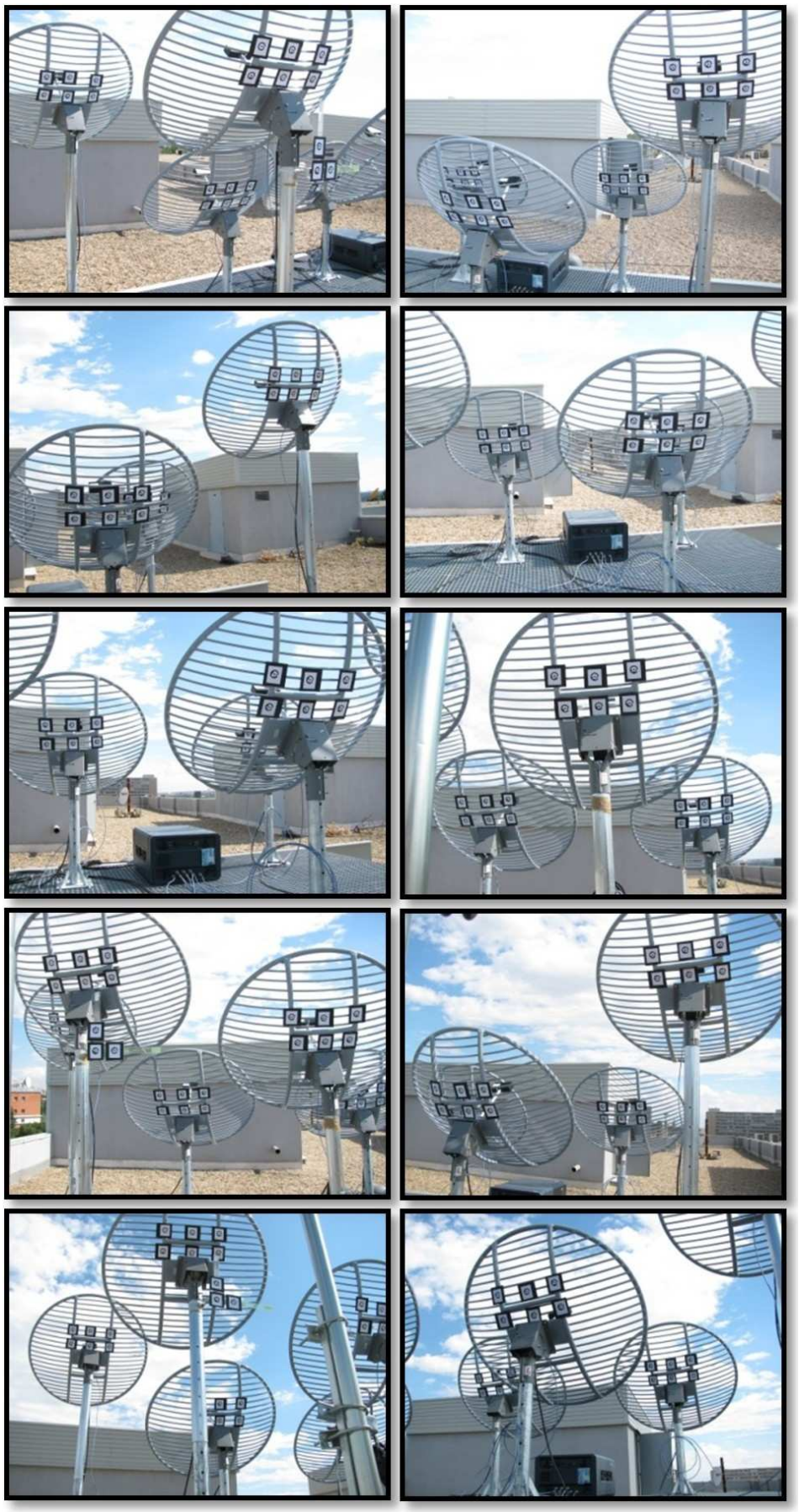

Ilustración 87. Serie de diez capturas para generar el modelo 3D del array de antenas.

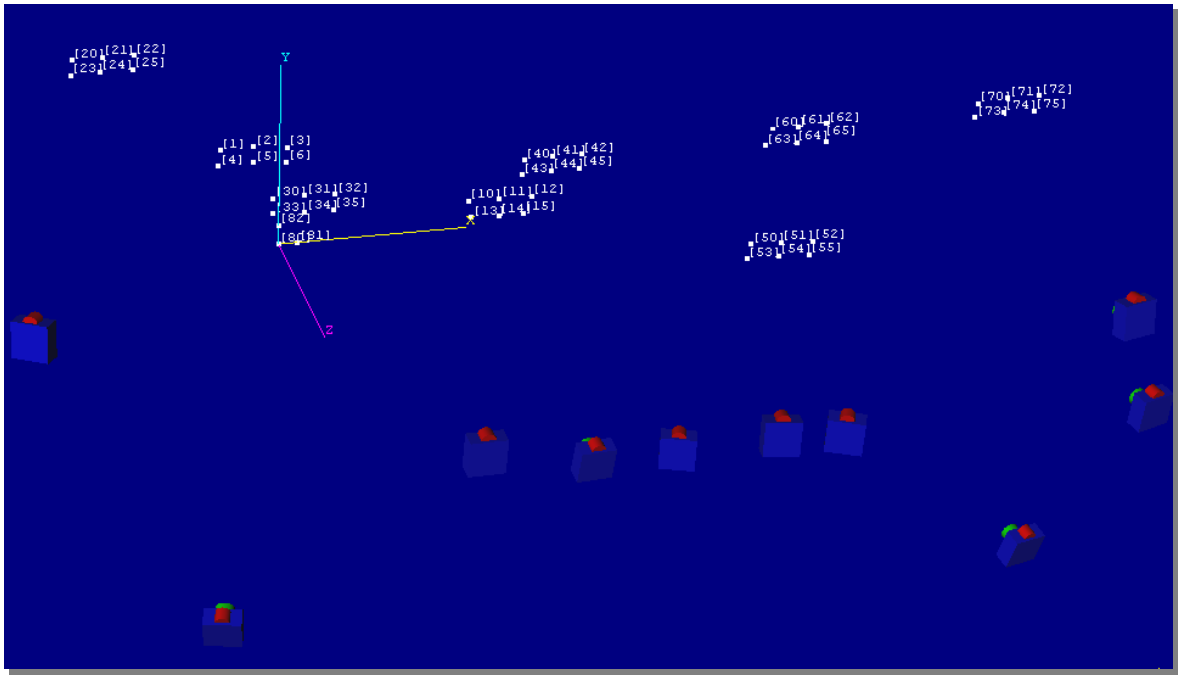

Ilustración 88. Vista lateral izquierda del modelo 3D del array de antenas.

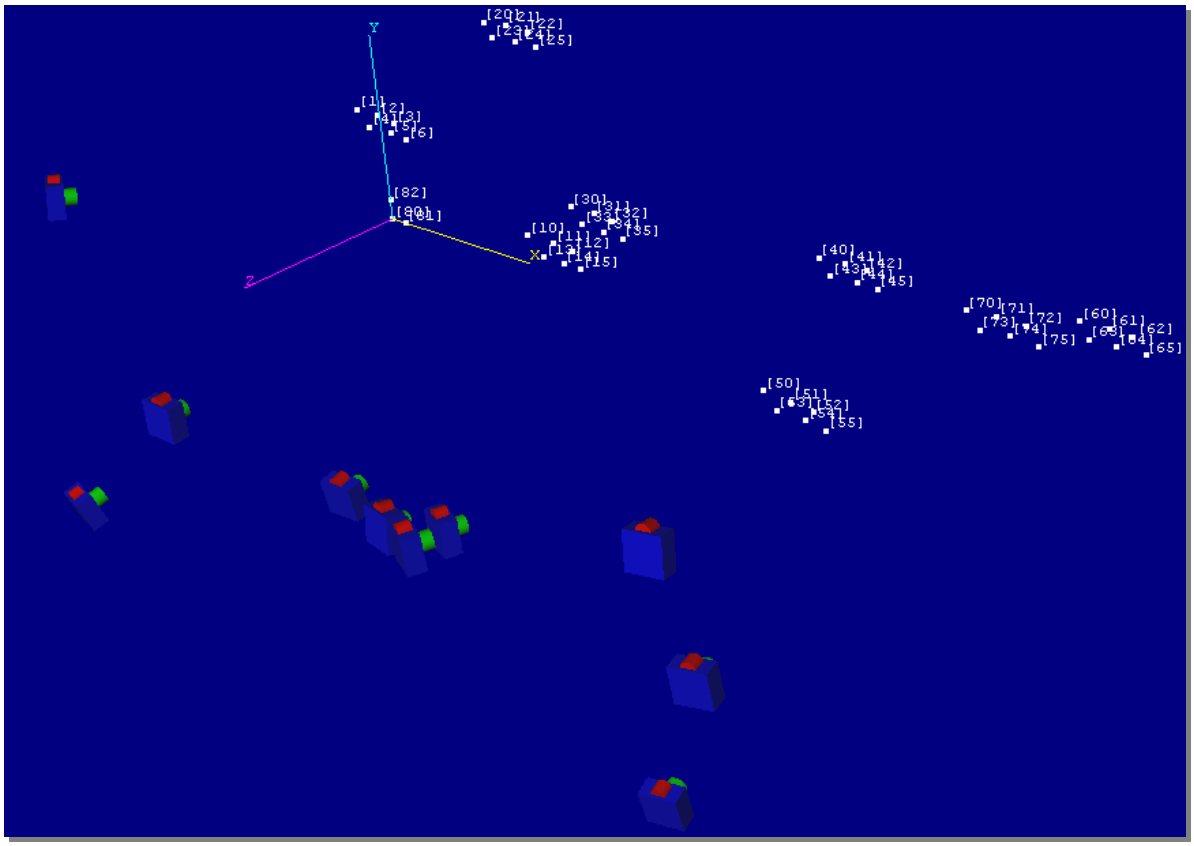

Ilustración 89. Vista lateral derecha del modelo 3D del array de antenas.

