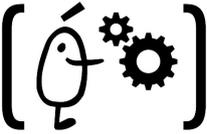




VNIVERSITAT ()
E VALÈNCIA
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria

Departamento de Informática

Tesis Doctoral

**APORTACIONES AL PROCESO DE CREACIÓN DE
CONTENIDOS DE REALIDAD AUMENTADA,
ORIENTADOS A FORMACIÓN, INDUSTRIA Y
CONSTRUCCIÓN**

Jesús Gimeno Sancho

Dirigida por:
Dr. Marcos Fernández Marín
Dr. Pedro Morillo Tena

Valencia, 2015

DR. MARCOS FERNÁNDEZ MARÍN, profesor Titular de Universidad del área de Ciencias de la Computación de la Universitat de València.

DR. PEDRO MORILLO TENA, profesor Titular de Universidad del área de Arquitectura y Tecnología de los Computadores de la Universitat de València.

CERTIFICAN que la presente memoria

“Aportaciones al proceso de creación de contenidos de realidad aumentada, orientados a formación, industria y construcción”

Ha sido realizada bajo su dirección, en el Departamento de Informática de la Universitat de València por Jesús Gimeno Sancho, y constituye su tesis para optar al grado de Doctor.

Y para que conste, en cumplimiento de la legislación vigente, presentamos ante la Escuela Técnica Superior de Ingeniería (ETSE) de la Universitat de València, a 20 de Octubre de 2015.

LOS DIRECTORES

Marcos Fernández Marín

Pedro Morillo Tena

A Lorena y Nora que son el motivo de cada
paso y mi alegría cada día

Agradecimientos

Este trabajo no habría sido posible sin todas aquellas personas que día a día me han animado a continuar, ayudando en todo lo posible y, sobre todo, escuchando cada uno de los problemas con los que me he encontrado.

A mis directores Marcos y Pedro por darme la oportunidad de llegar hasta aquí, ofreciéndome todo su tiempo y guiándome en el proceso.

A mis compañeros del IRTIC, Manolo, Julio, Fer, Sergio, Josevi, Lucia, Inma, Bibi, Rubén, Ricardo, Cristina y tantos otros por ofrecerme su ayuda cuando hacía falta. Sobre todo Manolo, que desde la mesa de enfrente ha escuchado cada idea y cada parte de este documento.

A mi familia, porque no todo es trabajo y sin ellos no merecería la pena.

A José Pino, que aunque no ha podido ver el final de esta tesis, seguro que habría sido el primero en ayudar y hacer “piña”, porque el IRTIC no es lo mismo sin él.

Resumen

La Realidad Aumentada (AR) consiste en aumentar la percepción que el usuario tiene del mundo real con información virtual que lo complementa. Esta característica de aumentar los sentidos, es deseable en muchos campos de aplicación, por lo que aunque es un campo de investigación relativamente joven, ha experimentado un gran auge en los últimos años. La evolución de cada uno de los procesos que componen un sistema AR, ha permitido que esta tecnología traspase las puertas de los laboratorios, y pueda ser utilizada por cualquier usuario que disponga, por ejemplo, de un Smartphone. Sin embargo, todavía existe una gran limitación y es la creación de contenidos (authoring). En la actualidad existen un pequeño número de herramientas de authoring que permiten crear contenidos AR, y en la mayoría de casos son herramientas propietarias que se limitan al uso de su propia tecnología.

En este trabajo se presentan las aportaciones al proceso de authoring de contenidos AR orientados a formación, industria y construcción. Estas aportaciones se engloban en dos campos principales: la creación de contenidos para ayudas visuales, y la creación de información durante la revisión del proceso constructivo por medio de AR (denominada información As-Built). Para la creación de ayudas visuales AR se define un nuevo modelo de authoring, a partir del modelo de presentaciones de diapositivas digitales, en el que se incluyen los mecanismos necesarios para crear los contenidos aumentados. Para la creación de la información As-Built, se han desarrollado, tanto una metodología, como el sistema que permite llevarla a cabo.

Todas las aportaciones presentadas en este trabajo tienen la finalidad de permitir a usuarios no expertos crear contenidos AR, abstrayéndoles del funcionamiento a bajo nivel de los sistemas AR. En los resultados presentados a lo largo de este trabajo se muestra cómo los sistemas desarrollados logran dicho objetivo, permitiendo a los usuarios no expertos, crear contenidos AR tanto en ayudas visuales, como para documentar el proceso constructivo.

Abstract

Augmented Reality (AR) consists in augmenting the user's perception of the real world adding virtual information that complements it. This capability of augment the senses, it is desirable in many applications, so although it is a relatively young field of research, has experienced a boom in recent years. The evolution of each of the processes involved in AR systems (computer vision, 3d rendering, etc.), it is making possible that this technology goes out from laboratories, to be used by anyone who own, for example, a Smartphone. However, there is still a major constraint, the AR content creation (denominated authoring). Nowadays, there are a small number of authoring tools for creating AR content, and in most cases are proprietary systems that are limited to using its own technology.

In this thesis, the contributions to the process of authoring of AR content oriented to training, construction and industry are presented. These contributions are focused on two main areas: creating AR content for visual aids, and the creation of information during the review of the construction process through AR (As-Built information). To create AR visual aids, a new authoring model is defined extending the digital slide presentations, which include the necessary mechanisms to create the augmented content. To create the As-Built information, during the revision of the construction process, a methodology and the system that allows carrying it out are proposed.

All contributions presented in this paper are intended to allow non-expert users to create AR content, by abstracting them from the low level technical details of AR applications. The results presented will show how the proposed systems achieved this objective; allowing non-expert users to create AR content both AR visual aids and As-Built information to document the construction process.

Tabla de contenido

CAPÍTULO 1	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1 Motivación	1
1.2 Objetivos.....	3
1.3 Metodología	4
1.4 Estructura de la Tesis.....	6
INTRODUCTION	7
1.1 Motivation	7
1.2 Objectives	9
1.3 Methodology	10
1.4 Thesis structure.....	11
CAPÍTULO 2	13
ESTADO DEL ARTE	13
2.1 Evolución histórica de la Realidad Aumentada	15
2.2 Requisitos de aplicaciones AR-MR	17
2.2.1 Combinar elementos reales y virtuales: dispositivos de visualización	17
2.2.2 Interacción en tiempo real	22
2.2.3 Correlación real-virtual: captura del punto de vista.....	24
2.3 Campos de aplicación de AR-MR	27
2.3.1 Educación y Pedagogía	27
2.3.2 Ciencias de la Salud	29
2.3.3 Industria.....	31
2.3.4 Edificación y Obra Civil	33
2.3.5 Ocio y Entretenimiento	34
2.3.6 Publicidad y comercio.....	36
2.4 Generación de contenidos AR-MR	37
2.4.1 Programación de bajo nivel.....	38
2.4.2 Programación de alto nivel.....	42

2.4.3	Diseño de contenidos de bajo nivel.....	45
2.4.4	Diseño de contenidos de alto nivel.....	48

CAPÍTULO 3..... 57

CREACIÓN DE AYUDAS VISUALES AR..... 57

3.1 Introducción 57

3.2 Descripción del problema 59

3.3 Análisis de la evolución de las ayudas visuales 61

3.3.1 Manual en papel61

3.3.2 Esquemas de operación.....63

3.3.3 Videos explicativos63

3.3.4 Documentos digitales multimedia64

3.3.5 Presentaciones digitales basadas en diapositivas.....64

3.3.6 Simuladores de realidad virtual64

3.3.7 Ayudas con Realidad Aumentada65

3.4 Análisis de tipos de información en ayudas visuales..... 66

3.4.1 Pasos de una tarea.....66

3.4.2 Texto explicativo.....67

3.4.3 Imagen o video explicativo69

3.4.4 Modelos 3D.....71

3.4.5 Documento de detalle73

3.4.6 Indicadores de lugar74

3.4.7 Información contextual sencilla.....75

3.4.8 Animación del procedimiento75

3.4.9 Eventos predefinidos76

3.4.10 Cuestiones para evaluar el conocimiento del usuario78

3.4.11 Simulaciones y Modelos 3D complejos.....79

3.5 Extensión del modelo de presentación de diapositivas digitales para ayudas visuales AR..... 80

3.6 Sistema de edición de ayudas visuales AR 82

3.7 Descripción del mundo real..... 85

3.7.1 Fotos: imágenes guía87

3.7.2 Imagen RGBD88

3.7.3 Objetos 3D referencia.....89

3.7.4	Objetos de oclusión	90
3.7.5	Referencias de captura de movimiento.....	92
3.8	Creación de la información virtual	96
3.8.1	Edición 2D, pasos e información general asociada.....	96
3.8.2	Edición 3D, información puntual asociada a objetos reales.....	97
3.8.3	Edición de cuestionarios utilizando AR.....	98
3.9	Resultados Experimentales	103
3.9.1	Evaluación del mecanismo de creación de escenarios aumentados.....	103
3.9.2	Evaluación con usuarios reales en tareas de formación.....	111
3.9.3	Ejemplos de ayudas visuales AR desarrolladas.....	112
3.10	Conclusiones	118
3.10.1	Análisis de los contenidos de las ayudas visuales AR	118
3.10.2	Extensión del modelo de presentación basada en diapositivas	119
3.10.3	Sistema de edición basado en referencias	119
3.10.4	Resultados experimentales	119

CAPÍTULO 4 121

EDICIÓN DE INFORMACIÓN AS-BUILT UTILIZANDO AR..... 121

4.1	Introducción.....	121
4.2	Descripción del problema.....	122
4.3	Metodología de control del proceso constructivo por medio de AR	123
4.3.1	Recolección de información	124
4.3.2	Configuración del escenario	128
4.3.3	Revisión y anotación.....	133
4.3.4	Generación de resultados.....	136
4.4	Sistema SICURA de seguimiento de obra	138
4.4.1	Módulo Núcleo SICURA	139
4.4.2	Módulo gestor de ficheros As-Built	141
4.4.3	Módulo gestor de planos.....	142
4.4.4	Módulo de comunicación con la cámara.....	142
4.4.5	Módulo de calibración del escenario.....	143
4.4.6	Módulo interfaz de usuario AR-CAD.....	143
4.4.7	Módulo de procesado de imagen.....	148
4.4.8	Módulo de medición y anotación.....	150
4.5	Resultados experimentales	152

4.5.1	Escenario 1: Ampliación del parking del aeropuerto de Manises (Valencia)	153
4.5.2	Escenario 2: Reforma del 9 Octubre (Valencia)	160
4.5.3	Escenario 3: Rivas (Madrid)	166
4.6	Conclusiones	174
4.6.1	Metodología de control del proceso constructivo por medio de AR	175
4.6.2	Sistema SICURA	176
4.6.3	Resultados experimentales	176
CAPÍTULO 5	179
CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO	179
5.1	Conclusiones y aportaciones	179
5.2	Líneas de trabajo futuro	182
5.3	Publicaciones relacionadas	183
CONCLUSIONS AND FUTURE WORK	185
5.1	Conclusions and contributions	185
5.2	Future work	187
5.3	Related research publications	189
BIBLIOGRAFÍA	191

Índice de figuras

<i>Figura 1. Esquema del prototipo "HUDset" propuesto por Caudell, compañía Boeing, en 1992, Fuente: [Caudell and Mizell. 1992].</i>	13
<i>Figura 2. Definición de Realidad Mixta dentro del continuo de la realidad virtual, Fuente: [Milgram, et al. 1994].</i>	14
<i>Figura 3. "Sensorama" (izda.), Fuente: [L. 1962]; "La espada de Damocles" (dcha.), Fuente: [Sutherland. 1968].</i>	15
<i>Figura 4. "ARQuake", Fuente: [Thomas, et al. 2000].</i>	17
<i>Figura 5. Esquemas de visualización "Video see-through", Fuente: [Azuma. 1997].</i>	18
<i>Figura 6. Esquema de visualización "Optical see-through" (izda.), Fuente: [Azuma. 1997]; gafas de visualización AugVisHMD (dcha.), Fuente: www.geocities.ws.</i>	19
<i>Figura 7. Clasificación de los dispositivos de visualización AR-MR. Fuente: [Bimber and Raskar. 2005].</i>	20
<i>Figura 8. "Tangible AR" (izda.), Fuente: [Vinot, et al. 2014]; Realidad Aumentada colaborativa (dcha.), Fuente: [Wagner, et al. 2005].</i>	24
<i>Figura 9. "The Magic Book" (izda.), Fuente: [Billinghurst, et al. 2001]; Construct3D (centro), Fuente: [Kaufmann. 2000]; In-Place 3D Sketching (dcha.), Fuente: [Bergig, et al. 2009].</i>	28
<i>Figura 10 "Virtuoso" (izda.), Fuente: [Wagner, et al. 2006]; Butterfly ecology learning system (centro), Fuente: [Wernhuar Tarng and Kuo-Liang Ou. 2012]; aplicación para experimentar con el electromagnetismo (dcha.), Fuente: [Ibáñez, et al. 2014].</i>	29
<i>Figura 11. Captura del movimiento de la superficie no rígida de un corazón latiendo (izda.); proyección del interior de un corazón latiendo (centro); [Navab, et al. 2007] visualización de una CT sobre el pie del paciente (dcha.). Fuente: [Lerotic, et al. 2007].</i>	30

Figura 12. Diseño de una planta de producción utilizando AR (izda.), Fuente: [Doil, et al. 2003]; prototipo para el diseño de los salpicaderos utilizando Realidad Aumentada espacial (centro), Fuente: [Porter, et al. 2010]; indicaciones durante el montaje con realidad aumenta espacial (dcha.), Fuente: [Marner, et al. 2014]	32
Figura 13 Visualización de información de estructuras (izda.), Fuente: [Thomas, et al. 1999]; visualización de información BIM y 4D (centro), Fuente: [Hakkarainen, et al. 2009]; anotaciones sobre fachadas reales utilizando AR (dcha.), Fuente: [Bae, et al. 2013].....	34
Figura 14. AR Invaders (izda.), Fuente: [Soulbit7. 2015]; juego de Kinect “Rabbing Rabids alive & kicking” (dcha.), Fuente: [Ubisoft. 2015]	35
Figura 15. Navegador AR Layar (izda.), Fuente: www.Layar.com ; pantalla holográfica (centro), Fuente: www.hologram3ddisplay.com ; probador virtual Fitnect (dcha.), Fuente: [Fitnect. 2015].....	37
Figura 16. Pirámide de la edición de contenidos(izda.), Fuente: [Abawi, et al. 2004]; clasificación en niveles de las herramientas de edición de contenidos AR-MR (dcha.), Fuente: [Hampshire, et al. 2006]	38
Figura 17. Fases del algoritmo de reconocimiento de marcadores de la biblioteca ARToolkit, Fuente: [Kato and Billinghurst. 1999].....	40
Figura 18. Características descubiertas por la biblioteca PTAM (izda.) y el mapa de puntos generado a partir de las mismas en el proyecto NAVVIS (dcha.), Fuente: www.navvis.com	41
Figura 19. Características encontradas en una imagen con calificación 5 estrellas en Vuforia (izda.); escaneo de un objeto 3D con Vuforia (dcha.), Fuente: www.vuforia.com	43
Figura 20. Extensión de ECT (Equator Component Toolkit) para AR (izda.), Fuente: [Hampshire, et al. 2006]; ComposAR (dcha.), Fuente: [Seichter, et al. 2008]	46
Figura 21. Sistema Power Space de edición de aplicaciones AR-MR, Fuente: [Haringer and Regenbrecht. 2002].....	48

<i>Figura 22. MR Assembly Instructor and Authoring Wizard. Herramienta de posicionamiento de objetos (izda.); visor AR (dcha.). Fuente: [Zauner, et al. 2003]</i>	49
<i>Figura 23. Layar Creator (izda.); Datos publicados sobre el uso de Layar hasta Julio de 2014 (dcha.). Fuente: www.Layar.com</i>	50
<i>Figura 24 Metaio Creator (izda.); edición de contenido basada en reconocimiento facial con Metaio Creator (dcha.). Fuente: www.metaio.com</i>	51
<i>Figura 25. Ejemplos de ayuda visual en un manual de coche (izda.), Fuente: www.fiat.com; y de montaje de muebles (dcha.), Fuente: www.ikea.com</i>	62
<i>Figura 26. Fotografías realizadas a los esquemas de operación colocados por el fabricante en el interior de una fotocopiadora RICOH MP 7000</i>	63
<i>Figura 27. Ejemplos de manuales utilizando Realidad Aumentada de la empresa Metaio, Fuente: www.metaio.com</i>	65
<i>Figura 28. Ejemplo de texto renderizado en 2D de la aplicación Wikitude (izda.), Fuente: www.wikitude.com; texto asociado a un lugar del entorno real con posición y orientación definidas en 3D en el prototipo de Holo Lens (dcha.), Fuente: [Microsoft. 2015]</i>	69
<i>Figura 29. Ejemplo de representación de un modelo 3D interactivo general (izda.); ejemplo de presentación de un modelo 3D asociado a un objeto real (dcha.). Fuente: http://flintarch.com</i>	73
<i>Figura 30. Ejemplos de indicadores de lugar en aplicaciones AR, Fuentes: www.instantreality.org y nationalgeographic.com</i>	74
<i>Figura 31. Diagrama general de la solución de edición para ayudas visuales AR propuesta</i>	83
<i>Figura 32. Modelo de datos del sistema de ayudas visuales AR</i>	84
<i>Figura 33. Ejemplo de imágenes guía aplicadas en una ayuda visual AR sobre el mantenimiento de un coche vistas desde el lateral (izda.) y la parte superior (dcha.)</i>	88
<i>Figura 34. Imagen RGBD (izda.); representación de la imagen con información de profundidad (dcha.)</i>	89

<i>Figura 35. Ejemplo de descripción del escenario aumentado mezclando fotos y modelos 3D.....</i>	<i>90</i>
<i>Figura 36. Ejemplo de error de visualización cuando no existe una correcta ocultación (izda.); visualización con ocultación real-virtual (dcha.).....</i>	<i>91</i>
<i>Figura 37. Esquema de los 4 tipos de referencias de captura de movimiento.....</i>	<i>93</i>
<i>Figura 38. Esquema de interfaz de edición del contenido 2D.....</i>	<i>97</i>
<i>Figura 39. Esquema de interfaz de edición de contenido 3D.....</i>	<i>98</i>
<i>Figura 40. Esquema del interfaz de edición de cuestiones AR de respuesta múltiple.....</i>	<i>100</i>
<i>Figura 41. Esquema del interfaz de edición de cuestiones AR de señalar.....</i>	<i>101</i>
<i>Figura 42. Esquema del interfaz de edición de cuestiones de colocar.....</i>	<i>102</i>
<i>Figura 43. Diagrama de montaje con las posiciones de los elementos del experimento incluidos en las instrucciones entregadas a los usuarios.....</i>	<i>105</i>
<i>Figura 44. Imagen de la caja de ordenador utilizada como referencia (izda.); canal de profundidad de dicha imagen (dcha.).....</i>	<i>105</i>
<i>Figura 45. Colocación de los indicadores de lugar de dos tornillos en cada uno de los tres casos propuestos.....</i>	<i>106</i>
<i>Figura 46. Tiempo medio empleado (izda.) y error medio (dcha.) empleado por los usuarios para completar las tareas propuestas en cada uno de los escenarios.....</i>	<i>107</i>
<i>Figura 47. Error cometido en la edición de cada uno de los elementos virtuales.....</i>	<i>108</i>
<i>Figura 48. Resultados de las encuestas para los parámetros de satisfacción general, facilidad de aprendizaje y facilidad para recordar su funcionamiento.....</i>	<i>109</i>
<i>Figura 49. Resultados de las encuestas para los parámetros de precisión y eficiencia.....</i>	<i>110</i>
<i>Figura 50. Puntuación media de otorgada por los usuarios a los aspectos principales de la herramienta.....</i>	<i>112</i>
<i>Figura 51. Ejemplo de edición de la información 2D durante la creación de una ayuda visual AR para la atención de personas con movilidad reducida.....</i>	<i>113</i>
<i>Figura 52. Ejemplo de edición de la información 3D durante la creación de una ayuda visual AR para atención de personas con movilidad reducida.....</i>	<i>114</i>

<i>Figura 53. Ejemplo de edición de la información 2D durante la creación de una ayuda visual AR para el mantenimiento de cuadros eléctricos</i>	<i>115</i>
<i>Figura 54. Ejemplo de edición de la información 3D durante la creación de una ayuda visual AR para el mantenimiento de cuadros eléctricos</i>	<i>115</i>
<i>Figura 55. Ejemplo de descripción del mundo real para ayudas visuales acerca del mantenimiento de una máquina excavadora.....</i>	<i>116</i>
<i>Figura 56. Ejemplo de edición de una pregunta de señalar donde la respuesta se indica con un cilindro de color verde</i>	<i>117</i>
<i>Figura 57. Ejemplo de edición de una pregunta de posicionar elementos, la zona correcta se indica con una esfera verde que contiene el icono de un marcador plano ..</i>	<i>118</i>
<i>Figura 58. Bloques principales de la metodología de control del proceso constructivo</i>	<i>124</i>
<i>Figura 59. Actividades de la recolección de información.....</i>	<i>124</i>
<i>Figura 60. Actividades para la configuración del escenario</i>	<i>129</i>
<i>Figura 61. Actividades para la revisión y anotación del proceso constructivo</i>	<i>133</i>
<i>Figura 62. Arquitectura modular del sistema SICURA</i>	<i>139</i>
<i>Figura 63. Modelo de datos del sistema SICURA.....</i>	<i>140</i>
<i>Figura 64. Visualización aumentada desde el punto de vista donde se capturó la imagen</i>	<i>144</i>
<i>Figura 65. Visualización aumentada desde el punto de vista CAD.....</i>	<i>145</i>
<i>Figura 66. Error obtenido al aplicara una imagen sobre un plano OpenGL con vértices irregulares (izda.); corrección realizada con el shader (dcha.)</i>	<i>146</i>
<i>Figura 67. Modificación de los parámetros visuales de diversos elementos</i>	<i>147</i>
<i>Figura 68. Visualización del escenario aumentado utilizando una cámara PTZ.....</i>	<i>147</i>
<i>Figura 69. Resultado de la detección de contornos sobre la imagen (izda.); función de ajuste a línea del cursor durante la interacción del usuario (dcha.).....</i>	<i>148</i>
<i>Figura 70. Algoritmo de extracción de líneas rectas a partir de la imagen original.....</i>	<i>150</i>
<i>Figura 71. Anotaciones creadas en el escenario aumentado</i>	<i>152</i>
<i>Figura 72. Tabla comparativa de los escenarios de pruebas.....</i>	<i>153</i>

<i>Figura 73. Plano y vista del entorno de trabajo.....</i>	<i>155</i>
<i>Figura 74. Diferentes vistas del escenario aumentado utilizando diferentes imágenes capturadas por el dron</i>	<i>157</i>
<i>Figura 75. Detalle la posición de los pilares al nivel de la cimentación de la planta baja (líneas azules) donde se observa que faltan dos pilares. La diferencia de altura de las líneas azules indica el relieve irregular de la superficie inicial.....</i>	<i>158</i>
<i>Figura 76. Ajuste de la saturación de la imagen de fondo en el programa SICUAR para mejorar la visualización de la medición del área de cimentación durante los trabajos de hormigonado. La línea amarilla representa la medición sobre el fondo con menor saturación (dcha.) y sobre la imagen original (izda.).....</i>	<i>159</i>
<i>Figura 77. Estado de los edificios antes (izda.) y después de la rehabilitación (dcha.).....</i>	<i>160</i>
<i>Figura 78. Ejemplos de los planos creados por los técnicos para documentar las actuaciones previstas sobre la fachada</i>	<i>161</i>
<i>Figura 79. Vista desde el punto de vista CAD del escenario aumentado compuesto por 5 imágenes, correspondiente a la fachada trasera del edificio 2 (arriba); misma vista con todas las capas del planos ocultas para observar las anotaciones directamente sobre la imagen de la fachada (abajo)</i>	<i>163</i>
<i>Figura 80. Anotaciones y mediciones realizadas sobre una de las fachadas para documentar los trabajos realizados.....</i>	<i>164</i>
<i>Figura 81. Ejemplo de medición de área incluyendo lados curvos.....</i>	<i>165</i>
<i>Figura 82. Ejemplo de error en la visualización desde el punto de vista CAD (arriba) al utilizar imágenes de fondo con demasiada perspectiva; vista de las dos imágenes desde el punto de vista de la cámara (abajo).....</i>	<i>166</i>
<i>Figura 83. Caja de protección para la cámara IP (izda.); colocación en lo alto de una grúa (dcha.).....</i>	<i>168</i>
<i>Figura 84. Información virtual (izda.); imagen capturada por la cámara PTZ (dcha.).....</i>	<i>170</i>
<i>Figura 85. Visualización del escenario aumentado compuesta por cuatro vistas aumentadas.....</i>	<i>172</i>

Figura 86. Detalle de la visualización aumentada donde se observa que la información real y virtual aparecen perfectamente alineadas (izda.); medición lineal realizada en el escenario aumentada con los planos ocultos (dcha.) 172

Índice de tablas

<i>Tabla 1. Comparación Video see-through y Optical see-through</i>	19
<i>Tabla 2. Ventajas y desventajas de Head attached, Hand held y spatial displays</i>	22
<i>Tabla 3. Comparación de sensores de captura de movimiento</i>	25
<i>Tabla 4. Bibliotecas de bajo nivel para el desarrollo de aplicaciones AR-MR</i>	42
<i>Tabla 5. Bibliotecas de alto nivel para creación de aplicaciones AR-MR</i>	45
<i>Tabla 6. Sistemas de edición de bajo nivel para creación de aplicaciones AR-MR</i>	48
<i>Tabla 7. Sistemas de edición de alto nivel para creación de aplicaciones AR-MR</i>	53
<i>Tabla 8. Tipos de captura utilizados por las bibliotecas y sistemas de edición de aplicaciones AR-MR</i>	54
<i>Tabla 9. Tipos de información virtual que implementan las bibliotecas y sistemas de edición de aplicaciones AR-MR</i>	55
<i>Tabla 10. Tipos de preguntas disponibles en las principales plataformas de formación de código abierto</i>	78
<i>Tabla 11. Porcentajes de selección de cada uno de los escenarios frente a las afirmaciones dadas</i>	111
<i>Tabla 12. Parámetros de calibración calculados a partir de los metadatos de una imagen</i>	132
<i>Tabla 13. Parámetros de calibración por defecto equivalentes a una lente ideal de 45º en horizontal</i>	133
<i>Tabla 14. Ficha descriptiva de cada anotación en el informe de anotaciones As-Built</i>	138
<i>Tabla 15. Formato y campo EXIF utilizado para almacenar la información de la anotación correspondiente a cada imagen</i>	141
<i>Tabla 16. Resultados de la evaluación del sistema SICURA, valor mínimo 1 y valor máximo 5</i>	174

Capítulo 1

Introducción

La Realidad Aumentada (AR) permite aumentar los sentidos de los usuarios añadiendo contenidos virtuales a su percepción del mundo real. Los recientes avances en campos como la visión por computador y la representación de gráficos 3D en tiempo real, unidos al auge de dispositivos móviles inteligentes, han hecho posible que esta tecnología se extienda al público general. Por ello, aunque la AR es un campo de estudio reciente y todavía en desarrollo, en la actualidad, la gran mayoría de usuarios han utilizado alguna aplicación de Realidad Aumentada, a veces sin ser conscientes de ello. Por ejemplo, en una aplicación que muestra la posición del cajero más cercano ó en otra que indica el nombre de cada una de las constelaciones simplemente observándolas con la cámara.

El uso de Realidad Aumentada podría considerarse beneficioso en prácticamente cualquier campo de aplicación, dada su capacidad de fusionar información virtual en nuestra percepción del mundo real. En un sistema que utiliza Realidad Aumentada, el usuario no necesita aprender a navegar por un entorno virtual para acceder a la información (como lo hace en los sistemas de realidad virtual), sino que la información virtual se presenta fusionada con el mundo real a medida que nos movemos por el. Este mecanismo de interacción hace que un usuario, sin apenas conocimientos técnicos, pueda utilizar un sistema AR. Sin embargo la creación de dichas aplicaciones esta al alcance solo de usuarios especializados.

1.1 Motivación

En la actualidad, la creación de aplicaciones AR y la edición de los contenidos de dichas aplicaciones es un proceso que combina diversos campos de investigación, y como consecuencia, es realizado solo por usuarios especializados que conocen dichas tecnologías. En la edición de contenidos AR encontramos que es necesario: crear la información virtual, definir la forma en que el sistema reconoce el mundo real, relacionar la información virtual con los elementos reales a los que complementa. Esta dificultad en el proceso de edición es un cuello de botella para el uso y difusión de la Realidad Aumentada. Por esta razón, aunque la AR ofrece un mecanismo de interacción a priori útil

y sencillo de utilizar, requiere un gran esfuerzo en el proceso de creación de contenidos. Las herramientas de creación de contenidos actuales son en su gran mayoría herramientas propietarias. Dichas herramientas o bien están enfocadas a un uso concreto y no general, o bien están limitadas a utilizar la tecnología propia del desarrollador de la herramienta. Probablemente debido a la juventud de la tecnología, todavía no existen estándares de definición de contenidos AR que permitan compartirlos entre diferentes herramientas, como sí existen por ejemplo, formatos de modelos 3D, que aunque no son estándares formalmente, se han convertido en formatos genéricos de intercambio para modelado 3D (.FBX, .OBJ, .DAE, etc.). La falta de modelos de datos y estándares que sirvan para definir contenidos AR, limita la creación de contenidos a las posibilidades de una u otra herramienta, y por tanto limita lo que un autor puede hacer a lo que le ofrece cada herramienta individualmente.

Dentro del problema general de creación de contenidos AR, en este trabajo se abordan dos campos de aplicación en los cuales la Realidad Aumentada es especialmente beneficiosa: las ayudas visuales AR y la generación de información sobre el estado real de una construcción.

Las ayudas visuales AR son ayudas en las que los contenidos de la ayuda se representan utilizando Realidad Aumentada. Con este tipo de ayudas los contenidos teóricos no se limitan al espacio virtual, sino que gracias a la Realidad Aumentada el usuario puede verlos y oírlos sobre los propios objetos a los que hacen referencia. Al aparecer fusionados ambos tipos de información, se mejora la comprensión de la información virtual, ya que el usuario no necesita imaginar a que objetos reales hace referencia cada una de las explicaciones o imágenes, sino que los contempla en los lugares asociados. Para crear estas ayudas visuales AR, es fundamental que la persona experta en el tema a tratar, pueda crear dicha ayuda sin necesidad de ser un experto en las tecnologías involucradas en AR. En la actualidad una persona experta define los contenidos de una ayuda visual AR, la cual es desarrollada por otra persona u organización, lo que conlleva una degradación de la información y un aumento del coste de creación de la ayuda. Este hecho conlleva que pese a los beneficios de este tipo de ayudas, no se apliquen de forma general.

La información sobre el estado real de una construcción, denominada información "As-Built", es la información que se genera durante la inspección del proceso constructivo, con el objetivo de reflejar el resultado exacto de dicha construcción. Esta información virtual, como es obvio, tiene una fuerte relación espacial con los elementos

de la construcción a los que hace referencia, por lo que un sistema AR es ideal, tanto para su representación, como para su creación. Actualmente, los encargados de la revisión de una construcción realizan inspecciones in-situ y toman nota de las desviaciones detectadas que trasladan posteriormente a un sistema de gestión. En un proceso ideal, utilizando AR, dicha información podría editarse y representarse sobre el propio objeto real al que hace referencia, mejorando tanto la comprensión como la creación de dicha información.

1.2 Objetivos

El objetivo principal de esta tesis es:

“crear nuevos métodos que faciliten la edición de contenidos AR a usuarios no expertos en Realidad Aumentada”

Este objetivo concreto, se pretende llevar a cabo en los dos casos principales de estudio descritos en la motivación: la creación de ayudas visuales AR y la creación de información As-Built.

Para la creación de ayudas visuales AR se persigue que la persona experta en la tarea, sea capaz de crear la ayuda visual sin necesidad de conocer la tecnología a bajo nivel. Es decir, se pretende abstraer al autor de la ayuda del funcionamiento de cada una de las partes de un sistema AR, reduciendo el proceso de creación a una edición gráfica de información 2D y 3D. Para conseguir este objetivo general será necesario conseguir los siguientes objetivos específicos:

- Identificar los distintos tipos de información que puede contener una ayuda visual AR
- Crear un sistema de edición que permita englobar dichos contenidos en una ayuda visual AR
- Permitir que los autores integren contenidos de ayudas visuales ya existentes para agilizar el proceso de creación
- Definir un mecanismo que permita a usuarios no expertos describir el mundo real de forma que el sistema AR sea capaz de reconocerlo
- Desarrollar una herramienta que ayude al autor a relacionar los contenidos de la ayuda con los lugares y objetos concretos a los que hace referencia

- Crear un modelo de datos que soporte todos los tipos de información, descripción del mundo real y relaciones real-virtual, de forma que la ayuda visual pueda ser compartida entre usuarios y/o sistemas diferentes
- Evaluar la idoneidad del nuevo sistema de edición propuesto por medio de pruebas con usuarios y su aplicación en diversas temáticas

Para la creación de información “As-Built” se persigue que mediante un sistema AR, la persona encargada de inspeccionar una construcción pueda editar y consultar la información sobre el propio lugar al que hace referencia. Es decir, se pretende mejorar este proceso de comparación de información virtual (plano original) y objetos reales (construcción realizada) por medio de un sistema de Realidad Aumentada. Al igual que en el caso anterior, se pretende abstraer al usuario del funcionamiento de un sistema AR, de forma que no necesite ser un experto en dicha tecnología para crear la información “As-Built”. Para conseguir este objetivo general será necesario conseguir los siguientes objetivos específicos:

- Definir una metodología que defina cómo llevar a cabo el proceso de revisión del proceso constructivo para aprovechar las ventajas de la Realidad Aumentada
- Crear un sistema de edición que permita a un usuario crear la descripción de las incidencias a partir de la información del mundo real
- Definir un mecanismo que permita a usuarios no expertos obtener la información del mundo real sobre la que realizar el proceso de edición
- Crear un modelo de datos que soporte la información creada durante la revisión, descripción del mundo real y relaciones real-virtual, para describir el estado real de la construcción
- Evaluar el correcto funcionamiento, tanto de la metodología, como del sistema de edición, por medio de pruebas con usuarios en diversos escenarios reales

1.3 Metodología

Para llevar a cabo los objetivos concretos se seguirá una metodología de trabajo basada en la documentación del estado actual de la tecnología, descripción del problema, propuesta de una solución, evaluación de dicha solución y presentación de los resultados y conclusiones obtenidas. Siguiendo este esquema, primero se documentarán los aspectos clave de los sistemas de Realidad Aumentada y los diferentes componentes que forman parte de ellos. Además se realizara una descripción de las soluciones actuales para la creación y edición de aplicaciones y contenidos AR. Tras este paso de documentación, se

seguirá la siguiente metodología concreta para alcanzar cada uno de los dos grandes objetivos: creación de ayudas visuales AR y creación de información As-Built.

La creación de las ayudas visuales AR es un objetivo que engloba la edición de gran cantidad de tipos de información diferentes, por lo tanto, primero se realizara un análisis de la evolución de las ayudas visuales y se catalogarán los posibles contenidos que podría contener una ayuda visual AR. En dicho análisis se definirán los requisitos de edición y representación de cada uno de los contenidos identificados en el estudio. A partir de los contenidos identificados y bajo la premisa, marcada en los objetivos, de facilidad de uso para usuarios no expertos, se diseñara un sistema de edición de contenidos para ayudas visuales AR. Dicho diseño deberá incluir tanto el modelo de datos como las herramientas necesarias para cumplir con las funcionalidades marcadas en los objetivos: definición del mundo real, creación de la información virtual, etc. Tras el diseño se realizaran distintas pruebas y evaluaciones con usuarios para validar la implementación de dicho sistema. En las pruebas, además de valores recogidos de forma automática (tiempos, error, etc.), se recogerá la opinión de los usuario por medio de encuestas. Finalmente a partir de los resultados obtenidos en las pruebas se expondrán las conclusiones acerca del sistema de edición de contenidos AR creado.

La creación de información As-Built en un proceso delicado que debe realizarse sistemáticamente en cada una de las fases de una construcción. Cada uno de los elementos construidos es candidato a quedar cubierto por otro elemento, lo que obliga a realizar la inspección en momentos concretos de su construcción. Este hecho implica que la base para cumplir este objetivo, sea definir una metodología de cómo crear dicha información As-Built utilizando AR. A partir de la definición de la metodología se diseñara un sistema que permita llevarla a cabo, siguiendo las premisas marcadas en los objetivos, especialmente la de facilidad de uso para usuarios no expertos en AR. En este diseño se incluirán tanto el modelo de datos capaz de soportar toda la información, como las herramientas de edición de contenidos diseñadas para gestionarlos. Tras la implementación del sistema se realizarán pruebas en entornos de construcción reales para validar su correcto funcionamiento. En las pruebas, además de valores recogidos de forma automática (tiempos, error, etc.), se recogerá la opinión de los usuario por medio de encuestas. Finalmente a partir de los resultados obtenidos en las pruebas se expondrán las conclusiones acerca del sistema de creación de información As-Built.

1.4 Estructura de la Tesis

Esta Tesis esta organizada en 5 capítulos incluido este de introducción. Las aportaciones realizadas se han recopilado en los Capítulos 3 y 4, dedicados a cada uno de los objetivos principales de este trabajo: la creación de ayudas visuales AR y la creación de información As-Built. Los Capítulos 1 y 5 (introducción y conclusiones), además del resumen inicial, se han redactado tanto en castellano e ingles y se muestran primero todo el capítulo en castellano y después en ingles.

En el Capítulo 2, se describe el estado actual de la Realidad Aumentada y las tecnologías implicadas en los sistemas AR. Primero se presenta una definición formal de los sistemas AR para después enumerar los requisitos que deben cumplir las aplicaciones AR, junto con el estado actual de las tecnologías para cumplir cada uno de ellos. Tras este estudio general, se realiza un informe detallado de las opciones que existen en la actualidad para la creación de aplicaciones y contenidos AR. Como conclusión de cada uno de los apartados principales se presentan tablas comparativas de las distintas alternativas en función de sus características.

En el Capítulo 3 se aborda el primer objetivo principal de este trabajo, la creación de ayudas visuales AR, según la metodología planteada. Para ello en primer lugar se presenta una descripción detallada del problema de edición de contenidos de dichas ayudas. En segundo lugar se presenta un análisis de la evolución las ayudas visuales y los posibles contenidos que podrían aparecer en una ayuda visual AR. Tras dicho análisis se incluye la propuesta de un nuevo modelo de edición de contenidos y el modelo de datos asociado. Finalmente se incluyen las pruebas realizadas, cuyos resultados se debaten en el apartado de conclusiones.

En el Capítulo 4 se aborda el segundo objetivo principal, la creación de información As-Built, según la metodología planteada. Tras una descripción detallada del problema, en este capítulo se presentan tanto una metodología, como el sistema SICURA creado para llevarla a cabo. En la última parte del capítulo se muestran los resultados experimentales obtenidos en lugares de construcción reales, cuyos resultados se analizan y debaten en el apartado de conclusiones.

Finalmente en el Capítulo 5 se presentan las conclusiones del trabajo, en las que tras haber presentado las aportaciones, se debate si se han completado los objetivos planteados en esta tesis, posibles líneas de trabajo futuro y las publicaciones relacionadas.

Introduction

Augmented Reality (AR) consists in to augment user's senses adding virtual content to his perception of real world. The research on fields of investigation like computer vision and real time 3D graphics, in conjunction with the smartphones and mobile devices boom, have made possible to extend the use of this technology to the general public. For this reason, although AR is a recent field of research, almost every user of mobile devices has used an AR application, sometimes without realising. An example of commonly used AR application is an App where the nearest bank is displayed over the live camera image, so the users looks around using his device to find the way to the bank.

Augmented Reality application could be benefit in many different uses, due to its ability to add virtual information to our perception of real world. In AR systems, the users do not need to learn how to look around or move inside a virtual world to find the information, in contrast to Virtual Reality systems, but the virtual information is mixed with the real world so we can find it in a more natural manner. This interaction metaphor makes possible that non-expert users can handle AR systems with only a few instructions.

1.1 Motivation

Nowadays, the development of Augmented Reality applications and the authoring of their contents is a complex process related with different fields of research. Therefore, only experts in all those technologies carry out these tasks. The authoring process of AR contents involves, among others: the creation of the virtual content, setup of the tracking process to recognize the real world, the definition of the spatial relationship between virtual information and real objects, etc. This complex authoring process is a bottleneck for use and dissemination of Augmented Reality, so although AR is an easy and intuitive interaction paradigm, the authoring of its contents requires a big effort.

Most of the current AR authoring tools are proprietary software, and they have different limitations. In one hand the most of those tools are not general, because they are focused on a specific usage (marketing, maintenance, etc.). In the other hand these proprietary solutions are limited by their own technology and tracking systems and they

cannot be extended. Maybe due of the youth of AR technology, there is a lack of standards to share contents between different authoring tools, which can be found in other related fields like, for example, 3D graphics. The lack of data models and standards to define AR contents and share them is the reason why the authoring task must be realized in one or another tool, so the creation process is limited to the individual capabilities of these tools.