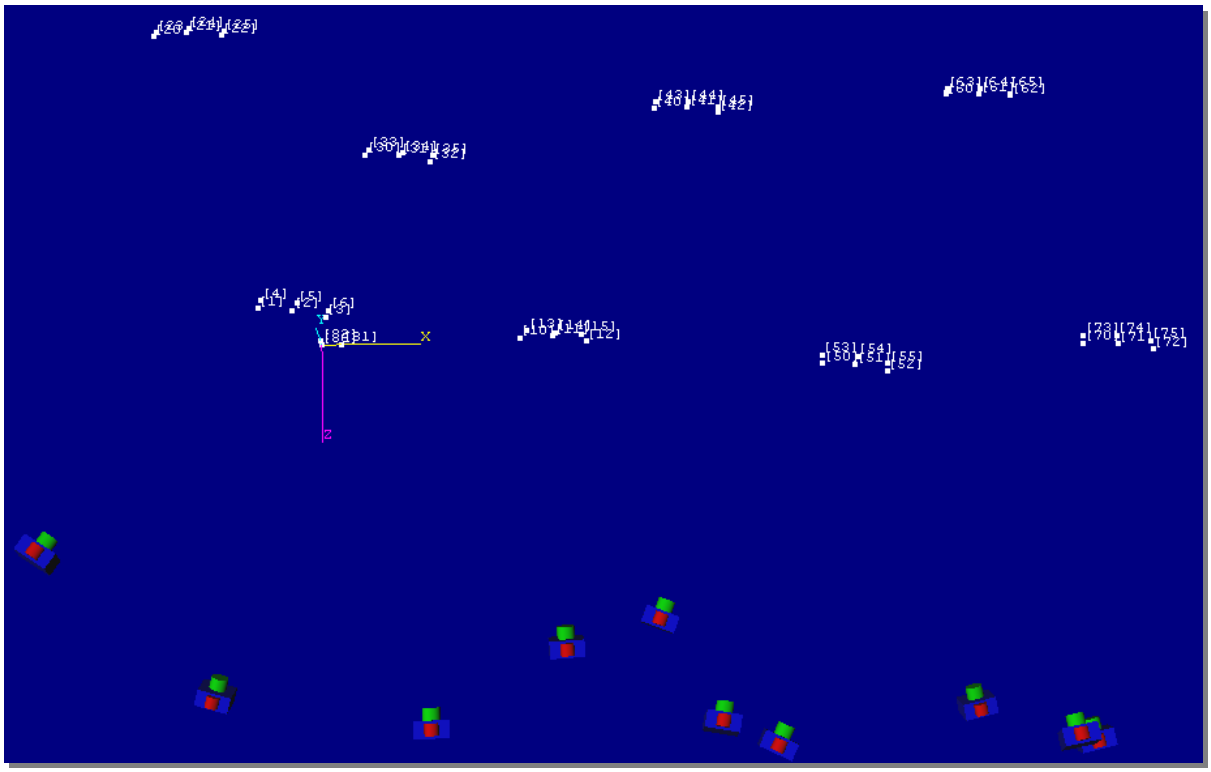

Ilustración 90. Vista superior del modelo 3D del array de antenas.

Tabla 4. Puntos XYZ obtenidos por el modelo 3D del array de 8 antenas.

Punto 3D	Antena	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)
1	1	-30,29	55,61	-11,93
2	1	-11,97	56,53	-9,90
3	1	5,60	56,53	-5,88
4	1	-29,82	43,09	-18,05
5	1	-10,58	44,15	-15,56
6	1	6,74	45,02	-11,26
10	2	111,82	18,24	-3,72
11	2	130,60	17,79	-4,92
13	2	116,34	4,06	-9,67
14	2	132,39	4,64	-9,18
12	2	148,68	19,71	-2,94
15	2	146,54	5,69	-8,87
20	3	-83,85	46,24	-156,56
21	3	-66,76	46,89	-157,86
22	3	-48,93	47,48	-157,52
23	3	-83,76	34,71	-162,80

24	3	-67,00	35,11	-164,71
25	3	-48,60	36,18	-163,63
32	4	61,09	-28,43	-106,19
31	4	43,25	-29,37	-110,23
30	4	24,08	-30,04	-111,70
34	4	44,74	-42,66	-115,11
33	4	25,77	-43,39	-117,98
35	4	61,76	-41,75	-113,07
45	5	218,67	-38,29	-134,43
44	5	202,63	-40,37	-136,73
42	5	217,29	-26,06	-128,24
41	5	200,84	-28,77	-128,08
40	5	183,93	-29,93	-128,77
43	5	185,27	-42,26	-135,77
50	6	277,44	-23,38	4,80
51	6	295,39	-23,59	4,86
52	6	312,78	-22,31	7,81
53	6	278,78	-36,11	-1,90
55	6	314,73	-33,92	1,42
54	6	297,80	-35,50	-1,63
62	7	371,34	-22,75	-147,36
60	7	344,96	-23,79	-146,29
64	7	365,46	-33,02	-153,49
65	7	377,55	-32,88	-153,73
63	7	348,24	-33,25	-154,02
61	7	358,97	-22,92	-148,82
70	8	404,73	57,71	1,51
71	8	422,00	59,80	0,88
72	8	439,62	60,96	2,60
73	8	407,07	46,51	-4,71
74	8	424,13	48,37	-5,57
75	8	441,25	49,03	-4,07
82	Referencia	0,16	11,76	0,00
81	Referencia	10,95	0,00	0,00
80	Referencia	0,00	0,00	0,00

7.8. DISCUSIÓN DE RESULTADOS Y POSIBLES MEJORAS

Como se ha observado en los resultados experimentales ofrecidos, la precisión de los modelos que se consiguió con el prototipo no solo cumplió con la requerida de 1 cm, sino que la mejoró hasta en algo más de un orden de magnitud. Como se explicó en la introducción del capítulo 3, normalmente los errores aceptables debidos a deformaciones gravitatorias sobre la superficie de las antenas de RF se estiman en aproximadamente $\lambda/20$, siendo λ la longitud de las señales. Por ejemplo, si bien en banda S (2.025-2.300 MHz), un error aceptable estaría cercano al centímetro, en banda X (7.145-8.500 MHz), el error permitido estaría alrededor de los 2 mm, por lo que la precisión en la medida debería ser inferior a dicho error.

La precisión alcanzada por el prototipo ha demostrado ser suficiente para banda S, pero está en los límites de los márgenes admisibles de sistemas en banda X, a los que se tiene por objetivo exportar la solución fotogramétrica. En este sentido hay que señalar que mayores precisiones se podrían conseguir con el mismo prototipo utilizado en este proyecto o bien realizando una serie de modificaciones.

Una primera mejora de la resolución del prototipo podría conseguirse mediante el buen calibrado de las cámaras. Calibrar una cámara en fotogrametría consiste en determinar de forma exacta las características reales de cada cámara tales como su distancia focal, relación de aspecto, distorsión de la lente, etc., con el objetivo de utilizar dichos datos, y no los teóricos obtenidos a partir de la información EXIF (EXchangeable Image File) que almacena la cámara en los archivos que contienen las imágenes, en el procesado fotogramétrico.

Otra forma de mejorar la precisión consiste en aumentar el número de imágenes en las que aparece cada patrón. Esta estrategia viene limitada por el número de cámaras que se pueden usar, a su vez limitado por el tiempo de procesado (cuantas más cámaras, más tiempo de procesado, a no ser que se paralelice por completo), y por el coste. Una forma de llevar a cabo esta estrategia sin aumentar necesariamente el número de cámaras es usar cámaras réflex de foco fijo usando lentes con muy grandes ángulos de visión, es decir, lentes gran angular (Ilustración 91). De esta forma, al tener un mayor campo de visión en cada cámara, el número de cámaras se puede reducir para detectar el mismo número de patrones. Si se aumenta, se obtiene una mejora de la precisión a causa del aumento del número de imágenes en las que aparece cada patrón. Utilizar un gran

angular como lente para las fotografías implica el empleo de cámaras réflex, de mayor coste. Sin embargo existen cámaras réflex de Canon (lo que permitiría reutilizar en gran parte el software de captura multicámara) de coste moderado que además proporcionarían más resolución a las imágenes tomadas para el procesado fotogramétrico.