Two different specific fields of application, from the general AR authoring problem, where AR is especially useful are addressed in this work: AR visual aids and authoring of construction As-Built information.

AR visual aids are aids where its contents are presented through Augmented Reality. In this kind of aids, the theory contents are not limited to the virtual space, but users can see and watch them combined with their related real objects. This kind of representation (merging virtual and real) makes the virtual contents easier to understand, because users do not have to imagine the relationship between the aid content and the real world. Every image or explanation is shown on the real place where it is meaningful. In order to create suitable AR visual aid, it is very important that an expert in the concerned task can create the aid, even though he may not be an expert in AR technologies. Nowadays, this is not possible, and the expert defines the contents, which are implemented by an AR developer. Therefore the development of an AR visual aid is more expensive and the final result may be different from the expert definition. These difficulties in the authoring process are probably the main reason why visual aids are still little used today.

As-Built information is the information that reflects all changes made in the original specifications during the construction process. This information must be generated continuously along the construction process, and obviously, it has a strong spatial relationship with the real world's objects that have been constructed. Due to that spatial relationship, an AR system is ideal to represent and create As-Built information. Nowadays, construction foreman is responsible for inspect in-situ the construction site, and he takes notes, during the inspection, which are then added to the construction's plans. Ideally the foreman could simply view and create the information on top of the real object using an AR system, improving the understanding and authoring of that information.

1.2 Objectives

The main objective of this work is to:

“Create new authoring tools and methods to facilitate AR content creation to non-experts in AR”

This objective will be carried out for the two main cases described in the motivation section: AR visual aids and As-Built information authoring.

In the first case, AR visual aids creation, this investigation aims that any expert in a certain matter can create an AR visual aid without being an expert in AR. In other words, this work pretends to distance the author from any underlying AR process, simplifying the AR content’s authoring process to the authoring of 2D and 3D elements with a graphical interface. To achieve this, the main goals are:

- Identify and classify the different kinds of contents suitable of appearing in an AR visual aid
- Create an authoring system which makes possible to handle all the identified contents
- Allow the authors to add existing contents to the new AR visual aid
- Define a mechanism aimed at non expert AR authors can describe the real world, so the AR system can recognize it
- Develop a system that helps the author to create the spatial relationships between virtual and real elements
- Create a data model that includes every kind of content, the real world’s description and the relationships between virtual and real elements, so the AR visual aids can be shared
- Evaluate the proposed system by real users tests and its application in different real situations

In the second case, As-Built information creation, this investigation aims that the foreman can create and access to the As-Built information, related to the real objects, during the inspection process. In other words, the aim is to improve the inspection process, where virtual information (construction plans) and real objects are compared, through the use of Augmented Reality. In the same way as the previous case, this work pretends to distance the author from any underlying AR process, so the foreman doesn’t need to be an AR expert to create As-Built information through an AR system. To achieve this, the main goals are:

- Define a suitable methodology for the inspection and revision process through AR
- Create an authoring system that helps the author to describe the changes found using the real world information
- Define a mechanism aimed to non experts can obtain the real world information
- Create a data model that includes all the As-Built information, real world information, spatial relationships, etc. to describe the real construction's state
- Evaluate the proposed system with real users during their work in real construction sites

1.3 Methodology

In order to achieve the goals this work follows a five steps methodology: documentation of the current state of the technology, description of the problem, solution proposal, evaluation of the solution and, finally, discussion of the results. Following this methodology, in the first place, the key aspects of Augmented Reality systems will be studied, including the different technologies involved in them. At the end of this study a more detailed study will be performed about the current AR authoring tools, libraries and systems. After this documentation step this work will follow the next steps for each of the two proposed main goals: AR visual aids creation and authoring of As-Built information.

Creation of AR visual aids is a process that involves many different kinds of information, so the first step will be to analyse evolution of visual aids and categorize the contents suitable to be included in a AR visual aid. In this analysis the requirements of authoring and presentation will be identified, so an authoring system will be proposed to achieve all those requirements and oriented to non-expert users. The proposed system may include a data model and all the necessary tools to achieve the proposed goals: real world description, creation of virtual information, etc. This system will be tested with real users, collecting values like time and error for every tasks and surveys will be used to evaluate the user's opinion. Finally all the results and conclusions will be presented.

The authoring of As-Built information is an important process that must be systematically performed in every construction's phase. Every constructed element is suitable of being cover by another elements, so the inspection must be made at certain

moments of the construction process. For this reason to define a methodology is, the first task, and one of the key aspects of the revision process through AR. In the next step an authoring system will be proposed that makes possible that non-expert users can implement the methodology. This system will include the data model and all the necessary tools to create and handle As-Built information from the real world information. The system will be tested in real construction sites, and results like times and error will be collected automatically. Real users will test the system, and surveys will be used to collect their opinion. Finally all the results and conclusions will be presented.

1.4 Thesis structure

This thesis is organized in 5 chapters including this introduction. Contributions have been collected in chapters 3 and 4, dedicated to each of the main objectives of this work: the creation of AR visual aids and authoring of As-Built information. Chapters 1 and 5 (introduction and conclusions), in addition to the initial summary, are written both in Spanish and English, presenting first whole chapter in Spanish and then in English.

In Chapter 2, current status of Augmented Reality and the technologies involved in the AR systems are described. In the first place, a formal definition of the AR systems is presented to then list the requirements of AR applications, along with the current state of technologies to meet each of those requirements. After this general survey, a detailed report on the options that exist today for creating applications and AR content is performed. At the conclusion of each of the main sections comparative tables of the different alternatives are presented according to their characteristics.

In Chapter 3, the first main objective of this work, creating AR visual aids is addressed, according to the proposed methodology. In the first place a detailed description of the problem of authoring such AR visual aids is presented. Secondly an analysis of evolution of visual aids is performed, and the possible contents that could appear in a visual aid AR are described. Following this analysis, the new proposed model of authoring is presented, including the associated data model. Finally the tests are described, whose results are discussed in the conclusions section.

In Chapter 4, the second main target, creating As-Built information it is addressed, according to the proposed methodology. After a detailed description of the problem, this chapter presents both a methodology and the SICURA system created to carry it out. Finally the experimental results obtained in actual construction sites are presented and the results are analyzed and discussed in the conclusions section.

In Chapter 5, the conclusions are presented, where after summarize the contributions, it is debated whether the objectives have been completed in this work. Finally possible lines of future work and related publications are presented.

Capítulo 2

Estado del arte

La Realidad Aumentada y la Realidad Mixta (AR-MR) son campos relativamente nuevos de investigación y muy activos en la actualidad. El término Realidad Aumentada aparece por primera vez en la bibliografía en 1992, cuando [Caudell and Mizell. 1992] trabajadores de Boeing, lo acuñaron para denominar la tecnología necesaria para aumentar el campo de visión del usuario con la información necesaria para desempeñar una tarea. En su trabajo describen el prototipo de un dispositivo denominado “HUDset”, Figura 1, en el que se combinan un casco (*Head Mounted Display, HMD*) y un sistema de captura de movimiento para la visualización de instrucciones por parte de los trabajadores.

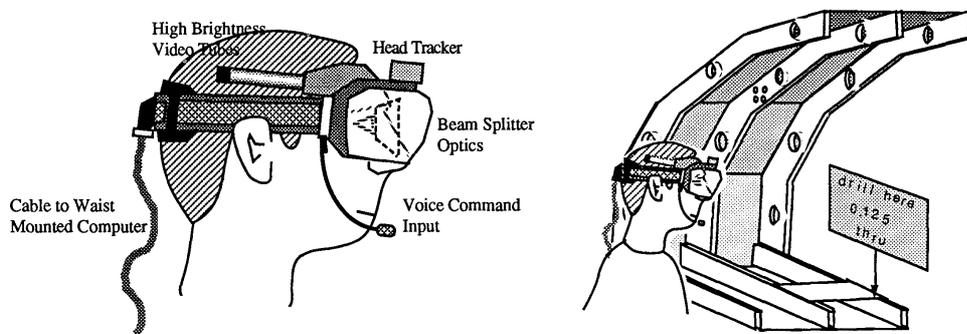


Figura 1. Esquema del prototipo “HUDset” propuesto por Caudell, compañía Boeing, en 1992, Fuente: [Caudell and Mizell. 1992].

Esta primera definición, utilizada para describir, sobre todo el funcionamiento de un dispositivo concreto, es revisada años más tarde por [Azuma. 1997], en uno de los artículos científicos más referenciados hasta la fecha. En dicho trabajo, Azuma define la Realidad Aumentada como una variación de la realidad virtual, en la que el usuario no se sumerge por completo en un mundo virtual, sino que observa el mundo real a su alrededor con objetos virtuales superpuestos. En este trabajo, Azuma elimina la limitación de utilizar dispositivos concretos, y define que los sistemas de Realidad Aumentada deben cumplir 3 características:

1. Combinar lo real con lo virtual
2. Interacción en tiempo real
3. Coherencia espacial en 3 dimensiones

Esta nueva definición extiende el uso de la Realidad Aumentada a otros dispositivos (no solo HMDs) sin perder ninguno de los componentes de un sistema AR. Por ejemplo, no incluye películas como sistemas AR puesto que aunque hay mezcla real-virtual, no hay interacción en tiempo real, pero permite sistemas de visualización monoculares, monitores, etc. con lo que se abre todo un abanico de posibles sistemas y aplicaciones de Realidad Aumentada.

Dos años más tarde, [Milgram, et al. 1994], realiza una acotación del termino Realidad Aumentada, creando dos nuevos términos: Realidad Mixta (MR) y Virtualidad Aumentada (AV). En esta nueva aproximación se define un espacio continuo entre realidad y virtualidad denominado Realidad Mixta (Figura 2), clasificando las aplicaciones atendiendo a cual es la información principal, real o virtual, y cual es la que complementa. Es decir, se trata de distinguir entre aumentar el mundo real con objetos virtuales (AR) o aumentar el mundo virtual con objetos realistas (AV). Sin embargo, como se observa en la Figura 2, no existe una línea clara de separación entre AR y AV, por lo que algunos sistemas o aplicaciones pueden ser considerados de cualquiera de los dos tipos. Este tipo de aplicaciones que no son claramente AR o AV, suelen denominarse simplemente aplicaciones de Realidad Mixta (MR).

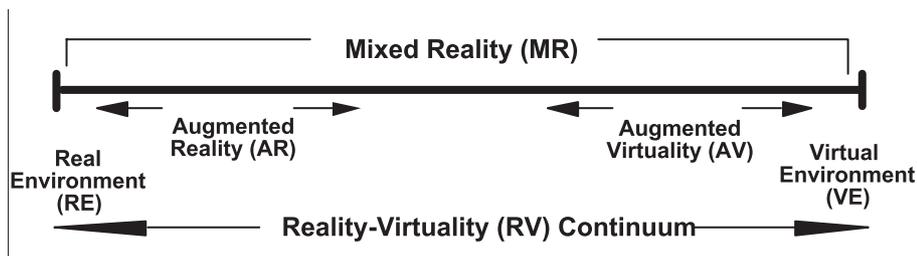


Figura 2. Definición de Realidad Mixta dentro del continuo de la realidad virtual, Fuente: [Milgram, et al. 1994]

En los últimos años el termino virtualidad aumentada (AV) ha caído en desuso, y se ha tendido a clasificar los sistemas entre Realidad Virtual, Realidad Mixta y Realidad Aumentada. Aunque la línea de separación sigue siendo difusa, se dividen los sistemas de Realidad Aumentada, según la definición de [Azuma. 1997], entre sistemas de Realidad Aumentada o Realidad Mixta. Para esta diferencia se atiende a donde se realiza la interacción del usuario. Si el usuario se mueve de forma natural por el mundo real,

obteniendo información adicional a través de dispositivos como gafas, móviles, etc. se considera Realidad Aumentada. Mientras que si el usuario no se mueve de forma natural por el mundo, sino que por ejemplo, observa el mundo a través de la webcam fija de un ordenador, con información virtual superpuesta, se considera Realidad Mixta. La gran similitud entre Realidad Aumentada y Realidad Mixta, hace que compartan retos comunes, y que muchas veces se hable en la bibliografía de una u otra indistintamente refiriéndose a ambas. Por ejemplo, [Carmigniani, et al. 2011] define la Realidad Aumentada como una visión directa o indirecta, de un objeto real, el cual es aumentado añadiendo información generada por computador. [Haringer and Regenbrecht. 2002] enuncia que Realidad Mixta (MR) y Realidad Aumentada (AR) definen un nuevo entorno donde convergen lo real y lo virtual.

2.1 Evolución histórica de la Realidad Aumentada

A continuación se muestra una línea temporal con los principales hitos en la evolución histórica de la Realidad Aumentada desde sus orígenes hasta la aparición de las primeras aplicaciones en PDAs en el año 2001.

1962 **Morton Heilig** inventa uno de los primeros sistemas de inmersión sensorial, “**Sensorama**” [L. 1962], **Figura 3** (izda.). Este sistema, anterior a la computación digital, mezclaba estímulos visuales, olfativos y sonoros con movimiento para ofrecer una nueva visión de las películas a través de todos los sentidos.

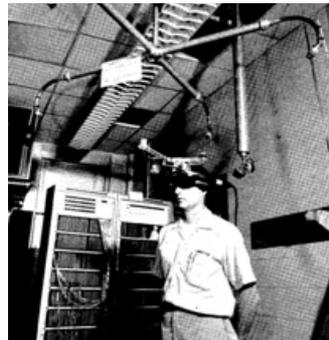
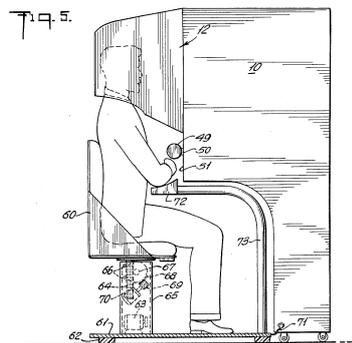


Figura 3. “**Sensorama**” (izda.), Fuente: [L. 1962]; “**La espada de Damocles**” (dcha.), Fuente: [Sutherland. 1968]

1968 **Ivan Sutherland** crea “**La Espada de Damocles**”, el primer sistema de Realidad Aumentada, que también es el primer sistema de Realidad Virtual, [Sutherland. 1968], **Figura 3** (dcha.). Este sistema utiliza un casco de tipo *see-through* y el

punto de vista es capturado por un sistema mecánico de 6 grados de libertad.

1985 Myron Krueger crea "**Videoplace**", [Krueger, et al. 1985]. un laboratorio donde mezclando diversas tecnologías los usuarios podían interactuar con contenidos virtuales. Krueger también denominó a este lugar "espacio sensible".

1980 Steve Mann crea un prototipo de computadora vestible, un sistema que superpone texto a la visión colocando un monitor, sujeto a un casco, frente al ojo del usuario [Mann. 1997].

1992 Tom Caudell y David Mizell acuñan el **termino Realidad Aumentada** durante sus trabajos en la empresa Boeing [Caudell and Mizell. 1992].

1993 Louis B. Rosenberg presenta "**Virtual Fixtures**", un sistema donde se añaden controles virtuales al usuario para mejorar la tele presencia [Rosenberg. 1993].

Steve Feiner, Blair MacIntyre y Dorre Seligmann publican "**KARMA**", un sistema de Realidad Aumentada para comunicar diversos conocimientos al usuario durante el desarrollo de tareas [Feiner, et al. 1993]. Este es considerado como el primer estudio publicado sobre un sistema de Realidad Aumentada.

1994 Paul Milgram y Fumio Kishino definen el "**Continuo Realidad-Virtualidad**" [Milgram, et al. 1994].

1997 Ronald Azuma escribe el primer estudio sobre Realidad Aumentada [Azuma. 1997]. En este estudio define los requisitos que debe cumplir un sistema para considerarse un sistema AR. Este estudio continúa siendo la referencia principal en las publicaciones científicas actuales.

Steve Feiner, Blair MacIntyre, Tobias Höllerer y Anthony Webster publican un artículo describiendo el sistema "**MARS**" un prototipo de Realidad Aumentada Móvil para dar información a turistas y visitantes. El sistema se compone de un ordenador y batería en una mochila, un HMD (*head mounted display*), GPS, brújula digital y un dispositivo de mano para la interacción [Feiner, et al. 1997].

1998 Rames Raskar, Welch & Henry Fuchs crean la Realidad Aumentada Espacial (*Spatial Augmented Reality*) [Raskar, et al. 1998].

- 1999** Hirokazu Kato y Mark Billinghurst presentan **ARToolKit** en el centro de investigación HITLab [Kato and Billinghurst. 1999].
- 2000** Bruce Thomas desarrolla “**ARQuake**”, Figura 4, el primer juego AR portátil tanto para interior como para exterior [Thomas, et al. 2000].



Figura 4. “ARQuake”, Fuente: [Thomas, et al. 2000]

- 2001** Aparecen las primeras aplicaciones AR en PDAs [Geiger, et al. 2001].

2.2 Requisitos de aplicaciones AR-MR

Cualquier sistema AR-MR debe cumplir los 3 requisitos definidos por [Azuma. 1997]: combinar lo real y virtual, interacción en tiempo real y mantener una coherencia espacial en 3 dimensiones. Estos 3 requisitos (aunque en distinto orden de preferencia) son compartidos por un gran número de autores, entre los cuales, por ejemplo, [Haringer and Regenbrecht. 2002], definen que la Realidad Aumentada se enfrenta a tres retos: Visualización de gran calidad, correlación real-virtual y ejecución en tiempo real.

2.2.1 Combinar elementos reales y virtuales: dispositivos de visualización

Los sistema AR-MR presentan al usuario una mezcla de elementos reales y virtuales, y por tanto todo sistema de este tipo precisa de un método/dispositivo para que el usuario pueda visualizar dicha combinación. La visualización de elementos virtuales sobre los objetos reales no significa necesariamente que sean modelos 3D realistas de los mismos, sino que esta información virtual puede ser de cualquier tipo: texto, fotos, videos, modelos 3D, esquemas, etc. Cualquier información relacionada con el entorno que estamos observando es factible de aparecer en una aplicación AR-MR aunque será necesario encontrar la mejor representación visual de la misma. Por ejemplo cuando se visualiza una obra de construcción, las partes no construidas pueden representarse con

modelos 3D de las mismas, sin embargo en las partes ya construidas es más útil mostrar una representación esquemática superpuesta.

En este apartado no solo debe considerarse la forma en que se representan los elementos virtuales, sino también el dispositivo utilizado para combinarlos con la imagen real. “Un dispositivo de visualización es un sistema de formación de imágenes que utiliza un conjunto de componentes ópticos, electrónicos y mecánicos para generar imágenes en algún lugar del camino óptico entre el ojo del observador y el objeto físico aumentado” [Bimber and Raskar. 2005]. Estos dispositivos de visualización pueden clasificarse de dos formas principales, según la forma en que muestran el mundo real o según donde se realiza la mezcla real-virtual (dentro de la línea que forma el ojo del observador y el objeto aumentado).

Clasificación de los dispositivos en función de la representación de la imagen real: Video see-through y Optical see-through

En un sistema AR-MR se realiza la suma de imagen real e imagen virtual. La imagen real puede provenir de dos fuentes diferentes: una cámara que captura la imagen o la propia visión del usuario. En el primer caso, conocido como “Video see-through”, la imagen capturada se combina con la imagen sintética para mostrarse finalmente al usuario a través de una pantalla. El usuario nunca ve la imagen real por sí mismo, sino que siempre visualiza la imagen sobre un monitor. En este apartado se comprenden tanto cascos de Realidad Aumentada, donde el monitor y la cámara van montados sobre la cabeza del usuario, Figura 5 (izquierda), como sistemas donde el monitor y la cámara se encuentran por separado, e incluso puede que solo la cámara sea móvil, Figura 5 (derecha).

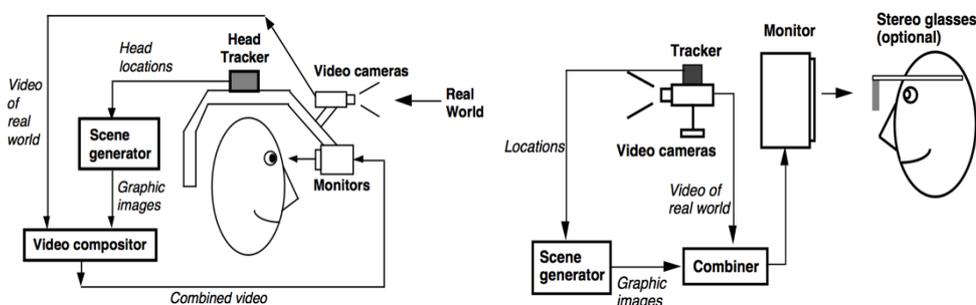


Figura 5. Esquemas de visualización "Video see-through", Fuente: [Azuma. 1997]

En el segundo caso, conocido como “Optical see-through”, la imagen real no debe mostrarse en ninguna pantalla, pero es necesario un dispositivo de visualización capaz de

mostrar la imagen virtual sobre la propia vista del usuario, Figura 6. Este tipo de dispositivos de visualización son más caros y difíciles de encontrar.

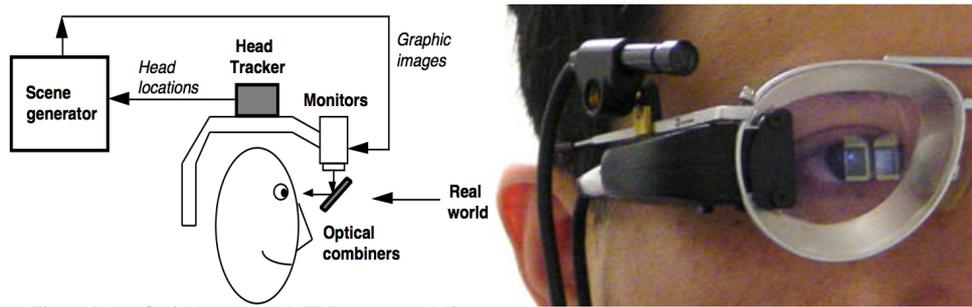


Figura 6. Esquema de visualización "Optical see-through" (izda.), Fuente: [Azuma. 1997]; gafas de visualización AugVisHMD (dcha.), Fuente: www.geocities.ws

A priori ninguno de los dos tipos de visualización es mejor que el otro, y su uso depende del tipo de sistema y condiciones de aplicación del mismo. Los de tipo óptico tienen la ventaja de que el sentido de la vista del usuario observa la imagen real de los objetos, por lo que es menos intrusivo. Sin embargo es mucho más complejo mostrar la información virtual superpuesta por varios motivos: el objeto virtual tiene una resolución diferente a nuestro sentido de la vista, los colores y contraste de este tipo de dispositivos de visualización todavía son de baja calidad al igual que la ocultación que ofrecen y no cubren todo nuestro campo de visión. Este tipo de sistema es adecuado para aplicaciones en las que el usuario se mueve observando el mundo real y la información virtual simplemente muestra indicaciones esquemáticas. En la Tabla 1 se muestran las principales ventajas y desventajas principales de cada uno.

Vídeo see-through	Optical see-through
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Las imágenes real y virtual son más homogéneas, puesto que ambas se muestran en una pantalla. ✓ Existe mayor número de dispositivos de este estilo en el mercado. ✓ La alineación espacial de objetos reales y virtuales es mejor, puesto que el punto de vista se calcula en base a la imagen de la cámara. ✗ El usuario no ve el entorno real, sino la imagen capturada por una cámara. ✗ Ángulo de visión limitado por la cámara. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ El usuario ve el entorno real. ✓ Menos intrusivo. ✗ La imagen virtual no se mezcla bien con la real, puesto que se muestra en una pantalla traslúcida. ✗ La imagen virtual no cubre todo el campo de visión del usuario. ✗ No existen muchos dispositivos de este estilo en el mercado. ✗ Necesita un dispositivo de captura adicional para calcular el punto de vista del usuario.

Tabla 1. Comparación Vídeo see-through y Optical see-through

Clasificación de los dispositivos en función del lugar de generación de la imagen virtual

La segunda clasificación de los dispositivos de visualización se puede realizar atendiendo al lugar donde se realiza la mezcla de la información real y virtual. Como muestra la Figura 7, los dispositivos de visualización pueden clasificarse en 3 grupos, dependiendo de si la mezcla se realiza más cerca del ojo del usuario, o más cerca del objeto aumentado. En orden de cercanía al ojo del usuario los 3 grupos son: “*head-attached*” (dispositivos sujetos a la cabeza del usuario), “*hand-held*” (dispositivo de mano) y “*spatial*” (dispositivos de AR espacial). A continuación se explica en detalle cada uno de ellos.

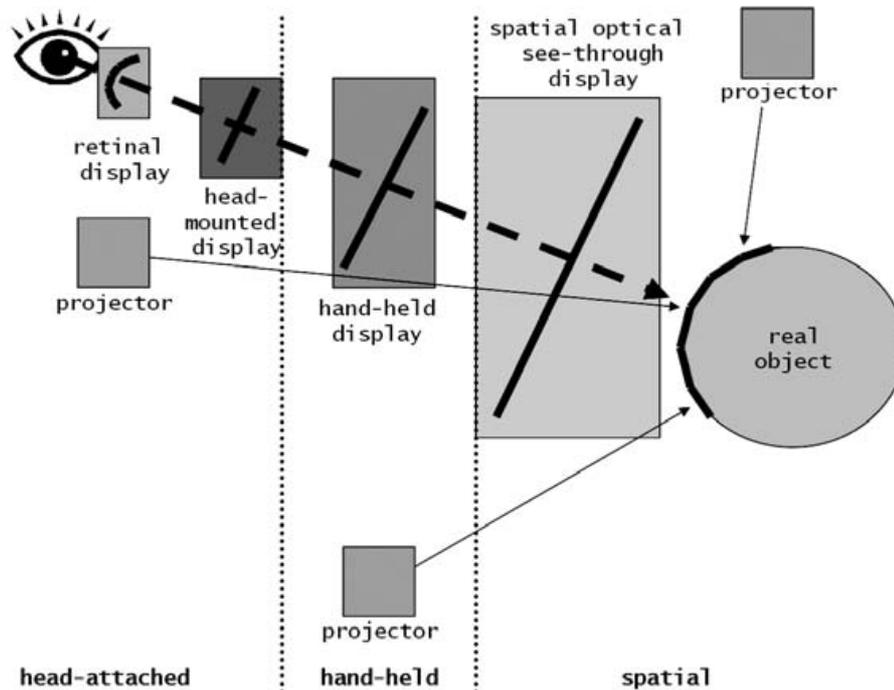


Figura 7. Clasificación de los dispositivos de visualización AR-MR. Fuente: [Bimber and Raskar. 2005]

El primer grupo serían los “*head-attached*”, es decir dispositivos de visualización sujetos a la cabeza del usuario, como por ejemplo: cascos, gafas, lentillas, etc. La pantalla (*display*) se mueve junto con el usuario, por lo que es posible aumentar cualquier objeto sin necesidad de hardware adicional. En estos dispositivos el usuario tiene las manos libres, pero a cambio debe vestir un dispositivo en la cabeza que en la mayoría de casos es pesado o requiere cables. Al ser un monitor colocado muy cerca del ojo, el usuario no puede interactuar directamente con la pantalla, tal y como estamos acostumbrados a

hacerlo, sino que deben utilizarse mecanismos de interacción adicionales (voz, botones incluidos en el dispositivo, etc.). Aunque este tipo de dispositivos podría parecer el ideal para aplicaciones de Realidad Aumentada, puesto que se coloca en nuestra cabeza y aumenta nuestro sentido de la vista, la realidad es que su complejidad técnica hace que sea una solución poco extendida en el mercado. La necesidad de pantallas que cubran un gran ángulo de visión con una buena resolución y además no afecten al ojo del usuario es un reto en el que se trabaja actualmente, con resultados como Google Glass [Google. 2014] o Oculus Rift [Oculus VR. 2015]. El último prototipo presentado en el momento de la redacción de esta tesis, es HoloLens de Microsoft [Microsoft. 2015], unas gafas inalámbricas de tipo *optical see-through*, que además incorpora una potente biblioteca de desarrollo de aplicaciones basadas en el movimiento de las manos del usuario.

El segundo tipo los *hand-held*, o dispositivos de mano, son aquellos que el usuario sujeta y utiliza a modo de cámara de video ó linterna para enfocar hacia el objeto que desea aumentar. En este caso el usuario ya no tiene las manos libres, pero a cambio si tienen libre el sentido de la vista por lo que la navegación por el mundo real es menos peligrosa con el tipo anterior. Los dispositivos de manos son los más extendidos en la actualidad gracias a los “*smartphones*” (teléfonos inteligentes). Los *smartphones* integran en un único dispositivo: dispositivo de adquisición de imagen (cámara) dispositivo de visualización (pantalla) y mecanismos de interacción (micrófono, pantalla táctil, botones, etc.) Esto hace que este tipo de dispositivos, disponibles en gran variedad de tamaños, se ajusten a las necesidades de un gran número de aplicaciones AR-MR.

El último tipo, denominado *spatial*, o dispositivos de Realidad Aumentada espacial, son aquellos que aumentan directamente el objeto. En este caso podemos encontrar pantallas semi-transparentes ó proyectores que enfocan a los objetos aumentados. En este caso un único dispositivo aumenta una única zona del espacio, pero a cambio sirve para varios usuario de forma simultánea. Además con este tipo de tecnología el usuario es completamente libre puesto que no “*viste*” ningún dispositivo que se encargue de aumentar su visión.

En la Tabla 2 se muestra un resumen de las principales ventajas y desventajas de cada uno.

Head attached	Hand held	Spatial
<ul style="list-style-type: none"> ✓ El usuario lleva las manos libres ✓ Se aumenta cualquier objeto hacia el que miremos (inmersivo) ✗ Campo de visión limitado ✗ Complejidad técnica en la fabricación de monitores ✗ Visión distorsionada del entorno ✗ Un dispositivo por usuario 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Existe una gran variedad de dispositivos en el mercado ✓ Dispositivos autónomos con todo el hardware integrado ✓ Fáciles de utilizar, su uso es similar a una cámara de video ✗ La visión aumentada se limita a la zona del espacio que observamos a través del dispositivo (poco inmersivo) 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ El usuario no lleva ningún dispositivo ✓ Es más natural para la vista del usuario ✓ Múltiples usuarios simultáneamente ✗ Se necesita un dispositivo por cada zona del espacio que se desee aumentar

Tabla 2. Ventajas y desventajas de Head attached, Hand held y spatial displays

2.2.2 Interacción en tiempo real

El segundo requisito de los sistema AR-MR es que deben ser interactivos. Según el diccionario, un sistema interactivo es aquel que permite una interacción, a modo de diálogo, entre el ordenador y el usuario. Es decir el sistema reacciona a ciertas órdenes o acciones del usuario. Este requisito es el que evita que se consideren sistemas AR-MR a las películas, puesto que aunque existe una mezcla entre imagen real y virtual (efectos especiales) el usuario no puede interactuar con los mismos, sino que están previamente grabados. Sin embargo, no llega a definirse en ningún momento el tipo de interacción que debe existir entre el usuario y el entorno. Por ello se pueden encontrar, tanto aplicaciones AR-MR altamente interactivas en las que el usuario crea contenido virtual asociado a objetos, lo modifica, etc. como aplicaciones poco interactivas, en las que la interacción simplemente se limita a que el usuario se mueve por el entorno, observando información virtual que se le presenta relacionada con lo que le rodea.

En los sistemas AR-MR se busca que la interacción del usuario con los objetos aumentados sea lo más transparente y natural posible, por lo que no solo se utilizan los mecanismos de interacción tradicionales (teclado y ratón), sino que se utilizan otros más complejos como la captura de movimiento, el reconocimiento de voz, etc. En este sentido, la manipulación de los objetos reales es un método muy intuitivo de interacción con la información aumentada. El usuario no debe aprender a manejar los objetos reales (cogerlos, moverlos, girarlos, etc.) sino que ya lo hace en el mundo real. Bajo esta premisa, en un primer lugar [Ishii and Ullmer. 1997] definieron los interfaces tangibles (TUIs), como aquellos en los que se modifica la información virtual por medio de objetos reales. Más tarde [Kato, et al. 2000] acuñaron el termino “**Tangible AR**” aplicando esta técnica a aplicaciones de Realidad Aumentada. En la bibliografía podemos encontrar

diversos estudios en los que se utilizan variedad de elementos reales como “manipuladores”. [Kato, et al. 2000] utilizan un puntero provisto de una marca para colocar mobiliario virtual en un entorno real, [Reitmayr, et al. 2005] aumentan información sobre un mapa real, donde un marco sirve para acceder de imágenes del lugar y otra herramienta permite obtener coordenadas del punto marcado. El libro universal multimedia [Gupta and Jaynes. 2006] describe un interfaz en el que el propio libro es a la vez, superficie de proyección y superficie táctil. En [Vinot, et al. 2014] se describe un interfaz para el tráfico aéreo donde se combinan las tarjetas que usan actualmente los controladores aéreos con un lapicero que permite escribir de forma virtual sobre las mismas, Figura 8. Los interfaces tangibles tienden a combinar el uso de objetos reales con la voz y gestos del usuario. Cuando se combinan varios métodos de interacción de forma simultánea se da lugar a la “interacción multimodal”. Según [Bourguet. 2003], “interacción multimodal se refiere a la interacción con el entorno real y virtual por medio de mecanismos naturales de comunicación”.

Otro tipo de interacción en aplicaciones AR-MR es la que se realiza con otros usuarios dando lugar a sistemas colaborativos de Realidad Aumentada (“*Collaborative AR*”). En este tipo de sistemas varios usuarios comparten la misma información virtual y cada uno de ellos puede modificarla. Los cambios que realiza un usuario lo ven reflejados los demás por lo que se establece un marco de trabajo común. En este apartado podemos distinguir entre aplicaciones colaborativas donde los usuarios se encuentran en el mismo lugar, o de tipo remoto en las que los usuarios pueden estar incluso en países diferentes. En el primer caso los usuarios observan los mismos objetos aumentados, como por ejemplo [Wagner, et al. 2005], que implementan un tren aumentado en tres dimensiones sobre un mapa real de la vía, Figura 8. En esta aplicación cada usuario puede modificar los cruces de la vía para cambiar el camino que sigue el tren. Otro ejemplo es [Henrysson, et al. 2005], donde dos usuarios colocados uno frente a otro, juegan al tenis con una pelota virtual que observan y manipulan utilizando smartphones. En este tipo de aplicaciones la interacción entre los usuarios se hace cara a cara, sin pasar por el sistema AR-MR y la colaboración se limita a modificar la información virtual. En el segundo tipo, donde los usuarios no están cara a cara, el sistema AR-MR se utiliza para crear un canal de comunicación entre los usuarios. El objetivo de este tipo de aplicaciones es normalmente mejorar la sensación de presencia al mantener un diálogo con otros usuarios, o mejorar la forma de transmitir la información entre ellos. Por ejemplo, [Kato and Billinghurst. 1999] proponen un sistema de videoconferencia donde el usuario ve el video de los demás sobre unos marcadores, de forma que puede distribuirlos a su antojo sobre la mesa para

mejorar la forma de comunicarse con ellos. [Stafford, et al. 2006] proponen un nuevo mecanismo para comunicar información de cómo llegar a un lugar, donde un usuario se encuentra en el exterior y otro usuario quiere indicarle de forma remota la posición exacta a la que desea llegar.

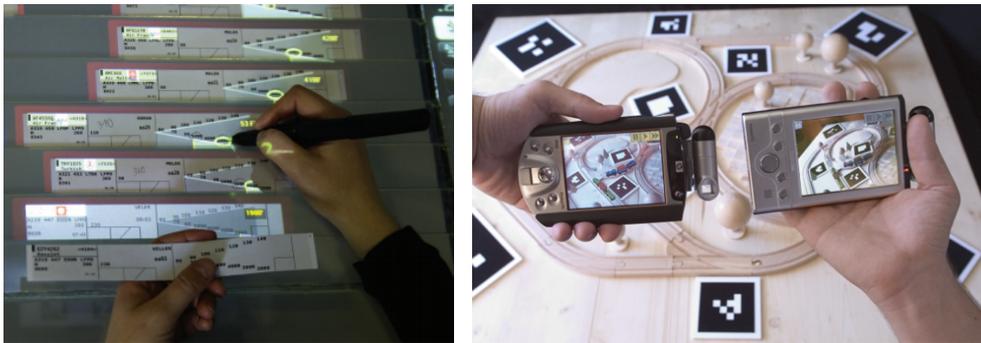


Figura 8. "Tangible AR" (izda.), Fuente: [Vinot, et al. 2014]; Realidad Aumentada colaborativa (dcha.), Fuente: [Wagner, et al. 2005]

2.2.3 Correlación real-virtual: captura del punto de vista

La tercera característica que todo sistema AR-MR debe cumplir es que se produzca una correlación espacial y en tres dimensiones entre los objetos reales observados y la información virtual que los complementa. Esta correlación se consigue generando la imagen de la escena virtual con una cámara virtual colocada en el punto de vista del usuario. Ambas cámaras deben tener los mismos parámetros intrínsecos [Young. 1971]: ángulo de apertura, relación de aspecto de la imagen y distorsión focal. De esta forma la cámara virtual genera una imagen similar a la que observaría el ojo del usuario si este pudiese ver la información virtual. Para realizar esto, es necesario calcular el punto de vista del usuario en todo momento, o la posición y orientación de la cámara que captura la imagen real en caso de sistemas *video see-through* (apartado 2.2.1). Este proceso de capturar el punto de vista del usuario se puede realizar utilizando diversos tipos de captura y en la bibliografía recibe el nombre de "tracking".

El primer tipo de captura que encontramos es la basada en sensores. Este tipo de captura tiene su origen en la realidad virtual, donde se utilizaba para calcular el punto de vista del usuario en sistemas inmersivos. Los 5 tipos principales son: magnéticos, acústicos, ópticos, inerciales y mecánicos. Los 3 primeros se basan en el uso de dos dispositivos: emisor y receptor. En todo momento el emisor emite una señal (acústica, magnética o luminosa), que es medida por el receptor y en función de la intensidad u

otros valores se calcula la posición relativa entre ambos. En los de tipo inercial un dispositivo sujeto al usuario mide aceleraciones para calcular el movimiento de este. En este caso no se necesita emisor, pero tampoco se tiene un sistema de referencia claro por lo que se producen errores de deriva, “drift error” [Foxlin. 1996]. Por último los de tipo mecánico usan principalmente potenciómetros colocados en estructuras que debe vestir el usuario. En función del valor de rotación entre los elementos de esta estructura se puede calcular el punto de vista del usuario. La Tabla 3 muestra un resumen comparativo de los distintos tipos de sensores.

	Mecánicos	Acústicos	Magnéticos	Ópticos	Inerciales
Precisión	Alta	Media	Alta	Muy Alta	Baja
Área de captura	Limitada por los cables y estructuras	Limitada a la potencia de los emisores	Limitada a la potencia del emisor central	Limitada al campo de visión de las cámaras	Ilimitada
Datos capturados	Ángulos	Posiciones de emisores en el espacio	Posición y orientación con respecto al emisor central	Posiciones de los marcadores en el espacio	Posiciones y orientaciones relativas
Activo / Pasivo	Activo	Activo	Activo	Pasivo en la mayoría de los casos	Activo
Emisor-Receptor	Inside-in	Outside-in	Inside-out	Outside-in	Inside-in
Eje común coordenadas	No	Si	Si	Si	No
Necesidad de cables	Si	No	Si	No	No
Interferencias	No	Si, sonidos en la frecuencia de los emisores	Si, metales o campos magnéticos cercanos	No es común encontrar interferencias de luz infrarroja	No
Varios usuarios	No	Si	Si	Si	Si
Otras ventajas			Baratos	Gran número de marcadores simultáneos Bajo precio añadir nuevos marcadores	Baratos
Otras desventajas	El sistema se monta sobre un exoesqueleto que dificulta el movimiento	No capturan todos los emisores a la vez, sino de forma secuencial Necesidad de cinemática inversa	Mucho ruido en los datos Número de receptores limitado	Problemas de ocultación Necesidad de cinemática inversa No es posible diferenciar los marcadores Coste alto de las cámaras	Error de deriva

Tabla 3. Comparación de sensores de captura de movimiento

La captura basada en sensores se utilizaba en los primeros sistemas AR-MR pero en la actualidad no están muy extendidos, siendo los métodos de captura basados en análisis de imagen los más populares. Los métodos de captura basados en análisis de imagen utilizan técnicas de visión por computador para calcular el punto de vista de una cámara en función de los objetos que observa. Estos métodos requieren mucha más capacidad de procesamiento que los basados en sensores, pero a cambio no utilizan ningún hardware adicional. Este tipo de sistemas son los que más se han investigado y por tanto las que han experimentado una mayor evolución hasta el punto que en la actualidad son la base de la gran mayoría de aplicaciones AR-MR. Dependiendo del tipo de análisis de imagen podemos realizar una distinción entre: sistemas basados en características o basados en modelo.

Los sistemas basados en características son los primeros que aparecieron y el mayor ejemplo es la biblioteca ARToolKit [Kato and Billinghurst. 1999]. En los sistemas basados en características se intenta reconocer puntos conocidos en la imagen 2D, de los cuales conocemos su posición 3D. Por medio de algoritmos de minimización del error se calcula la posición y orientación de cámara que minimiza el error de reproyección de los puntos 3D encontrados al reproyectarlos y compararlos con los puntos 2D de la imagen original. Estos algoritmos se descomponen por tanto en 3 fases: generar una lista de puntos conocidos con sus coordenadas en 3D, extracción de características de la imagen 2D y por último calcular la posición de cámara en función de ambos conjuntos de puntos. En función de la naturaleza de los puntos 3D que se utilizan como referencia podemos realizar una nueva clasificación: basados en marcadores o basados en características naturales. Los primeros introducen elementos de referencia para simplificar el procesos de análisis y reconocimiento de los puntos, como por ejemplo las bibliotecas ARToolKit o Vuforia[Qualcomm Inc. 2015]), mientras que los segundos parten de una posición conocida e intentan descubrir nuevos puntos a medida que se mueve la cámara, como por ejemplo los algoritmos de tipo SLAM (*Simultaneous Location And Mapping*) o PTAM (*Parallel Tracking And Mapping*). Ambos métodos son complementarios pudiendo utilizar una imagen plana como referencia inicial y a partir de ahí intentar reconocer el entorno para no limitar el espacio a donde el marcador es visible.

Los sistemas basados en modelo no usan una lista de puntos 3D para describir el mundo real, sino modelos 3D que lo describen. En este caso el análisis no se basa en coincidir puntos, sino estructuras más complejas como superficies o aristas. Este tipo de métodos todavía son experimentales, y no están tan extendidos como los basados en características. Un ejemplo de este tipo de sistemas sería[Gimeno, et al. 2010] donde se

calcula el punto de vista del usuario a través de la *skyline* (línea entre el edificio y el cielo) de la Sagrada Familia para ofrecer una vista aumentada de la misma.

Aunque se han expuesto los distintos tipos de sistemas de captura, es muy común encontrarlos mezclados para compensar las carencias o fallos de cada uno, dando lugar a lo que se conoce como sistemas híbridos (*hybrid tracking*). Una combinación muy común es mezclar los sistemas de captura basados en características con los inerciales, puesto que dispositivos como los smartphones integran tanto cámara, como acelerómetro y giroscopio. En este caso los sensores dan una referencia de los movimientos rápidos de cámara, mientras que el análisis de imagen calcula la posición con mayor precisión cuando logra reconocer puntos conocidos.

2.3 Campos de aplicación de AR-MR

Este paradigma de interacción, en el que el usuario percibe mezclado lo real y lo virtual, es muy útil y de directa aplicación en campos como la educación, medicina, industria, construcción, etc. a continuación se muestran algunos ejemplos.

2.3.1 Educación y Pedagogía

Según [Kirkley and Kirkley. 2004], “La transformación de la enseñanza y el aprendizaje causada por la tecnología proporciona grandes oportunidades para diseñar entornos de aprendizaje que sean: realistas, auténticos, interesantes y extremadamente divertidos”. La rápida evolución de la tecnología ha cambiado radicalmente el campo de la educación. En la actualidad un gran número de avances tecnológicos han sido integrados con éxito en el proceso pedagógico: ordenadores, recursos multimedia, internet, e-learning y recientemente el uso de dispositivos móviles. Todos estos avances sirven como nuevos caminos para hacer llegar la información a los alumnos, o presentarla de forma más atractiva, sin embargo en todos ellos la información se muestra de forma independiente a la realidad. Con el uso de Realidad Aumentada, lo que se persigue es poder mostrar los contenidos teóricos fusionados con la realidad, de forma que sean más comprensibles. En la bibliografía se pueden encontrar numerosos artículos que exploran el uso de AR-MR como herramienta educativa, recopilan los artículos más relevantes y obtienen sus propias conclusiones [Kirkley and Kirkley. 2004, Yu, et al. 2010, Kesim and Ozarslan. 2012, Lee. 2012, Nincarean, et al. 2013]. La conclusión común de la mayoría, es que aunque no se puede demostrar que el uso de AR-MR mejore el aprendizaje, si demuestra: motivar, entretener y llamar la atención de los estudiantes, por lo que todos

ellos consideran que esta tecnología es adecuada para su aplicación en el campo de la educación.

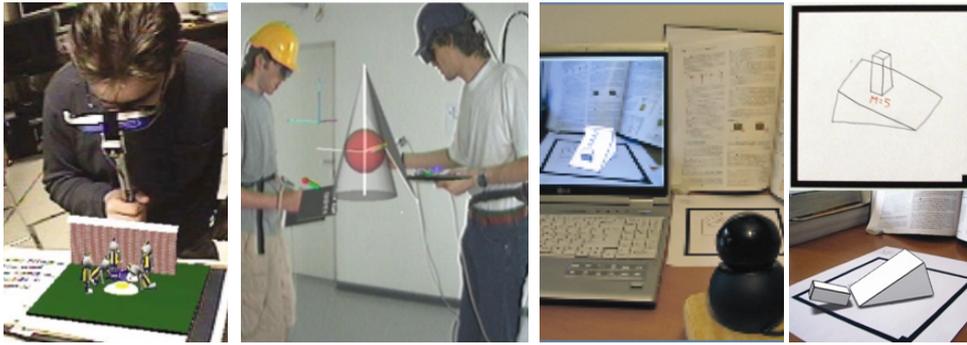


Figura 9. "The Magic Book" (izda.), Fuente: [Billinghurst, et al. 2001]; Construct3D (centro), Fuente: [Kaufmann. 2000]; In-Place 3D Sketching (dcha.), Fuente: [Bergig, et al. 2009]

Atendiendo a ejemplos de aplicación concretos, [Billinghurst, et al. 2001] explora el uso de un "Libro Mágico" como puerta de enlace entre lo real y lo virtual. En este sistema los usuarios utilizan unas gafas de Realidad Aumentada para observar un libro, que además de los contenidos tradicionales, contiene marcas ARToolKit (esta biblioteca se explica en detalle en el apartado 2.4.1). Sobre dichas marcas, se muestran modelos 3D animados que representan las explicaciones contenidas en el libro, como se puede observar en la Figura 9 (izda.). [Kaufmann. 2000] explican su sistema denominado Construct3D, para la enseñanza de matemáticas y geometría. En este sistema dos estudiantes provistos de gafas AR pueden construir figuras geométricas que flotan en el espacio, y realizar las operaciones matemáticas típicas sobre ellas de forma visual, como muestra la Figura 9 (centro). Ambas aplicaciones requieren el uso de costoso hardware dedicado para la visualización de la Realidad Aumentada. [Bergig, et al. 2009] muestra una aplicación en la que utilizando un PC y una webcam, los alumnos pueden dibujar figuras geométricas en una hoja de papel, las cuales son interpretadas por el programa que muestra una simulación física (con gravedad) del movimiento de las mismas (Figura 9 derecha).

En la actualidad el avance tecnológico de los teléfonos móviles y su amplia difusión en la sociedad, permiten crear aplicaciones accesibles para casi cualquier alumno. [Wagner, et al. 2006] desarrollaron un juego educativo llamado Virtuoso, Figura 10 (izda.), con el que varios alumnos recorrían un museo para completar una serie de metas. En este estudio se crearon diferentes grupos de alumnos, que utilizaron la versión de Realidad Aumentada, una versión en PC y una versión en papel del mismo juego. Para la

visualización aumentada cada alumno llevaba consigo una PDA con la que exploraba el museo simplemente apuntando con la cámara a los marcadores colocados en las paredes. El resultado más concluyente de este estudio fue que los alumnos interactuaban más entre sí con las versiones de Realidad Aumentada y papel, que con el juego en PC, mientras que la versión aumentada fue la que los alumnos eligieron como la que les gustaría encontrar en cualquier museo. [Wernhuar Tarng and Kuo-Liang Ou. 2012] muestran un sistema para enseñar a los alumnos el ciclo de vida de las mariposas y su ecosistema. En este sistema de nuevo cada alumno lleva un teléfono móvil para la visualización aumentada, Figura 10 (centro), y el punto de vista se calcula utilizando el GPS y brújula digital incorporados en el dispositivo. Como conclusión del estudio realizado con 60 estudiantes, la mayoría encontraron el sistema: fácil de usar, divertido y rico en contenidos que les ayudan a comprender mejor el ciclo de vida de las mariposas. [Ibáñez, et al. 2014] muestran un sistema para que los alumnos puedan experimentar con imanes y circuitos eléctricos por medio de fichas que simbolizan los distintos componentes y tablets para la visualización, Figura 10 (dcha.). En este caso cabe resaltar que los alumnos pueden montar distintos circuitos simplemente moviendo las tarjetas de papel y ver el resultado de forma gráfica apuntando hacia el circuito con sus tablets.



Figura 10 "Virtuoso" (izda.), Fuente: [Wagner, et al. 2006]; Butterfly ecology learning system (centro), Fuente: [Wernhuar Tarng and Kuo-Liang Ou. 2012]; aplicación para experimentar con el electromagnetismo (dcha.), Fuente:[Ibáñez, et al. 2014]

2.3.2 Ciencias de la Salud

Revisando la bibliografía existente se encuentran 3 campos principales de aplicación de la Realidad Aumentada a la medicina: Visualización de información sobre el cuerpo del paciente, asistencia ó guiado durante intervenciones médicas y la formación médica.

Dentro del campo de la medicina el uso de AR-MR es interesante sobre todo por la capacidad de mostrar información no visible a simple vista sobre el propio cuerpo del paciente, que en la mayoría de casos es la parte del mundo real que se desea aumentar. A menudo los médicos y personal sanitario disponen de una gran cantidad de información sobre el paciente que tienen frente a ellos, pero esta información se encuentra distribuida en múltiples formatos y soportes: informes en papel, imágenes impresas, imágenes digitales, radiografías, CTs (Tomografías por Computador), etc. La Realidad Aumentada puede ofrecer un nexo de unión entre toda esa información y el propio paciente, de forma que se pueda visualizar contextualizada sobre él. Con esta finalidad deben abordarse varios problemas: distintos tipos de información, si la información se captura o no en tiempo real, tener un dispositivos de visualización adecuado al entorno médico y cómo capturar la posición del paciente. [Lamounier, et al. 2010] proponen un sistema de visualización del corazón de una persona sobre un marcador colocado en el pecho del paciente. En este caso el modelo 3D del corazón no es estático, sino que se simula en tiempo real acorde a los datos recogidos del paciente. El marcador colocado sobre el pecho del paciente hacer que el corazón se muestre en una zona cercana al corazón real pero sin una gran coincidencia espacial. [Lerotic, et al. 2007] proponen un sistema que proyecta imágenes del interior del corazón sobre uno real en procesos de cirugía. En este caso la captura del movimiento del corazón se basa en el reconocimiento de características, Figura 11 Izda., con lo que se obtiene una coherencia espacial perfecta entre el corazón real y la imagen proyectada, Figura 11 centro. En ambos estudios la información virtual es generada a partir de los datos del corazón del paciente y representada con un modelo 3D animado.



Figura 11. Captura del movimiento de la superficie no rígida de un corazón latiendo (izda.); proyección del interior de un corazón latiendo (centro); [Navab, et al. 2007] visualización de una CT sobre el pie del paciente (dcha.). Fuente: [Lerotic, et al. 2007]

[Navab, et al. 2007, Bichlmeier, et al. 2007] presentan sistemas en que el usuario observa datos CT sobre el cuerpo del paciente, Figura 11 (dcha.). En estos casos los datos no son modelos 3D prediseñados, sino que son los datos volumétricos capturados previamente por una tomografía del paciente.

Otro uso común de la Realidad Aumentada aplicada al campo médico es el de dar instrucciones ó teleasistencia al personal médico durante una intervención. La Realidad Aumentada permite mostrar sobreimpuestos sobre el propio paciente indicaciones precisas de cuales son los pasos de un proceso médico, en este caso cabe distinguir si estas instrucciones son generadas previamente en un proceso de planificación de la intervención o si una segunda persona está dando instrucciones en tiempo real. [Wilson, et al. 2013] realizan un estudio en el que ofrecen instrucciones visuales al personal médico por medio de unas gafas durante la inserción de un catéter en la garganta. Como resultado de este estudio se obtiene que los usuarios que utilizaban el sistema de asistencia con AR completaban la tarea correctamente más veces que los usuarios sin asistencia.

Por último la capacidad de los sistema AR-MR de contextualizar la información sobre el paciente, se utilizan en el proceso de formación del personal médico. Las aplicaciones AR-MR muestran la información sobre personas reales, lo que facilita su comprensión y mejora la asimilación de los contenidos. Por ejemplo, [Lamounier, et al. 2010] describen cómo utilizar su sistema para mejorar la comprensión de cómo funciona el corazón en estudiantes de medicina.

2.3.3 Industria

Diseño, montaje y mantenimiento son tres usos en los que la aplicación de los sistemas AR-MR puede ser interesante. El diseño es el proceso en el que los conceptos teóricos se ponen en práctica para cumplir con objetivos reales. Durante este proceso los sistemas AR-MR pueden mostrar al diseñador los modelos teóricos de forma que este los pueda modificar y ver los resultados sobre el propio objeto que esta diseñando, o sobre el lugar real al que se va a aplicar dicho diseño. [Doil, et al. 2003] describe un sistema en el que diseñar una cadenas de producción a partir de una biblioteca de elementos. En este sistema el diseñador puede modificar la posición de cada elemento rápidamente o ver el resultado sobre el propio entorno de la fábrica para comprobar su diseño. Otro ejemplo es el presentado por [Porter, et al. 2010], Figura 12 (centro), donde el diseñador puede ver los cambios que realiza en la distribución del salpicadero de un coche en tiempo real. En este caso se utiliza un modelo a escala real del coche de color blanco, sobre el que se

proyectan los controles y tapizados del salpicadero. De esta forma el proceso de diseño es colaborativo, puesto que varios diseñadores pueden ver simultáneamente el resultado de los cambios y comentar sus impresiones.

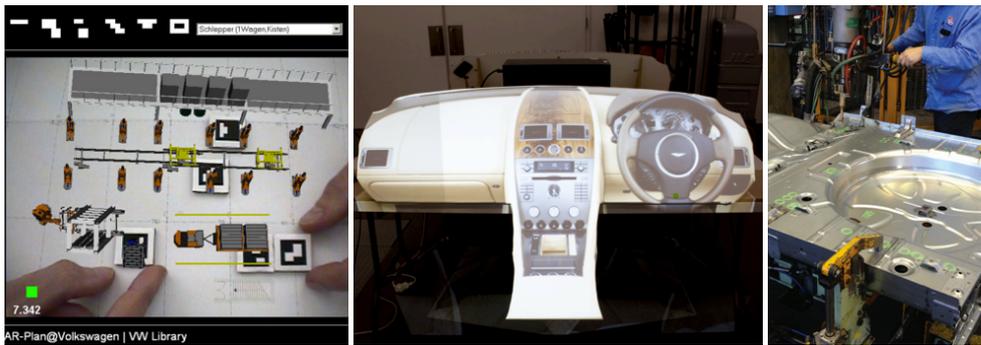


Figura 12. Diseño de una planta de producción utilizando AR (izda.), Fuente: [Doil, et al. 2003]; prototipo para el diseño de los salpicaderos utilizando Realidad Aumentada espacial (centro), Fuente: [Porter, et al. 2010]; indicaciones durante el montaje con realidad aumentada espacial (dcha.), Fuente: [Marner, et al. 2014]

El montaje es otro proceso industrial ampliamente investigado dentro del campo de la Realidad Aumentada. En este caso no se busca el plasmar contenidos teóricos sobre la realidad, sino dar indicaciones exactas a los trabajadores de cuáles son los pasos para completar la tarea. Estas indicaciones deben ser precisas, siendo especialmente importante la coherencia espacial de la información virtual con el objeto real sobre el que se trabaja. El primer estudio de este tipo es el ya mencionado de Boeing [Caudell and Mizell. 1992], que además es uno de los primeros sistemas de Realidad Aumentada que aparecen en la bibliografía. En la actualidad, es común encontrar aplicaciones de la Realidad Aumentada espacial, para proyectar las instrucciones sobre los objetos reales, como por ejemplo [Marner, et al. 2014] Figura 12 (dcha.). De esta forma el trabajador tiene las manos libres para realizar la tarea, y no tiene ningún dispositivo de visualización que interfiera su visión. Además, el inconveniente de la baja movilidad de los sistemas de Realidad Aumentada espacial, no presenta problemas en esta aplicación, puesto que los procesos de montaje se realizan siempre en los mismos lugares dentro de las fabricas.

El proceso de mantenimiento es similar en muchos aspectos al de construcción, puesto que el objetivo del sistema es dar instrucción al trabajador. Sin embargo en este la aplicación de Realidad Aumentada espacial no es conveniente porque normalmente en una fabrica muchas maquinas requieren mantenimiento, por lo que el trabajador que se dedica a ello tiene una alta movilidad. Además algunas maquinas simplemente requieren un mantenimiento cada largos periodos de tiempos, por lo que no se justifica la

instalación de un sistema de Realidad Aumentada espacial en dicha máquina. En estos casos el caso más común es que el trabajador utilice un dispositivo móvil. En este dispositivo se almacenan las instrucciones de cada uno de los procesos de mantenimiento para su visualización sobre cada máquina, pero además sirve como herramienta para planificar el mantenimiento y notificar a distintos trabajadores cual es su trabajo diario. Por último los trabajadores pueden utilizar estos dispositivos móviles para crear anotaciones in-situ sobre incidencias en el mantenimiento, de forma que otros trabajadores puedan visualizarlas. [Henderson and Feiner. 2009] realizan una evaluación de los beneficios de la AR en procesos de mantenimiento de vehículos militares. Como conclusión obtienen que los usuarios que utilizan el dispositivo AR emplean un menor tiempo en identificar y encontrar los elementos involucrados en el mantenimiento del motor del vehículo.

2.3.4 Edificación y Obra Civil

[Dunston and Shin. 2009] define en su estudio tres áreas principales de aplicación de la Realidad Aumentada al entorno de construcción: construcción (e inspección), interpretación y coordinación. El primer área, comprende aquellas labores en las que se utilizan AR-MR como ayudas visuales del proceso de construcción o inspección de obra, y es en la que encontramos mayor número de trabajos en la literatura. Algunos ejemplos concretos, [Thomas, et al. 1999] crearon un sistema en el que un usuario provisto de un HMD podía caminar por el campus visualizando información de la estructura de los edificios. Este primer sistema requería de una gran cantidad de componentes que el usuario debía “cargar”, Figura 13 (izda.), un ordenador montado en una mochila junto con una batería, una antena para la recepción de señal GPS y un casco de visualización (HMD). Sin embargo aunque aparatoso es un ejemplo perfecto de cómo la Realidad Aumentada puede aplicarse al campo de la construcción para dar información de estructuras ya construidas. [Hakkarainen, et al. 2009] presentan un sistema en el que el usuario puede observar in situ las distintas fases de la obra (incluso las no construidas), apuntando con un dispositivo móvil al lugar de construcción Figura 13 (centro). Adicionalmente, el usuario puede consultar la información BIM (“*building information modelling*”) de cada uno de los elementos, para obtener: tamaños, resistencias al calor, nivel de permeabilidad, etc. El segundo área, interpretación, abarca los casos en los que se utiliza AR-MR para ayudar al usuario a comprender mejor la estructura que esta observando, superponiendo por ejemplo notas de diseño, iconos, etc. El último área, la coordinación, comprende aquellas labores en las que AR-MR se usan como herramienta para completar

descripciones verbales, dibujos, etc. [Bae, et al. 2013] proponen un sistema de reconstrucción 3D y anotaciones sobre edificios basado en múltiples fotografías del mismo. El mismo sistema permite a un operario observar las anotaciones sobre los edificios reales, Figura 13 (dcha.) utilizando técnicas de visión por computador y reconocimiento de imágenes.



Figura 13 Visualización de información de estructuras (izda.), Fuente: [Thomas, et al. 1999]; visualización de información BIM y 4D (centro), Fuente: [Hakkalainen, et al. 2009]; anotaciones sobre fachadas reales utilizando AR (dcha.), Fuente: [Bae, et al. 2013]

Sin embargo estas deseables características de observar los modelos planificados juntos a las construcciones reales, son muy difíciles de aplicar en la realidad debido a las condiciones particulares de los entornos de construcción. Los entornos de construcción tienen condiciones incontrolables de iluminación, elementos móviles, interferencias y además requieren el uso de hardware preparado para resistir golpes, suciedad, humedad, etc.

2.3.5 Ocio y Entretenimiento

A medida que han mejorado las técnicas de captura de movimiento y visualización para funcionar fuera del entorno del laboratorio, ha crecido el uso de la Realidad Aumentada en aplicaciones de entretenimiento. La Realidad Aumentada y mixta, son formas de interacción atractivas para los usuarios porque hacen que los contenidos virtuales les rodeen y les invita a que los encuentren por el mundo real. De esta forma la acción ya no ocurre en el interior de la pantalla, sino que se traslada a nuestro alrededor. En aplicaciones de entretenimiento encontramos la AR aplicada sobre todo a juegos y guías turísticas.

En el campo de los juegos basados en AR podemos realizar una clasificación entre juegos de exterior o interior. En los juegos de exterior normalmente se utilizan

dispositivos móviles para la visualización y los sensores GPS, acelerómetro, giroscopio y brújula para calcular el punto de vista del usuario. En estos juegos la Realidad Aumentada aporta los elementos del juego a nuestro entorno en forma de lugares que debemos alcanzar, objetivos, indicaciones de donde se encuentran el resto de usuarios ó enemigos virtuales. Además muchas veces el propio dispositivo móvil se utiliza como herramienta o arma, como por ejemplo en [Soulbit7. 2015], Figura 14 (izda.).

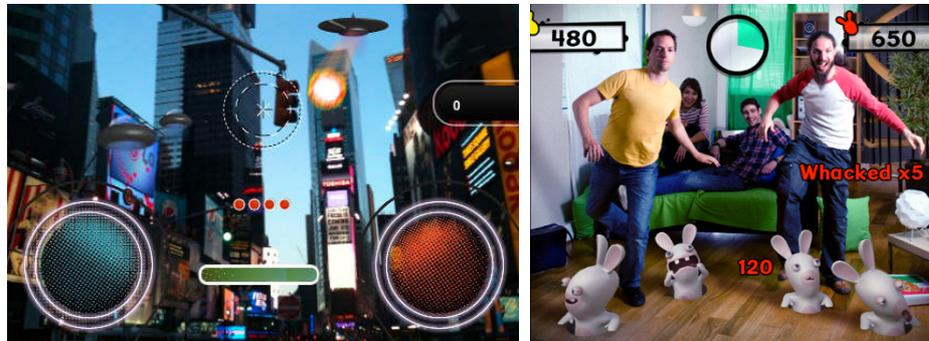


Figura 14. AR Invaders (izda.), Fuente: [Soulbit7. 2015]; juego de Kinect "Rabbing Rabids alive & kicking" (dcha.), Fuente: [Ubisoft. 2015]

En cuanto a los juegos de interior las aplicaciones más extendidas son las que usan un tablero como referencia o las de tipo espejo virtual. En el primer caso los usuarios utilizan sus dispositivos móviles para observar los contenidos del juego y marcadores planos para interactuar con el juego. De esta forma los personajes y elementos se manejan moviendo las tarjetas planas. Un buen ejemplo es [AUG. 2015]. En el caso de las de tipo espejo aumentado los usuarios observan su propia imagen en la pantalla dentro de mundos virtuales o rodeados del contenido virtual. En este tipo de aplicaciones las cámaras de profundidad han supuesto un gran avance, en especial el dispositivo Kinect [Zhang. 2012] de Microsoft. Kinect combina cámara, micrófono y cámara de profundidad. Utilizando la información de profundidad este dispositivo es capaz de capturar la posición de hasta 4 usuarios sin ningún tipo de marcas, y además es capaz de mezclar su imagen con la imagen virtual calculando correctamente la oclusión entre ellos [Ubisoft. 2015], Figura 14 (dcha.).

Dentro del sector turístico las guías de Realidad Aumentada son cada vez más comunes. En estas aplicaciones normalmente un dispositivo móvil sirve como método para descubrir información interesante que rodea al turista. Con este objetivo los tipos de información virtual utilizados son de lo más diverso desde texto informativo, hasta modelos 3D que muestran cómo eran los edificios que se encontraban en la zona hace

cientos de años y que ya han desaparecido [Dähne and Karigiannis. 2002]. Con este tipo de aplicaciones los turistas comprenden mejor las explicaciones, puesto que las aplicaciones se las muestran sobre los propios objetos. Además se sienten inmersos en la visita ya que la información virtual les rodea y son ellos los que la descubren, motivándolos y manteniendo su atención.

2.3.6 Publicidad y comercio

Dentro del negocio de la publicidad una máxima es intentar ofrecer los productos que puedan interesar a cada cliente para no bombardearle con anuncios que no le interesan. En los navegadores web, ya se produce una personalización de la publicidad, puesto que los servidores muestran unos anuncios u otros, en función de las páginas que ha visitado el usuario últimamente. Los sistemas AR-MR dan un paso más en este sentido, puesto que la publicidad o anuncios de productos pueden aparecer ante nosotros al pasar por al lado de una tienda, o sobre el propio producto cuando lo observamos. En este sentido la Realidad Aumentada cumple una doble función, atraer nuestra atención hacia objetos que nos rodean (resaltando sus características) o guiarnos hacia otros que necesitamos en un momento determinado. Existen múltiples plataformas que permiten insertar anuncios en un mapa o encima de imágenes de anuncios. Utilizando dichas aplicaciones el usuario observa los anuncios a su alrededor en función de la posición (Figura 15 izda.), punto de vista ó la imagen capturada por la cámara de su dispositivo móvil. Las dos plataformas más extendidas son: Layar [Layar. 2015a] y Junaio [Metaio. 2014]. En cuanto a atraer la atención del posible comprador hacia productos que le rodean, resaltando a su vez sus características, podemos encontrar sistemas móviles y estáticos. Móviles serían aquellos en los que el dispositivo móvil del comprador (Smartphone, gafas, tablets, etc.) reaccionan a los objetos del entorno, mientras que en los estáticos los productos se colocan en expositores que añaden la información virtual (por ejemplo los monitores holográficos [Bimber, et al. 2006]). En el primer tipo el avance más reciente son las balizas Bluetooth, más conocidas por su nombre en ingles *Beacons*. Los Beacons consisten en pequeñas balizas Bluetooth LE (Low Energy), que son detectadas por los dispositivos móviles.[Jindan Zhu, et al. 2012] ofrece un estudio de cómo utilizar estos dispositivos en localización comparado con las antenas Wi-Fi. Al detectar un Beacon, el dispositivo móvil consulta en un servidor cual es su información asociada y muestra a un aviso al comprador de que dicho producto se encuentra cerca. En el segundo tipo, la gran ventaja es que el usuario observa el producto real y la información virtual lo

complementa. De esta forma además de ver el producto, observamos todas las características que el vendedor quiere resaltar, Figura 15 centro.



Figura 15. Navegador AR Layar (izda.), Fuente: www.Layar.com; pantalla holográfica (centro), Fuente: www.hologram3display.com; probador virtual Fitnect (dcha.), Fuente: [Fitnect. 2015]

Un caso particular de uso de la Realidad Aumentada en aplicaciones de comercio es el de los probadores virtuales. Las ventas on-line permiten al consumidor comprar desde su casa, pero el comprador carece del producto real para observarlo o probárselo. La Realidad Aumentada puede cubrir ese hueco, mostrando una versión virtual del producto frente a él. En el caso de ropa o complementos el usuario puede incluso probarse las prendas y ver cómo le sientan. [Fitnect. 2015] es un ejemplo de probador en el que utilizando un Kinect (que proporciona información de profundidad), el usuario se viste con ropa virtual la cual se comporta como tela real utilizando simulaciones físicas y el propio movimiento del usuario, Figura 15 dcha.

2.4 Generación de contenidos AR-MR

De los apartados anteriores se obtiene una impresión de las muchas posibilidades que ofrecen la AR-MR en distintos campos, gracias a la capacidad de mostrar información virtual sobre nuestra percepción del mundo real. Sin embargo, pese a lo deseable de esta nueva capacidad de mezclar lo real y lo virtual, todavía a día de hoy son escasas las aplicaciones AR-MR. Está escasez, debida en parte a la juventud de la tecnología, viene determinada en gran medida por la falta de herramientas para generar aplicaciones y contenidos AR-MR. Si observamos el campo de la realidad virtual, podemos encontrar numerosas herramientas de generación de contenidos, especializadas en distintos usos de esta tecnología: creación de videojuegos [Unity Technologies. 2015, Epic Games Inc. 2015, Crytek GmbH. 2015], creación de modelos 3D [Blender.org. 2015, Autodesk. 2015a, Google. 2015], creación de iluminaciones realistas [PovRay. 2015, Autodesk. 2015b,

NewTek. 2015], etc. Está gran variedad de herramientas, podrían ser aplicables a aplicaciones AR-MR pero solo cubrirían una necesidad, la creación de información virtual. En una aplicación AR-MR existen muchas más necesidades (como se explica en el apartado 2.2) que en una aplicación VR y su creación por tanto es mucho más compleja. Una herramienta de creación de contenidos para sistemas AR-MR, debe cubrir no solo la visualización de información sintética, sino además cómo se relaciona con los objetos reales y cómo interactuar con ella cuando esta complementando a dichos objetos.

A partir de 2001, se encuentran en la bibliografía varias propuestas de métodos/herramientas de edición de contenidos para aplicaciones AR-MR. [Abawi, et al. 2004] realizan una clasificación de los distintos roles dentro del proceso de edición (Figura 16 izda.) atendiendo al nivel de abstracción de la tecnología. [Hampshire, et al. 2006] realizan una clasificación de las herramientas de edición en 4 niveles (Figura 16 dcha.) que van desde la programación a bajo nivel desarrollada por un programador, hasta el diseño de contenidos de alto nivel realizado por un diseñador o creador de aplicaciones. Esta clasificación atiende a la abstracción de la información y el control de la relación entre lo real y lo virtual que ofrece cada tipo de herramienta. En adelante desarrollando esta clasificación se muestran las herramientas de creación de contenidos AR-MR más relevantes hasta la fecha.

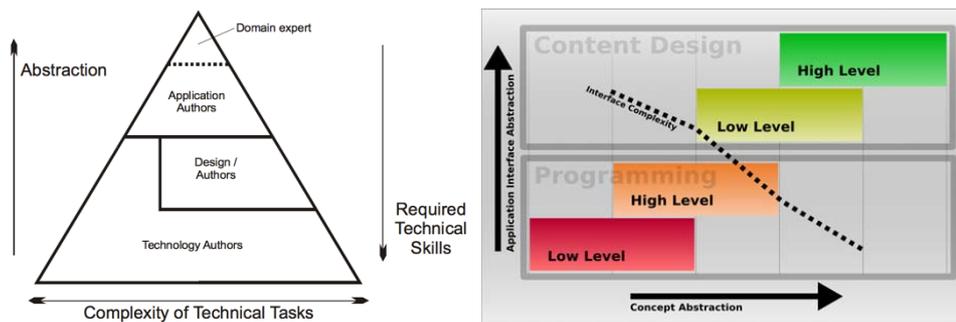


Figura 16. Pirámide de la edición de contenidos(izda.), Fuente: [Abawi, et al. 2004]; clasificación en niveles de las herramientas de edición de contenidos AR-MR (dcha.), Fuente: [Hampshire, et al. 2006]

2.4.1 Programación de bajo nivel

Las bibliotecas de programación de bajo nivel, orientadas a AR-MR, implementan funciones clave de: visión por computador, ajuste espacial en tres dimensiones de objetos reales y virtuales, renderizado de objetos 3D, etc. El bajo nivel de abstracción que ofrecen dota al programador de una gran flexibilidad a la hora de desarrollar aplicaciones, pero

requiere implementar manualmente cualquier tipo de interacción o funcionamiento del sistema.

Para el desarrollo de aplicaciones utilizando esta bibliotecas, el programa debe conocer el funcionamiento de la biblioteca y conceptos tales como: calibración y parámetros intrínsecos de una cámara, creación de marcadores, definición de marcadores compuestos, conceptos geométricos para crear algún mecanismo de interacción en base al movimiento de los marcadores, nubes de puntos, etc. Es decir, un programador además de conocer la plataforma para la que desea crear la aplicación debe tener conocimientos de visión por computador y estudiar el funcionamiento de la biblioteca para integrarla dentro de su aplicación.

Dentro de las bibliotecas se puede realizar una clasificación por el tipo de reconocimiento del mundo real que implementan, de hecho la gran mayoría de bibliotecas se centran en ofrecer al programador algoritmos de captura de movimiento que utilizan la imagen de una o varias cámaras y no mecanismos de dibujado. Un primer grupo de bibliotecas (las más antiguas) son las utilizan marcadores planos con un marco negro. Las bibliotecas más relevantes de este tipo son: Artag [Fiala. 2005], ARToolKit [Kato and Billinghurst. 1999] y su posterior versión ARToolKit Plus [Wagner and Schmalstieg. 2007].

En este punto ARToolKit merece una mención especial, puesto que ha sido, sin duda alguna, la biblioteca más utilizada en el campo AR-MR desde su aparición en 1999, dando la oportunidad, a investigadores de todo el mundo, de desarrollar aplicaciones AR y avanzar en los distintos usos de esta tecnología. Según la definición de la web oficial: "ARToolKit es una biblioteca software para crear aplicaciones de Realidad Aumentada que consisten en mostrar imágenes virtuales sobre el mundo real". ARToolKit ofrece las funciones necesarias para capturar la imagen de una webcam convencional y calcular su posición en base a unos marcadores definidos en un archivo de texto. Una vez calculada la posición permite dibujar elementos 3D utilizando la biblioteca OpenGL [Woo, et al. 1999] y un cargador de modelos VRML [Carey and Bell. 1997]. Una característica de esta biblioteca es el tipo de marcadores que utiliza: cuadrados negros con una imagen en negro en su interior. Esta morfología de marcador esta ideada para simplificar el proceso de reconocimiento, puesto que la capacidad de procesamiento de los ordenadores en 1999 era mucho más limitada. Observando en detalle el proceso de reconocimiento de marcadores, Figura 17,este se divide en 6 fases.

- a) Capturar la imagen de la cámara

- b) Convertir la imagen a blanco y negro
- c) Calcular las regiones conexas de color negro
- d) Calcular el borde exterior de estas regiones
- e) Detectar líneas en los bordes y la intersección entre ellas para calcular los vértices del marcador
- f) Calcular la posición de la cámara en función de los vértices del marcador, la imagen de su interior y los parámetros intrínsecos de la cámara (calibrados previamente)

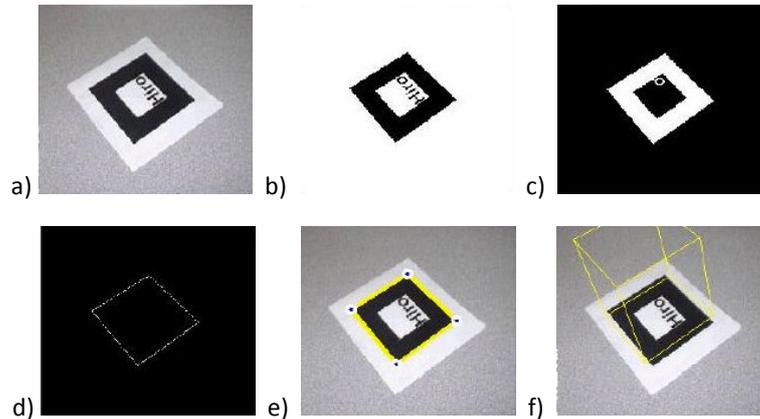


Figura 17. Fases del algoritmo de reconocimiento de marcadores de la biblioteca ARToolKit, Fuente: [Kato and Billinghurst. 1999]

En un segundo tipo podemos encontrar las bibliotecas que aunque utilizando marcadores planos, ya no necesitan que tengan un borde negro para reconocerlos. Este tipo de marcas se denominan marcas naturales, puesto que las imágenes constituyen un marcador en si mismo sin necesidad de añadir elementos artificiales. Sin embargo, el poder utilizar imágenes planas como mecanismo de reconocimiento no significa que pueda calcularse la posición de cualquier objeto, puesto que la gran mayoría no tienen caras planas o no están lo suficientemente texturizadas como para ser reconocidas. Un ejemplo es la biblioteca BazAR [Pilet, et al. 2008].

Finalmente podemos encontrar bibliotecas que intentan reconocer el entorno a partir de la imagen de la cámara sin necesidad de utilizar superficies planas. Estas bibliotecas hacen uso de algoritmos de tipo SLAM (*Simultaneous Localization and Mapping*) que fueron inicialmente aplicados por la NASA para la navegación de vehículos autónomos en terrenos desconocidos. El reconocimiento se realiza detectando características sobre la imagen, pero en este caso se realizan dos procesos en paralelo:

crear un mapa de puntos 3D de las posiciones donde se encuentran dichas características y calcular la posición de la cámara en función de las características visibles en cada momento. En la Figura 18 se pueden observar dos ejemplos de las características encontradas sobre la imagen de la cámara y el mapa 3D que se crea a partir de ellas utilizando la biblioteca PTAM [Klein and Murray. 2007].

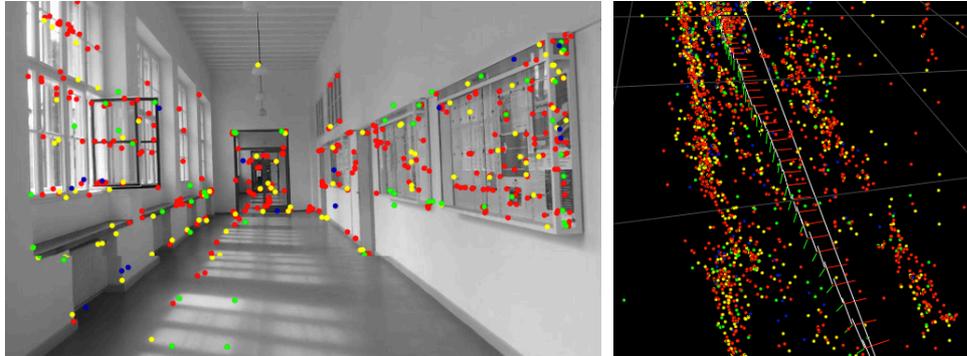


Figura 18. Características descubiertas por la biblioteca PTAM (izda.) y el mapa de puntos generado a partir de las mismas en el proyecto NAVVIS (dcha.), Fuente: www.navvis.com

A continuación se muestra una tabla resumen de las bibliotecas de este tipo.

Biblioteca de bajo nivel	Características
ARToolKit [Kato and Billinghurst. 1999]	Herramientas de calibración de la cámara Herramientas de creación de marcas simples (cuadro + imagen) Reconocimiento de marcas basadas en cuadros negros Modelos 3D en formato VRML Lenguaje C
ARTag [Fiala. 2005]	Similar a ARToolKit pero con otro proceso de reconocimiento de marcas No utiliza imágenes en el centro de los cuadros, sino un código binario que hace más robusto el reconocimiento de las marcas
ARToolKit Plus [Wagner and Schmalstieg. 2007]	Extensión de ARToolKit Algoritmo de reconocimiento más robusto basado en ARTag Lenguaje C++
PTAM (Parallel Tracking and Mapping) [Klein and Murray. 2007]	No necesita la creación previa de marcadores o mapas de puntos Implementa las funciones necesarias para crear mapas de puntos al mismo tiempo que se utilizan para calcular la posición de la cámara No implementa funciones de dibujo
StudierStube [Wagner, et al. 2008]	Desarrollada para uso en móviles Detecta marcadores basados en cuadros negros Captura de movimiento más robusta que las anteriores No implementa funciones para el uso de la cámara

BazAR [Pilet, et al. 2008]	Marcadores Naturales No utiliza cuadros negros sino imágenes planas texturizadas Desarrollada sobre la biblioteca de visión por computador OpenCV No implementa funciones de dibujado
PTAMM (Parallel Tracking and Multiple Mapping) [Castle, et al. 2008]	Extensión de la biblioteca PTAM para utilizar múltiples mapas de puntos Permite guardar y cargar mapas de puntos creados previamente Incluye renderizado de modelos 3D en formato 3DS Incluye funciones para crear juegos sencillos
PointCloud SDK [13th LAB. 2013]	Implementa un algoritmo SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) Permite reconocer y hacer capturar la posición en entornos desconocidos Lenguaje C solo disponible para el sistema operativo IOS No implementa funciones para el dibujado

Tabla 4. Bibliotecas de bajo nivel para el desarrollo de aplicaciones AR-MR

2.4.2 Programación de alto nivel

Las bibliotecas de programación de alto nivel, orientadas a AR-MR, ofrecen un nivel mayor de abstracción al programador que las de bajo nivel, en la implementación de: interacción, adaptación a diferentes dispositivos, gestión del dibujado de la información virtual, etc.