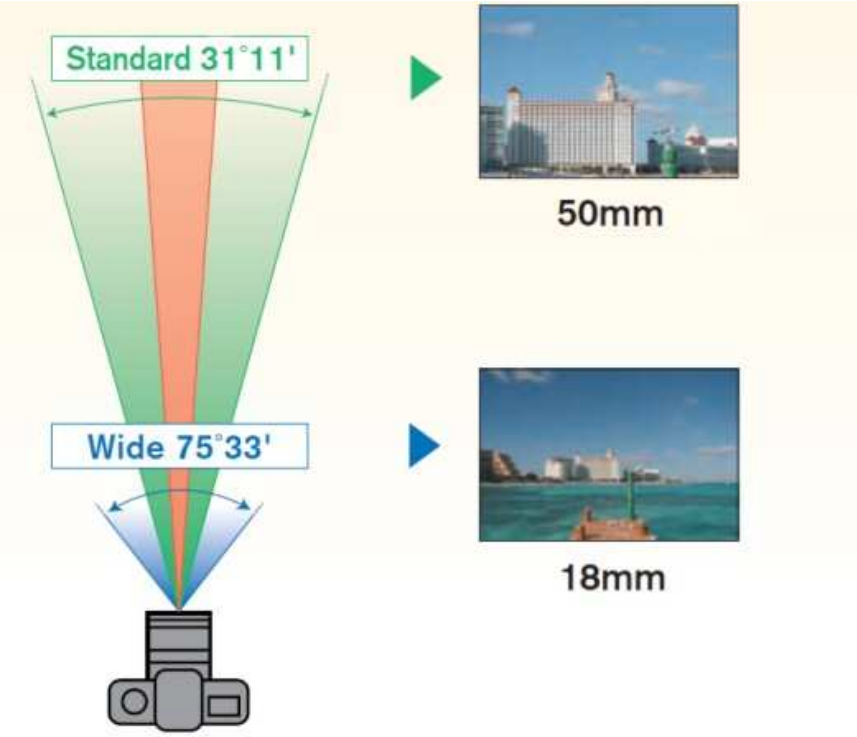

Ilustración 91. Comparación entre una lente estándar (50 mm; arriba) y un gran angular (18 mm; abajo).

La búsqueda de patrones en las imágenes supone el cuello de botella del sistema en cuanto a resolución temporal, ya que se realiza de forma secuencial imagen a imagen. Por ello, los tiempos necesarios para generar cada modelo son altos, distantes de los 10 segundos requeridos inicialmente. Sin embargo, tras estudiar el problema, se han encontrado soluciones y se están llevando a cabo diversas técnicas para implementarlas (en fase de pruebas en el momento de redactar esta memoria).

Existen varias estrategias posibles a seguir para reducir la carga computacional. Una de ellas es delimitar zonas en la imagen en la que buscar los patrones. Dado que las antenas en relación al sistema de fotogrametría permanencen estáticas, ya se trate de un array como el sistema de las pruebas de este trabajo o de un array dispuesto sobre una antena de gran tamaño, es posible definir las zonas de antemano para que automáticamente el software únicamente busque en ellas, siempre observando ciertos

márgenes de error. Sin embargo, esta estrategia por sí sola no puede solucionar la limitación que existe en el sistema en cuanto a velocidad de procesado y tampoco proporciona la escalabilidad necesaria en el sistema. Cuanto mayor número de cámaras se utilicen, más tiempo conlleva la generación de cada modelo, se definan regiones de preferencia o no.

Otra mejora adicional que se pretende implementar en el prototipo es la utilización de patrones codificados retrorreflectantes. Uno de los grandes problemas encontrados durante las campañas de pruebas del prototipo final se debió a la gran variabilidad de la luz ambiental, que modificaba las características de iluminación en las imágenes capturadas. Esta variabilidad implicaba frecuentemente un bajo contraste entre el patrón a detectar y el entorno cercano en la imagen, lo que dificulta y retarda el proceso de reconocimiento de patrones. Una forma simple de resolver este inconveniente se basa en subexponer las capturas de forma que gran parte del área de la imagen sea oscura, a excepción de los patrones, que al estar construídos de un material retrorreflectante, devolverían la luz con la que se iluminaran de forma artificial, mediante flashes o focos sincronizados. La luminosidad de un patrón de este material puede llegar a superar en tres órdenes de magnitud a la luminosidad de un patrón blanco convencional, por lo que la subexposición podría ser extrema con el objetivo de conseguir un gran porcentaje de la imagen totalmente oscuro. De esta forma, el tiempo consumido por el proceso de reconocimiento de patrones podría verse disminuido en gran medida, al simplificarse la búsqueda. Para implementar dicha mejora se ha adquirido, mediante la empresa *WNBC in LA, Inc.*, un juego de 100 patrones retrorreflectantes, codificados según las necesidades de PhotoModeler, de 10,2 mm de diámetro y 8 mm de centro, a un precio de $297,35, que se integrarán en el prototipo una vez se disponga de ellos (al momento de escribir esta memoria no se habían recibido aún).

Como se ha explicado en el apartado anterior, la nueva versión de *PhotoModeler* permitirá el procesado paralelo en determinadas partes del software, especialmente en la búsqueda de patrones, que es la parte crítica. De esta manera se han demostrado mejoras en la velocidad del prototipo desrrollado de aproximadamente tantas veces como núcleos sean utilizados por el procesador de forma concurrente. El uso de una estación de trabajo con un elevado número de núcleos (por ejemplo, ocho), junto a las mayores velocidades de reloj de los mismos, permitiría grandes mejoras en la velocidad del

sistema, que sumadas a la estrategia de la delimitación de regiones y del empleo de patrones codificados retrorreflectantes, podría ser suficiente para satisfacer el requerimiento de los 10 segundos.

Aún así, podría no ser suficiente en el caso de que el número de cámaras sea muy superior al número de núcleos del procesador. En ese caso la única solución para optimizar al máximo el problema sería paralelizar por completo el proceso. Para ello, se contactó con *EOS Systems* y se llegó a un acuerdo para el desarrollo de una subrutina que facilitara el control mediante comunicación DDE de dicho software para permitir implementar una estrategia que facilitaría un procesado totalmente concurrente. La forma más simple de hacer esto, dadas las características de *PhotoModeler*, se identificó como separar el proceso de búsqueda de patrones en tantas imágenes como cámaras haya y luego unirlo para dar lugar a un proyecto único en el que todas las imágenes con los patrones identificados se relacionan entre sí para generar el modelo final.

La técnica descrita la soportaría nativamente *PhotoModeler* sin necesidad de más desarrollo que el del comando para unir proyectos, y optimizaría al máximo la velocidad de procesado a costa de aumentar la complejidad del sistema hardware, porque precisaría tantos núcleos como imágenes a procesar en cada momento. En el peor caso de un sistema de un único procesador, setraduce en tantos ordenadores como cámaras. Sin embargo, aprovechando la concurrencia de la versión 7 de *PhotoModeler* y la disponibilidad de procesadores de varios núcleos en el mercado, un sistema de hasta 16 cámaras podría ser procesado de forma totalmente paralela por dos estaciones de trabajo de 8 núcleos. De esta manera, la velocidad de procesado del sistema de fotogrametría sería totalmente escalable (independizando el número de cámaras del tiempo de procesado), si bien sería necesario un trabajo considerable de programación para sincronizar y comunicar los diferentes procesadores/ordenadores en la generación de cada modelo.

8. Extensión del prototipo a una antena de 15 metros

En este capítulo se presenta una propuesta para trasladar la solución fotogramétrica demostrada con el prototipo desarrollado en este proyecto a la antena parabólica de 15 metros de la red ESTRACK de la ESA, situada en las instalaciones de Villafranca, Madrid. La justificación de esta propuesta se basa en el interés expresado por INSA en dar continuidad al presente proyecto a raíz de los resultados obtenidos en el proyecto CAMSA, que se han presentado en esta tesis de Máster.

Dado que el proyecto se planteó desde su inicio como un demostrador con el objetivo de probar la tecnología necesaria para implementar con éxito algoritmos DoA como soporte a una antena móvil de 15 metros, en todo momento el prototipo se diseñó con dicho objetivo presente. Como consecuencia, en su mayor parte, es posible

reutilizar la mayor parte de conceptos de diseño llevados a cabo en dicho desarrollo. No obstante, en el diseño e implementación del mismo se presentaron dificultades inexistentes en el caso de una antena de 15 metros, sobre todo debido a la irregular topología del array de antenas desplegado en las instalaciones de la UPM. La consecuencia más directa de esta situación fue la necesidad de llevar a cabo una puesta en estación del prototipo basada en un proceso de prueba y error, más que en la realización de un diseño previo, como hubiera sido deseable.

En el caso de la antena de 15 metros es posible realizar un diseño más sistemático, que traiga consigo no solo un despliegue más eficiente del sistema en las instalaciones finales, sino también la posibilidad de llevar a cabo una configuración óptima del sistema fotogramétrico, de acuerdo con la topología del array de antenas, que en este caso se distribuirá de una manera totalmente homogénea y regular. Además, la posibilidad de realizar diseños previos a su instalación permite el poder ofrecer varias alternativas de diseño, que contemplen diversas posibilidades de configuración tanto del array de antenas, cuyo diseño aún no es definitivo, como del sistema de cámaras.

A continuación se ofrece la discusión de dichos diseños. Así mismo, en este capítulo se describen otras mejoras y modificaciones necesarias para cumplir con los requisitos del sistema final, a los que además se añaden algunos específicos de la antena de 15 metros. Por último, se proponen alternativas para dotar de la robustez necesaria a un sistema cuyo uso final está orientado a la fase LEOP y se presenta un presupuesto que contempla la ejecución de dicho proyecto en un plazo de 1,5 años.

8.1. SISTEMA DE CAPTURA FOTOGRÁFICA

En el diseño del prototipo implementado en este proyecto se consideró utilizar cámaras compactas como las Canon SX110 IS con el objetivo de mantener el coste bajo a la vez que se cumplían los requisitos exigidos para la solución fotogramétrica. En el caso de la antena de 15 metros, si bien el bajo coste sigue siendo una importante cualidad a mantener, las exigencias en cuanto al sistema de captura son superiores, por lo que se hace inviable reutilizar las cámaras empleadas en el demostrador. En este caso es imprescindible un salto a cámaras DSLR (*Digital Single Lens Reflex*) o réflex digitales, debido a varias razones:

- Es la única alternativa para automatizar la captura simultánea de imágenes bajo un entorno de desarrollo software que permita controlar las cámaras, dado que todos los fabricantes han ido abandonando dichos entornos en cámaras compactas, para dar soporte únicamente a réflex. No obstante, el entorno de programación de Canon para cámaras réflex guarda numerosas similitudes con el empleado en este proyecto para la automatización de las cámaras compactas, por lo que es posible reutilizar gran parte de la solución software desarrollada, tanto desde el punto de vista conceptual, como desde puramente el de sintaxis de las primitivas disponibles por el entorno de desarrollo.