Para el desarrollo de aplicaciones utilizando estas bibliotecas el programador ya no necesita conocer en detalle el procesos como el reconocimiento de objetos, clases de alto nivel le facilitan el proceso de asociar información virtual a objetos reales y cómo interactuar con ella.

En este apartado encontramos numerosas bibliotecas que utilizan ARToolkit como biblioteca de captura de marcadores integrándola en otras bibliotecas de alto nivel. De esta forma, extienden el funcionamiento de la biblioteca de alto nivel, y a la vez, abstraen al programador de algunas características de la propia biblioteca de bajo nivel ARToolkit. OSGART [Looser, et al. 2006] integra la biblioteca ARToolkit en la biblioteca gráfica OpenSceneGraph (OSG). OSG [Osfield and Burns. 2004] es una biblioteca Open Source para el desarrollo de aplicaciones basadas en gráficos 3D ofreciendo al programador un mecanismo de creación de mundos virtuales basados en grafo de escena. La biblioteca OSGART implementa nodos que se incorporan al grafo de escena para añadir la vista de la cámara y los marcadores sobre los que aparecen la información virtual. De esta forma el programador no necesita programar utilizando las funciones de ARToolkit sino simplemente añade los nodos que representan cada uno de los elementos necesarios. Siguiendo la misma línea encontramos otras bibliotecas como FLARTOOLKIT [Koyama. 2009] que permite incorporar captura de marcas a aplicaciones Flash, PyARTK

[PyARTK. 2015]para aplicaciones Python ó NyARToolkit [NyARToolKit. 2015]para aplicaciones Java.

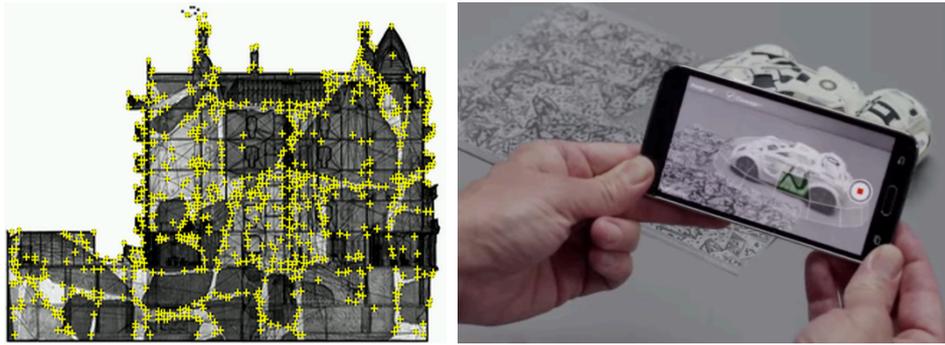


Figura 19. Características encontradas en una imagen con calificación 5 estrellas en Vuforia (izda.); escaneo de un objeto 3D con Vuforia (dcha.), Fuente: www.vuforia.com

En la actualidad encontramos bibliotecas de alto nivel mucho más avanzadas que ofrecen al usuario características tales como: reconocimiento de marcadores naturales, algoritmos tipo SLAM, sistemas de gestión de marcas, mecanismos de interacción, etc. Vuforia [Qualcomm Inc. 2015]es una biblioteca para el desarrollo de aplicaciones AR para móviles que integra todos estos aspectos. Está biblioteca utiliza procesos de visión por computador para reconocer imágenes planas e incluso objetos texturizados. La biblioteca busca características en la imagen capturada por la cámara, las compara con los marcadores disponibles y calcula la posición de la cámara con respecto a los marcadores reconocidos. El programador puede crear sus propios marcadores utilizando un servicio web, o escanear los objetos que desea reconocer por medio de una aplicación (Figura 19 dcha), obteniendo un nivel de calidad en un rango de 1-5 estrellas en función de las características encontradas (Figura 19 izda). De esta forma dejan de utilizarse marcadores básicos, como los de ARToolKit formados por cuadros negros, para utilizar cualquier imagen u objeto como referencia (características naturales). Esta biblioteca hace transparente al programador: el uso de la cámara del dispositivo móvil, el proceso de reconocimiento de imágenes y objetos e incluso la interacción con los objetos reales. Como mecanismo de interacción, ofrece la posibilidad de crear botones virtuales sobre los objetos reales, además incorpora un algoritmo para detectar la mano del usuario, de forma que este pulsa los botones virtuales, como si de verdad se encontrasen sobre el objeto real. Vuforia puede utilizarse por medio de múltiples lenguajes de programación: C++, Java (Android), Objective-C (IOS) y .Net para su incorporación a otros entornos de

desarrollo como Unity [Unity Technologies. 2015](del que hablaremos en detalle más adelante).

A continuación se muestra una tabla resumen de las bibliotecas de este tipo.

Biblioteca de alto nivel	Características
OSGART [Looser, et al. 2006]	Integra ARToolKit en OpenSceneGraph Implementa nodos con el funcionamiento de marcadores y cámara que se incorporan al grafo de escena OSG
FLARToolKit [Koyama. 2009]	Integra ARToolKit en aplicaciones Flash
PyARTK [PyARTK. 2015]	Integra ARToolKit en aplicaciones Python
NyARToolKit [NyARToolKit. 2015]	Integra ARToolKit en aplicaciones móviles Android
Total Immersion Augmented Reality Pro SDK [Total Immersion. 2015]	Reconocimiento de marcas naturales Gestión de múltiples cámaras Soporta resolución HD Utiliza la biblioteca Open NI para añadir métodos de interacción utilizando dispositivos como por ejemplo Kinect Multiplataforma: Windows y Linux Integra la biblioteca Ogre 3D para gráficos 3D Pago de licencia anual
Qualcomm Vuforia SDK [Qualcomm Inc. 2015]	Herramienta de creación de marcas naturales (planas, cajas, cilindros) y marcas 3D Sistema de gestión de marcas y Cloud Gestión de la cámara del dispositivo y descarga automática de los parámetros intrínsecos en función del modelo Reconocimiento de texto en inglés Lenguajes: Java (Android), Objective C (IOS) y C# (Unity 3D) Interacción por medio de botones virtuales Algoritmo SLAM para extender la captura a partir de las marcas Escaneado del entorno de forma dinámica en la aplicación Reproducción de videos en planos 3D o pantalla completa Shaders para creación de efectos visuales (incluye ejemplos) Pago de licencia en función del número de reconocimientos de marcas

Metaio SDK [Metaio. 2015a]	Herramienta de creación de marcas naturales y marcas 3D Sistema de gestión de marcas y Cloud Algoritmo SLAM Reconocimiento de códigos de barras y QR-codes Captura de movimiento basada en localización GPS Lenguajes: Java (Android), Objective C (IOS), C++ (Windows) y C# (Unity 3D) Compatible con las herramientas de edición de Metaio Compatible con cámaras RGB-D (color y distancia), por ejemplo Kinect Incluye un sistema de renderizado 3D Shaders para creación de efectos visuales (incluye ejemplos) Pago de licencia anual en modalidad Básica y Pro
--------------------------------------	--

Tabla 5. Bibliotecas de alto nivel para creación de aplicaciones AR-MR

2.4.3 Diseño de contenidos de bajo nivel

Los sistemas de diseño de contenidos de bajo nivel constituyen la siguiente capa de abstracción en la que se eliminan las referencias directas a un lenguaje de programación sustituyéndolas por un modelo de datos. Este modelo representa tanto los contenidos virtuales, como la relación con los objetos reales y los mecanismos de interacción. En este nivel de abstracción todavía son necesarios conocimientos de programación para generar los modelos de datos, pero ya aparecen las primeras interfaces gráficas.

Para el desarrollo de aplicaciones el programador ya no necesita conocer las bibliotecas, su interfaz o su protocolo. En este caso el programador solo debe conocer los objetos de que dispone para crear la aplicación y la forma en que puede relacionarlos. Este nivel de abstracción no solo simplifica el uso de bibliotecas de bajo nivel, sino que además permite el uso de múltiples bibliotecas o actualizarlas sin que el desarrollador tenga que modificar su modelo de datos.

En su trabajo [Bauer, et al. 2001] proponen identificar los diferentes componentes de una aplicación AR-MR y caracterizarlos de forma que puedan utilizarse conjuntamente en un mismo entorno de trabajo. Una gran ventaja de esta aproximación es que, a diferencia de la mayoría de sistemas presentados hasta el momento, permitía reutilizar componentes entre distintos proyectos AR para agilizar el desarrollo de los mismos. Como demostración de su trabajo muestran el framework DWARF (Distributed Wearable Augmented Reality Framework). En él definen 4 componentes principales: servicios, World Model, flujo de tareas e interfaz de usuario. En los servicios se encuentran los objetos que crean información como por ejemplo los trackers. Incluso los

servicios de captura de movimiento pueden combinarse para generar captura de movimiento híbrida. El “World Model” contiene la información de posición y orientación de todos los objetos reales y virtuales de forma que se describe el escenario de información. Con el flujo de tareas, el programador describe cómo los servicios actúan sobre los objetos del World Model. En este nivel encontramos las primeras aplicaciones gráficas [Hampshire, et al. 2006, Seichter, et al. 2008], Figura 20, en las que el programador puede crear elementos y relacionarlos entre si por medio de grafos o arboles. Estas aplicaciones aunque tienen un interfaz gráfico donde se puede observar el resultado en tiempo real, carecen de mecanismos para modificar los objetos sobre la propia vista gráfica.

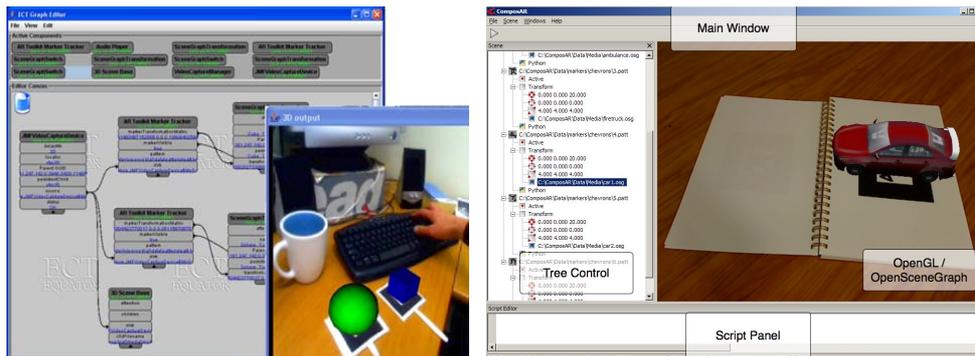


Figura 20. Extensión de ECT (Equator Component Toolkit) para AR (izda.), Fuente: [Hampshire, et al. 2006]; ComposAR (dcha.), Fuente: [Seichter, et al. 2008]

Dentro del diseño de contenidos de bajo nivel también encontramos trabajos que se centran en añadir extensiones a lenguajes de diseño de contenidos para crear aplicaciones AR. De esta forma no se reimplementan tecnologías ya existentes, sino que se aprovechan y amplían para dar soporte a sistemas AR-MR. [Hampshire, et al. 2006] crea componentes nuevos dentro del software ECT (Equator Component Toolkit) para crear aplicaciones de Realidad Aumentada utilizando la biblioteca ARToolKit como base. [Hill, et al. 2010] crea una nueva extensión denominada KHARMA a partir del lenguaje KML de georeferenciación de elementos con el que añadir información virtual en posiciones GPS concretas, o asociada a otros elementos KML.

A continuación se muestra una tabla resumen de los sistemas de edición de contenidos de bajo nivel.

Sistemas de edición de bajo nivel	Características
DWARF [Bauer, et al. 2001]	Modelo de datos para creación de aplicaciones AR-MR División de la aplicación en 4 componentes: servicios, World Model, flujo de tareas e interfaz de usuario Cada componente contiene objetos implementados previamente Los objetos pueden reutilizarse en diferentes aplicaciones
AMIRE [Dörner, et al. 2003]	Propone identificar y encapsular objetos utilizados en aplicaciones AR-MR para crear "MR Gems" MR Framework define las posibles interacciones entre las MR Gems Sientan las bases de herramientas de edición basadas en relacionar las MR Gems siguiendo las reglas el MR Framework Propone un proceso de edición basado en niveles: desarrollador tecnológico, diseñador, autor de aplicaciones y experto
APRIL [Ledermann and Schmalstieg. 2005]	Definen un lenguajes basado en XML de descripción de escenas El fichero de descripción se compone de 5 partes: descripción hardware, descripción del contenido, estructura temporal, comportamiento dinámico e interacción Implementa la captura de movimiento con las bibliotecas de bajo nivel OpenTracker y StudierStube Implementa el renderizado 3D con las bibliotecas de bajo nivel OpenInventor y OpenGL
ECT (Equator component toolkit) + componentes AR [Hampshire, et al. 2006]	Interfaz gráfico de programación Provee una serie de componentes que realizan tareas básicas La aplicación se crea añadiendo componentes y creando relaciones entre sus propiedades Un usuario programador puede crear componentes nuevos para extender su funcionalidad Lenguaje Java (multiplataforma) Componentes AR creados: visualización 3D, captura de video, marcadores ARToolkit, relación entre marcadores ARToolkit, salida de audio y hardware
ComposAR [Seichter, et al. 2008]	Edición gráfica de escenas AR La aplicación se crea añadiendo componentes que se relacionan bajo el paradigma acción-reacción Utiliza la biblioteca de alto nivel OSGART para implementar sensores AR Los cambios en los sensores generan eventos que pueden desencadenar acciones Ventana gráfica solo para visualización el resultado en tiempo real Posibilidad de programación mediante Scripts en lenguaje Python
ComposAR for Mobiles [Wang, et al. 2009,]	Extensión de ComposAR para crear aplicaciones AR para móviles con sistema operativo Symbian Incluye sensores basados en la biblioteca de bajo nivel StudierStube Implementa un visor nativo para móviles Symbian

<p>KHARMA [Hill, et al. 2010]</p>	<p>Extensión del lenguaje KML (Keyhole Markup Language) de representación de datos geográficos Añaden propiedades geométricas a la información virtual asociada a los datos geográficos para su visualización en sistemas AR-MR Los contenidos pueden estar asociados a una coordenada GPS o estar asociados a otros elementos (marcadores)</p>
<p>AREL [Metaio. 2012]</p>	<p>Definición de escenas e interacción para aplicaciones AR-MR sobre WEB Lenguaje JavaScript y XML Abstracción de la biblioteca de alto nivel Metaio SDK</p>

Tabla 6. Sistemas de edición de bajo nivel para creación de aplicaciones AR-MR

2.4.4 Diseño de contenidos de alto nivel

El diseño de contenidos de alto nivel es el último nivel de abstracción donde el diseñador no requiere conocimientos de programación para crear aplicaciones AR-MR. Este tipo de aplicaciones o sistemas pueden considerarse como interfaces de alto nivel de los sistemas y bibliotecas descritos previamente, puesto que permiten al usuario hacer uso de esas bibliotecas, sin conocer su funcionamiento, a través de interfaces gráficas sin necesidad de programación. En este tipo de sistemas por tanto se necesitan mecanismos para: creación de información virtual, creación de referencias con los objetos reales y definir mecanismos de interacción.

El primer sistema de este tipo que se encuentra en la bibliografía es el trabajo de [Haringer and Regenbrecht. 2002], Figura 21, donde utilizan el software Power Point para colocar información virtual alrededor de una imagen que simboliza el objeto real. El documento almacenado en Power Point, formato XML, se procesa después en un sencillo editor creado para recolocar la información 2D en posiciones 3D que el usuario puede modificar. Por último un visor permite la visualización de la información virtual utilizando la biblioteca ARToolKit para reconocer la posición del objeto real al que se refiere.

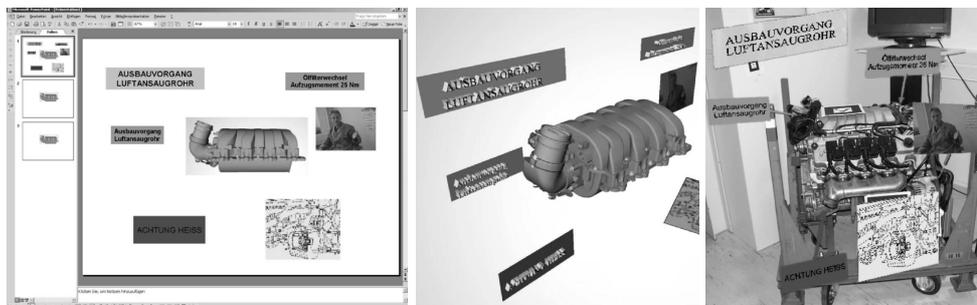


Figura 21. Sistema Power Space de edición de aplicaciones AR-MR, Fuente: [Haringer and Regenbrecht. 2002]

Más avanzado es el trabajo de [Zauner, et al. 2003] donde se presenta un sistema propio de edición de contenidos para aplicaciones AR de inspección. En este sistema compuesto por un editor y un visor, el autor crea contenido virtual asociado a marcas ARToolkit colocadas sobre objetos reales. Las marcas se recogen de una biblioteca y la edición de los contenidos se realiza sobre la foto del escenario real, donde se ha colocado la marca. De esta forma el autor tiene un entorno WYSIWYG (What You See Is What You Get) en el que además de añadir información virtual puede: crear animaciones basadas en dos posiciones, añadir información de texto a los elementos y crear pasos para representar la ejecución de un proceso. Este sistema, incluye un modo de edición en tiempo real utilizando la imagen de una cámara como fondo, y una herramienta de posicionamiento de elementos virtuales Figura 22. Esta herramienta consiste en un ratón inalámbrico provisto de un marcador para su posicionamiento 3D. El usuario puede mover, rotar y escalar los objetos 3D moviendo el ratón (observado por la cámara) en el entorno real y utilizando los botones para seleccionar la transformación deseada.



Figura 22. MR Assembly Instructor and Authoring Wizard. Herramienta de posicionamiento de objetos (izda.); visor AR (dcha.). Fuente: [Zauner, et al. 2003]

Por último, en este apartado encontramos sistemas comerciales que han aparecido, en los últimos 5 años, a partir de la mejora de las técnicas de captura basadas en imagen de video y la gran difusión de los teléfono inteligentes (Smartphones). En estos programas el usuario puede crear sus propios marcadores a partir de imágenes, o escaneando objetos 3D por medio de Apps y un Smartphone. La edición es de tipo WYSIWYG de forma que el diseñador añade la información virtual sobre los marcadores (sean del tipo que sean) creados previamente. Estos sistemas incorporan algoritmos SLAM para extender la visualización más allá de las zonas donde se ve el marcador, reconocimiento facial e incluso gestores de marcas en la nube (Cloud). En este sentido las dos mayores referencias son: Layar Creator y Metaio Creator/Engineer.

El sistema Layar nació como uno de los primeros navegadores de Realidad Aumentada. En este sistema el usuario caminaba por el mundo real y el software le mostraba etiquetas de información a su alrededor, basadas en la posición GPS y la orientación de la brújula del Smartphone. La plataforma de Layar, con una estructura muy similar a los sistemas GIS, permitía al usuario crear capas de información donde colocar sus propia etiquetas geo referenciadas. Con el auge de las técnicas de reconocimiento de imágenes, la plataforma Layar ha evolucionado centrándose en crear contenidos aumentados para revistas, libros, anuncios, etc. Layar Creator es un editor on-line de información aumentada con el que añadir información aumentada a imágenes planas, Figura 23 (izda.). El usuario añade las imágenes planas que simbolizan páginas, anuncios, carteles, etc. y tiene una biblioteca de elementos que puede colocar sobre la imagen: botones, imágenes, textos, videos, etc. En este caso los contenidos aumentados están orientados al sector de la publicidad, por lo que existen controles asociados a redes sociales, compra on-line, etc. La edición es del tipo WYSIWYG y aunque permite añadir modelos 3D el entorno de trabajo es una imagen plana, por lo que la información se coloca en 2D. Todos los contenidos creados en Layar Creator se suben a los servidores de Layar, el usuario utiliza la aplicación base de Layar que al observar la imagen de la cámara reconoce automáticamente los marcadores de entre todas las campañas existentes. En esta plataforma los publicadores de contenido pagan por cantidad de campañas on-line y número de accesos. En datos publicados en Julio de 2014, Figura 23 (dcha.), la aplicación Layar tenía 33 millones de descargas, y más de 55.000 usuarios que habían publicado contenidos AR.

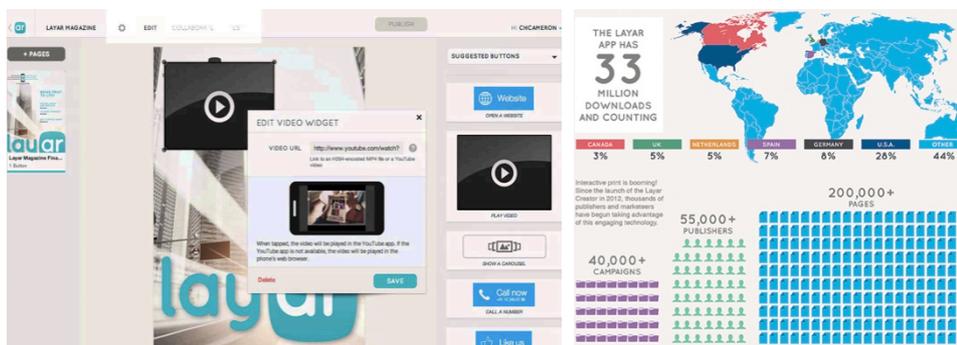


Figura 23. Layar Creator (izda.); Datos publicados sobre el uso de Layar hasta Julio de 2014 (dcha.).
Fuente: www.Layar.com

La aplicación Metaio Creator es hoy por hoy la alternativa comercial dentro de los editores de contenidos de alto nivel de Realidad Aumentada más completo del mercado.

Al igual que Layar nació como un navegador de Realidad Aumentada con su plataforma Junaio. En el caso de Metaio Creator, se ofrece un editor de tipo WYSIWYG en el que el usuario puede añadir contenido virtuales sobre marcas, Figura 24. Las marcas soportadas son las mismas que la librería Metaio SDK: imágenes planas, objetos 3D, reconocimiento facial, etc. Los objetos virtuales que puede añadir el usuario son de tipo multimedia, modelos 3D, fotos de 360º e incluye opciones de scripting para crear comportamientos avanzados utilizando el lenguaje AREL. El contenido creado puede exportarse a 3 plataformas diferentes: aplicación móvil, aplicación de PC ó Mac y on-line. En el caso de on-line el usuario accede a los contenidos por medio de la aplicación móvil Junaio. El usuario puede añadir también una capa de contenidos 2D, los cuales se muestran como interfaz transparente, sobre la imagen de la cámara y el contenido aumentado.



Figura 24 Metaio Creator (izda.); edición de contenido basada en reconocimiento facial con Metaio Creator (dcha.). Fuente: www.metaio.com

A partir de Metaio Creator existe una versión orientada a industria llamada Metaio Engineer. Esta versión permite mejorar la precisión de la visualización aumentada incluyendo módulos de calibración de cámaras, conexión con otros sistemas de captura, etc. Incluye la generación de escenas basadas en pasos para explicar procesos y el uso de herramientas de medición industriales.

Ambos editores Layar Creator y Metaio Creator, permiten la creación de contenidos aumentados sobre distintos tipos de marcadores, abstrayendo al usuario de todo el proceso de reconocimiento e incluso gestión de la información virtual (gracias al Cloud). Sin embargo, ambos están acotados en un aspecto fundamental, el usuario solo puede añadir información a cada marca por separado, no pueden combinarse marcas ni ver el contenido aumentado sobre varias marcas simultáneamente. En la actualidad no existen soluciones comerciales que permitan a un usuario sin conocimientos de programación crear escenas de este tipo, puesto que requiere el uso de bibliotecas de alto

nivel. Una solución cercana a los sistemas de edición de alto nivel es el uso de entornos de desarrollo como Unity 3D para los cuales existen versiones de la mayoría de bibliotecas de alto nivel mencionadas. Unity ofrece un interfaz gráfico para la edición de información virtual 3D, sin embargo requiere crear Scripts para añadir funcionalidad a dicha información, por lo que aunque ofrece una plataforma de desarrollo mucho más amigable no elimina la necesidad de conocimientos de programación.

Sistema de edición de alto nivel	Características
PowerSpace [Haringer and Regenbrecht. 2002]	Creación de la escena en Power Point Postproceso del Power Point en un editor 3D propio que permite re posicionar los objetos en 3D Visor propio basado en ARToolKit
MR Assembly Instructor and Authoring Wizard [Zauner, et al. 2003]	Basado en el sistema de bajo nivel AMIRE Definición de instrucciones paso a paso Herramienta de edición WYSIWYG para colocar objetos 3D sobre marcas ARToolKit Puntero para posición de objetos 3D sobre los objetos reales Permite crear animaciones con posición de inicio y fin Los contenidos creados se almacenan en XML Visor con interfaz para navegación paso a paso
DART [MacIntyre, et al. 2004]	Extensión de Macromedia Director para aplicaciones AR-MR Implementa 5 bibliotecas de objetos: DART-Actors, DART-Events, DART-Physics, DART-DataStore y DART-Framework Los objetos se añaden a la línea de tiempo de Director como clips de video La cámara puede funcionar en playback o en tiempo real
ATOMIC [ATOMIC. 2009]	Creación de aplicaciones AR añadiendo componentes que tienen una funcionalidad predefinida 2 tipos de componentes: marcadores (ARToolKit) y objetos 3D (VRML) Software multiplataforma: Linux, Windows y Mac
D'Fusion Studio [Total Immersion. 2011]	Software de creación de aplicaciones AR basado en la biblioteca Total Immersion Augmented Reality Pro SDK que permite el uso de todas sus funcionalidades a través de un interfaz gráfico Interfaz WYSIWYG para posicionar objetos 3D en función de marcadores de referencia Cada marcador posee una lista de objetos 3D asociados Para crear acciones, animaciones, etc. Es necesario programar Scripts en lenguaje LUA dentro del programa Permite integrar contenidos multimedia y manejarlos como objetos 3D Encriptación de los contenidos multimedia y modelos 3D Multiplataforma: Windows, Mac OS, Linux, IOS y Android

<p>Web3D Authoring Tool [Barbadillo and Sánchez. 2013]</p>	<p>Interfaz web basado en HTML5+CSS, PHP y Javascript para crear escenas AR Editor WYSIWYG con modificación del modelo por medio de sliders El calculo de la posición de la cámara en función de un marcador se realiza en el servidor utilizando la biblioteca OpenCV</p>
<p>Layar Creator [Layar. 2015b]</p>	<p>Interfaz web especializado en creación de contenido aumentado sobre revistas Editor WYSIWYG donde el autor coloca el contenido multimedia sobre una página Cloud donde se almacenan los contenidos virtuales y sus relaciones con las revistas Permite añadir contenido multimedia (videos, fotos, web), redes sociales, botones para lanzar aplicaciones e información georeferenciada Sistema de pago en función de descargas, número de páginas y contenidos Premium (añadir videos, capas georeferenciadas, etc.) Para acceder a los contenidos una aplicación móvil reconoce automáticamente las imágenes consultando el Cloud</p>
<p>Metaio Creator [Metaio. 2015a]</p>	<p>Editor WYSIWYG donde el autor coloca contenido sobre la marca de referencia Marcas de tipo: imagen plana, objeto 3D, SLAM, captura facial y georeferencia Permite añadir contenido multimedia, redes sociales y botones Plataforma Cloud (Junaio) para acceso a las escenas Posibilidad de crear aplicaciones independientes Necesaria licencia para crear aplicaciones Mecanismo básico de animación Permite asociar acciones predeterminadas a los objetos Para extender el funcionamiento es posible crear Scripts el lenguaje AREL</p>
<p>Metaio Engineer [Metaio. 2015b]</p>	<p>Extensión de Metaio Creator para industria Conexión con diferentes sistemas de captura de movimiento Conexión con herramientas de medición industriales Módulo de calibración de cámara Edición basada en pasos para guiar al trabajador</p>

Tabla 7. Sistemas de edición de alto nivel para creación de aplicaciones AR-MR

	Fiducial 2D	Natural 2D	Objetos 3D	SLAM	Geo referencia	Facial	OCR	RGB-D	Otros sistemas	Múltiples	Combinar tipos
ARToolKit	X									X	
ARTag	X									X	
ARToolKit Plus	X									X	
PTAM				X							
StudierStube	X										
BazAR[Pilet, et al. 2008]		X									
PTAMM				X						X	
PointCloud SDK		X		X						X	X
OSGART	X									X	
FLARToolKit	X									X	
PyARTK	X									X	
NyARToolKit	X									X	
TI AR Pro SDK		X						X		X	X
Qualcomm Vuforia SDK	X	X	X	X			X			X	X
Metaio SDK		X	X	X	X	X		X		X	X
DWARF									X	X	X
AMIRE									X	X	X
APRIL	X								X	X	X
ECT	X									X	
ComposAR	X									X	
ComposAR for Mobiles	X									X	
KHARMA	X				X					X	X
AREL		X	X	X	X	X		X		X	X
PowerSpace	X										
MR Assembly Instruct...	X										
DART	X									X	
ATOMIC	X										
D'Fusion Studio		X								X	
Web3D Authoring Tool		X									
Layar Creator		X			X					X	
Metaio Creator		X	X	X	X	X				X	
Metaio Engineer	X		X						X	X	

Tabla 8. Tipos de captura utilizados por las bibliotecas y sistemas de edición de aplicaciones AR-MR

	Modelos 3D	Multimedia	Capa 2D	Efectos Visuales	Ocultación	Crear objetos	Crear animaciones	Objetos interactivos	Interfaz escenas	WYSIWYG	Gratuito
ARToolKit	X										X
ARTag	X										
ARToolKit Plus	X										X
PTAM	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X
StudierStube	X										
BazAR[Pilet, et al. 2008]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X
PTAMM	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X
PointCloud SDK	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X
OSGART	X										X
FLARToolKit	X										X
PyARTK	X										X
NyARTToolKit	X										X
TI AR Pro SDK	X										
Qualcomm Vuforia SDK	X	X			X			X			
Metaio SDK	X	X	X	X	X	X	X	X			
DWARF	X							X			X
AMIRE	X							X			X
APRIL	X										X
ECT	X										X
ComposAR	X									X	X
ComposAR for Mobiles	X									X	
KHARMA	X	X				X					X
AREL	X	X	X	X	X	X	X	X			
PowerSpace	X									X	X
MR Assembly Instruct...	X	X	X			X	X	X	X	X	X
DART	X	X			X	X	X			X	X
ATOMIC	X										X
D'Fusion Studio	X	X					X	X		X	
Web3D Authoring Tool	X									X	
Layar Creator	X	X				X	X	X		X	
Metaio Creator	X	X	X	X	X	X	X	X		X	
Metaio Engineer	X	X		X	X	X	X	X	X	X	

Tabla 9. Tipos de información virtual que implementan las bibliotecas y sistemas de edición de aplicaciones AR-MR

Capítulo 3

Creación de ayudas visuales AR

3.1 Introducción

La Realidad Aumentada permite aumentar la percepción que el usuario tiene del mundo real con información virtual que lo complementa y con la que el usuario puede interactuar. En este paradigma de interacción el usuario no queda inmerso en un mundo sintético (Realidad Virtual), sino que moviéndose por el mundo real obtiene información adicional del mismo. Con estas características la Realidad Aumentada podría ser una herramienta valiosa a la hora de asistir a un usuario durante la realización de una tarea o evaluar sus conocimientos durante la realización de la misma. En un caso ideal, mientras el usuario realiza una tarea o procedimiento en el mundo real, indicaciones virtuales le van guiando, aumentando sus sentidos del oído, vista, tacto, etc. Puesto que la información virtual aparece mezclada con el mundo real, el usuario no necesita abandonar la tarea para consultar dicha información, sino que esta aparece de forma adecuada sobre los elementos pertinentes. En este caso ideal, la información se presenta al usuario de forma contextualizada, sin necesidad de consultarla, por lo que el interfaz de Realidad Aumentada cumple una triple función: mostrar la información que el usuario necesita, donde la necesita y cuando la necesita. Además este mismo mecanismo permite evaluar los conocimientos del usuario, añadiendo preguntas acerca de dicho procedimiento. Al utilizar Realidad Aumentada, los contenidos de las preguntas (información virtual) se pueden presentar sobre los objetos de la pregunta (mundo real), mejorando la comprensión de las mismas. Sin embargo, en la realidad este caso ideal viene limitado por la tecnología existente.

Durante el desarrollo de una tarea, la visualización de la información virtual está limitada por el dispositivo utilizado. Los cascos o gafas de Realidad Aumentada dejan las manos libres al usuario para realizar el procedimiento, pero a cambio limitan su sentido de la vista. En la mayoría de casos estos dispositivos son de tipo *video see-through*, por lo

que el usuario no observa directamente la realidad sino la imagen capturada por una o dos cámaras (colocadas en el casco o gafas). En el caso de dispositivos *optical see-through* el usuario sí que observa la realidad, pero con la tecnología actual el contenido virtual es de menor calidad que en los anteriores. Además, en ambos casos, el campo de visión del usuario se limita en gran medida (normalmente menos de 40º) y no serían seguros en ciertas tareas. Si por el contrario el usuario utiliza un dispositivo de mano a modo de lupa o cámara, no se limita su sentido de la vista, pero ocupa al menos una de sus manos por lo que puede influir en el desarrollo de la tarea. En el caso de utilizar proyección para crear Realidad Aumentada espacial, no se ve limitado ninguno de los sentidos, pero la zona aumentada esta limitada por lo que es posible que no se pueda ofrecer toda la información virtual necesaria.

La interacción con la información virtual también está limitada por la tecnología, puesto que para que el usuario pueda interactuar con dicha información, el sistema debe ser capaz de recoger e interpretar los movimientos, voz, gestos, etc. que el usuario realiza. En este caso las limitaciones vienen por el método utilizado para capturar al usuario. En el caso de ordenes de voz el reconocimiento está limitado por las ordenes programadas y el idioma del usuario. En cuanto a interacción con el movimiento depende de la tecnología utilizada. Utilizando tecnología basada en sensores (inerciales, magnéticos, mecánicos, etc.) el usuario debe “vestir” una cantidad variable de sensores, por lo que el sistema de captura es altamente intrusivo y puede dificultar el desarrollo de algunos procedimientos. En el caso de sistemas de captura basados en imagen, son mucho menos intrusivos, pero están limitados por el campo de visión de las cámaras y los algoritmos de reconocimiento. Pese a las limitaciones tecnológicas, existen estudios, como por ejemplo [Henderson and Feiner. 2009], que demuestran cómo las ayudas visuales por medio de AR mejoran el desarrollo de tareas.

Independientemente del tipo de sistema de visualización o de captura, un problema común a la hora de aplicar Realidad Aumentada para ofrecer ayudas visuales es la creación del contenido de dichas ayudas. Estos contenidos pueden ser de gran variedad de tipos, con tipos de representaciones totalmente diferentes. Por ejemplo, un texto puede representarse como un texto en 2D, en 3D alrededor del objeto al que complementa o simplemente en forma de audio utilizando un sintetizador. Durante el desarrollo de este trabajo, se han recopilado necesidades reales de empresas, centros de formación, etc. para los que se han desarrollado sistemas AR dentro de proyectos financiados.

Una gran dificultad a la hora de crear contenidos para ayudas visuales, radica en cómo relacionar la información virtual con los objetos reales a los que complementan. En este apartado no es solo importante el mecanismo para definir dicha relación, sino que es necesario tener en cuenta el nivel de conocimientos técnicos que el usuario necesita para crear los contenidos AR. La mayoría de aplicaciones de Realidad Aumentada se crean ad-hoc utilizando entornos de desarrollo, como por ejemplo Unity [Unity Technologies. 2015]. En el caso de creación de ayudas visuales, lo deseable es una herramienta que abstraiga al autor del funcionamiento del sistema AR. Es decir, que el autor de las ayudas (experto en el procedimiento a realizar) no necesite conocimientos técnicos sobre los dispositivos de captura, visualización, etc.

En este capítulo se muestran las aportaciones en el campo de creación de contenidos, para ofrecer ayudas visuales por medio de sistemas de Realidad Aumentada. Tras una descripción del problema, se describen los distintos tipos de información y los mecanismos y herramientas creados para la generación de dichas ayudas. En todo momento se persigue el objetivo de ofrecer la posibilidad de crear ayudas visuales AR al mayor número de usuarios posibles, abstrayendo el funcionamiento propio del sistema AR a bajo nivel. Finalmente los resultados experimentales muestran los resultados obtenidos aplicando estas técnicas en diversos proyectos financiados durante el desarrollo de este trabajo.

3.2 Descripción del problema

Las técnicas de computación y dispositivos necesarios para crear sistemas de Realidad Mixta y Aumentada han evolucionado rápidamente en los últimos años. En un caso ideal cualquier usuario debería ser capaz de aplicar estos avances a sus aplicaciones, sin embargo en la mayoría de casos se encuentra la limitación de que el usuario debe tener amplios conocimientos técnicos para utilizarlos. Debido a esto, en la mayoría de casos, la creación de contenidos para aplicaciones donde se mezcla la realidad con objetos virtuales, es un proceso manual desarrollado por técnicos y programadores. En el caso concreto de las ayudas visuales, lo deseable sería que cualquier persona que conozca en detalle el procedimiento a realizar, fuese capaz de plasmarlo en una aplicación AR, sin requerir amplios conocimientos técnicos sobre cómo funcionan las tecnologías involucradas en dicha aplicación.

En este caso se considera que las ayudas visuales abarcan, tanto las indicaciones que recibe un usuario durante la realización de una tarea, como posibles preguntas para

evaluar su conocimiento sobre dicha tarea. Por tanto, estas ayudas pueden tener varios objetivos: guiar al usuario para realizar un proceso que desconoce, ofrecer asistencia en momentos concretos, aportar documentación necesaria durante el proceso, identificar elementos involucrados en el proceso, evaluar el conocimiento de elementos del proceso, etc. El proceso de creación de ayudas visuales involucra por tanto diversos tipos de información, que pueden ser necesarios en distintos momentos durante el desarrollo de una tarea. Cada tipo de información tiene unas propiedades visuales que deben tenerse en cuenta a la hora de incluirlos en el sistema, para que el usuario final pueda visualizarlos correctamente. En el momento de crear el contenido de la ayuda visual, normalmente ya existe información previa: documentos, planos, textos explicativos, cuestionarios, etc. Esta información previa debe ser incorporada a las ayudas visuales y complementada con nueva información en los casos necesarios. En la actualidad, no existe ningún sistema en el mercado lo suficientemente extendido, como para considerarse un sistema de referencia para crear ayudas visuales AR. Al igual que tampoco existe una herramienta o metodología, que defina cómo integrar la información existente en un sistema AR. La falta de este tipo de herramientas provoca que las empresas, centro de formación, etc. tengan que contratar este tipo de servicios a desarrolladores especializados (diseñadores, programadores, etc.). Con esta forma de trabajar, el experto en desarrollar la tarea, es decir, quien posee el conocimiento, debe transmitirlo al desarrollador para que este lo plasme en las ayudas visuales creadas ad-hoc. Como consecuencia se encarece el proceso de creación, se distorsiona la información al transmitirse entre varias personas y no permite un mecanismo de creación y actualización ágil del contenido de las ayudas.

En concreto, en este trabajo se desea dar solución a los siguientes problemas principales:

1. Permitir que usuarios no programadores puedan crear contenidos para ayudas visuales AR
2. Abstracter al diseñador o autores de las ayudas, del funcionamiento a bajo nivel de las tecnologías AR
3. Definir un mecanismo para crear la coherencia espacial entre la información virtual y las partes del mundo real al que complementan
4. Ofrecer un mecanismo para integrar la información existente previamente en las nuevas ayudas visuales para minimizar la necesidad de crear nuevos recursos
5. Evaluar el conocimiento del usuario acerca de la tarea desarrollada utilizando AR

Además son deseables las siguientes características:

6. Aprovechar al máximo el contenido 2D y multimedia disponible
7. Ofrecer mecanismos para agilizar la creación del contenido 3D
8. El mecanismo de definición de la relación espacial entre real y virtual debe ser sencillo para que puedan llevarlo a cabo el máximo número de usuarios posible, independientemente de sus conocimientos informáticos
9. La coherencia espacial entre real y virtual no solo incluirá posición y orientación, sino también una correcta ocultación entre ambas
10. Definir distintos tipos de preguntas para evaluar el conocimiento del usuario

Para dar solución a estos problemas se propone una solución compuesta por un nuevo sistema de edición de contenidos y un sistema cliente para la visualización de los contenidos creados. El sistema de edición permitirá al usuario organizar la información de la tarea a realizar, tanto temporalmente, como espacialmente. Para la organización temporal se utilizará una estructura de pasos que deberán ejecutarse por el cliente de forma secuencial. Para la organización espacial se analizarán los distintos tipos de información y se propondrá su representación adecuada en la ayuda visual y cómo vincularla al mundo real. Crear contenidos para aplicaciones AR de formación.