- Representa la única opción para utilizar distancias focales fijas, aspecto fundamental en el uso de cámaras calibradas. Emplear cámaras previamente bien calibradas permite utilizar los parámetros de orientación interior en el procesado fotogramétrico, lo que proporciona un aumento de la precisión de los modelos y el hecho de usar focales fijas asegura que la calibración es válida durante la vida de la cámara, eliminando el riesgo de la descalibración debida a diferencias en los parámetros del objetivo por motivos mecánicos, aspecto común en lentes de tipo zoom variable. La naturaleza de las cámaras réflex de objetivos intercambiables las hace idóneas para el empleo de objetivos de focales fijas.

- Es la única forma de utilizar objetivos gran angular con focales fijas. Las cortas distancias focales que proporciona un gran angular, sólo disponibles en objetivos para cámaras réflex si se precisa una focal única, permiten a las cámaras realizar las capturas con mayores campos de visión (FOV). En una antena del tamaño y forma de la de 15 metros de la ESA, la capacidad para captar grandes ángulos se hace imprescindible para poder relacionar patrones codificados situados a distancias y ángulos de separación considerables, y además podría permitir el empleo de un menor número de cámaras, lo que redundaría en un importante ahorro de costes y un aumento de la velocidad de procesado de los modelos.

- Las cámaras réflex son las que incorporan los sensores de mayores resoluciones disponibles actualmente. Un gran número de píxeles permitiría alcanzar, en un sistema en el que la solución fotogramétrica sea robusta y estable, una mayor precisión en los modelos tridimensionales obtenidos. Esta característica es importante a la hora de exportar el sistema de fotogrametría como asistencia a

los algoritmos DoA en banda X (y no solo en banda S donde se admiten mayores errores), en cuyo caso se exigen precisiones submilimétricas.

- El mayor tamaño de los sensores que incorporan las cámaras réflex, unido a unos procesadores más avanzados, hacen que el tratamiento del ruido cuando se utilizan niveles altos de sensibilidad (ISO), presente resultados cualitativamente muy superiores a los de cámaras compactas. La capacidad para usar imágenes con altos valores de ISO, a altas sensibilidades, proporciona la ventaja de poder trabajar en condiciones de muy baja luminosidad.

Teniendo en cuenta todo lo anterior, se proponen las siguientes cámaras:

- Canon EOS 550D (~700€). Esta cámara es el último modelo lanzado por Canon de la serie réflex EOS, por lo que debería tener una vida comercial larga y su futura disponibilidad, en caso de necesidad de escalar el sistema, está asegurada para un largo periodo de tiempo. Sustituye a la también reciente y reconocida 500D y al sistema de fotogrametría aportaría, entre otras cosas, las ventajas de una resolución excelente (18 Megapíxeles) teniendo en cuenta el coste, y un muy buen tratamiento de ruido, gracias al nuevo procesador DIGIC IV.
- Canon EOS 5D Mark II (~2.000€). Es la cámara más avanzada de Canon actualmente. También cuenta con el procesador DIGIC IV y presenta una resolución de sensor extrema (21,1 Megapíxeles) y una sensibilidad muy superior. Además cuenta con un sensor de formato completo, con lo que no se aplica el factor de corrección de 1,6× (necesario por ejemplo en el caso de la 550D), lo que resulta en un aprovechamiento total de la longitud focal nominal de la lente, es decir, mayor campo de visión para el mismo objetivo.

La razón de proponer dos cámaras distintas, en lugar de una sola, se explica en el apartado 8.5. En cuanto al objetivo para las cámaras, se propone el Canon 15 mm f/2,8 Fisheye EF (~700€), que proporciona altos campos de visión (calculados en el siguiente apartado) gracias a su longitud focal de gran angular ojo de pez (15 mm). Además, su gran luminosidad (f/2,8) permite la operación con ambientes de iluminación más tenues.

8.2. CÁLCULO DEL CAMPO DE VISIÓN

Para llevar a cabo un diseño para la topología del sistema fotogramétrico, que se ofrece en el capítulo 8.3, es imprescindible conocer el campo de visión de las cámaras utilizadas. Para calcularlo, basándose en la geometría del sistema óptico de la cámara, reflejada en la Ilustración 92, y mediante trigonometría básica, se puede deducir la siguiente ecuación:

$$FOV = \alpha = 2\arctan\left(\frac{d}{2F\cdot\left(1+\frac{S_2}{S_1}\right)}\right) \approx 2\arctan\left(\frac{d}{2F}\right) \qquad \textbf{(8-1)}$$

donde d es el tamaño del sensor y F es la longitud focal. La simplificación que se lleva a cabo se basa en asumir que se enfoca al infinito ($S_1 >> S_2$), suposición válida siempre que no se aplique a fotografía macro de distancias muy cercanas, por lo que el cociente entre S_2 y S_1 es igual a cero.

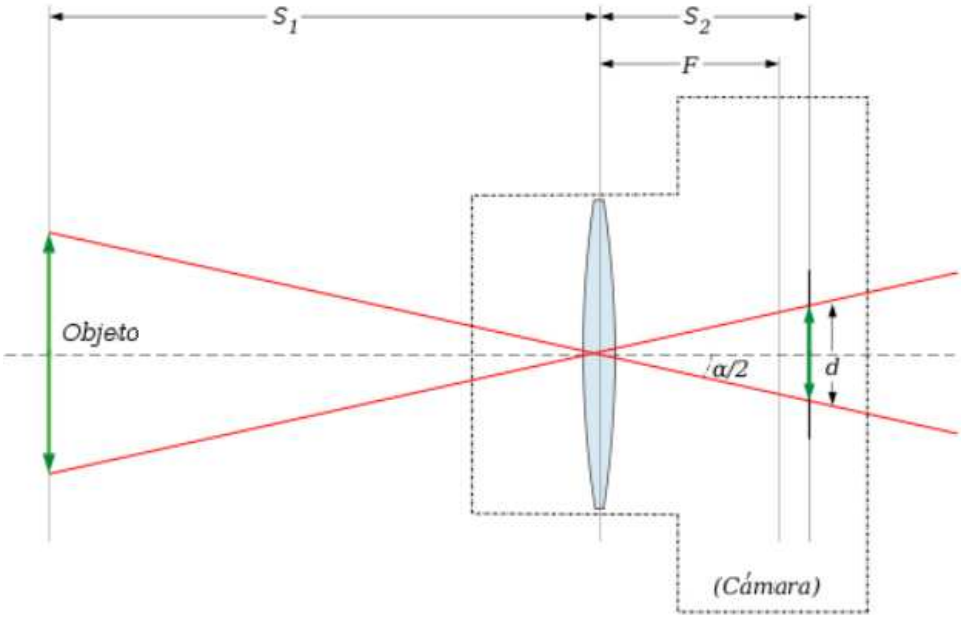

Ilustración 92. Cálculo del campo de visión de una cámara.

Basándose en la ecuación del campo de visión vista y en las características de las cámaras y lente propuestas en el apartado anterior, se obtienen los resultados mostrados en la Tabla 5.

Tabla 5. Cálculo del FOV para la Canon EOS 550D y 5D Mark II.

	Tamaño de sensor (mm)	Distancia focal (mm)	FOV horizontal (grados)
Canon EOS 550D	36,0 × 24,0	15	73,25
Canon EOS 5D Mark II	22,3 × 14,9	15	100,39

8.3. DIFERENTES TOPOLOGÍAS

En la Ilustración 93 se muestra la antena VIL-1 de la ESA, donde se planea instalar el array de antenas a calibrar.