3.3 Análisis de la evolución de las ayudas visuales

El auge de los dispositivos móviles, ordenadores portátiles y las tecnologías multimedia han dotado a los procesos de formación de nuevas herramientas que en pocos años se han convertido en indispensables. Diversos estudios han demostrado como las nuevas tecnologías y las plataformas *e-learning* mejoran el aprendizaje de los alumnos [Chandra. 2005]. Estos estudios muestran, cómo las nuevas tecnologías, hacen los contenidos más atractivos y accesibles, mejorando la retención de la información por parte del alumnado.

3.3.1 *Manual en papel*

Observando la evolución de la información utilizada en las ayudas visuales, el primer tipo de ayuda visual que encontramos es el manual en papel. Los manuales incluyen, tanto textos, como imágenes para mostrar los contenidos. Estos manuales pueden contener gran cantidad de información, pero dicha información esta completamente desligada del mundo real. Es el alumno, quien leyendo las explicaciones y observando las imágenes, debe establecer una relación entre los objetos reales del procedimiento, y la información teórica (virtual) contenida en el manual. En cuanto a la

3.3.2 Esquemas de operación

A menudo en las fabricas, con el objetivo de evitar el manejo de grandes manuales, se colocan ayudas visuales en cada máquina describiendo de forma esquemática los procedimientos de mantenimiento. Esta forma de utilizar el soporte papel, contextualiza la información puesto que el usuario al llegar a la máquina encuentra solo la información necesaria. Estas ayudas tienen el requisito de ser breves y esquemáticas, puesto que su función es recordar al operario los pasos necesarios, no enseñarle a realizarlos. Si en algún momento el usuario tiene alguna duda, el resto de información debe buscarla en el manual en papel de la máquina. Este mismo tipo de ayudas visuales se encuentran comúnmente en maquinas complejas, como por ejemplo coches o fotocopiadoras. Estas ayudas no describen procedimientos complejos, sino tareas de mantenimiento comunes que debe realizar el usuario sin conocimientos técnicos de la máquina, por ejemplo desatascar una hoja de la fotocopiadora o llenar el deposito de agua del limpiaparabrisas de un coche. En la Figura 26 se puede observar parte de los esquemas de operación incluidos en una fotocopiadora RICOH Aficio 1060. Estos esquemas explican los pasos para solucionar un atasco en cada una de las secciones de la máquina, identificadas cada una de ellas por una letra. En este caso la relación espacial entre los objetos reales y la información virtual se mejora añadiendo pegatinas con letras y pintando de color azul las piezas que es necesario accionar.

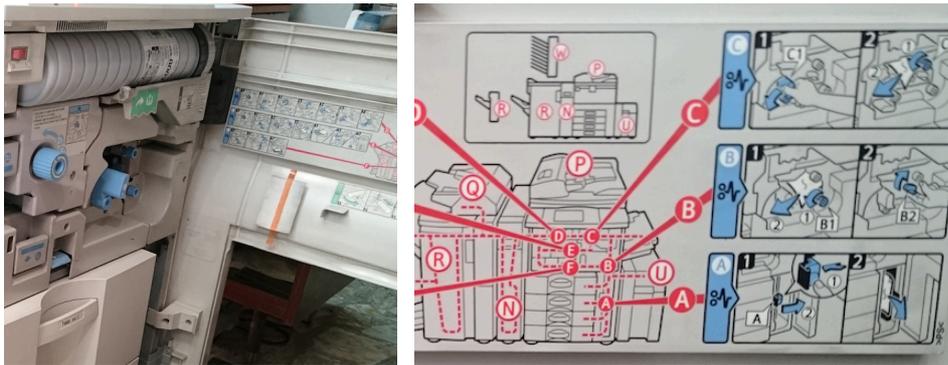


Figura 26. Fotografías realizadas a los esquemas de operación colocados por el fabricante en el interior de una fotocopiadora RICOH MP 7000

3.3.3 Videos explicativos

La siguiente evolución de los manuales en papel, la encontramos en los videos explicativos. Antes de disponer de ordenadores personales, ya se creaban tutoriales y cursos en video. En este caso los alumnos podían observar cómo se realizaba un

procedimiento, además de leer los detalles en el manual. Esta forma de presentar la información mejora la relación entre los contenidos y los objetos reales a los que se refieren, puesto que el usuario ve un entorno real en la imagen del video, sobre el que un experto explica el procedimiento. En este caso el usuario observa cómo se realizan las tareas reales, por lo que su comprensión es más sencilla, aunque carece de una relación espacial de la información con el lugar concreto del espacio al que se refiere. En ocasiones el usuario puede estar observando el video, sin tener muy claro cual es el punto real donde se esta realizando el procedimiento.

3.3.4 Documentos digitales multimedia

Con la generalización del uso de ordenadores y dispositivos móviles, tanto la información en texto e imágenes de los manuales, como los videos explicativos, se digitalizan de forma que se mejora el acceso a la información. Al utilizar una plataforma digital, los videos, textos e imágenes pueden aparecer juntos y el usuario puede saltar rápidamente de una información a otra por medio de botones y enlaces. Este avance, por tanto, mejora la forma en que se almacena la información y cómo acceder a ella, pero sigue sin aportar mecanismos que mejoren la relación entre el contenido virtual y los objetos reales. Ahora el usuario puede llevar consigo gran cantidad de manuales y videos en un dispositivo, pero de nuevo debe ser el quien decida que información consultar y cómo llegar hasta ella.

3.3.5 Presentaciones digitales basadas en diapositivas

En cuanto a la formación el principal recurso digital son las presentaciones digitales basadas en diapositivas. Con este mecanismo el experto crea presentaciones, en las que una serie de diapositivas secuenciales muestran el contenido de su explicación. Estas diapositivas pueden contener texto, imágenes, videos o sonidos que el experto considere necesarios para mejorar el entendimiento por parte del alumno. Para la creación de dichas presentaciones existen múltiples soluciones software, de forma que usuarios con mínimos conocimientos informáticos pueden plasmar sus conocimientos en dicho soporte.

3.3.6 Simuladores de realidad virtual

Con la aparición de la realidad virtual encontramos una nueva evolución de representar la información a los alumnos. En este caso se crean representaciones virtuales de los objetos y el alumno puede observar e interactuar con dichos objetos. Este nuevo

mecanismo no solo permite presentar el modo de realizar una tarea, sino practicar la realización de dicha tarea de forma virtual. Este tipo de formación permite practicar procedimientos peligrosos sin riesgo, e incluso evaluar al usuario durante la realización de los mismos. Estos métodos de formación y entrenamiento se encuentran muy difundidos en la actualidad, pudiendo encontrar simuladores de todo tipo: conducción, navegación, realización de procedimientos médicos, montaje de estructuras, etc. Sin embargo, en este paradigma de interacción el usuario está sumergido en un mundo virtual, de forma que aunque pueda practicar sus conocimientos, luego debe ser capaz de aplicarlos sobre los objetos reales.

3.3.7 Ayudas con Realidad Aumentada

La Realidad Aumentada aglutina todos los beneficios de los métodos explicados y además mejora la relación entre los objetos reales y los contenidos virtuales. Con este paradigma de interacción la información aparece contextualizada y el usuario la observa junto con los objetos reales a los que hace referencia, por lo que se mejora la comprensión de los contenidos. Sin embargo la juventud de la tecnología y las limitaciones técnicas, dificultan la creación de contenidos. En la Figura 27 se pueden observar dos ejemplos de ayudas visuales utilizando Realidad Aumentada de la empresa Metaio. En la primera, se observa la explicación de cómo extraer el faro de un coche, y en la segunda, cómo extraer una pieza de una impresora. En ambos casos, se puede observar cómo la relación espacial entre las flechas que indican la dirección y los elementos a los que pertenecen, mejoran la comprensión de la tarea a realizar.



Figura 27. Ejemplos de manuales utilizando Realidad Aumentada de la empresa Metaio, Fuente: www.metaio.com

Para crear este tipo de ayudas existen diversas opciones, como se explica en el apartado 2.4. Estas opciones van desde crear las ayudas utilizando bibliotecas de bajo

nivel, o utilizar programas de edición de alto nivel. En el primer caso los tipos de información que se pueden representar solo depende de lo que sea capaz de desarrollar el usuario, sin embargo en el segundo las opciones son mucho más limitadas debido a lo novedoso de este tipo de herramientas de edición. A continuación se analizan los distintos tipos de información susceptibles de aparecer en este tipo de ayudas y el método de representación válida de cada una de ellas. Tras este análisis se propone un nuevo sistema de edición de ayudas visuales AR.

3.4 Análisis de tipos de información en ayudas visuales

Tras las entrevistas realizadas con expertos en formación, mantenimiento y prevención de distintas empresas y sectores, se han catalogado los distintos tipos de información necesarios en ayudas visuales AR con el objetivo de guiar o formar al usuario en el desarrollo de una tarea. Para cada uno de los tipos identificados se realizará una descripción del mismo, los requisitos de edición para su inclusión en un sistema de generación de contenidos y los requisitos de visualización por parte del usuario de las ayudas.

3.4.1 Pasos de una tarea

Descripción

El primer tipo de información necesario es la organización de la información necesaria para realizar una tarea en pasos. Tanto para enseñar un proceso que el usuario desconoce, como para recordar dicho proceso a un usuario experto, en todas las ayudas visuales se encuentra la información dividida en pasos que el usuario debe realizar. La división en pasos de una tarea o procedimiento debe cumplir un equilibrio entre el número de pasos y la complejidad de los mismos. Una tarea compleja dividida en pocos pasos conlleva que cada uno de ellos pueda ser demasiado complejo y el usuario tenga problemas en su realización o aprendizaje. El mismo efecto puede darse al contrario, si el número de pasos es excesivo y demasiado sencillos, será más difícil de recordar para un usuario inexperto y demasiado tedioso de seguir para uno experto. Un método común es agrupar estos pasos en secciones y utilizar una estructura jerárquica de forma que el procedimiento puede descomponerse en los pasos necesarios con una estructura fácil de recordar y que además permita a un usuario experto consultar diversas partes del mismo.

Requisitos de edición

La división en pasos de una tarea es algo que solo el experto en dicha tarea puede realizar, lo que otorga más importancia a que sea dicho experto quien tenga las herramientas necesarias para crear ayudas visuales AR de forma rápida y sencilla. Para la creación de dicha estructura es necesario que el sistema de edición provea las siguientes funcionalidades:

- Edición básica de pasos (crear, eliminar, copiar, pegar, etc.)
- Ordenación de pasos
- Definición de una estructura jerárquica para agrupar los pasos
- Asociar la información necesaria para explicar el paso

Requisitos de representación

Durante el desarrollo de la tarea el usuario debe ser capaz de realizar las siguientes acciones con los pasos de la tarea:

- Ver toda la información asociada a un paso
- Ver los pasos de una tarea de forma secuencial para aprender u obtener indicaciones de cómo realizarla
- Volver a ver las indicaciones de un paso
- Navegar por la jerarquía de pasos para seleccionar cualquiera de ellos

3.4.2 Texto explicativo

El texto explicativo es el recurso más utilizado para describir una tarea porque puede describir cualquier proceso y es fácilmente editable. Desde los primeros manuales en papel el texto explicativo ha sido la base de los documentos de ayuda y formación, sin embargo en los manuales actuales se tiende a reducir el texto al mínimo necesario complementándolo con imágenes y esquemas. Observando las presentaciones basadas en diapositivas, en la mayoría de casos estas incluyen texto e imágenes o videos, donde el texto enumera o describe los apartados y aspectos clave de la explicación. Ya que el texto explicativo es la base de representación de los manuales actuales, a la hora de crear ayudas visuales AR, los textos explicativos serán una gran parte de los recursos que se deban reutilizar para optimizar la creación de dicha ayuda. En un sistema de ayudas visuales AR, el texto explicativo representará la descripción de la acción a realizar creada por el experto durante la creación de la ayuda. En esta clasificación se diferencia este texto explicativo del resto de textos que puedan aparecer en documentos o referencias

que se tratan más adelante. Dentro de los textos explicativos distinguiremos dos categorías: textos generales o textos puntuales asociadas a un lugar/elemento real concreto.

Los textos generales representan información asociada al paso o el procedimiento, a través de los cuales se explica e instruye al usuario sobre la tarea a realizar. Los textos puntuales son información adicional asociados a un lugar o elemento concreto. Este tipo de textos deben por tanto tener un vínculo en el sistema con el elemento al que complementan.

Requisitos de edición

El texto explicativo es uno de los recursos cuyos requisitos de edición están más desarrollados en los software actuales. En la actualidad cualquier usuario medio conoce algún programa de edición de textos con el que editar estos contenidos. En una herramienta de creación de ayudas visuales no se persigue replicar el funcionamiento de un editor de textos, sino dar los mecanismos para que el autor pueda incluir los textos en dichas ayudas. Los requisitos de edición para este recurso serán los siguientes:

- Edición básica de textos (escribir, borrar, copiar, pegar, etc.)
- Ajustar parámetros visuales del texto: tamaño, color, fuente, etc.
- Asociar el texto al paso de la tarea al que pertenece
- En el caso de textos puntuales, un mecanismo para definir la coherencia 3D del texto con el elemento al que hace referencia

Requisitos de representación

Los textos explicativos pueden representarse de múltiples formas, cada una de ellas orientada a guiar al usuario en diferentes momentos del desarrollo de una tarea.

- Representación del texto 2D: este modo de representación es el más adecuado para hacer legible el texto puesto que los píxeles de la letras quedan alineados con los píxeles de la pantalla. Este modo es el modo más común de representación de texto, por lo que los usuarios están más familiarizados con dicha representación. Se puede observar un ejemplo en la Figura 28 (izda.).
- Representación del texto 3D: este modo de representación debe utilizarse para textos cortos. En este caso el texto debe representarse en una posición y orientación coherente al objeto que hace referencia, como el ejemplo de la Figura 28 (dcha.).

- Sintetizador de voz: esta opción permite al usuario escuchar el texto mientras desarrolla la tarea o inspecciona los elementos. Esta opción es válida para cualquier texto 2D o 3D, pero es especialmente útil en el caso de los textos explicativos.
- Parámetros visuales: en cualquiera de los modos el texto debe mostrar las propiedades visuales definidas durante el proceso de edición (tamaño, color, fuente, etc.).



Figura 28. Ejemplo de texto renderizado en 2D de la aplicación Wikitude (izda.), Fuente: www.wikitude.com; texto asociado a un lugar del entorno real con posición y orientación definidas en 3D en el prototipo de Holo Lens (dcha.), Fuente: [Microsoft. 2015]

3.4.3 Imagen o video explicativo

Las imágenes y videos explicativos son aquellos utilizados en los manuales para mostrar al usuario imágenes reales de un proceso o esquemas y animaciones que le ayuden a comprenderlo. Este tipo de recursos, al igual que el texto, son muy comunes en los manuales actuales. Los video tutoriales son un recurso muy extendido tanto en cursos de formación, como a través de internet, donde cualquier usuario experto se graba a sí mismo realizando una tarea. El experto explica al mismo tiempo los pasos que va realizando, de forma que otro usuario pueda seguirlos viendo y escuchando el video. Del mismo modo en un manual en papel o una presentación, las imágenes de pasos clave se incrustan en la explicación para mostrar escenarios reales de aplicación. Este tipo de información tiene un mayor grado de relación entre el mundo real y la información virtual (los contenidos que se explican), puesto que el usuario que observa las imágenes puede ver la aplicación de los contenidos sobre elementos reales. Sin embargo este tipo de representaciones carecen de interactividad puesto que el alumno solo puede observar lo que se ha grabado previamente, en ningún caso puede interactuar con las imágenes que observa, simplemente puede modificar el tiempo de reproducción.

Las imágenes y videos explicativos son un recurso que se puede generar fácilmente utilizando una cámara de fotos o una cámara de video. Sin embargo existe un requisito fundamental, que se pueda reproducir el proceso de forma real para ser grabado o fotografiado. Este requisito, fácil de cumplir en la mayoría de casos, es completamente imposible en casos donde la tarea es peligrosa, cuando el material involucrado es imposible de conseguir para la grabación o simplemente el lugar donde se realiza la tarea no es susceptible de ser grabado o fotografiado. En estos casos las imágenes y videos pueden generarse de forma virtual por medio de simulaciones. En ambos casos, los videos siempre requieren un trabajo de post proceso para obtener un resultado final de calidad que contenga solo las partes necesarias para la explicación o ayuda.

Las imágenes y videos explicativos, al igual que el texto, puede clasificarse en dos tipos: generales o puntuales asociados a una localización/elemento concreto. Los generales mostraran las acciones necesarias para realizar la tarea. Los puntuales muestran detalles concretos y descripciones asociadas a elementos reales concretos.

Requisitos de edición

Existen multitud de paquetes comerciales para edición de imágenes y videos, y en este estudio se describen los requisitos necesarios para incluir, los recursos ya generados, en las ayudas visuales AR.

- Asociar un video o imagen general al paso de la tarea al que pertenece.
- En el caso de imágenes y videos puntuales, asociarlos al objeto real al que hacen referencia, teniendo en cuenta posición y orientación si el autor lo considera necesario durante la creación de la ayuda.
- En cualquier video, añadir la marca de tiempo en la que el video muestra la información relevante. Por ejemplo, en un video que describa una tarea completa, crear la marca de tiempo que se corresponde con cada paso.

Requisitos de representación

Las imágenes y videos explicativos se representan de forma visual (y sonora en el caso de los videos). Los diferentes requisitos de representación vendrán dados sobre todo por si el recurso es de tipo general o puntual asociado a un elemento/localización real.

- Representación de imágenes y videos 2D: este modo de representación es el más adecuado para imágenes y videos, puesto que los pixeles de cada imagen están alineados con los pixeles de la pantalla obteniendo mejor definición. Además

este el modo en que el usuario está más acostumbrado a visualizar dicha información.

- Representación de imágenes y videos 3D: en este modo de representación las imágenes y videos aparecen en el espacio 3D, como si se observarían pantallas flotantes. En este tipo de representación, habrá que distinguir entre dos tipos: con orientación fija u orientación libre. En el caso de imágenes y videos relacionados con elementos reales, tanto en posición, como en orientación, la representación deberá ser fija en el espacio de forma que el usuario deba colocarse frente al video o imagen para visualizarlo. En los casos en que la orientación no es un requisito, sino que solo lo es la localización, el video o imagen puede orientarse siempre de frente al usuario, de forma automática, para mejorar su visualización.
- En cualquier caso deberá incluirse la reproducción del audio en el caso de los videos.
- En ambos casos el usuario debe ser capaz de interactuar con el tiempo de reproducción del video.

3.4.4 Modelos 3D

Los modelos 3D son representaciones en tres dimensiones de elementos útiles para la explicación. Este tipo de información se utiliza principalmente para mostrar objetos que no existen en el entorno real, pero que se utilizan de alguna forma durante el procedimiento. Este tipo de información es muy adecuada para su visualización en sistemas de Realidad Aumentada porque pueden observarse desde cualquier punto de vista, y no solo desde el que se tomó la imagen, como es el caso de las imágenes y videos. Gracias a ello, el usuario puede explorarlos en el entorno real, como si en realidad estuviesen ahí. Otro uso común de este tipo de información es resaltar objetos existentes que se transforman de alguna forma. Por ejemplo, en el caso de que se desee mostrar que se debe retirar una pieza se utiliza un modelo 3D de la misma forma con un color llamativo y una flecha que indica la dirección en que moverla. Los modelos 3D pueden ser tan sencillos como un cubo de un color sencillo, o tan complejos como para representar, por ejemplo, un motor completo con todas sus piezas. Los modelos 3D, por tanto, no deben entenderse como un único elemento, sino que dependiendo de su complejidad pueden dividirse o utilizar partes concretas un modelo para la ayuda visual, descartando el resto. En este tipo de información solo se engloban los modelos 3D compuestos por propiedades visuales (geometría, texturas, materiales, iluminación, etc.), cualquier otro

comportamiento asociado o representado por modelos 3D: modelos físicos, fluidos, etc. se contemplan más adelante. Los modelos 3D pueden utilizarse para mostrar información general del paso, o puntuales vinculados a localizaciones/objetos reales concretos. En el caso de modelos 3D generales representan objetos relevantes en la explicación, para que el usuario pueda observarlos, sin un vínculo con una posición del entorno real. En el caso de modelos 3D puntuales se vincularán a una posición y/o orientación del mundo real.

Requisitos de edición

Los modelos 3D pueden crearse utilizando diversos programas de edición existentes en el mercado y existen diversas técnicas para crear dichos modelos: modelado de caras, modelado de sólidos, superficies paramétricas, escaneo 3D, etc. No es objetivo de una herramienta de creación de ayudas visuales AR el replicar el proceso de edición de modelos 3D, sino el ofrecer las herramientas necesarias para incluirlos en dicha ayuda. Sin embargo, en estos requisitos se ha considerado adecuado incluir la creación de elementos 3D sencillos, de esta forma un usuario sin conocimientos de modelado 3D podrá incluir este tipo de elementos sencillos.

- Asociar un modelo 3D existente a un paso concreto de la tarea o procedimiento.
- Crear modelos 3D sencillos: cubo, esfera, cilindro, etc.
- Modificar las propiedades visuales de los objetos 3D: color, transparencia, textura, etc.
- Seleccionar partes concretas de un modelo 3D complejo y poder utilizarlas como modelos 3D individuales.
- Modificar la posición, orientación y escalado de los modelos 3D.
- En el caso de modelos 3D puntuales: definir su relación con el lugar u objeto del mundo real al que se asocian.

Requisitos de representación

- Visualizar los modelos 3D manteniendo las propiedades visuales definidas por el autor.
- En el caso de modelos 3D generales, no asociados a un lugar real concreto, el usuario debe poder explorar el modelo 3D para observarlo desde diferentes puntos de vista.
- En el caso de modelos 3D puntuales, asociados a lugares u objetos reales, deben mantener la posición y orientación definidas por el autor de la ayuda.



Figura 29. Ejemplo de representación de un modelo 3D interactivo general (izda.); ejemplo de presentación de un modelo 3D asociado a un objeto real (dcha.). Fuente: <http://flintarch.com>

3.4.5 Documento de detalle

Los documentos de detalle son documentación adicional que complementa la descripción o instrucciones de una tarea/procedimiento. Estos tipos de documentos son archivos propios de otras aplicaciones que no se desean integrar en la propia ayuda visual, sino que se vinculan como documentación adicional. Estos documentos de detalle permiten añadir cualquier tipo de información a la ayuda visual, aunque su nivel de integración es mínimo, puesto que no se integran en la propia visualización aumentada. Por ejemplo, el manual completo de una máquina sería un documento de detalle, al cual se haría referencia en algunos pasos. En este caso la ayuda visual AR serviría para hacer accesible dicha información, en el momento necesario del proceso o asociado a un elemento concreto. La posibilidad de incluir este tipo de documentos de detalle en cualquier formato es crucial, puesto que en muchos casos el autor de la ayuda posee documentos en algún formato propietario que son de utilidad para completar la ayuda. La inclusión de estos documentos no solo resulta en una mejor calidad de la ayuda, sino que agiliza la creación de la misma.

Requisitos de edición

Este tipo de documentos se incluyen tal cual en la ayuda visual y no se editan en ningún modo, por lo que los requisitos de edición se limitan a poder añadir una referencia a dichos documentos. Dentro de esta referencia será necesario indicar también la parte del documento a la que se hace referencia para agilizar la consulta de dicho documento y ofrecer al usuario exactamente la información que necesita. Los requisitos concretos son los siguientes:

- Vincular un documento a un paso determinado del procedimiento
- Vincular un documento a un objeto o localización concretos
- En cualquiera de los dos casos, poder seleccionar la parte del documento referente al paso o elemento.

Requisitos de representación

La representación de este tipo de documentos no corre a cargo del sistema de ayudas visuales AR, sino que este sistema es un mero enlace a los documentos. Por ello los requisitos de visualización se reducen a poder mostrar los archivos utilizando el software asociado a cada uno de ellos.

- Visualizar el documento utilizando el software asociado
- Mostrar la parte pertinente del documento seleccionada por el autor (siempre que el software lo permita).

3.4.6 Indicadores de lugar

Los indicadores de lugar son marcas que el autor de la ayuda visual utiliza para resaltar o indicar zonas reales concretas. Por ejemplo, el lugar de colocación de una pieza, o donde realizar una perforación con el taladro. Este tipo de indicadores tienen una cantidad muy limitada de información que permite identificar dicho lugar, normalmente con una cadena de texto. Esta información pese a su sencillez aporta una relación directa entre la información virtual (instrucciones) y el mundo real, puesto que muestra directamente lugares a los que se hace referencia en las instrucciones. En la Figura 30 se observan dos ejemplos de representación de indicadores de lugar.



Figura 30. Ejemplos de indicadores de lugar en aplicaciones AR, Fuentes: www.instantreality.org y nationalgeographic.com

Requisitos de edición

- Seleccionar de forma sencilla un lugar concreto del mundo real
- Añadir información que permita identificar unívocamente el lugar seleccionado

Requisitos de representación

- Mostrar el lugar concreto en la posición definida previamente del mundo real
- Mostrar la información que identifica dicho lugar

3.4.7 Información contextual sencilla

La información contextual sencilla es aquella información que se utiliza para mostrar indicaciones sencillas sobre lugares o elementos reales concretos. Este tipo de información será: texto, imágenes, iconos o modelos 3D sencillos que resaltan alguna característica del elemento real. Por ejemplo, mostrar indicaciones de peligro en los elementos que puedan causar daño durante una tarea sobre un cuadro eléctrico. Esta información esta orientada principalmente a realizar anotaciones o señalar el mundo real por lo que aporta una relación directa entre los objetos reales y la información virtual.

Requisitos de edición

- Seleccionar de forma sencilla un lugar u objeto del mundo real
- Añadir información sencilla: texto, imágenes, modelos 3D sencillos, etc.
- Establecer la orientación de la información (en caso de ser necesario)

Requisitos de representación

- Mostrar la información sencilla en el lugar definido previamente por el autor. En caso de que el autor haya definido una orientación deberá mantenerse en la visualización.
- En el caso de orientación no fijada por el autor la información rotará de forma automática para obtener en todo momento la mejor visualización posible.

3.4.8 Animación del procedimiento

La animación es un tipo de información complementario a los tipos anteriores, puesto que se refiere a cambios producidos en elementos virtuales a lo largo del tiempo. Las animaciones se utilizan para mostrar acciones, recorridos o movimientos que deben realizarse en un paso determinado de una tarea. Las animaciones permiten por tanto, no solo mostrar que se debe hacer y donde hacerlo sino además la forma correcta de

realizarlo. Las animaciones permiten crear instrucciones complejas a partir de elementos sencillos, como imágenes y modelos 3D sencillos. En las animaciones es posible distinguir entre animaciones generales o animaciones asociadas a un lugar o elemento concretos. Las animaciones generales simplemente almacenan la evolución de posición y/o orientación, color, etc. de los elementos animados a lo largo del tiempo, mientras las que van asociadas a un lugar o elementos concretos además incluyen la relación con el objeto del mundo real.

Requisitos de edición

- Definir el estado de cada parámetro de la animación en cada instante de tiempo (posición, orientación, color, transparencia, etc.).
- Definir el tiempo de la animación y los valores que toma en cada instante.
- Operaciones básicas de edición de animaciones basadas en fotogramas: copiar, pegar, mover, etc.
- En caso de animaciones asociadas a elementos concretos: definir la relación entre la animación y el elemento real al que se asocian.

Requisitos de representación

- Mostrar el estado de cada elemento animado acorde al tiempo transcurrido.
- En el caso de animaciones asociadas a elementos concretos: mostrar el elemento animado en la posición y orientación definidas con respecto al elemento real al que se asocia.
- El usuario debe ser capaz de configurar el tiempo de la animación para mejorar la visualización de la misma: volver a empezar para verla de nuevo, saltar a un tiempo determinado, pausar, etc.

3.4.9 Eventos predefinidos

Los eventos predefinidos son información relativa a cómo deben comportarse los objetos incluidos en la ayuda visual, en base a ciertas acciones del usuario, temporizadores, etc. Este tipo de eventos son deseables en una ayuda visual puesto que dotan de una lógica sencilla al contenido de la ayuda, por ejemplo, cuando el usuario pulse sobre un interruptor aplicar la animación de encender un circuito o bombilla. Estos eventos engloban condiciones y acciones en la forma cuando se cumpla la condición entonces se ejecuta la acción. Este tipo de eventos están programados previamente y no

es necesario que el autor de la ayuda tenga conocimientos de programación para crearlos, puesto que solo debe relacionar condiciones con acciones.

Dentro de las posibles condiciones podemos encontrar distintos tipos en función de los parámetros utilizados para evaluar la condición. Los principales parámetros son: tiempo, interacción del usuario, posición/orientación de objetos e inicio/fin de otras acciones. Dentro de las condiciones asociadas a la interacción del usuario, se encuentran condiciones, tanto en función del punto de vista, como en la forma de interactuar con los objetos (por ejemplo tocándolos). En las condiciones de posición/orientación se engloban todas las condiciones asociadas a posiciones o movimientos de los objetos reales o virtuales.

En cuanto a las acciones desencadenadas las principales son: modificar el estado de animaciones, mostrar/ocultar información virtual, modificar el estado de temporizadores o condiciones. Estas acciones, aunque sencillas, permiten modificar el estado de la información virtual de forma que la ayuda visual responda a las acciones del usuario, consiguiendo una mayor interacción con dicha ayuda.

Requisitos de edición

- Un mecanismo de seleccionar la condición asociada a cada acción.
- Para las condiciones y acciones asociadas con posiciones u orientaciones, un mecanismo de definición de dicha relación tridimensional.
- Para las condiciones y acciones asociadas con posiciones o movimientos de objetos, un mecanismo de definición de dicha especificación espacial.
- Para las condiciones y acciones asociadas a lugares u objetos reales concretos, un mecanismo de definición de la relación espacial con dichas localizaciones.
- Para acciones y condiciones relacionadas con tiempo, un mecanismo de definición del intervalo temporal.
- Un método para visualizar el resultado final durante la edición de la ayuda visual.

Requisitos de representación

- Un mecanismo automático que compruebe las posibles condiciones e inicie las acciones necesarias.
- Para acciones y condiciones relacionadas con posiciones y orientaciones del entorno real, será necesario aplicarlas en el punto definido previamente por el autor de la ayuda.

3.4.10 Cuestiones para evaluar el conocimiento del usuario

Un tipo especial de contenidos que puede encontrarse en las ayudas visuales son cuestiones para evaluar la correcta comprensión de los contenidos por parte del usuario. Los cuestionarios son una herramienta esencial dentro del proceso de formación, y como tal, podemos encontrar que la gran mayoría de plataformas digitales, orientadas al proceso educativo, incorporan herramientas para la creación y gestión de cuestionarios. En la Tabla 10, se muestra un listado de los distintos tipos de preguntas disponibles y los recursos multimedia que permiten asociar a dichas preguntas las plataformas de código abierto: Dokeos, Moodle e Illias.

Plataforma	Tipos de cuestiones	Recursos
Dokeos [Dokeos. 2015]	Elección múltiple Rellenar espacios Relacionar Respuesta abierta Zonas Interactivas	Imágenes Videos Sonido
Moodle [Ros Martínez de Lahidalga, Iker. 2008]	Elección múltiple Verdadero/Falso Respuesta corta Emparejado Numérico Calculadas Descripción Organizado al azar Respuestas incrustadas	Imágenes (en las preguntas de opción múltiple)
Illias [Illias. 2015]	Elección múltiple Rellenar huecos Ordenar ítems Unir parejas	Imágenes Sonidos Applets Java

Tabla 10. Tipos de preguntas disponibles en las principales plataformas de formación de código abierto

Como se puede observar en la Tabla 10, existen multitud de tipos de preguntas, a las que podemos asociar imágenes, videos o sonidos. Estas preguntas permiten evaluar los conocimientos teóricos del alumno, sin embargo tienen una relación muy débil con el entorno real, puesto que la única referencia con el mundo real son las descripciones en texto apoyadas por los videos e imágenes. En un sistema de ayudas visuales AR será necesario incluir cuestiones que utilicen la Realidad Aumentada para crear una mayor relación entre el entorno real y los conocimientos teóricos (información virtual). De esta forma nos encontramos con dos tipos de preguntas atendiendo a si se refieren a cuestiones generales del proceso o a lugares/elementos reales concretos.

Requisitos de edición

- Mecanismo de creación de preguntas de diversos tipos
- Posibilidad de añadir recursos adicionales a las preguntas (videos, fotos, sonidos, etc.)
- Mecanismo para asignar propiedades de evaluación a cada cuestión: nota de la pregunta, tiempo de respuesta, número de intentos, etc.
- En el caso de preguntas asociadas a lugares/objetos reales, será necesario un mecanismo para asociar la pregunta y sus respuestas a dichos lugares u objetos.

Requisitos de representación

- En el caso de preguntas generales, los cuestionarios se mostraran alineados con la pantalla para obtener una mejor visualización del contenido.
- En el caso de preguntas asociadas a lugares/objetos reales, la pregunta o las respuestas asociadas deberán mostrarse con la relación espacial definida por el autor.
- En cualquier caso la representación de los cuestionarios requiere la representación de atributos asociados a los cuestionarios: nota obtenida, respuestas correctas, tiempo restante, tiempo empleado, etc. Todo ello según lo definido por el autor de la ayuda durante el proceso de edición.

3.4.11 Simulaciones y Modelos 3D complejos

Las simulaciones y modelos 3D complejos son cualquier otro tipo de información, no contemplada por los tipos anteriores, que tiene un comportamiento propio, y no solo representación visual. En este tipo de información se engloban por ejemplo: simulaciones de fluidos, modelos virtuales de circuitos eléctricos que reaccionan a acciones del usuario, etc. Mientras que los tipos de información anteriores son genéricos y pueden aplicarse en cualquier procedimiento o tarea, las simulaciones y modelos 3D complejos se crean ad-hoc para tareas concretas. Este tipo de elementos son más complejos de crear y a menudo requieren programar su conocimiento por medio de scripts o algún lenguaje de programación.

Requisitos de edición

- Mecanismo para añadir comportamientos complejos a elementos de la ayuda visual.

- Posibilidad de incorporar bibliotecas existentes que implementen el funcionamiento de elementos complejos.
- Mecanismo para observar el resultado del comportamiento complejo durante el proceso de edición.
- En el caso de tener una relación con el entorno real, ofrecer un mecanismo para definir dicha relación.

Requisitos de representación

- Representar los comportamientos definidos por el autor durante la creación de la ayuda.
- Los elementos complejos deben responder a las acciones del usuario.
- En caso de tener una relación con el entorno real, dicha relación debe mantenerse durante la representación en la forma que la haya definido el autor de la ayuda.

3.5 Extensión del modelo de presentación de diapositivas digitales para ayudas visuales AR

En la actualidad, tal y como se describe en el apartado 2.4, existen gran cantidad de bibliotecas de programación y programas comerciales para crear aplicaciones de Realidad Aumentada, las cuales pueden aplicarse a la creación de ayudas visuales. Cada una de ellas tiene sus propias ventajas/limitaciones y están orientadas a usuarios con distinto nivel de conocimientos de programación. Entre las opciones orientadas a usuarios sin conocimientos de programación, existe una variedad muy limitada y la mayoría funciona únicamente con su propia librería de reconocimiento. Además, teniendo a la poca madurez de las soluciones actuales, se observa que no existe un sistema de generación de contenidos asentado como referencia en el mercado. Observando las capacidades de edición de cada editor, ninguno de los editores de contenidos analizados es capaz de soportar todos los contenidos, descritos en el apartado anterior, factibles de aparecer en una ayuda visual. Por esta razón en este trabajo se propone un nuevo sistema de edición para ayudas visuales AR basado en el modelo extendido de presentaciones basadas en diapositivas.

Analizando los distintos tipos de contenidos que podemos encontrar en las ayudas visuales, se puede realizar una clasificación en función de si el contenido esta relacionado o no con un lugar u objeto real concreto. Prácticamente todos los tipos de

contenidos descritos, excepto los referidos únicamente a indicar lugares reales concretos, pueden aportar información de tipo general o puntual asociada a un objeto real concreto. En el caso de información general, el contenido se refiere al paso de la tarea, sin una fuerte relación con algún lugar concreto. Es decir, se explica al usuario cómo realizar un paso, se le muestra la descripción de un objeto o herramienta involucrada, etc. Este tipo de información, sin una fuerte relación espacial con la realidad, no es necesario visualizarla en el lugar real para comprenderla. Sin embargo la información puntual asociada a un lugar u objeto real concreto, es aquella información que no tiene sentido si no se representa alineada espacialmente con el mundo real. Por ejemplo, la identificación del lugar donde realizar un agujero, o el modelo 3D que muestra cómo realizar un procedimiento sobre la propia maquina real.

Evaluando los requisitos de visualización y representación de la información general y la información puntual, observamos que el actual modelo de presentación basada en diapositivas es adaptable para editar y mostrar información general, pero sin embargo carece de mecanismos para: crear información puntual relacionada con lugares u objetos reales, definir la relación espacial entre la información virtual y dichos objetos, etc. El modelo de presentación basada en diapositivas es un modelo muy extendido, utilizado en todos los ámbitos: formación, industria, entretenimiento, etc. En este modelo la información se agrupa en diapositivas, las cuales se visualizan una tras otra secuencialmente o con el orden que selecciona el usuario. En la actualidad existen gran cantidad de programas que permiten a usuarios sin conocimientos de programación crear dichas presentaciones, por lo que la gran mayoría de posibles autores de ayudas visuales ya están familiarizados con esta forma de trabajo. Además, utilizando un modelo tan extendido de creación de contenidos, facilita la adaptación de las ayudas visuales existentes, y su extensión para crear ayudas visuales AR.

Siguiendo estas premisas se propone un modelo extendido de presentaciones basadas en diapositivas donde se añade la posibilidad de crear información puntual asociada a objetos y lugares reales concretos. En este modelo extendido el autor vinculará la información general a cada uno de los pasos de la tarea, de forma similar al actual proceso de creación de presentaciones. De esta forma cada paso de la tarea queda asemejado a una diapositiva de la ayuda visual. Además el modelo se extiende para que el usuario pueda crear escenarios aumentados y relacionarlos con dicho paso. Será sobre estos escenarios aumentados donde el autor añadirá toda la información puntual necesaria. La visualización de la ayuda visual AR, por parte del usuario final, también constara de dos apartados (aunque estrechamente relacionados). En primer lugar la

información general del paso (diapositiva) se representara alineada con la pantalla del dispositivo utilizado, es decir, no se transformaran con los movimientos del usuario. En segundo lugar la información puntual se mostrará alineada con los lugares u objetos reales, tal y como la haya definido el autor de la ayuda. De esta forma el contenido general será más legible y el usuario interactuara al igual que lo realiza actualmente con presentaciones digitales o páginas web. Aprovechando el conocimiento previo de los posibles usuarios/alumnos sobre cómo ver e interactuar con esta información, se mejora la comprensión de la misma. En el caso de la información puntual, se revelará cuando el usuario observe dichos lugares u objetos, alineada y fusionada con la realidad. Este paradigma de interacción en que la información virtual aparece complementando al mundo real es lo que ya hemos definido previamente como Realidad Aumentada, por lo que el resultado de mezclar ambos mecanismos de edición y representación (presentación basada en diapositivas y AR) es lo que se ha denominado ayudas visuales AR.

3.6 Sistema de edición de ayudas visuales AR

El modelo descrito de ayudas visuales AR requiere por un lado un mecanismo para asociar la información general de cada paso, y por otro un mecanismo para que el usuario sea capaz de vincular información con lugares u objetos reales. Además para implementar el mecanismo de edición de información puntual asociada a objetos reales son necesarios dos aspectos fundamentales: ser capaces de identificar el mundo real y ser capaces de asociar información virtual a dicha descripción. Por tanto el proceso de edición de la información puntual se divide en dos partes: definición del mundo real y creación de la información virtual (tanto general como puntual).

Para la definición del mundo real se propone un mecanismo basado en objetos guía que formen la descripción del entorno. Estos objetos permitirán, por ejemplo, capturar información del entorno por medio de cámaras convencionales o cámaras de profundidad (RGBD). La edición de la información virtual englobara la creación de 4 tipos de contenidos: pasos, contenido 2D (todos los contenidos generales del paso), contenido 3D (los contenidos puntuales del paso) y cuestionarios. En la Figura 31 se muestra un diagrama de los elementos involucrados en ambas partes del proceso de edición.