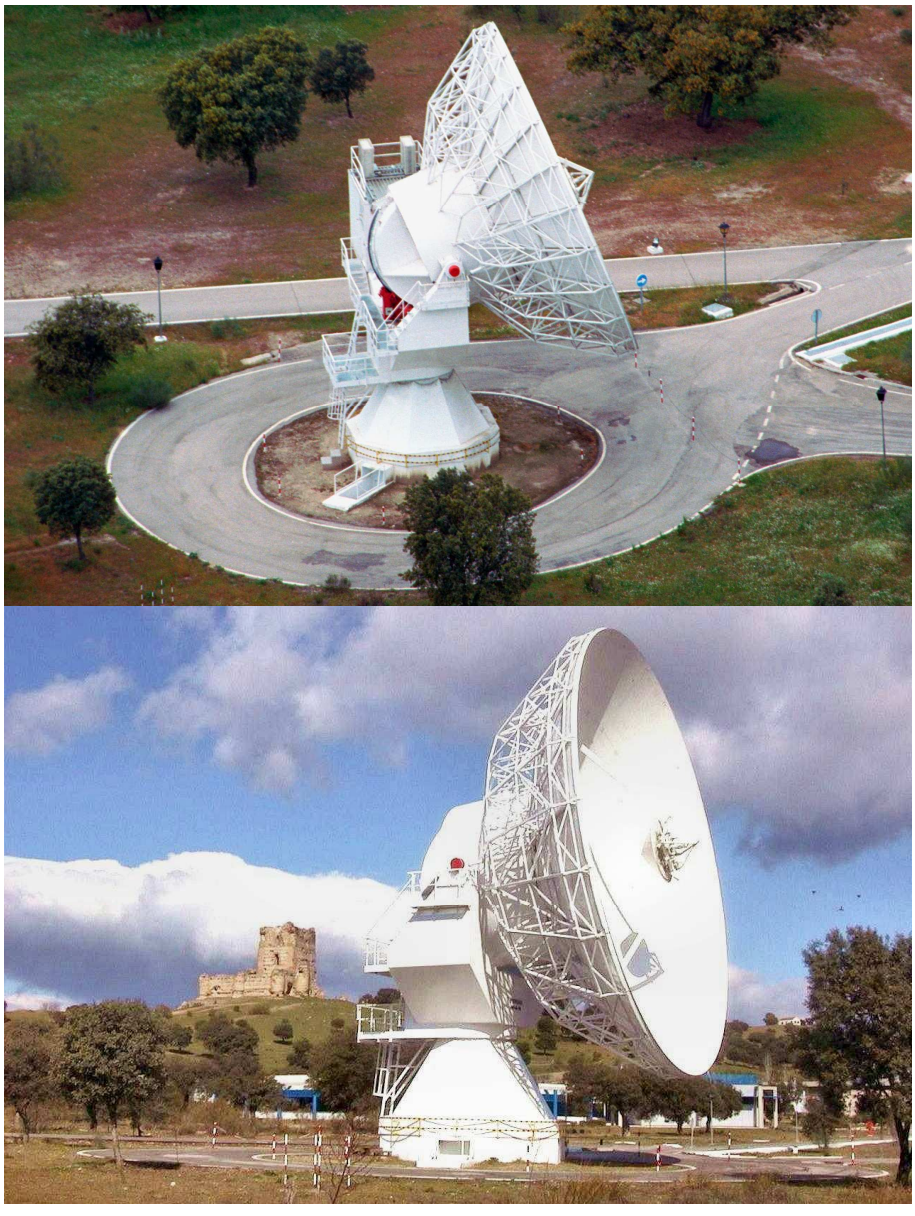

Ilustración 93. Antena VIL-1 de 15 metros de la red ESTRACK en Villafranca, Madrid.

De las fotografías de la Ilustración 93 es posible deducir gráficamente las proporciones de la antena, como se muestra en la Ilustración 94, y distribuir equidistantemente ocho antenas sobre el semicírculo superior de la antena VIL-1. Inicialmente se tiene planeado instalar un array de ocho antenas, tal como se muestra en el modelo, si bien no se descarta el uso de 16 antenas, en caso de que fuera necesario mejorar el rendimiento de los algoritmos DoA. Sea cual sea el tamaño del array, el diseño fotogramétrico no varía, ya que es posible relacionar unas antenas con otras mediante patrones codificados situados en posiciones intermedias.

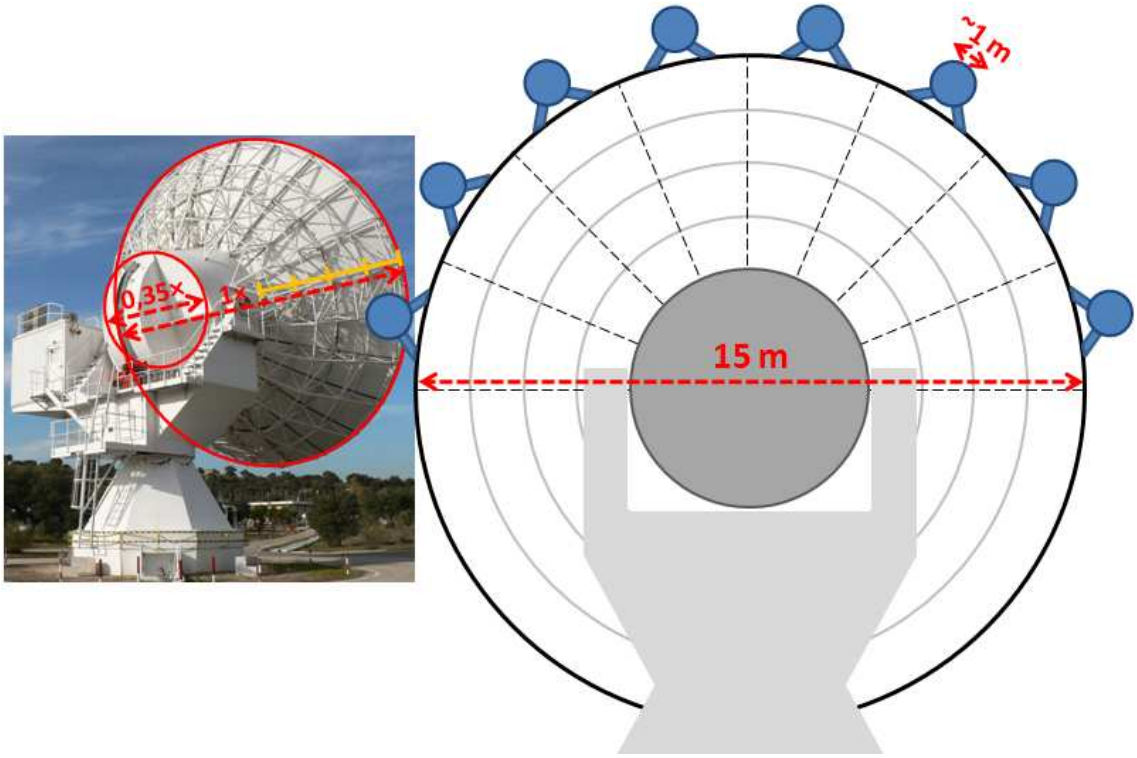

Ilustración 94. Modelo gráfico de la antena VIL-1.

Como se puede observar en la Ilustración 93, la estructura trasera de la antena VIL-1 no permite colocar las cámaras sobre la parte circular central, por ser completamente lisa, y tampoco sobre el primer círculo concéntrico porque el segundo supondría un obstáculo que podría impedir a las cámaras ver los patrones correctamente (esto puede observarse en las fotografías de la Ilustración 93). Por ello, y a falta de una inspección más exhaustiva sobre el terreno, se propone instalar el sistema sobre el segundo círculo concéntrico. Teniendo en cuenta que se usan cámaras Canon EOS 550D con objetivos de 15 mm, que dan lugar a unos a FOV nominales de 73,25º, en la Ilustración 95 y en la Ilustración 96 se presentan dos posibles soluciones para la distribución y orientación de un total de 9 cámaras.

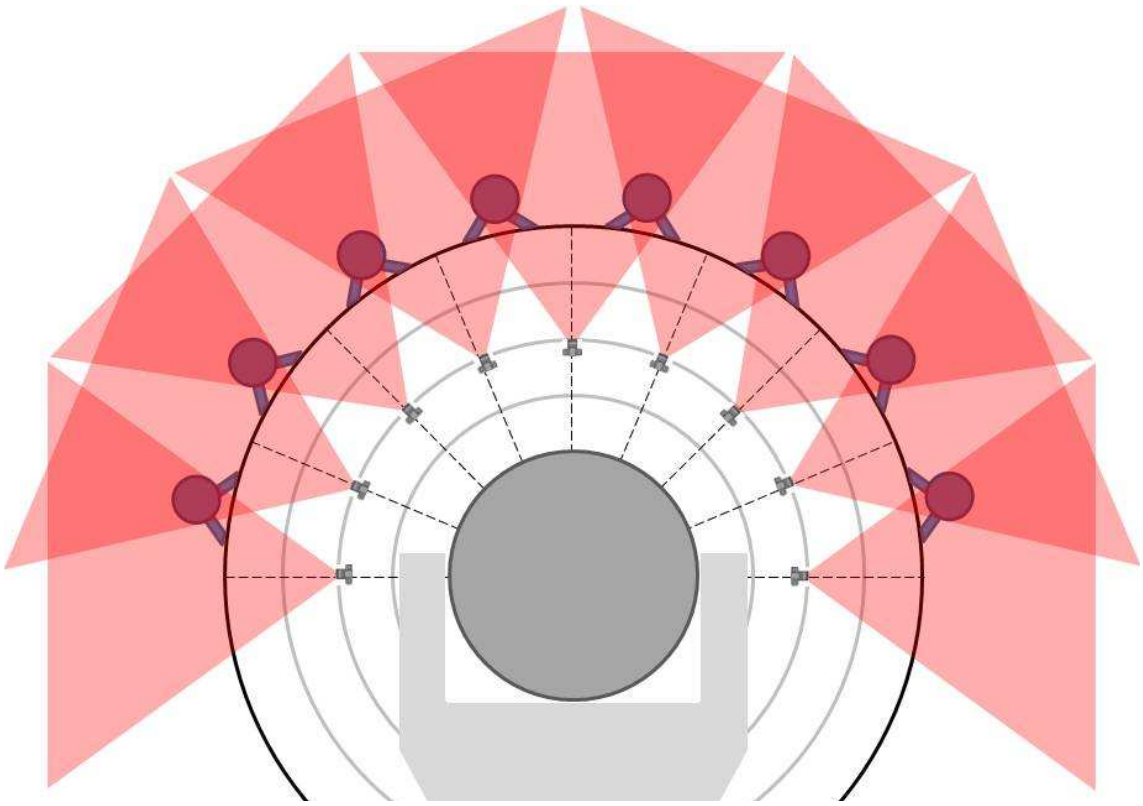

Ilustración 95. Solución fotogramétrica débil usando Canon 550D con objetivos de 15mm.

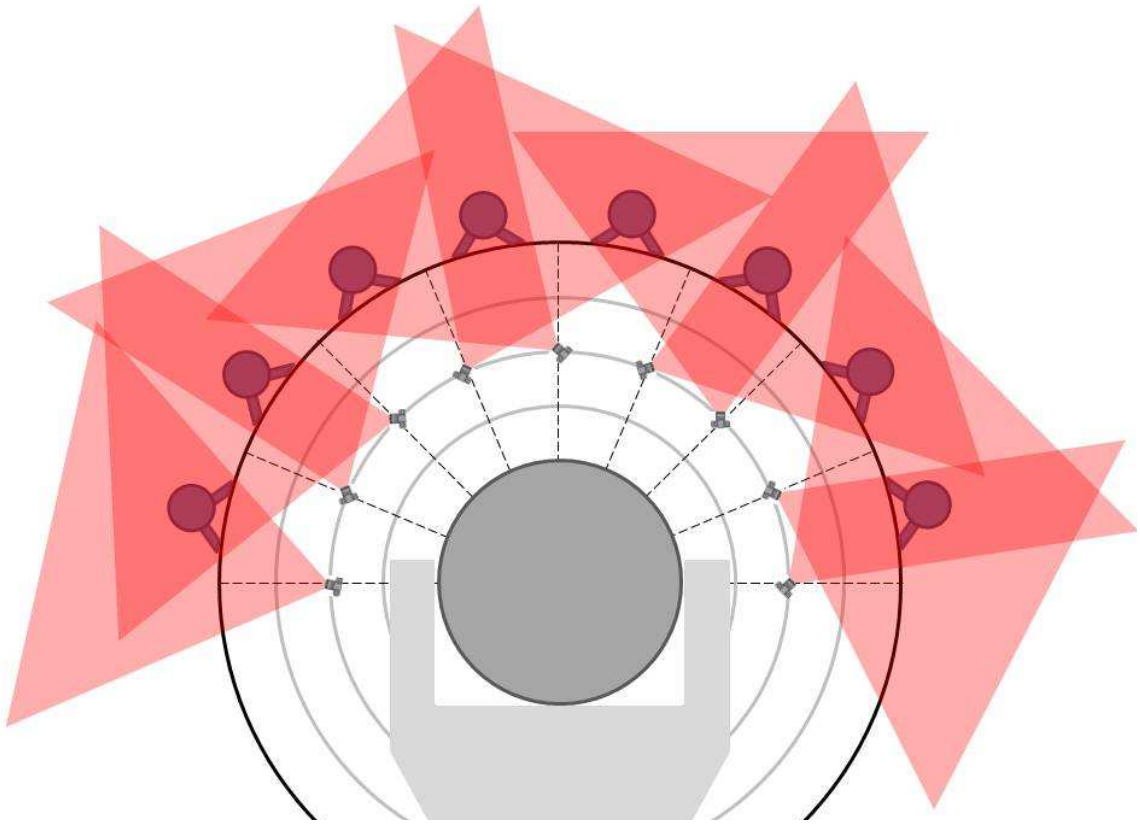

Ilustración 96. Solución fotogramétrica robusta usando Canon 550D con objetivos de 15mm.

Pese a que la geometría de la Ilustración 95 pudiera parecer más lógica por la geometría regular y simétrica de la misma, atendiendo a requisitos estrictamente fotogramétricos, resulta ser una solución débil porque los ángulos de visión entre pares de cámaras son bajos, casi paralelos. Los campos de visión se solapan levemente, y los patrones situados en las antenas aparecerán mayoritariamente situados en los extremos de las imágenes y con una fuerte inclinación. En cambio, en la geometría propuesta en la Ilustración 96 los ángulos formados por las intersecciones de los campos de visión son cercanos a 90º, que es la orientación ideal para un sistema fotogramétrico, por lo que presenta una solución mucho más robusta, haciendo uso del mismo número de cámaras y de las mismas posiciones.

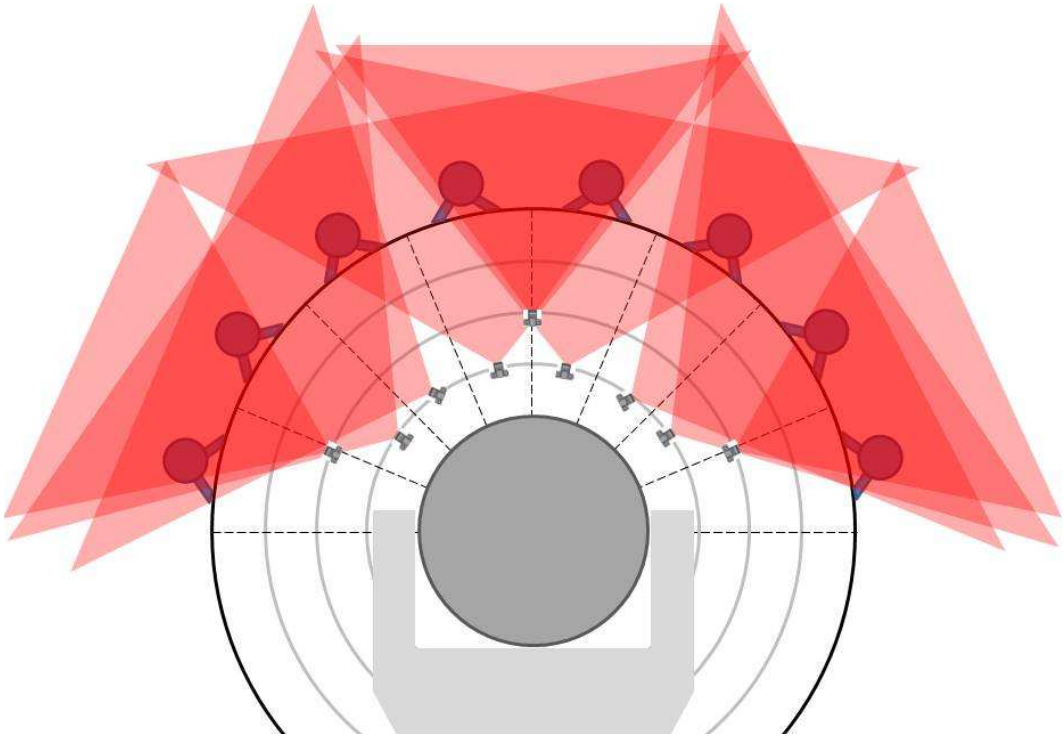

Ilustración 97. Solución fotogramétrica mixta usando Canon 550D y 5D Mark II con objetivos de 15mm.

En la Ilustración 97 se propone otra distribución posible de distribución de cámaras con el objetivo de maximizar la precisión del modelo 3D, debido a que cada antena es vista por tres cámaras simultáneamente. Para hacer viable dicha distribución, si el segundo círculo concéntrico de la antena de 15 metros supusiera un obstáculo en la línea de visión de las cámaras que se han situado en el primero, deberían usarse monturas elevadoras para salvar dicha obstrucción. En esta solución se han empleado dos tipos de cámaras distintas, con el objetivo de aprovechar el mayor FOV de la 5D Mark II, debido a su sensor de formato completo, para cubrir un número mayor de antenas. En total se

han empleado seis Canon 5D Mark II (situadas en el primer círculo, interior) y tres Canon 550D (en el segundo círculo), todas con objetivos de 15 mm. Soluciones similares, con el objetivo de disminuir costes, podrían conseguirse utilizando únicamente Canon 550D con objetivos de menores focales, a costa de mayor dificultad en la calibración de la cámara.

8.4. MEJORAS EN EL PROCESADO FOTOGRAMÉTRICO

Como se vió en el capítulo 7, el cuello de botella del prototipo desarrollado en las pruebas que se llevaron a cabo resultó ser el tiempo de procesado. La velocidad final requerida sigue siendo de diez segundos en la actualización de los modelos 3D, para lo cual es necesario un salto cualitativo que permita cumplir con dicho requisito, ya que además en este caso las imágenes serían de mayor resolución. Dada la magnitud del aumento de velocidad necesario, se hace imprescindible atacar el problema desde varios ángulos. En este apartado se proponen soluciones que no operarán de forma independiente, sino cooperativa, para dar respuesta al problema de la velocidad de procesado.

El enfoque más evidente es el de la solución puramente hardware: cuanto más exigente es la carga computacional que se precisa llevar a cabo, la capacidad de procesamiento disponible debería ser tanto mayor. Desde este punto de vista, se propone la sustitución del sistema de procesamiento, que en el caso del prototipo lo constituía un ordenador portátil convencional y en el sistema final debería ser sustituído por una estación de trabajo profesional. Este tipo de sistemas proporcionan la posibilidad de utilizar multiprocesadores multinúcleo y además ofrecen unas prestaciones no disponibles en los equipos de usuario. Como se explica a continuación, más que la frecuencia de reloj de los núcleos, si bien es de gran importancia, el punto clave, que relaciona esta solución con las siguientes, es la enorme capacidad de procesamiento paralelo que proporcionan las estaciones de trabajo. El hecho de contar en un mismo sistema con multitud de núcleos simultáneos, con la posibilidad de ejecutar una gran cantidad de hilos de ejecución a la vez, es la pieza clave para aumentar la velocidad en el proceso de búsqueda de patrones, que en el prototipo, por limitaciones del software de fotogrametría, funcionaba de un modo serie. En este diseño se propone una estación de trabajo tipo HP-Z800 FM017UT (~7.000€), que proporciona doble procesador

Intel® Xeon® Quad-Core X5677 de cuatro núcleos cada uno, a 3,46 GHz y 12 MB de memoria caché.