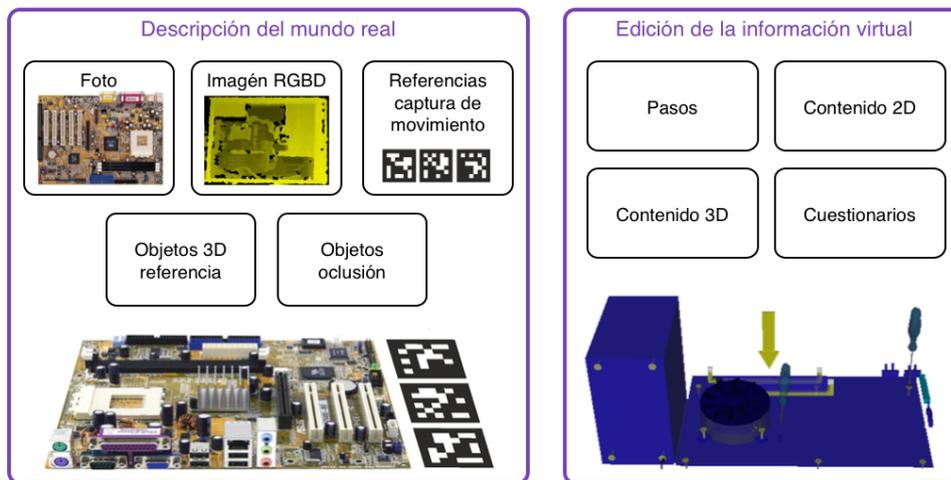


Figura 31. Diagrama general de la solución de edición para ayudas visuales AR propuesta

Modelo de datos

El modelo de datos del sistema de ayudas visuales AR debe ser capaz de soportar todos los contenidos factibles de aparecer en una ayuda visual, y además, todos los elementos utilizados para la descripción del mundo real. En la Figura 32 se muestra un diagrama de clases simplificado del modelo de datos propuesto. En este modelo se propone que la clase principal “Ayuda Visual AR” se compone de información virtual agrupada en “Pasos”, y de la descripción del mundo real por medio de “Escenarios”.

Los pasos están formados por un conjunto de elementos: “Evento”, “Objeto 2D” y “Objeto 3D”. La clase “Evento” almacena los eventos predefinidos que se hayan configurado en dicho paso, estos eventos compuestos por “Condiciones” y “Acciones” relacionan acciones del usuario con modificaciones en el contenido virtual. Los “Objeto 2D” representan toda la información general factible de asociarse a un paso. De este tipo de objetos heredan los contenidos previamente analizados: “Texto”, “Imagen”, “Video”, “Documento de detalle”, “Modelo 3D” y las cuestiones divididas en “Pregunta” y sus posibles “Respuesta”. Esta información no tiene una fuerte relación espacial con el entorno real. Los “Objeto 3D” representan toda la información puntual que si esta relacionada con lugares/objetos reales. Dicha relación viene definida por la clase “Relación espacial” y para el contenido se asocia un “Objeto 2D” que en este caso se representara en la vista aumentada alineado con la realidad.

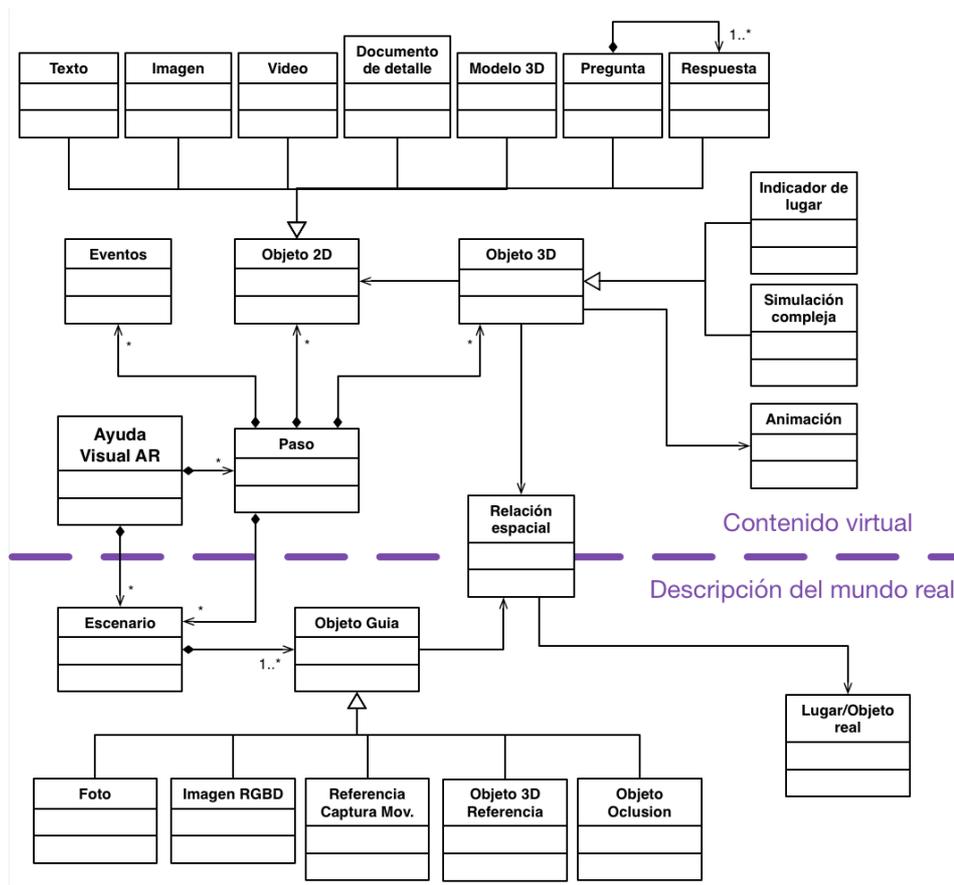


Figura 32. Modelo de datos del sistema de ayudas visuales AR

La descripción del mundo real se realiza por medio de “Escenario”. Cada “Escenario” representa una localización donde se realiza total o parcialmente el procedimiento y esta compuesto por una serie de “Objeto Guía”. Los “Objeto Guía” son objetos con los que crear una descripción del mundo real y se han definido 5 tipos: “Foto”, “Imagen RGBD”, “Referencia de captura”, “Objeto 3D Referencia” y “Objeto oclusión”. Es decir para describir el mundo real el autor de la ayuda utilizara fotos, fotos con información de profundidad (RGBD), modelos 3D y añadirá las referencias necesarias para que pueda funcionar el sistema de captura seleccionado.

A continuación se describen en detalle cada una de las partes del proceso de edición y se explican en detalle las clases involucradas en cada uno de ellos.

3.7 Descripción del mundo real

El proceso de descripción del mundo real es clave en cualquier aplicación de Realidad Aumentada, puesto en base a esta información es donde se añade la información virtual asociada. El objetivo de este sistema de generación de contenidos es abstraer al autor de la ayuda del funcionamiento a bajo nivel de las bibliotecas de Realidad Aumentada, y conseguir pueda crear ayudas visuales AR sin ser un experto en dicha tecnología. Observando las herramientas de edición actuales, el proceso de descripción del mundo real se limita a colocar las referencias del sistema de captura utilizado. Por ejemplo los editores de los sistemas Layar y Metaio, explicados en el apartado 2.4.4, permiten utilizar imágenes y fotografías como marcador sobre los que colocar el contenido virtual. En estos casos, al utilizar un único marcador, la descripción del mundo real se resume a dicho marcador. En el caso de Metaio, no solo se permiten marcadores basados en imágenes, sino también reconocimiento facial, nubes de puntos, etc. Pero de nuevo, la única referencia del mundo real es la representación del marcador escogido: una imagen, un modelo 3D de una cabeza para el reconocimiento o la propia nube de puntos. Estos métodos, al igual que el propuesto en este estudio, tienen una gran ventaja, y es que las referencias del mundo real sirven como base para colocar el contenido virtual sobre ellas, abstrayendo al usuario de conceptos como configurar el sistema de captura a bajo nivel, o cómo crear un sistema de referencia entre dicho marcador y la información virtual. Sin embargo estos mecanismos avanzados de edición, al ser sistemas propietarios, carecen de un modelo general de representación del mundo real y se reducen a asociar información virtual a un tipo de marcador concreto.

En este sistema de edición se propone crear una descripción visual del mundo real por medio de 5 tipos de objetos editables:

- Fotos
- Imágenes RGBD
- Objetos 3D de referencia
- Objetos de oclusión
- Referencias de captura de movimiento

Con estos 5 tipos de objetos se puede crear una representación virtual en tres dimensiones del entorno real, incluyendo en dicha representación donde se colocan los marcadores necesarios para realizar la captura de movimiento posteriormente. Esta descripción del mundo real dará como resultado un escenario 3D sobre el que el usuario

podrá colocar los contenidos virtuales. Este escenario no tendrá representación visual cuando el usuario final visualice la ayuda, puesto que dicho usuario visualizará la información virtual sobre los objetos reales. De esta forma se obtiene un proceso de edición de tipo WYSIWYG, *“what you see is what you get”*, donde el autor de la ayuda ve el aspecto final del contenido virtual sobre el mundo real (representado por el escenario 3D creado). Además con este sistema de edición se abstrae al autor de los siguientes aspectos clave:

- **Funcionamiento a bajo nivel de una aplicación de Realidad Aumentada.** Los procesos típicos de una aplicación AR como por ejemplo: captura de imagen, captura de movimiento, composición de la imagen con los elementos virtuales en función del punto de vista del usuario, etc. Quedan implementados en el propio sistema de edición y visualización de las ayudas, por lo que no es necesario que el autor de la ayuda conozca cómo se realizan internamente.
- **Funcionamiento a bajo nivel del sistema de captura empleado.** Cada uno de los sistemas de captura tendrá una representación visual asociada que es la que el autor utiliza para incorporar dicho sistema a su descripción del entorno real. De esta forma el autor no necesita conocer cómo funcionan internamente, sino simplemente cómo interpretar o configurar dicha representación.
- **Fusión de varios sistemas de captura.** El autor de la ayuda podrá incluir distintos tipos de marcadores en su descripción del entorno, la implementación de cómo se mezclan estará implementada en la propia herramienta. De esta forma el autor solo debe ser capaz de combinar correctamente las representaciones visuales de cada uno de los marcadores.
- **Definición de la relación espacial entre la información virtual y el entorno real.** El proceso de añadir información virtual se simplifica puesto que tanto dicha información, como el entorno real tendrán una representación visual. El autor de la ayuda podrá alinear la información virtual del modo deseado sin necesidad de conocimientos de programación o de conocimientos a bajo nivel de cual el sistema de referencia utilizado por cada sistema de captura.
- **Obtener una correcta ocultación entre los objetos reales y la información virtual.** Al incluir modelos de ocultación el autor puede crear una representación del entorno real que se utilizará posteriormente para generar una correcta mezcla entre la imagen real y virtual. Estos objetos abstraen al autor del funcionamiento de la librería gráfica a bajo nivel y cómo se implementa dicha ocultación.

3.7.1 Fotos: imágenes guía

El uso de fotos como imagen guía, se basa en que el usuario realice fotografías del entorno real y sobre estas fotos pueda añadir el contenido virtual. Las fotos son representaciones 2D del mundo real, por lo que para poder utilizarlas como guía, el autor deberá definir el tamaño de alguno de los elementos de dicha fotografía. En base a esta medida se calcula el tamaño de la imagen completa. Esta definición se realiza simplemente arrastrando con el ratón del punto inicial al punto final y escribiendo la longitud de dicho segmento medido previamente en el escenario real, Figura 33. Una vez definido el tamaño de la imagen, esta queda asociada al escenario aumentado de forma que el usuario puede utilizar varias fotos para componer un escenario complejo. Una vez colocadas las imágenes guía, el autor ya tiene una referencia visual para colocar sobre ella todos los elementos que desee. Al tener una imagen como referencia, el usuario ya no debe medir donde colocar cada elemento virtual, sino que simplemente los coloca sobre la imagen. Esta referencia abstrae al usuario de tener que definir un eje de referencia, o de cómo calcular las transformaciones entre objetos 3D simplificándolo a un proceso gráfico de diseño de elementos 3D.

El uso de la imagen guía es el método más sencillo de descripción del escenario, pero también el que tiene mayores limitaciones. Al utilizar fotos 2D se elimina la componente de profundidad, por lo que este tipo de guías serán aptas para definir escenarios planos, pero no son aptas en elementos irregulares donde sus elementos se encuentran a distintas profundidades. En este último caso el autor de la ayuda tendrá que colocar la profundidad de cada objeto sin referencia visual. Por ejemplo este tipo de referencia sería válida para crear una ayuda visual AR acerca de un cuadro eléctrico donde una foto frontal de dicho cuadro sirve de referencia para colocar los elementos virtuales. Esta limitación a menudo es compensada por la facilidad y rapidez de creación de escenarios utilizando fotos y se puede salvar realizando múltiples fotos de las distintas zonas de trabajo del escenario real, donde cada una de ellas representa una superficie de trabajo relativamente plana. En la Figura 33 se muestra un ejemplo de la descripción de un escenario real correspondiente a la parte delantera de un coche para crear una ayuda visual AR referente al mantenimiento del vehículo, en la imagen se observa cómo se combinan 6 imágenes guía, para crear las referencias necesarias sobre las que añadir posteriormente la información virtual.



Figura 33. Ejemplo de imágenes guía aplicadas en una ayuda visual AR sobre el mantenimiento de un coche vistas desde el lateral (izda.) y la parte superior (dcha.)

3.7.2 Imagen RGBD

Este tipo de referencia basado en imágenes RGBD (Red Green Blue Depth) funciona de forma similar al de las fotos pero sin el inconveniente de la falta de información de profundidad. Las imágenes RGBD son imágenes en las que se adjunta un canal adicional que indica la profundidad de cada pixel. Esta información de profundidad permite representar estas imágenes como modelos 3D. En la Figura 34, se muestra un ejemplo de este tipo de imágenes. A la izquierda se observa la imagen RGBD mostrando por un lado la información de color y a continuación el canal D (donde los tonos son más oscuros cuanto mayor es la distancia). En el centro se muestra la imagen en perspectiva de la imagen guía sin información de profundidad y a la derecha la misma imagen aplicando la información de profundidad.

Las imágenes RGBD no necesitan ninguna clase de definición de tamaño adicional por parte del usuario, puesto que a partir de la información de distancia es posible recomponer la imagen con el tamaño real que tiene el objeto capturado en la misma. Una vez añadida esta imagen, como elemento guía de definición del escenario real, el usuario puede colocar la información virtual en su posición correcta incluyendo la profundidad, puesto que ahora la imagen presenta el relieve correcto del elemento real.

En la actualidad las cámaras RGBD ya son un elemento común que se encuentra fácilmente en el mercado, tanto en formato similar a cámara compactas (con dos objetivos), como en dispositivos que se conectan al ordenador (por ejemplo Kinect). Esta

variedad de dispositivos y su inclusión en el mercado de tecnología hace que el uso de imágenes RGBD sea accesible a los posibles autores de ayudas visuales AR.

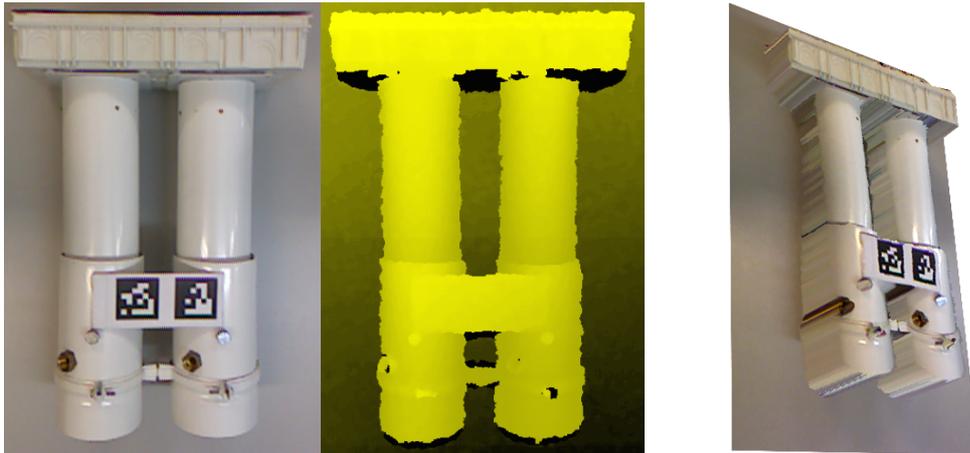


Figura 34. Imagen RGBD (izda.); representación de la imagen con información de profundidad (dcha.)

La limitación de las imágenes RGBD es que la imagen solo está capturada desde un punto, por lo que no se tiene información de las partes ocultas que no aparecen en la imagen. Este hecho conlleva que una única imagen RGBD puede no ser suficiente para describir el escenario. Esta limitación se puede subsanar combinando varios elementos guía RGBD, mostrando todas las partes relevantes del escenario.

3.7.3 Objetos 3D referencia

Los objetos 3D de referencia son modelos 3D creados previamente que pueden incorporarse a la descripción del mundo real para simbolizar objetos reales. Este tipo de objetos permiten añadir detalles a zonas concretas de la descripción del mundo real o completar lugares de los que no se dispone de fotos o imágenes RGBD. Los objetos 3D de referencia carecen de las limitaciones de los dos tipos anteriores, sin embargo su creación es más costosa y compleja. En los dos tipos anteriores el propio autor de la ayuda puede realizar fotografías e incorporarlas a la descripción del mundo real, en este caso los objetos 3D requieren de un paso previo de creación del modelo 3D, que puede ser realizado por un diseñador especializado o utilizando un mecanismo de escaneo de objetos 3D. Los métodos de escaneo 3D son cada vez más habituales y en la actualidad pueden realizarse sin necesidad de hardware especial. Existen aplicaciones, como por ejemplo 123D Catch [Autodesk. 2015c], capaces de reconstruir un objeto 3D a partir de varias fotos de dicho objeto desde distintos puntos de vista. También existen dispositivos

como por ejemplo HP Sprout [HP. 2015] en los que se incorpora un escáner 3D para que los diseñadores puedan añadir objetos reales a sus diseños. El auge de estos métodos de creación de objetos 3D orientados a usuarios sin conocimientos de programación, y disponibles en el mercado a cualquier comprador con precios asequibles, permitirá un uso más extendido de este tipo de objetos guía en un futuro cercano.

A menudo los autores de ayudas visuales AR pueden disponer de objetos 3D previamente diseñados que utilizarán durante la creación de la ayuda. Estos objetos 3D, aunque no se hayan creado para tal uso, pueden combinarse con fotos e imágenes RGBD para crear representaciones precisas del mundo real. De esta forma se agiliza el proceso de creación y no se requiere crear modelos 3D adicionales que encarezcan o ralenticen el proceso de edición. En la Figura 35 se puede observar un ejemplo de este último caso en el que se utiliza un modelo 3D del motor mezclado con imágenes de referencia para crear la descripción de un escenario real correspondiente a trabajos de mantenimiento en un coche.



Figura 35. Ejemplo de descripción del escenario aumentado mezclando fotos y modelos 3D.

3.7.4 Objetos de oclusión

Los objetos de oclusión son objetos que se añaden a la descripción del mundo real para indicar el volumen que representan los objetos opacos. La correcta ocultación entre la información real y virtual es un aspecto clave los sistemas de Realidad Aumentada o mixta. La información virtual no solo debe aparecer perfectamente alineada espacialmente con la realidad, sino que además debe fusionarse correctamente con ella,

de forma que los objetos virtuales queden ocultos por los objetos reales cuando sea necesario. En caso contrario se producen efectos visuales que confunden al usuario. Por ejemplo, en la Figura 36, se muestra cómo en la imagen de la izquierda, sin ningún mecanismo de ocultación, parece que la flecha apunte a un elemento que se encuentra delante del motor, mientras en la imagen de la derecha, aplicando una correcta ocultación entre objetos reales y virtuales, se observa que la flecha en realidad apunta a un objeto que se encuentra tras el motor.

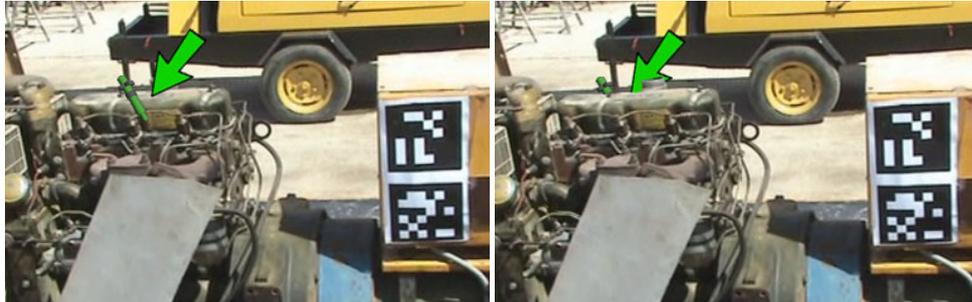


Figura 36. Ejemplo de error de visualización cuando no existe una correcta ocultación (izda.); visualización con ocultación real-virtual (dcha.)

Para crear una correcta ocultación entre el mundo real y la información virtual, es necesaria información geométrica de los objetos reales observados. Esta información puede añadirse durante la descripción del mundo real por medio de objetos de ocultación, o puede capturarse en tiempo real si el dispositivo de visualización incorpora el hardware adecuado para ello. Si se utiliza por ejemplo una cámara RGBD para la visualización del escenario aumentado, se puede capturar la profundidad de cada pixel de la imagen y mezclar correctamente la información real-virtual en tiempo real. Sin embargo, las cámaras RGBD todavía no están incorporados a la gran mayoría de dispositivos móviles. Los objetos de ocultación ofrecen un mecanismo de generar dicha ocultación sea cual sea el dispositivo de visualización empleado, pero requieren su creación durante la descripción del escenario real.

Los objetos de ocultación pueden crearse a partir de cualquier objeto 3D o imagen RGBD, pudiendo crearse a partir de los objetos descritos anteriormente para agilizar el proceso de edición. En caso de no disponer de modelos 3D o imágenes RGBD, los objetos de ocultación se crearán utilizando formas básicas (cubos, cilindros, esferas, conos, etc.) Estas formas básicas permiten crear volúmenes similares a los objetos reales, de forma que aunque el resultado no sea ideal, permite un mecanismo rápido de

descripción de los objetos opacos del escenario real para obtener una correcta visualización final.

3.7.5 Referencias de captura de movimiento

Las referencias de captura de movimiento son los objetos que describen las características por las que reconocerá el sistema de captura el escenario real. El sistema de captura es la parte de cualquier sistema AR encargada de calcular el punto de vista del usuario, y si es posible, la posición/orientación de otros elementos. La información aportada por el sistema de captura es la base para crear una visualización, de la información virtual, coherente con el punto de vista del usuario en cada momento.

Como se describe en el apartado 2.2.3, actualmente los sistemas de captura más utilizados son los que analizan la imagen de video de la cámara para reconocer objetos predefinidos: marcadores simples, imágenes, estructuras 3D, etc. aunque no son los únicos. Puesto que existen distintos tipos de sistemas de captura, será necesario crear una representación visual para cada uno de ellos. Esta representación visual permitirá a un usuario, sin conocimientos de programación, incluir la tecnología de captura de movimiento que desee sin necesidad de conocer cómo funcionan a bajo nivel. Cada referencia de captura podrá ser de tipo estática o móvil. Las referencias estáticas serán aquellas que no se vayan a mover, por ejemplo marcadores planos pegados en una pared. Las referencias móviles serán aquellas que puedan moverse de forma independiente, por ejemplo un marcador plano pegado a la tapa de un motor que puede quitarse. Las referencias móviles podrán tener información virtual asociada que se transformara con dichas referencias.

Para crear la representación visual de los distintos tipos de sistemas de captura de movimiento, se han creado 4 tipos de representaciones de objetos referencia: marcador plano, modelo 3D, nube de punto y eje de coordenadas. En la Figura 37 se puede observar un esquema de representación de cada uno de estos 4 tipos. En dicha figura los objetos de referencia se resaltan en color morado, sobre la imagen negro que simboliza el resto de objetos referencia utilizados para la descripción del escenario real. La representación de los 4 tipos de objetos de referencia de captura de movimiento, sobre el mismo escenario, ya ofrece una primera idea de la diversidad de métodos de captura y posibilidades a la hora de configurar la captura de movimiento en un sistema AR.

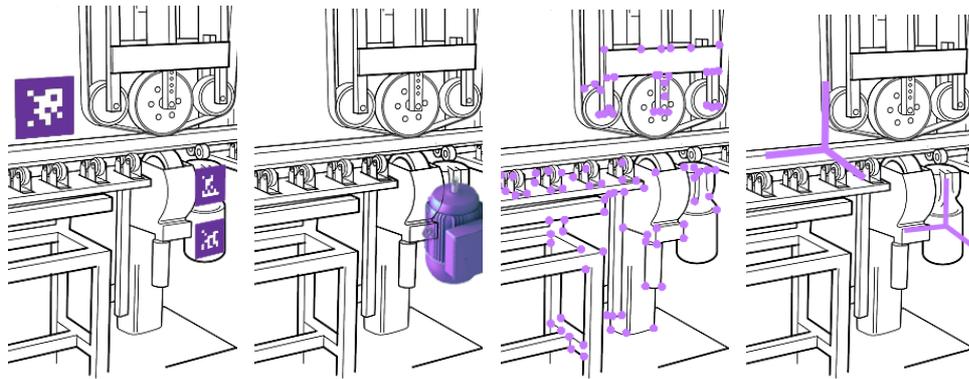


Figura 37. Esquema de los 4 tipos de referencias de captura de movimiento

Marcador plano

Las referencias de captura de movimiento de tipo marcador plano son aquellas que utilizan un plano texturizado para describir cada uno de los marcadores planos reconocidos por el sistema de captura. Los sistemas de captura más extendidos actualmente son los sistemas basados en el reconocimiento de marcadores planos, bien utilizando marcadores sencillos en blanco y negro o reconociendo características de cualquier imagen suficientemente texturizada. En ambos casos la representación visual de dicho marcador es un plano con un tamaño determinado, una posición y orientación determinada y su imagen correspondiente. Hasta ahora si un usuario desea utilizar una biblioteca software de captura basada en marcadores, debe conocer cómo se definen, cómo se define su posición, orientación, tamaño, imagen, etc. A menudo estas tareas implican conocer en detalle el funcionamiento del sistema de captura y pueden requerir conocimientos de programación. Utilizando los objetos de referencia de captura de movimiento tipo marcador plano, estos parámetros pueden ser definidos por el usuario de forma sencilla, simplificando el proceso a la simple edición de planos 3D sobre la descripción del escenario real. En este proceso de edición el autor elige la imagen/es que desea utilizar como marcador, le asigna un tamaño y la coloca sobre la representación del entorno real. De esta forma se abstrae al autor del funcionamiento interno de la librería, el proceso de creación de los marcadores, la definición de su tamaño y de calcular las transformaciones geométricas necesarias para definir la posición/orientación de dicho marcador. Otra ventaja de este método de edición es que la combinación de múltiples marcadores planos, o bibliotecas de captura es totalmente transparente al usuario puesto que simplemente se dedica a añadir referencias planas a su descripción del mundo real, sin preocuparle cómo se implementan a bajo nivel.

Modelo 3D

Las referencias de captura de movimiento tipo modelo 3D, son aquellas que utilizan un modelo 3D para describir cada uno de los objetos 3D reconocidos por el sistema de captura. Este tipo de referencias se asocian a los sistemas de captura de movimiento que se basan en reconocer características de un modelo 3D, y no solo planos como el tipo anterior. En este tipo de sistemas de captura cabe destacar los sistemas basados en características visuales y los basados en información de profundidad. Los sistemas basados en características visuales analizan la imagen de la cámara para reconocer objetos reales a través de características tales como: vértices, aristas, texturas, etc. Los basados en profundidad, requieren de un sistema de cálculo de profundidad en tiempo real, para reconocer los objetos reales por medio de su volumen durante la visualización. Aunque ambos tipos de sistemas emplean métodos de reconocimiento completamente diferentes, en ambos se pueden representar los objetos reconocibles con modelos 3D. En el primer caso un modelo 3D texturizado indicara las características visuales reconocibles, en el segundo caso el volumen de un modelo 3D representa la forma de los objetos reales reconocibles. En la implementación, para cada tipo de sistema de captura basada en modelos 3D, será necesario definir cómo deben crearse los modelos 3D para cada uno de ellos. Una vez definido e incorporado al sistema de edición, el uso de un sistema de captura de este tipo es completamente transparente al autor de la ayuda, que simplemente añade objetos 3D a su descripción del entorno real para representar los objetos reconocibles. De esta forma complejos procesos de configuración del sistema de captura, de definición de la posición/orientación de cada marcador, etc. quedan ocultos tras un simple proceso de edición de un objeto 3D dentro del escenario que representa el mundo real.

Nube de puntos

Las referencias de tipo nube de puntos, son aquellas que utilizan una nube de puntos para describir las características del escenario real reconocibles por el sistema de captura. Este tipo de referencias se asocian a los sistemas de captura que se basan en el reconocimiento de características puntuales y su distribución en el espacio real. En este tipo de sistemas, la imagen capturada por la cámara se analiza en búsqueda de puntos reconocibles, los puntos reconocidos en cada imagen se combinan para crear una distribución de puntos 3D en el espacio y calcular la posición de la cámara real que los observa. Este tipo de sistemas en la actualidad están más extendidos que los de reconocimiento de objetos 3D, porque el análisis de la imagen se basa en el

reconocimiento de características puntuales, más sencillas de reconocer que por ejemplo las aristas de un objeto. A diferencia de los modelos 3D o los marcadores planos, las nubes de puntos no son fácilmente interpretables desde ciertos puntos de vista. Sin embargo una vez alineadas con la descripción del mundo real, estas se visualizan dentro de un contexto, por lo que su comprensión es mucho mejor durante el proceso de edición del contenido virtual. Con este tipo de referencias las nubes de puntos se añaden a la descripción del entorno real, de forma que el usuario no debe tener en cuenta cómo se configuran, donde está el eje de coordenadas o cuál es la orientación. El autor de la ayuda simplemente maneja la nube de puntos (como si fuese un modelo 3D) para alinearla con la representación creada del mundo real.

Eje de coordenadas

Las referencias de tipo eje de coordenadas, son meras referencias al sistema de referencia utilizado por los sistemas de captura que no poseen representación visual. A diferencia de los casos anteriores, existen sistemas de captura cuyas referencias no tienen representación visual, por ejemplo un sistema magnético, un sistema acústico o un sistema óptico infrarrojo. Este tipo de sistemas requieren de un paso previo de instalación y calibración en el que se define el eje de coordenadas de dicho sistema, es decir, donde se encuentra el punto (0,0,0) y la orientación de los ejes XYZ. Para incluir este tipo de sistemas en la definición del entorno real, se utilizarán modelos virtuales de un eje de coordenadas que indiquen donde se ha definido dicho centro y orientación. En el caso de que el sistema acepte varios marcadores, se deberán crear tantos ejes, como marcadores existen, indicando para cada uno cuál es su centro y su orientación. Adicionalmente, para mejorar la comprensión de cada sistema, este tipo de sistemas incorpora un modelo 3D auxiliar que representa el marcador asociado a dicho eje de coordenadas. Este modelo auxiliar mejora la comprensión y configuración del sistema de captura por parte del autor.

Aunque se han definido 4 tipos de representación visual para los objetos de referencia de captura de movimiento, independientemente de su representación, algunos objetos podrán crearse de forma automática y otros necesitarán ser creados previamente e importados al sistema de edición. Cada sistema de captura incorporado al sistema de edición deberá implementar el mecanismo de creación/importación que lo relacione con una de las 4 representaciones visuales definidas. Una vez definida dicha relación, el uso de estos sistemas es completamente transparente al autor de la ayuda, que simplemente los añade a su modelo 3D de representación del escenario real. El autor podrá combinarlos

de forma completamente transparente sin conocer cómo están implementados o las transformaciones geométricas necesarias para ponerlos en común.

3.8 Creación de la información virtual

Una vez definido cómo se crea la descripción de los escenarios reales, la segunda parte del proceso de edición consisten en la creación de la información virtual. Como ya se ha definido previamente, la información virtual se clasifica en información general o información puntual. La información general se refiere a contenidos generales de un paso concreto de una tarea y puede visualizarse sin relación espacial con la realidad. Sin embargo la información puntual es la que no tiene sentido si no se representa alineada correctamente con la realidad. Para crear estos dos tipos de información se ha dividido el proceso de creación de información virtual en dos grupos: edición de los pasos e información general asociada y edición de la información puntual. Estos dos procesos de edición se corresponden con un proceso de edición 2D para la creación de las diapositivas que contienen la información general de cada paso y un proceso de edición 3D para añadir la información virtual a las descripciones del entorno real creadas previamente. A continuación se describe en detalle cada uno de los dos procesos de edición.

3.8.1 Edición 2D, pasos e información general asociada

La edición 2D de las ayudas visuales AR, engloba la creación y configuración de toda aquella información virtual que no tiene una fuerte relación espacial con la realidad. Es decir, engloba la creación de aquellos elementos virtuales que no necesitan representarse alineados espacialmente con la imagen del mundo real. Estos contenidos virtuales, ya definidos previamente, podrán crearse de forma similar a cómo se crean las presentaciones basadas en diapositivas actualmente. El autor debe dividir la tarea en pasos, donde cada paso se presentara como una diapositiva, la cual contiene información virtual. Todo el contenido incluido en la diapositiva tendrá una representación 2D siguiendo los requisitos de edición y representación marcados en el apartado 3.4. A diferencia de la presentación basada en diapositivas, donde existe una única lista de pasos, en este caso los pasos/diapositivas tendrán una estructura jerárquica representada por un árbol, donde cada nodo hoja se corresponderá con un paso de la tarea.

Todo el contenido incluido en la diapositiva tendrá una representación visual, excepto los documentos de detalle. Este tipo de información al ser documentos propietarios, se mostraran como iconos indicando el formato del documento. Los iconos

servirán como acceso directo a dichos documentos para su visualización en la aplicación correspondiente. En la Figura 38 se muestra un esquema del interfaz para realizar la edición del contenido 2D.

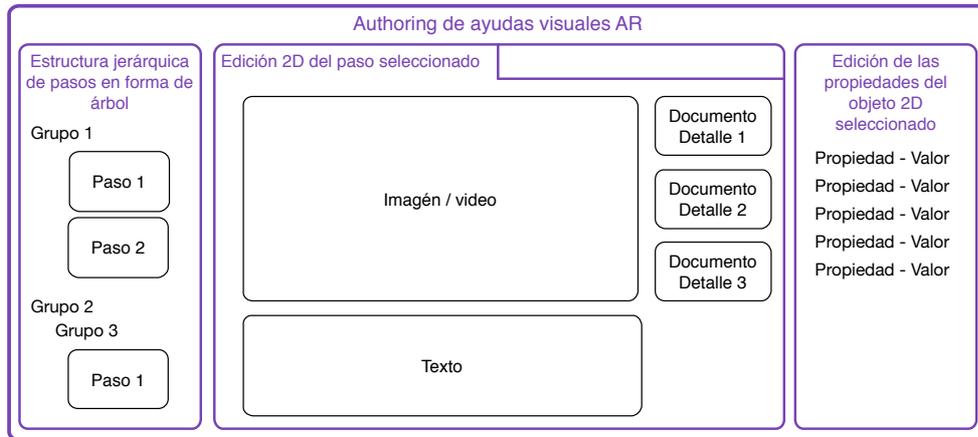


Figura 38. Esquema de interfaz de edición del contenido 2D

Las 2 principales ventajas de incorporar un mecanismo de edición 2D dentro del proceso de edición de ayudas visuales AR son que el autor ya está familiarizado con este tipo de edición y que permite reutilizar gran parte del contenido existente. Estas dos ventajas ofrecen un importante punto de partida a la hora de crear una ayuda visual a partir de contenido existente previamente. En el caso de que el contenido ya se encuentre en formato de presentación basada en diapositivas, todo el contenido se podría importar fácilmente, quedando pendiente únicamente el proceso de añadir el contenido 3D. La adaptación fácil de contenidos previos es un factor determinante a la hora de diseñar un nuevo sistema de ayudas visuales, puesto que en la gran mayoría de casos existen manuales, videos, presentaciones, etc. que se han desarrollado previamente. La reutilización de estos recursos por un lado ofrece la certeza de que el resultado final de la ayuda visual AR contendrá al menos la misma información que la antigua ayuda visual, además del contenido 3D. Por otro lado reduce la necesidad de editar nuevos recursos con lo que el proceso de edición es más rápido y tiene un coste menor.

3.8.2 Edición 3D, información puntual asociada a objetos reales

La edición 3D de las ayudas visuales AR engloba la creación y configuración de todos los contenidos puntuales que poseen fuerte relación espacial con el mundo real y por tanto deben representarse siempre combinado con el espacio real por medio de Realidad Aumentada. El proceso de edición 3D consiste en colocar la información virtual

sobre la descripción del mundo real previamente creada. Por medio de esta forma de añadir el contenido 3D se abstrae al usuario de cualquier proceso de calculo geométrico de la relación espacial entre el contenido virtual y el mundo real. El autor de la ayuda se limita a colocar objetos 3D sobre la representación 3D del mundo real, como si colocara nuevos elementos sobre una maqueta. Este proceso requiere que el autor de la ayuda aprenda a manejar un entorno de edición 3D, en el que los objetos, además de cambiar sus propiedades visuales propias, se pueden: trasladar, escalar y rotar para colocarlos en la posición deseada, con la orientación adecuada y el tamaño preciso.

En este proceso de edición 3D el autor primero selecciona el paso al que añadir el contenido 3D, una vez seleccionado el paso se muestra una lista con todas las descripciones de escenarios previamente creadas. Al seleccionar cada uno de los escenarios aparece la representación visual de dicho escenario, sobre la que el usuario puede añadir cualquiera de los contenidos 3D descritos en el apartado 3.4. De esta forma el autor puede añadir información asociada a cada escenario real, para cada uno de los pasos de la tarea. En la Figura 39 se observa un esquema del interfaz de usuario para llevar a cabo el proceso de edición 3D descrito.

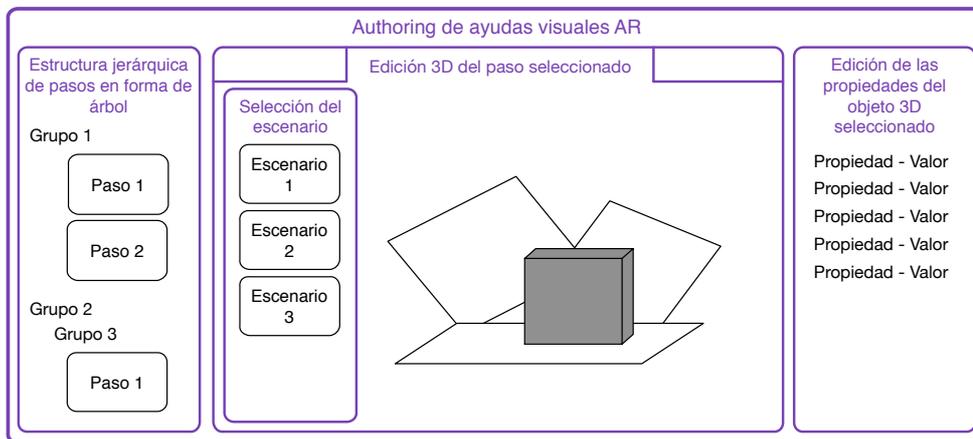


Figura 39. Esquema de interfaz de edición de contenido 3D

3.8.3 Edición de cuestionarios utilizando AR

La edición de cuestionarios engloba la creación y configuración de los contenidos orientados a evaluar el conocimiento del usuario sobre una tarea. En la actualidad los cuestionarios presentes en las plataformas digitales de formación, no hacen uso de la Realidad Aumentada, sino que presentan preguntas de diversos tipos sin relación espacial con el mundo real, apartado 3.4.10. La inclusión de cuestionarios en ayudas visuales AR

permite aprovechar el modo en que la Realidad Aumentada muestra la información virtual complementando la percepción del mundo real. Con este mecanismo las cuestiones adquieren una relación espacial con el entorno real, de forma que los contenidos de dichas cuestiones se relacionan directamente con los objetos reales a los que hacen referencia. Los cuestionarios AR ofrecen las siguientes ventajas:

- **Permite al alumno inspeccionar el elemento real sobre el que se le pregunta.** Al dotar de una relación espacial a los cuestionarios con el mundo real, el usuario que realiza el cuestionario observa en todo momento el entorno real objeto de la pregunta. Esta relación espacial no se reserva solo a la pregunta, sino que los propios objetos reales pueden ser las respuestas a una cuestión de identificar un objeto concreto.
- **En caso de no tener accesible el objeto real, su puede simular con contenidos virtuales.** Los objetos reales no siempre pueden estar accesibles, pero al utilizar Realidad Aumentada un usuario puede inspeccionar elementos virtuales como si en realidad estuviesen ahí. Este mecanismo de completar la realidad con elementos virtuales permite crear escenarios sobre los que cuestionar al alumno, que podrá inspeccionarlos de forma natural antes de dar una respuesta.
- **Permite evaluar dos aspectos fundamentales: conocimiento y habilidad.** Por medio de cuestionarios AR no solo es posible evaluar el conocimiento de un usuario sobre los objetos reales o virtuales, sino que además se puede evaluar la habilidad del usuario para realizar correctamente una tarea. La Realidad Aumentada ofrece los mecanismos para capturar la posición de los elementos reales y por medio de contenidos virtuales se pueden ofrecer metas que deben alcanzarse con dichos objetos.
- **Permite mostrar las respuestas correctas sobre el propio objeto real.** Los cuestionarios no son solo herramientas de evaluación, sino que son una parte muy importante del proceso de formación. Al realizar un cuestionario, la Realidad Aumentada permite mostrar al usuario las respuestas correctas (información virtual) sobre los propios objetos reales.
- **Permite evaluar la inspección que ha realizado el alumno antes de contestar.** Al utilizar un sistema de Realidad Aumentada, como base del cuestionario, es posible analizar ciertos aspectos del comportamiento del usuario durante la resolución del cuestionario. Por ejemplo es posible evaluar si para identificar un objeto el punto de vista del usuario se ha movido a lo largo de una zona muy

amplia o se ha dirigido directamente al objeto valido (denotando un mejor conocimiento del entorno).