Las limitaciones en el software de fotogrametría a las que se hacen referencia en el párrafo anterior se refieren a la incapacidad de *PhotoModeler 6* de llevar a cabo la búsqueda de patrones de forma concurrente en un proyecto con múltiples imágenes. Si bien ya se ha solucionado en parte este problema con la nueva versión de *PhotoModeler*, para un número de cámaras mayor al número de núcleos del sistema, como es el caso de cualquiera de los diseños realizados, podría no ser suficiente con esta solución.

A continuación se propone una técnica alternativa que haría del sistema de procesamiento fotogramétrico uno totalmente concurrente si ello fuera necesario, en el que cualquier mejora temporal tendría que referirse a aspectos puramente hardware. Dado que el proceso de automarcado es un proceso independiente para cada imagen, idealmente debería realizarse de forma totalmente paralela, de manera que el tiempo consumido por este proceso se dividiera exactamente entre el número de imágenes a procesar. Para ello, se ha contactado con *EOS Systems*, y se ha llegado a un acuerdo para desarrollar ad hoc un comando DDE con el que tener la capacidad de programar dicha funcionalidad desde el software automático desarrollado en este proyecto. La función principal de este comando DDE sería la de relacionar diferentes proyectos, de forma que el software de automatización crearía tantos proyectos como imágenes existan, para desde ellos realizar el reconocimiento de patrones de forma paralela lanzando a la vez tantos hilos de ejecución como imágenes. De esta forma la limitación de núcleos en un mismo sistema se podría suplir dividiendo el proyecto en más de un ordenador, en el que además las búsquedas se realizan en paralelo. Esta solución ofrece la posibilidad de paralelizar por completo el proceso, ya que en el peor de los casos, cada proyecto podría ser creado en ordenadores diferentes, bien con cámaras independientes conectadas a cada uno, o bien con el sistema de captura diseñado en este proyecto y distribuyendo las cámaras de forma que cada ordenador procese tantas cámaras como núcleos tenga. Así, con dos estaciones de trabajo de ocho núcleos podría implementarse un sistema de hasta 16 cámaras, que debería ser suficiente en todos los casos. Si bien esta opción totalmente concurrente, precisaría de una labor adicional de programación para llevar a cabo las comunicaciones entre los diferentes ordenadores de forma que no ralentizara el proceso.

8.5. PROPUESTA PARA DISPONIBILIDAD DEL 100%

En la implementación del prototipo desarrollado en este proyecto se identificó una limitación de su operación en modo automático que afectaría a la solución ofrecida en tiempo real a los algoritmos DoA. Dicha limitación se refiere a la posibilidad de ofrecer modelos que no cumplan con la precisión requerida, que no lleguen al 100% de identificación de patrones codificados, o, en el peor de los casos, que no ofrezcan un modelo 3D aceptable en uno de los ciclos del funcionamiento automático. Estas anomalías pueden ser debidas a factores ambientales como alta variabilidad en la iluminación o presencia de gotas de lluvia que impidan el reconocimiento de patrones, o cualquier otro fenómeno esporádico que impida la correcta captura de las imágenes.

Teniendo en cuenta que el sistema fotogramétrico debería proporcionar asistencia a los algoritmos DoA, orientados a funcionar durante la fase de lanzamiento y órbita temprana (LEOP), que exige una disponibilidad del 100% y una corrección total en los resultados de dichos algoritmos, la limitación expuesta en el párrafo anterior es inasumible durante la fase de explotación del sistema. Para solucionar este problema se propone un funcionamiento dual del sistema de fotogrametría con el objetivo de proporcionar siempre una respuesta correcta. La solución propuesta se basa en realizar una calibración total previa de la antena de 15 metros para todo el rango de posibles inclinaciones y orientaciones, que a su vez contemplaría todos los casos de deformaciones gravitatorias que se podrían dar. En dicha calibración se emplearía una única cámara Canon EOS Mark II, que aseguraría los mejores resultados, y se realizaría a mano (no automáticamente) y *offline*, es decir, cuando el sistema no estuviera en funcionamiento, tomando un elevado número de fotografías redundantes, durante una campaña de medidas al modo descrito en los trabajos presentados en el capítulo 3 sobre el estado del arte. Una vez finalizado el proceso de captura, se llevaría a cabo un proceso de selección de imágenes con el objetivo de obtener, para cada orientación e inclinación, un modelo optimizado según la máxima precisión posible.

Disponiendo de la solución obtenida por la calibración total previa, se incluiría en el sistema final un decisor (Ilustración 98) basado en evaluar en cada ciclo los modelos generados automáticamente para, en el caso de que no cumplan con los requerimientos, usar los modelos generados en la calibración previa, ya sea usando el modelo más cercano al caso actual o mediante un sistema de interpolación de

resultados. Adicionalmente sería aconsejable realizar varias calibraciones totales en ciertos intervalos de tiempo para comprobar la vigencia de los modelos generados inicialmente, y en caso necesario programar campañas de calibraciones totales cada cierto tiempo para mantener los modelos fieles al estado actual de la antena. De esta forma, se asegura un funcionamiento continuo, con disponibilidad total y una respuesta siempre correcta, sin errores, dentro de los requerimientos.

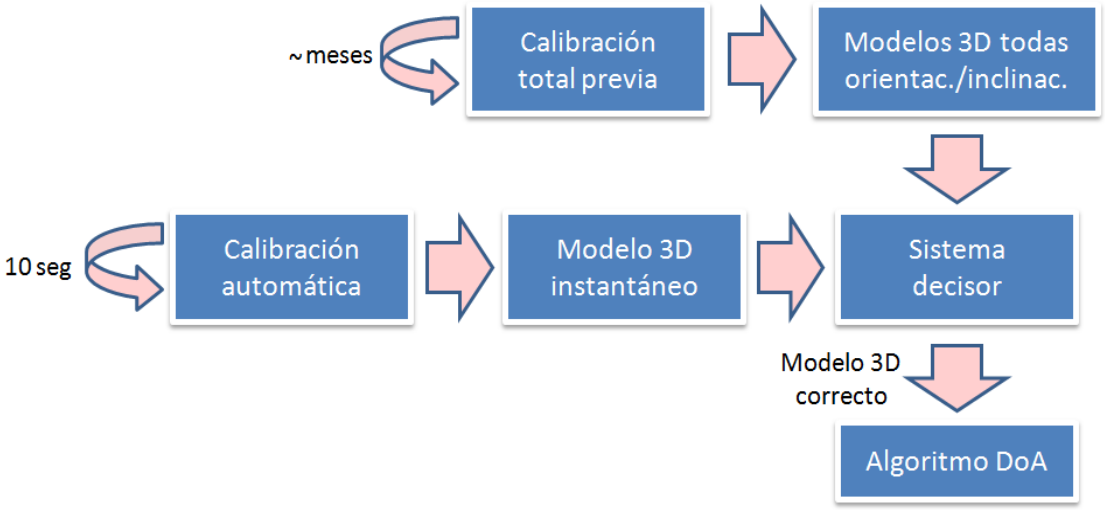

Ilustración 98. Diagrama de bloques del sistema final para disponibilidad 100%.

8.6. PRESUPUESTO

En este apartado se ofrece un presupuesto aproximado relativo a la partida de materiales necesarios para desarrollar las dos soluciones fotogramétricas propuestas en el apartado 8.3 para la antena de 15 metros de la ESA situada en Villafranca, Madrid. Nótese que, si bien el coste es varias veces superior al del prototipo desarrollado, permanece más de un orden de magnitud por debajo de la alternativa *V-Stars*.

Tabla 6. Presupuesto para la propuesta 1.

	Coste unidad	Unidades	Total
Estación de trabajo HP Z800	6.980€	1	6.980€
Canon EOS 550D	690€	9	6.210€
Canon 15 mm f/2,8 Fisheye EF	700€	9	6.300€
Canon EOS 5D Mark II	1.960€	1	1.960€
Canon 20 mm f/2,8 USM EF	470€	1	470€
Adaptador Canon ACK-E8	75€	9	675€
Extensiones USB fibra óptica	260€	9	2.340€
Protección para intemperie	50€	9	450€
Anclajes cámara-antena	1.000€	1	1.000€
Total			26.385€

Tabla 7. Presupuesto para la propuesta 2.

	Coste unidad	Unidades	Total
Estación de trabajo HP Z800	6.980€	1	6.980€
Canon EOS 550D	690€	3	2.070€
Canon 15 mm f/2,8 Fisheye EF	700€	3	2.100€
Canon EOS 5D Mark II	1.960€	6	11.760€
Canon 20 mm f/2,8 USM EF	470€	6	2.820€
Adaptador Canon ACK-E8	75€	9	675€
Extensiones USB fibra óptica	260€	9	2.340€
Protección para intemperie	50€	9	450€
Anclajes cámara-antena	1.000€	1	1.000€
Total			30.195€

9. Conclusiones

A continuación se enumeran brevemente las conclusiones más importantes a las que se ha llegado tras la realización de esta tesis de Máster.

- El contenido de esta tesis de Máster se corresponde con el trabajo que ha sido llevado a cabo para cumplir con los objetivos establecidos en el contrato entre INSA y la Universidad Carlos III de Madrid con el fin de desarrollar un sistema automático de fotogrametría para medir un array de antenas operativo.
- Se han cubierto con muy alto grado de éxito todas las fases relativas a dicho proyecto, concluido en junio de 2010, con el acuerdo de ambas partes.
- Durante la fase inicial del proyecto se hizo una revisión de la teoría fotogramétrica aplicable al ámbito del proyecto. Para ello se recurrió a varios

libros de texto expecíficos de la materia, así como a multitud de publicaciones científicas especializadas.

- En relación a la búsqueda bibliográfica inicial, también se llevó a cabo un rastreo de publicaciones en las que se detallaran los resultados de proyectos similares al desarrollado en esta tesis. Tras dicho rastreo, no se encontró ningún sistema que, además de las características clásicas en este tipo de mediciones, incorporara operacion en tiempo real y componentes de bajo coste.
- Tras concluir que el desarrollo de una algoritmia fotogramétrica propia excedía las posibilidades para cumplir con los objetivos del proyecto en tiempo y forma, se realizó un rastreo exhaustivo de las diversas alternativas de software comercial, seleccionando finalmente uno que cumplía simultáneamente con varios requisitos imprescindibles para posibilitar el subsiguiente desarrollo del proyecto.
- Se investigaron los aspectos relativos a la teoría fotográfica básica relacionada con la fotogrametría y se rastrearon las posibilidades comerciales para implementar el sistema de captura fotográfica. Se hicieron múltiples pruebas con varios tipos de cámaras, comenzando con dispositivos de muy bajo coste, y se seleccionó uno que satisfacía un compromiso entre bajo coste y diversos requisitos importantes para el procesado fotogramétrico.
- Se desarrolló en C++ un software de captura fotográfica que, mediante una comunicación en paralelo con un número potencialmente muy elevado de cámaras, permitía, a través de una aplicación intuítiva de ventanas, sincronizar los disparos de todas ellas, descargar las imágenes tomadas a la memoria del ordenador y repetir este proceso con la periodicidad deseada. Además en dicho software se ofrecían diversos parámetros de configuración de las cámaras, dotándolo de gran flexibilidad.
- Para complementar al software de captura multicámara, se desarrolló un software de automatización del procesado fotogramétrico que, haciendo uso de las imágenes tomadas por el software de captura, proporcionaba como datos de salida los modelos 3D finales, de forma tanto visual como numérica. Además dicho software se integró con el de captura para conseguir un funcionamiento totalmente automático, periódico y en tiempo real.

- Se adquirieron las cámaras de las que constaría el sistema de captura, con su correspondiente cableado relativo a alimentación contínua y conexión con el ordenador, así como trípodes fotográficos para implementar un demostrador. Además se construyó con componentes de muy bajo coste un modelo a escala de un array de cuatro antenas dispuestas en cruz para su medición en las pruebas de un demostrador de laboratorio.

- En enero de 2010, tras la primera fase del proyecto, se llevó a cabo la prueba con el demostrador de laboratorio obteniendo modelos 3D de la maqueta construida con precisiones en el orden del milímetro, siempre por debajo del centímetro, tal como se especificó en el contrato INSA-UC3M. El objetivo para el prototipo final fue mantener dichas precisiones, optimizando todos los aspectos del sistema, ya que las condiciones serían más adversas.

- Una vez finalizada la instalación del array de ocho antenas en la UPM, se construyeron con componentes de bajo coste los soportes necesarios para dotar al sistema de captura de suficiente movilidad y orientación, así como de gran resistencia contra vientos, al estar el conjunto instalado en la azotea de un edificio. También se desplegó el cableado necesario para la alimentación y la comunicación entre cámaras y ordenador, protegido contra intemperie, mediante arquetas estancas.

- Finalmente se llevaron a cabo sucesivas campañas de puesta a punto y pruebas del sistema fotogramétrico, llegando a un estado de operación automática y precisiones medias en torno al milímetro, e incluso submilimétricas. Estos resultados mejoraban hasta en más de un orden de magnitud los requeridos para el sistema final. Los tiempos de actualización de modelos se lograron disminuir hasta aproximadamente 50 segundos, no satisfaciendo el requisito de los 10 segundos de refresco, si bien se puede considerar un muy buen resultado considerando el resto de características del sistema y del estado del arte.

- El proyecto fue finalizado tras la obtención de resultados del prototipo final, consiguiendo así un sistema que en coste se sitúa hasta dos órdenes de magnitud por debajo de uno similar (aunque posiblemente de mayor precisión) que pudiera desarrollar la empresa líder del sector (*Geodetic Systems*), si bien un desarrollo similar no ha sido encontrado en la bibliografía rastreada.

Bibliografía

[1] K. B. Atkinson, *Close Range Photogrammetry and Machine Vision.* Caithness: Whittles Publishing, 2009.

[2] José Bolívar Contreras y Cristian Wilmer Encalada, *Diseño e implementación de un simulador para analizar el funcionamiento de un Sistema de Antenas Inteligentes*, Repositorio digital DSpace, Diciembre 2009.

[3] Canon Inc., *PowerShot RemoteCapture Software Development Kit Software Developer's Guide*, 2008.

[4] Jim H. Chandler, John G. Fryer y Amanda Jack, *Metric Capabilities of Low-Cost Digital Cameras for Close Range Surface Measurement*, The Photogrammetric Record, Volume 20, No. 109, Abril 2005.

[5] Chieh Cheng y Auri Rahimzadeh, *Hacking Digital Cameras*, Indianapolis: John Wiley & Sons, Inc., 2005.

[6] T. A. Clarke, *An Analysis of the Prospects for Digital Close-Range Photogrammetry*, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Volume 50, No. 3, Junio 1995,

[7] Paul Goldsmith, *Resetting the Arecibo Primary Reflector Surface,* National Astronomy and Ionosphere Center/Arecibo Observatory Newsletter, No. 32, Marzo 2001.

[8] Rolf Güsten, Lars-Åke Nyman, Karl Menten, Catherine Cesarsky, Roy S. Boo y Peter Schilke, *The Atacama Pathfinder Experiment – a new submillimeter facility for southern skies –,* Telescopes and Instrumentation. The Messenger, Volume 104, Junio 2006.

[9] José A. Gutiérrez y Brian S. R. Armstrong, *Precision Landmark Location for Machine Vision and Photogrammetry.* Londres: Springer, 2008.

[10] Klaus Hanke, *Accuracy Study Project of Eos Systems' PhotoModeler*, Final Report, University of Innsbruck, Austria, 1996.

[11] Eugene Hecht, *Óptica*, Addison Wesley Iberoamericana: Madrid. 2000.

[12] David Lichodziejewski y Costas Cassapakis, *Inflatable Power Antenna Technology*, 37th American Institute of Aeronautics and Astronautics AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, No. 1074, Enero 1999.

[13] José Antonio López Pérez, *Sistemas de Holografía por Microondas para Caracterización de Superficies Reflectoras*, Informe Técnico OAN 2004-4, Abril, 2004.

[14] Thomas Luhmann, Stuart Robson, Stephen Kyle y Ian Harley, *Close Range Photogrammetry: Principles, Techniques and Applications.* Caithness: Wiley, 2006.

[15] Josef Migl, Christian Hoetzel, Christian Hartwanger, Un Pyo Hong, Filippo Concaro, Maite Arza, Piermario Besso y Detlef Heuer, *X-Band Acquisition Aid Antenna for Ground Stations Application*, 4th European Conference on Antennas and Propagation, A09-5, 1804129, Abril 2010.

[16] Edward M. Mikhail, James S. Bethel y J. Chris McGlone, *Modern Photogrammetry.* Nueva York: John Wiley & Sons, Inc., 2001.

[17] Celestino Ordóñez, Belén Riveiro, Pedro Arias y Julia Armesto, *Application of Close Range Photogrammetry to Deck Measurement in Recreational Ships*, Journal of Sensors, Volume 9, No. 9, Julio 2009.

[18] Richard S. Pappa, Louis. R. Giersch y Jessica. M. Quagliaroli, *Photogrammetry of a 5 m Inflatable Space Antenna with Consumer Digital Cameras*, National Aeronautics and Space Administration: Washington (DC). Report No. NASA/TM-2000-210627, Diciembre 2000.

[19] Richard Roy y Thomas Kailath, *ESPRIT: Estimation of Signal Parameters Via Rotational Invariance Techniques.* IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing, Volume ASSP-37, pp. 984-995, Julio 1989.

[20] Enoc Sanz-Ablanedo, José Ramón Rodríguez-Pérez, Pedro Arias-Sánchez y Julia Armesto, *Metric Potential of a 3D Measurement System Based on Digital Compact Cameras,* Journal of Sensors, Volume 9, No. 6, Junio 2009.

[21] N. Udaya Shankar, R. Duraichelvan, C. M. Ateequlla, Arvind Nayak, A. Krishnan, M. K. S. Yogi, C. Koteshwar Rao, K. Vidyasagar, Rohit Jain, Pravesh Mathur, K. V. Govinda, R. B. Rajeev y T. L. Danabalan, *Photogrammetric Measurements of a 12-metre Preloaded Parabolic Dish Antenna*, National Workshop on the Design of Antenna & Radar Systems DARS, Bangalore, India, Mayo 2009.

[22] Ralph O. Schmidt, *Multiple Emitter Location and Signal Parameter Estimation.* IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Volume AP-34, No.3, Marzo 1986.

[23] P. F. Scott y M. Ryle, *A Rapid Method for Measuring the Figure of a Radio Telescope Reflector*, Royal Astronomical Society, Monthly Notices, Volume 178, Marzo 1977.

[24] Ravi Subrahmanyan, *Photogrammetric Measurement of the Arecibo Primary Reflector Surface,* IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Volume 53, No. 8, Agosto 2005.

[25] Ravi Subrahmanyan, *Photogrammetric Measurement of the Gravity Deformation in a Cassegrain Antenna,* IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Volume 53, No. 8, Agosto 2005.

[26] J. Bará Temes, *Ondas electromagnéticas en comunicaciones*. Barcelona: Ediciones UPC, 1999.

[27] Rene Wackrow, Jim H. Chandler y Paul Bryan, *Geometric consistency and stability of consumer-grade digital cameras for accurate spatial measurement*, The Photogrammetric Record, Volume 22, No. 118, Junio 2007.