Con el objetivo de crear cuestionarios que permitan aprovechar estas ventajas se han diseñado 3 tipos de preguntas que aprovechan las características de un interfaz AR: preguntas de respuesta múltiple, preguntas de señalar y preguntas de colocación de objetos. Estos tres tipos de preguntas se diferencian principalmente por el mecanismo de respuesta, y si este tiene relación espacial con el entorno real. Los 3 tipos de cuestiones definidos describen a continuación.

Preguntas de respuesta múltiple

Las preguntas de respuesta múltiple son aquellas en las que se cuestiona el conocimiento del usuario sobre un objeto (real ó virtual). En este caso la pregunta se compone de un enunciado, un elemento real ó virtual al que se refiere el enunciado y una lista de respuestas. En este tipo de preguntas la relación espacial es entre el enunciado de la pregunta y el objeto al que hace referencia. Las respuestas no tienen ningún tipo de relación espacial, puesto que son afirmaciones acerca del contenido de la pregunta. Con este tipo de preguntas el alumno puede explorar el objeto e interactuar con el gracias al interfaz AR.

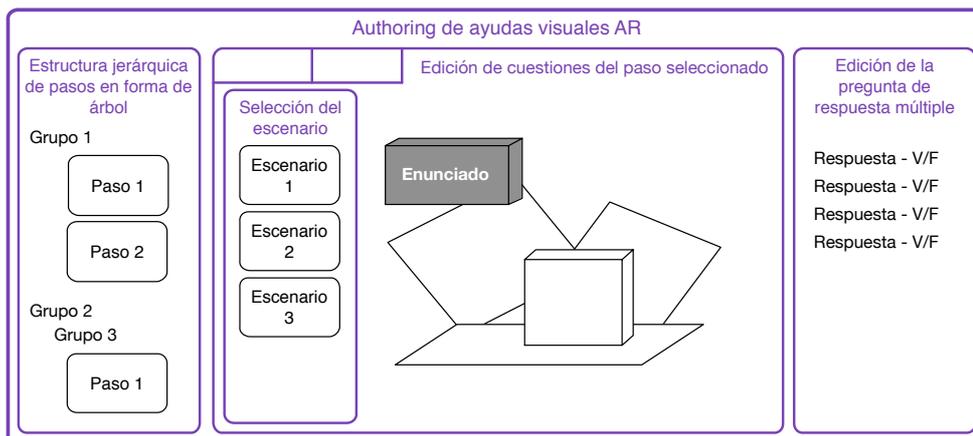


Figura 40. Esquema del interfaz de edición de cuestiones AR de respuesta múltiple

La edición de este tipo de preguntas combina la edición de elementos 2D y 3D. Por un lado el enunciado de la pregunta (o un indicador de lugar asociado) será un elemento 3D con relación espacial. Por otro las respuestas serán elementos 2D sin representación tridimensional. En la Figura 40 se muestra un esquema del interfaz de

edición de cuestiones de tipo respuesta múltiple. En este esquema se muestra, como el enunciado se define en la vista 3D sobre la descripción del escenario real, mientras las posibles respuestas se editan en un dialogo 2D.

Preguntas de señalar

Las preguntas de señalar son aquellas en las que se cuestiona la capacidad del usuario de reconocer e identificar objetos reales o virtuales (que complementen el entorno real). En este caso la pregunta se compone de un enunciado con o sin relación espacial con el entorno real y una lista de respuestas asociadas a objetos concretos. En este caso, la relación espacial se establece, como mínimo, entre cada una de las posibles respuestas y el objeto al que hacen referencia. Con este tipo de preguntas el usuario es cuestionado sobre un objeto/os del mundo real que debe señalar, acorde a un enunciado, y explora el mundo real para señalar la respuesta/as correctas.

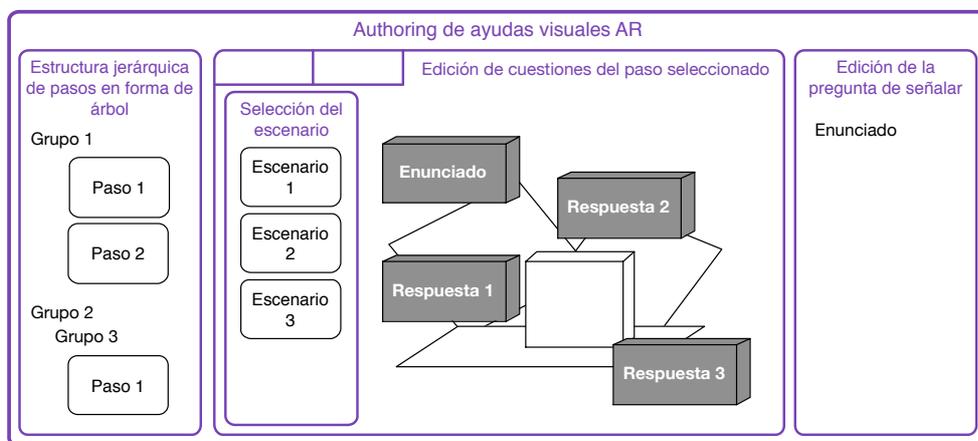


Figura 41. Esquema del interfaz de edición de cuestiones AR de señalar

La edición de este tipo de preguntas combina la edición de elementos 2D y 3D. Por un lado el enunciado es un elemento que puede tener representación 2D o 3D. Las posibles respuestas son elementos 3D asociados a los objetos reales que dan respuesta al enunciado presentado. En la Figura 41, se muestra un esquema del interfaz de edición de este tipo de preguntas. En dicho esquema, se puede observar cómo el enunciado se edita en una ventana 2D (parte derecha) o en la ventana 3D. Las posibles respuestas se colocan sobre la descripción del mundo real creada previamente, junto con el resto de contenidos virtuales. Cada una de las respuestas llevará asociado un valor para indicar si es verdadera o falsa y una representación visual. Al editar las respuestas el autor podrá elegir si estas se resaltan o no en el entorno real. Si se resaltan, el usuario final podrá observar entre que

objetos debe elegir la respuesta correcta. En caso contrario el usuario deberá marcar los objetos reales que cree dan respuesta al enunciado planteado.

Preguntas de colocación de objetos

Las preguntas de colocación de objetos son aquellas en las que se cuestiona al usuario acerca de su capacidad de colocar correctamente ciertos objetos. En este caso la pregunta se compone de un enunciado y una lista de objetos que deben colocarse en su posición y orientación correcta. Con este tipo de preguntas, a diferencia de los dos tipos anteriores, no solo se evalúa el conocimiento del usuario, sino también su habilidad para llevarlo a cabo. De nuevo el enunciado puede o no tener una relación espacial con el entorno real, sin embargo cada uno de las respuestas tiene dos relaciones espaciales: una con el objeto al que se asocia y otra con la posición donde debe colocarse el objeto.

La edición de este tipo de preguntas combina la edición de elementos 2D y 3D. Por un lado el enunciado es un elemento que puede editarse en 2D o 3D. Por otro cada una de las respuestas se asocia a un elemento real y también a la posición 3D en la que debe ir colocado finalmente. En la Figura 42 se muestra un esquema del interfaz necesario para la edición de este tipo de preguntas. En la imagen, se puede observar cómo en la parte 3D se debe señalar por un lado el objeto, y por otro la posición correcta donde debe colocarse. La parte 3D, al igual que en los casos anteriores, se editara sobre las descripciones del entorno real creadas previamente. Cada una de las respuestas tendrá asociada un umbral de validez para evaluar la posición correcta. En este umbral el autor configurará si debe comprobarse la posición, si debe comprobarse la orientación y el rango para cada una de ellas.

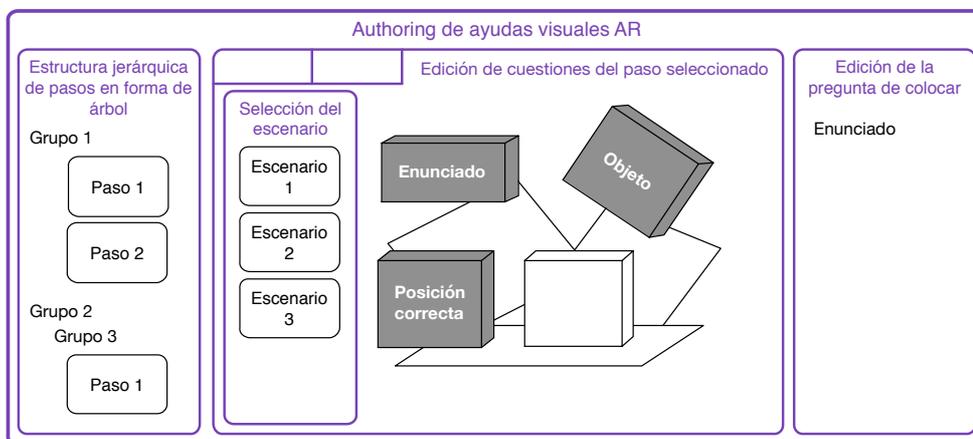


Figura 42. Esquema del interfaz de edición de cuestiones de colocar

3.9 Resultados Experimentales

En este apartado se describen los resultados experimentales obtenidos durante la evaluación del sistema de edición propuesto. En primer lugar se muestran dos casos de evaluación con usuarios reales, para validar el correcto funcionamiento del sistema. En segundo lugar se describen los resultados obtenidos de la aplicación de este estudio en diversos proyectos de investigación, para la creación de ayudas visuales de distintas temáticas.

3.9.1 Evaluación del mecanismo de creación de escenarios aumentados

En este capítulo se ha descrito el sistema de creación de ayudas visuales AR orientado a usuarios no programadores, siendo la edición de objetos 3D una de las partes fundamentales de dicho proceso. La edición de objetos 3D se realiza añadiendo objetos virtuales a una descripción del mundo real creada previamente. Dicha descripción, tiene como resultado, un escenario 3D sobre el que el autor de la ayuda visual AR puede colocar fácilmente la información, abstrayendo al usuario de cualquier cálculo geométrico.

Objetivos

El objetivo principal de este experimento es evaluar la influencia de la descripción del mundo real como referencia durante el proceso de edición de elementos 3D. Para cumplir con este objetivo se persiguen las siguientes metas concretas:

- Evaluar la influencia de fotos 2D como elementos de referencia
- Evaluar la influencia de elementos 3D como referencia
- Evaluar la usabilidad del proceso de edición de contenido 3D propuesto
- Evaluar la precisión del proceso de edición de contenido 3D propuesto

Metodología

Para realizar la prueba se ha utilizado un caso real de montaje de un ordenador, donde la ayuda visual AR indica, además del procedimiento, el lugar donde deben colocarse cada uno de los elementos. En la prueba se propone a los usuarios que coloquen correctamente 4 elementos virtuales pertenecientes a 3 pasos de la ayuda: el indicador de lugar de 2 tornillos que sujetan la fuente de alimentación, el modelo 3D del ventilador de la CPU y el modelo 3D de la tarjeta de video. Se ha elegido estos 4 elementos porque tienen posiciones dispersas por toda la caja del ordenador, no se

encuentran alineados y si se observan frontalmente con la caja abierta se encuentran a distintas profundidades.

El experimento se ha realizado con 30 usuarios de ambos sexos y un rango de edad de entre 20 y 50 años. Los usuarios tenían distintos grados de conocimiento en cuanto al diseño 3D y los sistemas de Realidad Aumentada. En las pruebas se ha utilizado un ordenador portátil con un ratón inalámbrico, un procesador i5, 8Gb de memoria RAM y una tarjeta gráfica NVidia GT 650M con 1024 MB de memoria dedicada. Antes de realizar el experimento se ha dado una clase de formación de 10 minutos, acerca del mecanismo de edición de contenido virtual a cada uno de los usuarios. Después de la formación cada usuario ha entrenado con el sistema de edición hasta completar una tarea de control sencilla consistente en apilar 3 cubos de colores en un orden determinado. Por medio de estos dos pasos previo al experimento, la formación y la realización de la tarea de control, se considera que el usuario comprende el funcionamiento de las herramientas de edición y es capaz de utilizarlas. Además, el tiempo empleado para realizar la tarea de control será tenido en cuenta durante el análisis de los resultados como base de la habilidad del usuario.

Las pruebas se han dividido en tres experimentos: colocar los elementos virtuales sin utilizar referencias, utilizando únicamente fotos como elementos de referencia y utilizando una imagen RGBD como elemento de referencia. Para evitar que el orden de las pruebas influya en el resultado, se ha dividido a los 30 usuarios en 6 grupos que realizan los 3 experimentos en ordenes diferentes.

En la primera prueba donde los usuarios deben colocar los elementos virtuales sin ninguna referencia se les ha entregado un esquema de montaje de los elementos. Donde se explica la colocación de cada uno de los elementos y se incluyen imágenes con las cotas necesarias para su montaje, Figura 43. En este caso el único elemento que describe el escenario real es un marcador 2D y un eje de coordenadas que indica la posición y orientación del eje de referencia.

En la segunda prueba los usuarios deben colocar los mismos elementos virtuales, en este caso utilizando una foto de la caja del PC y una imagen del marcador como referencia. Mientras que en la tercera deben completar el mismo objetivo utilizando una imagen RGBD y la misma imagen del marcador como referencia. En la Figura 44 se muestran las imágenes utilizadas para crear la descripción del escenario real.

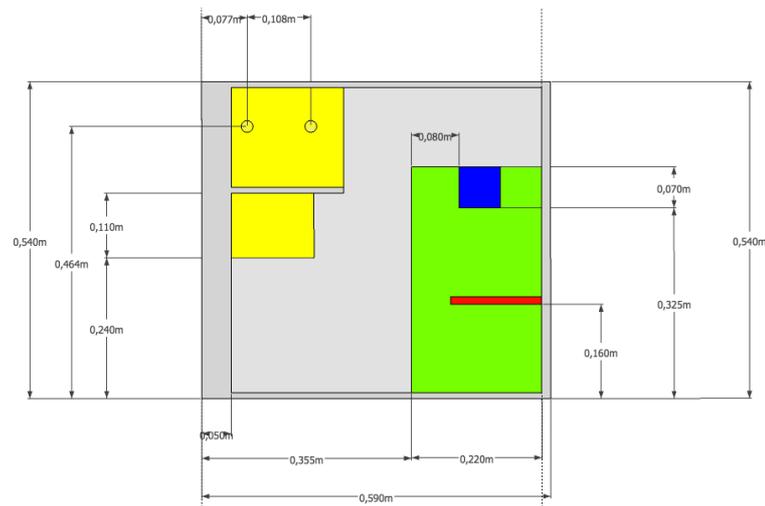


Figura 43. Diagrama de montaje con las posiciones de los elementos del experimento incluidos en las instrucciones entregadas a los usuarios

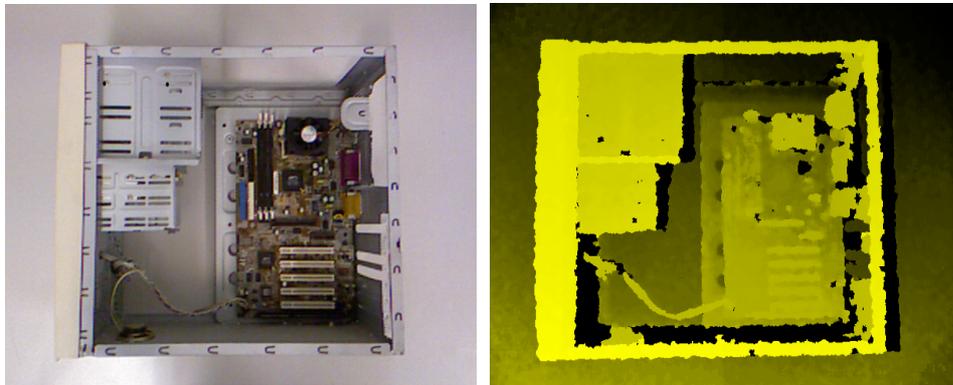


Figura 44. Imagen de la caja de ordenador utilizada como referencia (izda.); canal de profundidad de dicha imagen (dcha.)

En los tres casos los usuarios disponen de herramientas para traslada, rotar y escalar los elementos 3D en el interfaz gráfico utilizando el ratón. Además el interfaz de edición contiene un panel lateral donde el usuario puede ver y modificar los valores de posición, rotación y escalado del elemento seleccionado en cada momento.

Durante la realización de las pruebas el sistema captura de forma automática el tiempo empleado en la colocación de cada elemento y el error tras su colocación (tanto posición como orientación), incluida la tarea de control inicial. Al finalizar las pruebas se pide a cada usuario que rellene un cuestionario acerca de su opinión sobre el uso del sistema. En el cuestionario se incluyen preguntas acerca de 5 parámetros de usabilidad:

precisión, eficiencia, facilidad de aprendizaje, facilidad para recordar y satisfacción general, que el usuario debía valorar por medio de una escala Likert con valores de 1 a 7. Además, al final del cuestionario se pide a los usuarios que elijan uno de los 3 mecanismos de edición frente a 7 afirmaciones: Lo usaría en el futuro, necesita menos conocimientos previos, es más intuitivo, es más preciso, es más rápido, me he sentido más cómodo y lo prefiero en general.

Resultados

Durante la realización de las pruebas los 30 usuarios fueron capaces de completar todas las tareas propuestas. En la Figura 45 se muestra una captura del resultado tras colocar los dos indicadores de lugar de los tornillos en cada uno de los 3 escenarios propuestos: sin referencias (arriba-izquierda), utilizando una foto como referencia (arriba-derecha) y con una imagen RGBD como referencia (abajo). En adelante estos 3 escenarios se denominaran: No Ref., 2D y 3D en cada una de las gráficas.

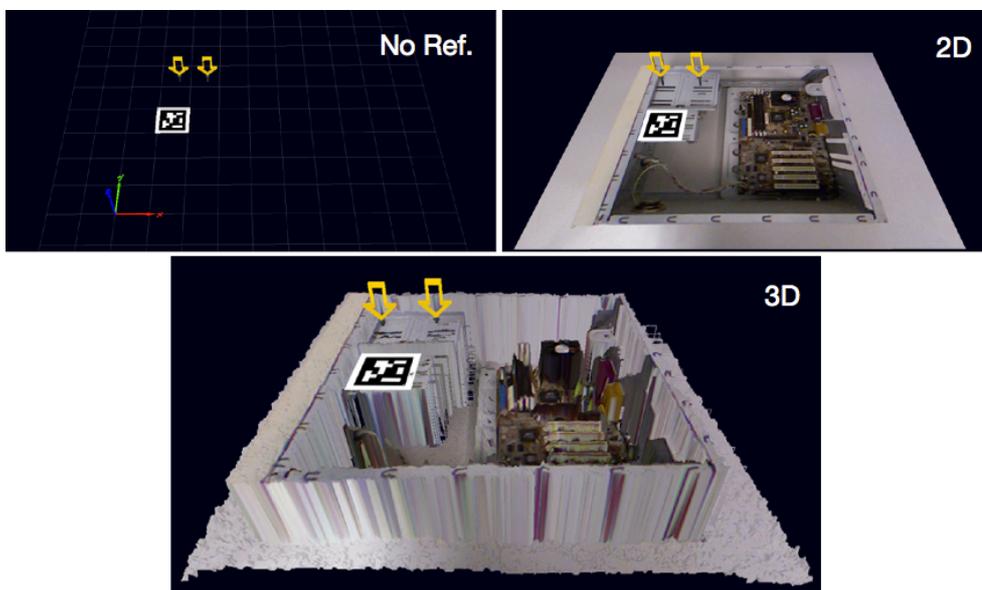


Figura 45. Colocación de los indicadores de lugar de dos tornillos en cada uno de los tres casos propuestos

El primer resultado que podemos destacar tras las pruebas es el tiempo y el error medio de posición, tras colocar los elementos. En la Figura 46 se puede observar el diagrama de cajas del tiempo empleado por los 30 usuarios en completar la edición de los 4 elementos en cada uno de los escenarios propuestos. En la gráfica se muestra también el tiempo empleado en la tarea de control como referencia. La media de tiempos

obtenidos en cada uno de los escenarios es de: 318 segundos para el escenario sin referencias, 189 s. para el escenario con referencias 2D, 111 s. en el escenario con referencias 3D y 82 s. en el proceso de control. El análisis de ANOVA aplicado a los tiempos representados ha dado un resultado $p = 0.0031$ confirmando que son estadísticamente diferentes. En la misma figura se puede observar el error medio en la posición de los 4 elementos para cada uno de los escenarios, donde la media ha arrojado unos valores de: 75 mm. para el escenario sin referencias, 26 mm. en el escenario 2D, 6 mm. en el escenario con referencias 3D y 2 mm. en la tarea de control. El análisis de ANOVA aplicado al error medio de los 4 elementos para cada usuario ha dado un resultado $p = 0.0039$ confirmando que son estadísticamente diferentes.

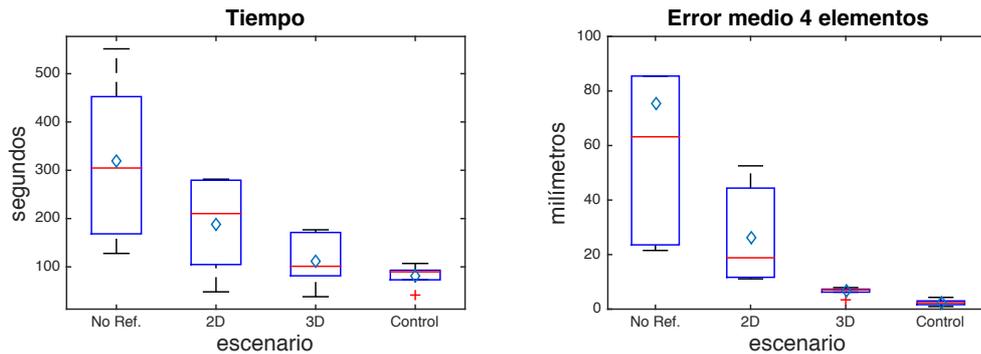


Figura 46. Tiempo medio empleado (izda.) y error medio (dcha.) empleado por los usuarios para completar las tareas propuestas en cada uno de los escenarios

Con estos tiempos y errores medios se puede determinar que el escenario 3D es donde los usuarios han realizado las tareas más rápidamente y de forma más precisa, seguido por el escenario con referencias 2D. El escenario sin referencias ha sido el que ha llevado más tiempo de edición a los usuarios y donde se ha cometido mayor error en la edición de los elementos. Además se puede observar que el tiempo y error en el escenario 3D es muy similar al de la tarea de control, esto significa que la edición de elementos virtuales utilizando referencias 3D es equiparable al de realizar una tarea sencilla de elementos 3D. Con esto se demuestra que el mecanismo propuesto de edición abstrae al usuario de las dificultades de un sistema AR, simplificando la edición de contenidos AR a un proceso de edición de objetos 3D.

Observando en detalle el error producido al colocar cada uno de los elementos se obtienen los resultados de la Figura 47. En los 4 casos el análisis de ANOVA ha dado un resultado $p < 0.015$ confirmando que son estadísticamente diferentes. De estos resultados se obtienen que los elementos con mayor error ha sido el ventilador y la tarjeta gráfica en

los 3 escenarios propuestos. En el caso de los tornillos el error en el escenario sin referencias es significativamente mayor que en los escenarios 2D y 3D, los cuales tienen valores muy similares. Sin embargo en el caso del ventilador y la tarjeta el error en el escenario sin referencias es similar al del escenario 2D, ambos significativamente mayores que el error en el escenario 3D. Esto significa que las referencias 2D son útiles para colocar elementos coplanarios con el marcador de referencia, como es el caso de los tornillos, pero son menos útiles a la hora de colocar elementos que se encuentra a distinta profundidad (ventilador y tarjeta). En todos los casos el error en el escenario 3D es muy similar al de la tarea de control, reforzando la afirmación que el sistema de edición propuesto simplifica la edición de información virtual para aplicaciones AR.

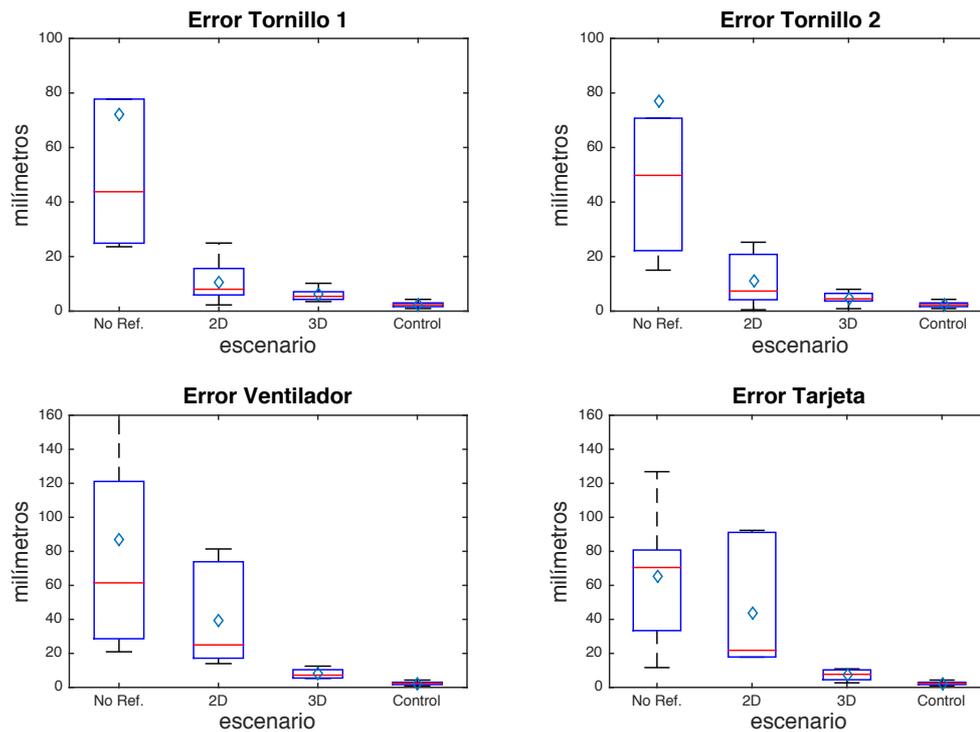


Figura 47. Error cometido en la edición de cada uno de los elementos virtuales

Analizando los resultados de las encuestas realizadas a los usuarios, se obtiene que la opción más valorada por los usuarios es la edición con referencias 3D. Como se puede observar en la Figura 48, donde 19 de los 30 usuarios valoran con un 6 (sobre la escala Likert 1-7) la versión de edición con elementos de referencia 3D, y el resto de valoraciones se reparten entre 4 y 7. Para la versión 2D encontramos que las valoraciones 4 y 5 son las más elegidas con 11 y 13 usuarios respectivamente. La versión sin referencias

obtiene las peores impresiones siendo valorada con un 2 por 17 usuarios, el resto de sus valoraciones se reparten entre los valores 3-7. En cuanto a la máxima puntuación encontramos que 2 usuarios han elegido la opción 3D y un usuario la versión sin referencias. Ningún usuario ha valorado con un 1 ninguna de las 3 opciones.

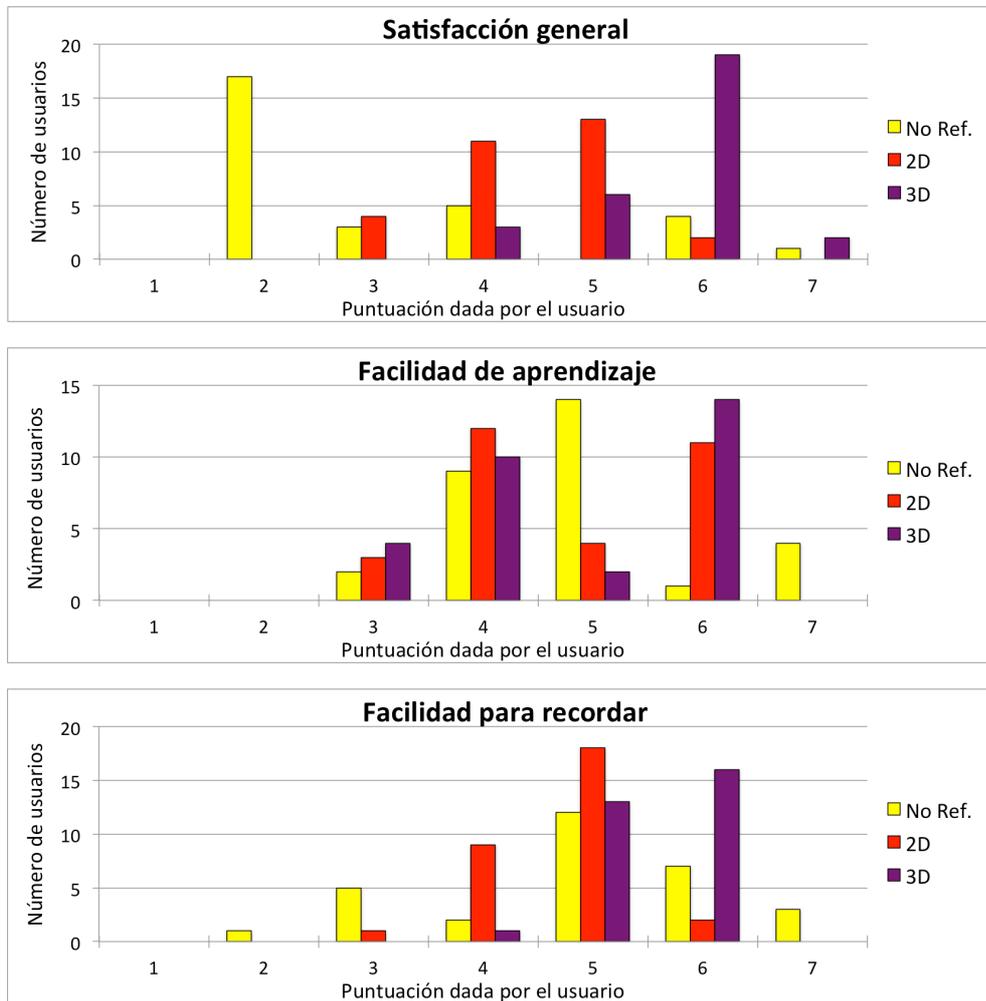


Figura 48. Resultados de las encuestas para los parámetros de satisfacción general, facilidad de aprendizaje y facilidad para recordar su funcionamiento

En la Figura 48 se observan los resultados agrupados de las preguntas referidas a facilidad de aprendizaje y facilidad para recordar el funcionamiento. En estas gráficas se observa como de nuevo la opción 3D es la mejor valorada por 14 usuarios, quienes valoran con 6 la facilidad de aprendizaje y 16 usuarios que valoran con un 6 la facilidad para recordar. En ambos casos, vemos como solo la opción sin referencias, a obtenido la

máxima puntuación por 4 usuarios en facilidad de aprendizaje y 3 usuarios en cuanto a facilidad para recordar.

Para los parámetros de precisión y eficiencia, se puede observar, en la Figura 49, cómo las valoraciones se encuentran mucho más repartidas. La versión sin referencias obtiene unos resultados dispersos, aunque mayoritariamente negativos. La opción 2D obtiene unos resultados entre 2 y 6, mientras la opción 3D es de nuevo la mejor valorada con unos resultados concentrados en 6 (18 usuarios en precisión y 21 usuarios en eficiencia). Con esto resultados se obtiene la conclusión que los usuarios han tenido la misma impresión que dan los resultados de tiempo y error, mostrados previamente, y es que el sistema con referencias 3D es más preciso y eficaz.

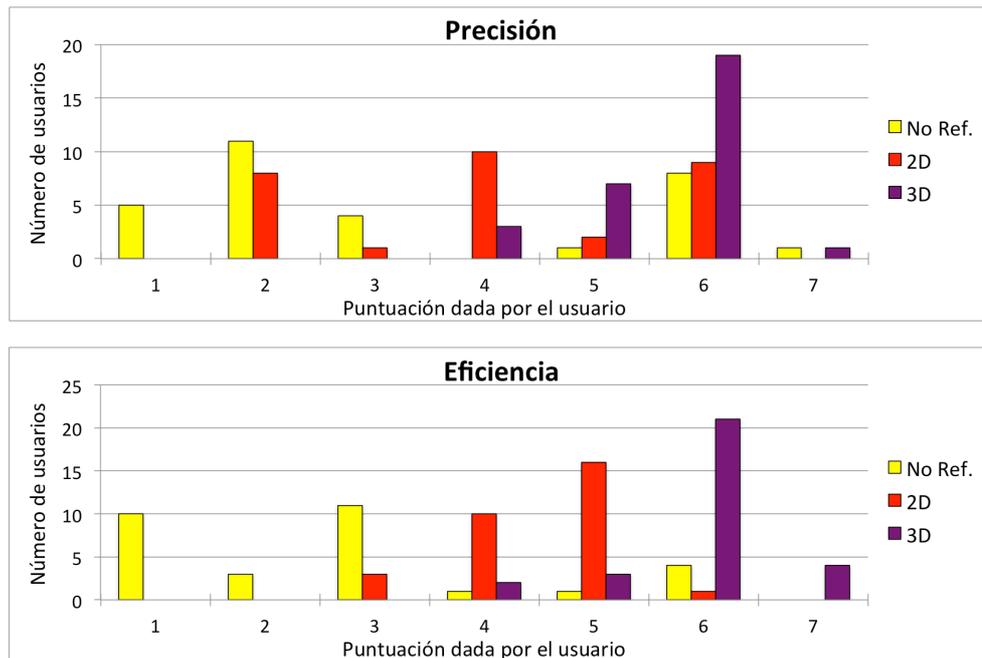


Figura 49. Resultados de las encuestas para los parámetros de precisión y eficiencia

Finalmente, observando los resultados de la Tabla 11, se puede observar cómo el sistema con referencias 3D es el preferido por la mayoría de usuarios en los 7 supuestos planteados. En esta tabla, se observa cómo esta opción es la más elegida con más del 80% de los usuarios en todos los casos. Esto significa que pese a que los tres sistemas han demostrado ser validos para realizar la tarea propuesta, comparativamente los usuarios prefieren la opción con referencias 3D. Este hecho refuerza los resultados anteriores, en

los que esta opción ha demostrado ser más precisa, más rápida y mejor valorada por los usuarios en cuanto a los parámetros de usabilidad planteados.

	No Ref.	2D	3D
Lo utilizaría en el futuro	0 %	0 %	100 %
Necesita menor aprendizaje	16.6 %	0 %	83.4 %
Más intuitivo	0 %	6.6 %	93.4 %
Más preciso	6.6 %	9.9 %	83.5 %
Más rápido	0 %	0 %	100 %
Me he sentido más cómodo	0 %	13.3 %	86.7 %
Lo prefiero en general	0 %	0 %	100 %

Tabla 11. Porcentajes de selección de cada uno de los escenarios frente a las afirmaciones dadas

3.9.2 Evaluación con usuarios reales en tareas de formación

Con el objetivo de aplicar ayudas visuales AR a cursos de formación, se realizó una implementación del sistema de edición propuesto dentro del marco de un proyecto financiado con número de expediente 7030-AC/09. Este proyecto se corresponde con una acción formativa concedida a la fundación formación y empleo (FOREM) por la Junta de Andalucía orientada a aplicar nuevas tecnologías al proceso formativo. En concreto el objetivo del proyecto era crear una plataforma para que los formadores pudiesen crear sus propias ayudas visuales AR. Al final del proyecto se realizó una prueba con usuarios cuyos resultados se presentan a continuación.

La prueba consistió en la presentación de la plataforma de formación creada, a través de la cual es posible crear ayudas visuales AR, tal y como se ha descrito en este capítulo. Tras la presentación se procedió a una sesión de pruebas con los usuarios para elaborar una ayuda visual AR. Una vez finalizada la prueba, los participantes rellenan un cuestionario de valoración referente a los criterios de calidad pedagógicos y tecnológicos de la herramienta.

La prueba fue realizada por 24 participantes, todos ellos alumnos/as del curso de "Formador de Formadores" impartido por FOREM en Villa Martín (11) y Jerez (13). De los 24 participantes el 54% eran hombres y el 46% mujeres. Sus edades comprendidas entre los 23 y 55 años, con una media de 33 años. El nivel de formación de los usuarios mayoritariamente era de Diplomado o superior. Todos ellos poseedores al menos del graduado escolar. En cuanto a la experiencia profesional, un 32% de ellos tenía más de 5 años de experiencia como trabajador cualificado.

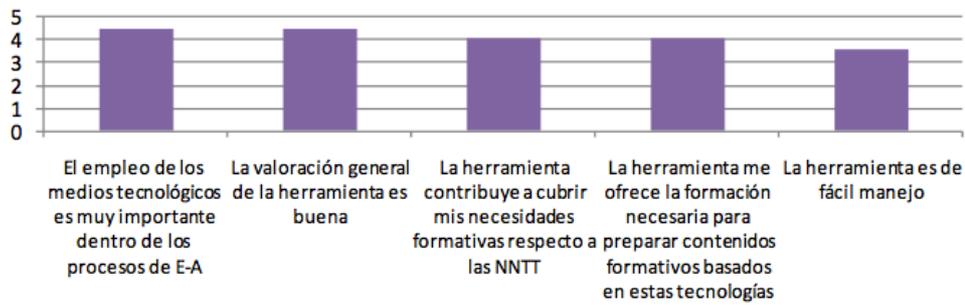


Figura 50. Puntuación media de otorgada por los usuarios a los aspectos principales de la herramienta

Los resultados más relevantes de las encuestas se muestran en la Figura 50. En esta figura se muestra la media de las puntuaciones otorgadas (de 0 a 5) a diversos aspectos de la herramienta. En la gráfica, se puede observar que todos los parámetros tienen una media superior a 3 lo que denota los buenos resultados obtenidos por la herramienta propuesta. En concreto los usuarios dan una puntuación de 4 a dos aspectos clave de la herramienta: “contribuye a cubrir mis necesidades formativas” y “ofrece la formación necesaria para preparar contenidos formativos”. Estas dos buenas puntuaciones indica que tras la formación dada, los usuarios se sienten preparados para crear ayudas visuales AR que además pueden cubrir su necesidades formativas. La valoración general de la herramienta arroja una puntuación de 4.4 lo que indica la satisfacción general de los usuarios durante las pruebas realizadas.

3.9.3 Ejemplos de ayudas visuales AR desarrolladas

La herramienta propuesta de creación de ayudas visuales AR, se ha implementado total o parcialmente para su aplicación en diversos proyectos. En estos proyectos dicha herramienta ha sido utilizada para crear ayudas visuales AR orientadas a temáticas completamente diferentes. Esta diversidad de contenidos creados, son una prueba de que el sistema de edición propuesto es un sistema generalista que puede aplicarse a diversas temáticas y objetivos. A continuación se muestran unos ejemplos de ayudas visuales AR creadas con dicho sistema.

Ayuda visual aplicada a los procedimientos de atención a personas de movilidad reducida

En este ejemplo la herramienta de edición se utiliza para mostrar los diferentes procedimientos de atención a personas con movilidad reducida. En los procedimientos de

este tipo la Realidad Aumentada es muy útil porque aporta información no visible en los videos (utilizados como ayuda visual hasta el momento). En las Figura 51 y Figura 52 se muestra un ejemplo del proceso de edición de dos de los pasos de la ayuda. En la Figura 51 podemos observar la parte de edición 2D donde se coloca un video y texto explicativo del paso. En la Figura 52 observamos la edición del contenido aumentado sobre una descripción del escenario creada con fotos, marcadores planos y modelos 3D. El modelo 3D de referencia, en este caso la cama, se ha creado a partir de una forma sencilla, que además, se utiliza como elemento de oclusión durante la visualización.



Figura 51. Ejemplo de edición de la información 2D durante la creación de una ayuda visual AR para la atención de personas con movilidad reducida

En este caso, los contenidos virtuales se corresponden con: videos, textos, documentos PDF y modelos 3D. Los videos, textos y documentos PDF se editan como contenido 2D. Los modelos 3D representan avatares que realizan los pasos de movimiento explicado, para que el usuario los visualice sobre la cama real. Los avatares 3D permitirán al usuario final observar cada ángulo de movimiento aportando información sobre las partes que queden ocultas en el video.

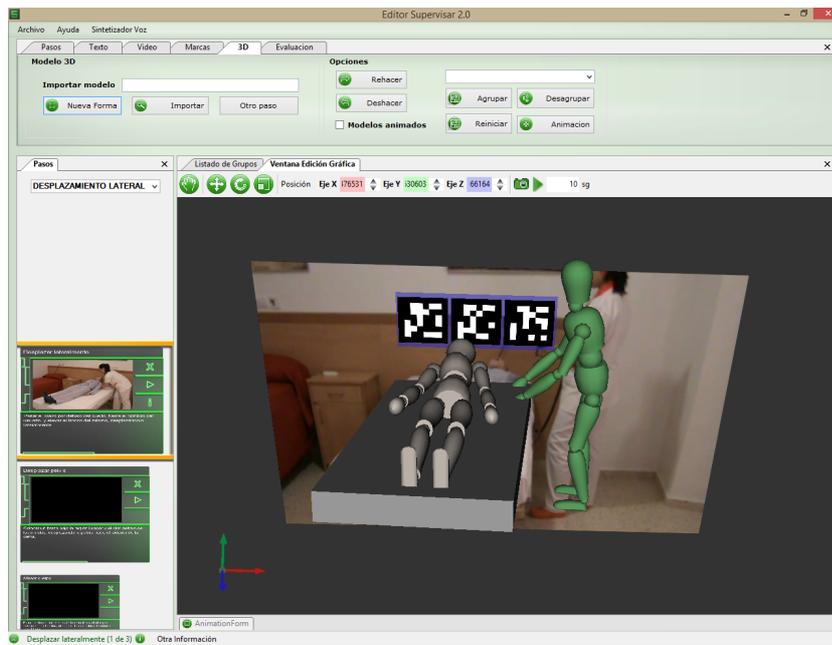


Figura 52. Ejemplo de edición de la información 3D durante la creación de una ayuda visual AR para atención de personas con movilidad reducida

Ayuda visual aplicada a mantenimiento de cuadros eléctricos

En este ejemplo la herramienta de edición se utiliza para crear ayudas visuales AR orientadas al mantenimiento de cuadros eléctricos. En las Figura 53 y Figura 54 se muestra un ejemplo del proceso de edición de dos de los pasos de la ayuda en los que se realizan diferentes comprobaciones con el polímetro sobre elementos del cuadro eléctrico. En la parte izquierda de la Figura 53 se observan dos de los pasos, en los que el procedimiento se explica mediante un video, texto y la documentación adicional a la que se accedería pulsando el icono “i”. En la Figura 54 se observa la edición 3D donde se añade la información virtual a la descripción del escenario real. En este caso la descripción del escenario real se compone de una imagen, un modelo 3D y dos marcadores planos. La foto de referencia ofrece un escenario general sobre el que colocar los modelos 3D referencia correspondientes a cada una de las partes de cuadro. La foto de referencia ,además sirve de base para añadir dos marcadores planos a la descripción. La información virtual se corresponde con un modelo 3D animado del polímetro y sus sondas de medición.



Figura 53. Ejemplo de edición de la información 2D durante la creación de una ayuda visual AR para el mantenimiento de cuadros eléctricos

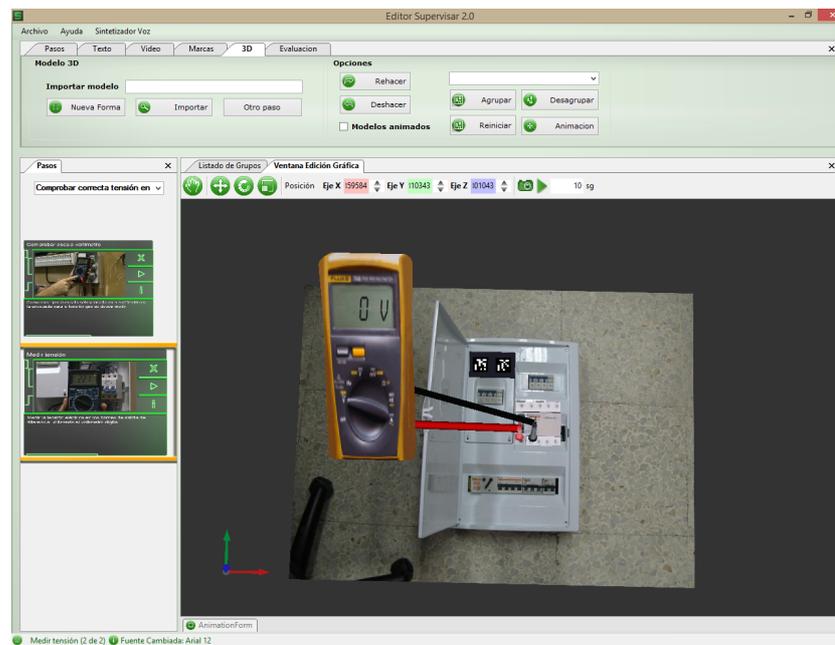


Figura 54. Ejemplo de edición de la información 3D durante la creación de una ayuda visual AR para el mantenimiento de cuadros eléctricos

En este caso particular la descripción del mundo real permite al autor de la ayuda posicionar de forma rápida y precisa las sondas del polímetro en cada uno de los bornes. Sin las referencias del mundo real el autor de la ayuda debería medir manualmente la distancia (en los tres ejes XYZ) a cada uno de los bornes, para luego colocar la información virtual correspondiente. Se observa, por tanto, que el método propuesto facilita la edición de contenidos aumentados, en entornos donde se requiere precisión en la posición de la información virtual.

Ayuda visual aplicada al mantenimiento de maquinaria

En este ejemplo la herramienta se utiliza para crear ayudas visuales AR sobre procedimientos de mantenimiento en una máquina excavadora. Esta ayuda a diferencia de los dos ejemplos anteriores, requiere información virtual en diferentes zonas de la máquina, por lo que la zona de trabajo es mucho mayor (alrededor de 10 m³). En la Figura 55 se muestra una captura de la descripción del mundo real creada a partir de fotos y modelos 3D. Al tratarse de un espacio más grande, la descripción se basa en una foto lateral de la máquina sobre la que se han añadido modelos 3D y otras fotos 2D de zonas concretas. Estas fotos 2D de detalle, se han utilizado a su vez, como marcadores planos para el sistema de captura, de esta forma el autor puede añadir contenido virtual en cualquiera de las zonas de interés de la excavadora sin necesidad de marcadores adicionales.



Figura 55. Ejemplo de descripción del mundo real para ayudas visuales acerca del mantenimiento de una máquina excavadora

En esta ayuda se han introducido también cuestiones para evaluar los conocimientos adquiridos por el usuario durante la ayuda. En la Figura 56 se muestra un ejemplo de la creación de una pregunta de señalar. En la imagen, se puede observar como el enunciado de la pregunta, en el que se indica cual es el elemento que debe señalar el alumno ,se edita en un control 2D (parte derecha). La respuesta se edita en la zona 3D sobre la descripción del mundo real, simbolizada por un objeto de color verde. Con este ejemplo se observa la implementación del mecanismo de edición propuesto previamente.



Figura 56. Ejemplo de edición de una pregunta de señalar donde la respuesta se indica con un cilindro de color verde

Finalmente, en la Figura 57 se muestra un ejemplo de la definición de una pregunta de tipo posicionar elementos. En este ejemplo se pide el usuario que posicione correctamente la batería y la imagen muestra el objeto respuesta que indica la zona de colocación correcta. En la imagen se observa por un lado un modelo 3D de una batería con un marcador asociado, este modelo representa el objeto real que el usuario debe colocar y el modelo de la batería se utiliza como modelo de oclusión. Por otro lado se observa seleccionado el objeto respuesta, simbolizado por una esfera verde, en el lugar donde debe colocarse dicha batería. El tamaño de la esfera simboliza el rango valido y el marcador interior la orientación correcta. Los parámetros configurables de la respuesta se configuran en el dialogo lateral siguiendo las líneas marcadas en el diseño de la herramienta de edición.



Figura 57. Ejemplo de edición de una pregunta de posicionar elementos, la zona correcta se indica con una esfera verde que contiene el icono de un marcador plano

3.10 Conclusiones

En este capítulo se han mostrado las aportaciones realizadas al proceso de creación ayudas visuales AR. Al principio del capítulo se describe cómo aunque la tecnología AR ya es accesible a la gran mayoría de posibles usuarios, actualmente la creación de contenidos se reduce a usuarios con amplios conocimientos técnicos sobre las tecnologías involucradas. Este problema se aborda ofreciendo un nuevo modelo de creación de ayudas visuales AR, basado en los sistemas de presentación de diapositivas digitales. Este modelo de diapositivas, ampliamente extendido entre los posibles usuarios, es incapaz de mostrar información asociada con objetos o lugares concretos. La versión propuesta extiende dicho modelo ofreciendo los mecanismos de edición necesarios para crear dicha información. En los resultados se muestra cómo el mecanismo de edición propuesto, basado en referencias, mejora la velocidad a la vez que disminuye el error de edición frente a otros mecanismos sin referencias. Además, los distintos casos mostrados en los resultados demuestran que el sistema propuesto proporciona un marco de trabajo general, el cual es aplicable a tareas tan dispares como la asistencia a personas con movilidad reducida, o el mantenimiento de maquinaria pesada. A continuación se describen las conclusiones particulares de cada una de las partes de este capítulo.

3.10.1 Análisis de los contenidos de las ayudas visuales AR

Como paso previo a la creación de un sistema de edición de ayudas visuales AR se han analizado todos los posibles contenidos factibles de aparecer en dichas ayudas. En dicho análisis, además de identificar cada uno de los tipos de información, se han enumerado sus requisitos concretos de edición y representación. Esta lista caracterizada

de tipos de información, supone la base para el diseño del sistema de edición que ha de englobar todos los contenidos identificados, con sus requisitos particulares.

3.10.2 *Extensión del modelo de presentación basada en diapositivas*

Tras el análisis de los tipos de información factibles de aparecer en las ayudas visuales AR, se llega a la conclusión que existen dos grandes tipos de información: la información general y la información puntual asociada a lugares u objetos concretos. El primer tipo puede representarse utilizando un modelo de presentación basada en diapositivas, el cual se extiende para incluir la información puntual. De esta forma se aprovecha el conocimiento previo del usuario en crear presentaciones. El proceso de edición quedara dividido en dos partes: la edición 2D (información general) y la edición 3D (información puntual relacionada espacialmente con el mundo real).

3.10.3 *Sistema de edición basado en referencias*

Para la edición de los contenidos virtuales 3D se ha definido un mecanismo de edición basado en referencias. En este mecanismo de edición, el usuario primero crea descripciones del entorno real, sobre las que coloca posteriormente la información virtual asociada a cada paso de la tarea. En la descripción del mundo real se incluyen tanto la geometría del mundo real, como las referencias de los sistemas de captura empleados. Dicha descripción se realiza de forma visual, similar a la creación de entornos 3D. Esta descripción, actúa como referencia visual durante la creación de la información virtual, ofreciendo un mecanismo rápido y preciso de crear relaciones espaciales entre la información virtual y el mundo real. Como resultado este proceso abstrae al usuario del funcionamiento a bajo nivel de la tecnología, por lo que usuarios sin conocimientos técnicos pueden crear ayudas visuales AR.

3.10.4 *Resultados experimentales*

El sistema de creación de contenidos propuesto se ha evaluado con usuarios reales, además de aplicarse en diversos proyectos de investigación financiados. De la evaluación del proceso de edición se obtiene como conclusión que los usuarios son capaces de posicionar la información virtual de forma más rápida y precisa utilizando el sistema propuesto basado en referencias. Finalmente, se muestran algunos de los resultados obtenidos en los diferentes proyectos, para la creación de ayudas visuales AR en diversos campos. De la diversidad de estos resultados se concluye que el sistema

propuesto puede considerarse un sistema genérico de creación de ayudas visuales AR, que no se restringe a una temática concreta.

Capítulo 4

Edición de información

As-Built utilizando AR

4.1 Introducción

En el sector de la construcción, en particular en la edificación, existen diversos procesos constructivos que afectan de forma directa a la correcta realización en tiempo y forma de una obra. Normalmente dichos procesos, como el proceso de replanteo o el proceso de revisión y control, son desempeñados por los equipos técnicos con métodos tradicionales, al margen de tecnologías propias de la época actual y de otros sectores. En los casos en que se aplican nuevas tecnologías, normalmente estas conllevan una elevada complejidad y coste de aplicación. Uno de los procesos especialmente sensibles y que afecta de forma directa a la correcta realización de una obra es el proceso de replanteo. El replanteo de una obra es el procedimiento base a partir del cual arrancan los demás procesos constructivos y de cuya óptima realización depende el correcto avance de ésta. Básicamente, mediante el replanteo de obra se asegura que cada elemento de los próximos trabajos (encuentros, líneas de muros, huecos, etc.) estará construido de acuerdo a la información contenida en los planos de diseño. Este procedimiento está sujeto a todo tipo de errores, que tienen que ser comprobados por los jefes de obra con respecto a diversos puntos de control. El propósito de estos puntos de control es mantener la precisión de la obra dentro de unos márgenes aceptables. Errores en los puntos de control pueden ocasionar la construcción errónea de algunos elementos, que muchas veces no pueden ser rehechos, lo que obliga a introducir modificaciones en el proyecto inicial con sus sobrecostes asociados. La detección temprana de errores en el proceso de replanteo, o incluso durante las primeras fases de la construcción es un elemento clave para asegurar el correcto desarrollo de la misma. En la actualidad existe un gran número de herramientas disponibles para ayudar a los jefes de obra en este proceso. Sin embargo, el nuevo tipo de equipamiento basado en estaciones totales,

niveles láser, GPS, etc. no ha sustituido del todo a los instrumentos tradicionales (guías metálicas, niveles, etc.) por razones técnicas y económicas.

Al final de cada proceso de construcción es necesario realizar los planos As-Built donde se recogen el estado real de la construcción y las diversas instalaciones realizadas. Los planos As-Built son importantes porque serán la única referencia de las instalaciones y partes de la construcción que quedan ocultas, por lo que serán la base del mantenimiento futuro de la construcción. Un proceso crítico dentro de la creación de estos planos es medir de forma precisa las modificaciones producidas durante la construcción y trasladarlas correctamente a los planos.

En este capítulo se muestran las aportaciones realizadas a la creación de información As-Built, por medio de la aplicación de AR a los procesos de seguimiento y control de desviaciones en obra y replanteo. Con estas aportaciones se persigue no solo reducir el número de errores durante la construcción, sino disminuir el tiempo de ejecución del proceso de control de la misma. La estructura del capítulo es la siguiente: descripción del problema, explicación de una nueva metodología y el sistema SICURA, ideados para la solución del problema descrito, resultados de su aplicación en tres obras diferentes y finalmente las conclusiones obtenidas.

4.2 Descripción del problema

Se pretende ofrecer un mecanismo que permita a los jefes de obra controlar el desarrollo del proceso constructivo por medio de Realidad Aumentada. Este mecanismo no solo debe ofrecer un método de detección de errores sino que además debe ofrecer herramientas para añadir anotaciones, modificaciones, etc. durante el control de dicha obra. Como resultado deberá ser posible generar un plano As-Built con toda la información recogida durante el proceso de control.

En la actualidad el proceso de revisión y control de ejecución o replanteo es un proceso arduo debido en gran medida al entorno de construcción sobre el que se realiza. El entorno de construcción no solo es cambiante continuamente, sino que múltiples procesos se realizan al mismo tiempo por distintos tipos de trabajadores e involucrando distintas maquinarias. Es común que mientras se realiza el control del replanteo de una zona, se este trabajando en la zona contigua, lo que imposibilite el acceso a pie a algunas zonas en momentos puntuales. Estas características exigen que los procesos de control sean rápidos y eficaces. Además esta labor debe ser concienzuda puesto que la mayoría de las mediciones no podrán volver a realizarse en el futuro debido a que las superficies

queden ocultas u otras construcciones dificulten la medición. En los casos en que fallan los mecanismos de control, y el elemento construido no puede ser corregido, la generación de modificaciones conlleva un nuevo trabajo de medición, plasmar la modificación en los planos acorde a las medidas realizadas y modificar las estructuras necesarias de acuerdo con la nueva situación. Al final de cada proceso constructivo debe generarse un documento denominado As-Built, el cual refleja el estado real de la construcción.

En concreto, en este trabajo se desea dar solución a los siguientes problemas principales:

1. Realizar un control del replanteo
2. Realizar un control de las estructuras visibles en cualquier fase
3. Generar un plano As-Built que incluya las modificaciones producidas en caso de que las hubiese

Además son deseables las siguientes características:

4. Poder reproducir el estado de la construcción en fases previas para realizar comprobaciones a posteriori
5. Eliminar la necesidad de acceder a pie a la zona que se desea comprobar
6. Permitir añadir anotaciones de distintos tipos al plano As-Built: texto, imagen, geometría, etc.
7. Rápida detección de errores groseros

Para dar solución a estos problemas se propone una solución compuesta por una nueva metodología de trabajo y un sistema que permita llevar a cabo la misma. La metodología describe los pasos necesarios para poder realizar un control de la construcción en cualquier fase, generando los planos As-Built como resultado final. El sistema de Realidad Aumentada desarrollado, denominado SICURA, incorpora herramientas necesarias en cada uno de los pasos descritos de la metodología.

4.3 Metodología de control del proceso constructivo por medio de AR

La metodología propuesta, para controlar el proceso constructivo por medio de Realidad Aumentada, descompone el proceso de control en 4 bloques principales: recolección de datos, configuración del escenario, revisión / control, y por último, generación de resultados. Estos 4 bloques engloban diferentes actividades que deben realizarse a lo largo del proceso constructivo y definen el procesamiento de la información

desde su recolección hasta la generación de resultados. Cada uno de los bloques propuestos genera información necesaria para el siguiente bloque, sin embargo esto no significa que solo deban realizarse una vez a lo largo del proceso de control de una obra, Figura 58. El proceso de control es un proceso que requiere múltiples iteraciones durante la construcción. El resultado final de esta metodología es un informe As-Built del estado final de la construcción. A continuación se explican las 4 actividades principales en detalle.

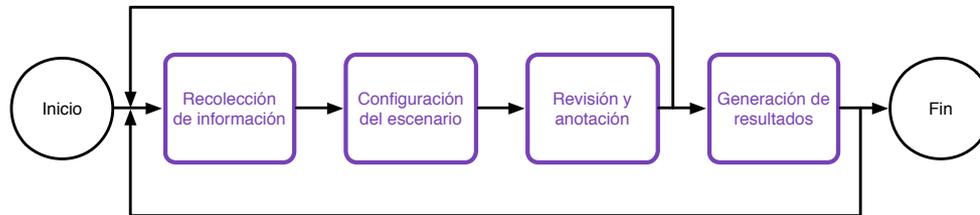


Figura 58. Bloques principales de la metodología de control del proceso constructivo

4.3.1 Recolección de información

La recolección de información consiste en obtener toda la información necesaria del escenario real para su análisis. Esta información recogida no solo permitirá realizar el análisis en el momento de la construcción, sino que además debe archivar de forma que pueda analizarse en cualquier momento posterior. Las técnicas de Realidad Aumentada, aplicadas en pasos posteriores, utilizarán esta información del mundo real como base para mostrar la información virtual sobre ella, por lo tanto el proceso de recolección de información es sumamente importante. En los siguientes apartados se describe que información debe recogerse y cómo hacerlo para garantizar la calidad del resultado final, siguiendo las actividades indicadas en la Figura 59.



Figura 59. Actividades de la recolección de información

Información del mundo real: video o fotografías de la construcción e información de los dispositivos de captura

La solución propuesta contempla el uso de Realidad Aumentada para realizar comprobaciones en obra, y para ello imágenes de la obra real serán la base del análisis.

Estas imágenes pueden provenir de dos orígenes diferentes: video en tiempo real ó fotografías tomadas con una cámara. El video en tiempo real nos permite evaluar el estado actual de la construcción, e incluso cambiar el punto de vista si se utiliza una cámara PTZ (Pan-Tilt-Zoom). Las imágenes estáticas recogen el estado de la construcción en cada momento en que se realizaron las capturas, por lo que permiten realizar un análisis de las estructuras visibles en ellas, y compararlo en diferentes momentos. Además en el caso de detectar errores durante la revisión de la construcción las imágenes capturadas formarán parte de la documentación As-Built final.

Cuando se utilice video en tiempo real se recomiendan resoluciones superiores a 1280x1024 con una velocidad de refresco de al menos 1 imagen cada segundo. En el caso de utilizar cámaras PTZ es recomendable aumentar la velocidad de refresco (aunque se reduzca la resolución) solo durante el proceso de orientación de la cámara.

Cuando se utilicen imágenes estáticas se recomienda utilizar como referencia una resolución máxima de 4096x4096. Esta recomendación viene dada para garantizar que las imágenes funcionen correctamente en la mayoría de tarjetas gráficas durante la visualización aumentada. Aunque es deseable utilizar siempre la mayor resolución posible, se debe tener en cuenta que estas imágenes se utilizarán como texturas en la visualización aumentada, y por ello están sujetas a las restricciones del hardware gráfico.

En los sistemas de Realidad Aumentada es fundamental conocer las características de la cámara con la que se capturan las imágenes para producir una perfecta coherencia espacial entre la información real y virtual (apartado 2.2.3). Por tanto en todo momento deberemos recoger no solo las imágenes sino también información de el dispositivo utilizado para su captura.

Calibración del dispositivo de captura

En cualquier momento, antes de proceder a la visualización aumentada de las imágenes, será necesario calibrar la cámara utilizada para capturar dichas imágenes (tanto si es video como en imágenes fijas). El proceso de calibración de la cámara consiste en realizar capturas desde distintos puntos a una imagen con un patrón conocido, de forma que analizando las imágenes es posible calcular los parámetros intrínsecos de la lente de la cámara. Existen múltiples programas de libre acceso que nos asisten en la realización de esta tarea de forma semiautomática, como por ejemplo, los incluidos en las librerías ARToolKit, OpenCV y MRPT [Blanco. 2013]. Independientemente del software utilizado, como resultado de la calibración deben obtenerse los siguientes parámetros:

1. Distancia focal en píxeles
2. Centro de la lente en píxeles
3. Parámetros de distorsión

En el caso de que la cámara disponga de varios niveles de zoom se repetirá el proceso de calibración para cada uno de ellos, puesto que al variar el zoom varían las propiedades intrínsecas de la lente (en especial la distancia focal).

El resultado de la calibración de la cámara (para cada uno de los niveles de zoom disponibles) se almacenará en un fichero de texto siguiendo el formato de fichero de calibración de OpenCV:

```
<Nombre de la cámara>           <Nivel de zoom>           <Fecha>
<Ancho de la imagen>           <Alto de la imagen>
<Centro de la lente en eje X>   <Centro de la lente en eje Y>
<Distancia focal en eje X>     <Distancia focal en eje Y>
<Parámetros de distorsión>
```

Captura de las imágenes

En cualquier sistema de Realidad Aumentada es importante colocar correctamente la cámara que captura el mundo real para obtener una mejor visión aumentada del mismo y el caso de la inspección de procesos de construcción no es diferente. La cámara debe colocarse siempre con el objetivo de obtener una perspectiva correcta de los elementos que se desean examinar y para ello se aportan las siguientes recomendaciones:

1. **Visión frontal de los elementos.** A la hora de realizar una comprobación basada en imagen, es importante ver el elemento desde una perspectiva frontal para mantener una buena resolución de todos los elementos presentes en la imagen. En el caso de imágenes en perspectiva los elementos más alejados ocupan pocos píxeles de la imagen por lo que no es posible obtener información de los mismos.
 - a. En el caso de comprobación de obras horizontales (cimentaciones o plantas de un edificio) se recomienda capturar las imágenes desde puntos elevados o utilizar cámaras colocadas en dispositivos aéreos.
 - b. En el caso de comprobación de obras verticales (como fachadas o puentes) se recomienda colocarlos perpendiculares a la línea de obra y

orientar la cámara hacia el punto más cercano de la misma definiendo un ángulo recto.

2. **Evitar elementos que interfieran la visión.** Siempre que se realice una comprobación es fundamental que el elemento/os que se desean comprobar se vean sin interferencias. Este aspecto debe tenerse en cuenta sobre todo al colocar cámaras PTZ que nos permitan realizar un seguimiento en tiempo real de la construcción. A la hora de elegir un punto de colocación habrá que tener en cuenta que los entornos de obra son cambiantes y a menudo requieren la colocación de estructuras auxiliares que obstaculicen la visión.
3. **Distancia correcta.** La distancia a la que se coloque la cámara, debe mantener un compromiso entre lo bastante lejana como para observar todos los elementos que se desean medir, y lo bastante cercana como para que los elementos se visualicen correctamente. A mayor distancia existe un mayor número de elementos en la imagen, pero cada uno de ellos ocupa menos píxeles en la imagen, por lo tanto tenemos menos información de cada uno de ellos. Sin embargo, si no tenemos una distancia suficiente el usuario no puede observar una vista general de la construcción lo que dificulta el proceso de inspección.
4. **Procurar incluir elementos de referencia.** Para observar la correcta colocación de todos los elementos de la construcción es necesario tener puntos de referencia en la imagen que aporten puntos de confianza. Estos puntos de confianza (ó puntos de control) serán especialmente útiles en el proceso de configuración del escenario aumentado. Sin estos puntos de control el proceso de configuración del escenario será más costoso y el resultado final será menos preciso.
5. **Utilizar un soporte.** Un último factor a tener en cuenta durante la colocación de la cámara es utilizar un soporte, ó trípode, siempre que sea posible para evitar imágenes borrosas. Las imágenes borrosas no permiten observar correctamente los detalles de los elementos de construcción y por tanto no permite su comprobación en un sistema de Realidad Aumentada. Las imágenes tomadas con un soporte son más nítidas puesto que la cámara permanece en la misma posición durante el tiempo que el obturador permanece abierto.

Almacenamiento de la información

El almacenamiento de la información es el último paso de la actividad de recolección de información y debe garantizar que en cualquier momento cualquier

usuario pueda utilizar una imagen en el proceso de revisión del proceso constructivo. Para ello deberá el usuario deberá saber cuando, donde y con que cámara fue tomada. Además todas las imágenes capturadas, junto con los archivos de calibración deberán ser almacenados siguiendo la política de copia de seguridad elegida por el usuario o la empresa de la que forme parte para asegurar la integridad en el tiempo de dicha información.

De cada imagen deberá almacenarse:

1. **El archivo de la imagen.** Es el archivo original capturado por la cámara. En ningún caso se almacenaran trozo parciales de la imagen para eliminar por ejemplo una zona que no nos interesa. Las imágenes parciales harían que la imagen almacenada no coincidiese con los datos de calibración de la cámara. Deben mantenerse todos los metadatos que contenga la imagen (en la mayoría de casos información EXIF), por lo que se recomienda no procesar la imagen en ningún software de mejora de imagen que elimine estos datos.
2. **La fecha de captura de la imagen.** Día y hora en que se realizó la captura. Esta información puede almacenarse en los propios metadatos de la imagen, como parte del nombre o utilizando una librería de gestión de imágenes.
3. **La zona de la construcción a la que hace referencia.** Debe almacenarse de cada imagen la zona de la construcción a la que pertenece la imagen. La mayoría de las obras tienen una división numérica de zonas, si es así se utilizará esta convención para referenciar la imagen. Si no es así deberá definirse una división que permita identificar de forma unívoca cada elemento de la construcción.
4. **El archivo de calibración correspondiente a la cámara utilizada** (teniendo en cuenta el zoom con el que se realiza la captura). Con cada una de las imágenes deberá almacenarse el archivo de calibración correspondiente a la cámara utilizada y el zoom que se utilizó para realizar dicha captura. La referencia a este archivo puede almacenarse como parte del nombre del archivo o utilizando un software de gestión de bibliotecas de imágenes que permita asociar datos a imágenes.

4.3.2 Configuración del escenario

La configuración del escenario consiste en relacionar las imágenes que se van a utilizar para la inspección con los planos o modelos 3D que representan el estado ideal de la construcción. En los sistemas de Realidad Aumentada o mixta el usuario observa el entorno real con información virtual añadida. En el caso de comprobación del proceso

constructivo la percepción del usuario se aumenta principalmente con los planos (2D ó 3D) utilizados como guía durante dicho proceso, de forma que pueda observar la correspondencia entre estos planos y la realidad. Para producir este efecto es necesario que los planos estén perfectamente alineados con la realidad, y es en la configuración del escenario donde se realizan las acciones necesarias para conseguirlo. La calidad final, tanto de la revisión, como de la generación de los resultados dependerá en gran parte de la calidad de esta configuración, puesto que una mala alineación de las imágenes del mundo real y la información virtual puede enmascarar fallos o mostrar errores inexistentes.

La configuración del escenario se realizará en base a la correspondencia de N puntos reales (observados en la imagen) y virtuales (representados en el plano o modelo 3D). A partir de estos puntos y los parámetros intrínsecos de la cámara (obtenidos en los pasos anteriores) el sistema calculará de forma automática la posición y orientación de la cámara para conseguir una coherencia visual entre la información real y virtual. Un paso importante antes de realizar cualquier comprobación en base a esta configuración será comprobar la posición de puntos de control no utilizados para la configuración.

Los pasos en detalle para realizar la configuración del escenario son los que muestra la Figura 60, y que se explican a continuación:

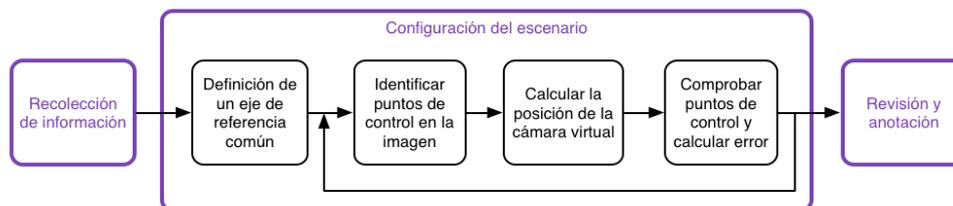


Figura 60. Actividades para la configuración del escenario

Definición de un eje de referencia común

El primer paso a la hora de trabajar con la información virtual, representada en este caso por planos o modelos 3D de la construcción, será definir un eje de referencia común en base al cual estén referenciados cada uno de los elementos virtuales. Este eje de referencia se compone de un punto origen y la orientación de los tres ejes cartesianos XYZ. En cualquier obra, al comenzar la confección de los planos se define este eje de referencia para que todos los planos de las distintas estructuras coincidan entre ellos y además los técnicos puedan realizar las comprobaciones del replanteo. Sin embargo a la hora de realizar la construcción es común encontrar planos de instalaciones o actuaciones

menores que no están correctamente referenciados. Estos fallos de referencia son debidos a causas, como por ejemplo: diversas personas y empresas que trabajan simultáneamente en la confección de los planos, modificaciones que no se han tenido en cuenta o no se han difundido al resto de trabajadores ó simplemente fallos puntuales que no se han detectado debido al gran número de planos que componen el proyecto. Es por ello que el primer paso de la calibración del escenario será definir un eje de referencia, compuesto por un punto origen y la orientación de los 3 ejes cartesianos XYZ (en caso de que no exista uno). Para cada plano o modelo 3D que se vaya a introducir en el sistema se deberá comprobar que dicho eje de referencia está colocado correctamente, sino deberán corregirse los planos aplicando las traslaciones y rotaciones necesarias con un software CAD.

Identificar puntos de control en la imagen

Para calcular la correlación entre la imagen real (imágenes) y la información virtual (planos y modelos) se utilizarán puntos de control que puedan identificarse claramente en ambos. Es por ello, que para cada imagen que se desee utilizar como base, para comprobar los elementos presentes en la misma, deberán definirse al menos 4 puntos de control (cómo se explica más adelante 3 se utilizarán para el calibrado y otro para el proceso de control). Los puntos de control deberán cumplir los siguientes requisitos:

1. Los puntos de control deben ser elementos que se ha comprobado están contruidos correctamente. Puesto que la relación entre la información virtual y real viene determinada por estos puntos, será necesario utilizar puntos fiables para realizar la configuración del escenario.
2. Deben ser fácilmente reconocibles en la imagen evitando elegir estructuras que puedan conducir a error durante la identificación de los mismos.
3. Deben ser elementos cuya posición pueda determinarse de forma clara en el plano o modelo 3D. Es decir se utilizarán elementos estáticos que no cambien de posición a lo largo del tiempo, o en el caso de que sean elemento móviles, deberá ser posible conocer su posición exacta en el plano en el momento que se capturó la imagen.
4. Los puntos de control deben ser vértices y no superficies o aristas. Un punto de control debe ser definible de forma precisa en la imagen, por lo que siempre se utilizarán puntos donde intersecten una o más aristas. Por ejemplo, en el caso del hueco de una puerta, puntos de control serían los vértices exteriores del hueco

pero nunca cualquier otro punto de las aristas laterales o la superficie interior del marco.

5. La disposición general de los puntos de control debe ser dispersa por toda la imagen ocupando al menos un tercio de la superficie total de la misma. Cuanto mayor sea la zona que ocupen los puntos de control mayor es la precisión de la calibración.
6. Los puntos de control no deben estar alineados, deben ocupar al menos un tercio del alto y un tercio del ancho. Unos puntos de control alineados no aportan información suficiente para realizar una calibración en tres dimensiones del sistema.

Calcular la posición de la cámara virtual

Una vez definidos los puntos de control, tanto en la imagen real, como en el modelo o plano virtual se calculará, de forma automática, la posición y orientación de la cámara en el momento que se capturo la imagen. Estos datos se conocen como parámetros extrínsecos de la cámara y se calculan a partir de los parámetros intrínsecos (obtenidos previamente) y la correspondencia de los puntos de control de la imagen y el plano virtual. Existen diversos algoritmos e implementaciones que resuelven este problema de estimar los parámetros extrínsecos de una cámara. Todos ellos se basan en realizar un proceso iterativo que minimice el error de reproyección de los puntos virtuales (3D) sobre la imagen 2D. No es objetivo de esta metodología restringir el cálculo al uso de uno de los algoritmos, simplemente especificar que la entrada deben ser 3 ó más pares de puntos de control (imagen-plano) y el fichero de calibración de la cámara.

En el caso de que en la fase de recolección de datos no se hubiesen obtenido el fichero de calibración de la cámara y no fuese posible obtenerlo en este momento se procederá de la siguiente forma. Primero, examinar los metadatos de la imagen (información EXIF) para tratar de identificar la cámara utilizada y si es posible obtener su fichero de calibración. Si no pudiese obtenerse el fichero buscar en los metadatos si la cámara graba la distancia focal de la lente y el tamaño del CCD. A partir de esta información será necesario generar un fichero de calibración con los parámetros de distorsión a cero (puesto que son desconocidos). Los parámetros de calibración se calcularán siguiendo las formulas de la Tabla 12. En muchas ocasiones las cámaras no graban directamente el tamaño del CCD y la distancia focal sino que graban la distancia focal equivalente a una cámara de 35 mm. Esto es debido a que la película de 35 mm. ha sido un estándar de facto a lo largo de los años en fotografía y todavía se mantienen las

referencias a dicha escala. En la Tabla 12 se muestra cómo calcular los parámetros de calibración (resolución, centro de la lente y distancia focal) en función de la información grabada en la información EXIF.

Parámetro	Eje X	Eje Y
Resolución	Ancho de la imagen en pixeles	Alto de la imagen en pixeles
Centro de la lente	$\frac{Resolución\ X}{2}$	$\frac{Resolución\ Y}{2}$
Distancia focal en pixeles, calculada a partir de la distancia focal equivalente a 35mm (DF35)	$\frac{DF35 * \sqrt{Resolución\ X^2 + Resolución\ Y^2}}{43.27}$ (43.27 mm. es el tamaño en mm de la diagonal en la película de 35 mm.)	= Distancia focal X
Distancia focal en pixeles, calculada a partir de distancia focal (DF) y tamaño del CCD	$\frac{DF * Resolución\ X}{Ancho\ del\ CCD}$	$\frac{DF * Resolución\ Y}{Alto\ del\ CCD}$
Distorsión	0,0,0,0	

Tabla 12. Parámetros de calibración calculados a partir de los metadatos de una imagen

Si no existiese ninguna información sobre la focal de la cámara se utilizará una apertura de cámara de 45° en horizontal (y su valor proporcional en vertical a partir de la relación de aspecto de la imagen). La Tabla 13 muestra las formulas para calcular dichos parámetros. En este último caso solo podrán realizarse comprobaciones sobre planos perpendiculares a la cámara, es decir los puntos de control deberán ser coplanarios y todas las comprobaciones deberán realizarse solo sobre elementos de dicho plano perpendicular. Esto es debido a que sin conocer los parámetros intrínsecos solo se puede asegurar que la proyección de la cámara virtual calculada coincidirá con la cámara real en el plano perpendicular que definen los puntos de control. Estas imágenes no deberán utilizarse a menos de que no exista posibilidad de capturar de nuevas imágenes con una cámara calibrada.

Una vez calculados los parámetros extrínsecos de la cámara virtual ya será posible realizar una visualización aumentada de la imagen. Para ello el sistema aplicará los parámetros extrínsecos e intrínsecos a una cámara virtual que tenga como imagen de fondo la imagen utilizada en la calibración. Más adelante, se explica en detalle cómo el sistema SICURA realiza este proceso para ofrecer al usuario un entorno de Realidad Aumentada donde realizar comprobaciones del proceso constructivo.

Parámetro	Eje X	Eje Y
Resolución	Ancho de la imagen en píxeles	Alto de la imagen en píxeles
Centro de la lente	$\frac{\text{Resolución } X}{2}$	$\frac{\text{Resolución } Y}{2}$
Distancia focal	$\frac{\text{Resolución } X}{2} / \tan\left(\frac{45}{2}\right)$	= Distancia focal X
Distorsión	0,0,0,0	

Tabla 13. Parámetros de calibración por defecto equivalentes a una lente ideal de 45° en horizontal

Comprobar puntos de control y calcular el error

Puesto que el cálculo de los parámetros extrínsecos de la cámara no es un proceso exacto, sino que se trata de un proceso iterativo hasta alcanzar una solución valida, será necesario comprobar que la calibración se ha realizado de forma óptima y ofrecer un error estimado. Este error servirá como valor de confianza de las medidas y comprobaciones que se realizarán posteriormente. Para realizar la comprobación se calculará la distancia en píxeles de los puntos de control virtuales visualizados en la imagen aumentada con su posición en la imagen real. En esta comprobación además de los puntos de control utilizados en la calibración se utilizaran el resto de puntos de control definidos. El error será el resultado de la media de esta distancia en todos los puntos de control. Este error vendrá determinado en píxeles. Un umbral de error valido será el inferior al 0.1% del ancho en píxeles de la imagen. En caso de obtener un umbral de error superior será necesario repetir el proceso de calibración.

4.3.3 Revisión y anotación

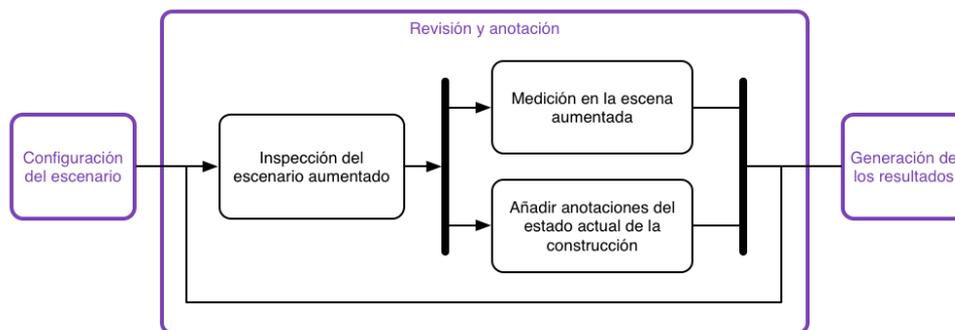


Figura 61. Actividades para la revisión y anotación del proceso constructivo

La revisión y anotación del proceso constructivo por medio de Realidad Aumentada consiste no solo en comprobar el correcto estado de la construcción por

medio de la visualización combinada del mundo real y la información virtual, sino también en la habilidad de añadir la información necesaria para documentar las desviaciones encontradas. En esta metodología el proceso de revisión y anotación se divide en tres tipos de acciones: inspección del escenario aumentado, medición en la escena aumentada y anotación del estado actual de la construcción.

Inspección del escenario aumentada

Una vez realizada la configuración del escenario el usuario ya puede observar una imagen compuesta por el mundo real y la información virtual que aportan los planos o modelos 3D superpuestos. Este primer resultado ya supone un avance en si mismo puesto que en este momento el usuario a simple vista puede inspeccionar los elementos constructivos y detectar errores de bulto donde algún elemento no coincide en ambas representaciones.

En la inspección el usuario podrá hacer uso de 4 funcionalidades básicas:

1. **Navegación y zoom.** El primer mecanismo para realizar la inspección es poder mover la vista y hacer zoom sobre las zonas deseadas. Este mecanismo debe permitir al usuario observar en detalle cada uno de los elementos representados en las imágenes de forma simultánea con su representación virtual. En el caso de utilizar una cámara de tipo PTZ el usuario podrá realizar la navegación sobre la imagen actual de la cámara o mover la misma para obtener una imagen de una zona diferente.
2. **Modificación de las propiedades visuales de la imagen de fondo y los planos o modelos 3D.** Uno de los problemas derivados de mostrar información virtual sobre la información real es como mostrar ambos tipos de información atendiendo a dos casos: que se presenten al usuario de tal forma que no pueda distinguirlas (mayor integración) o que se presenten de forma que la información virtual sea una referencia que aporte indicaciones al mundo real (menor integración y mayor visibilidad). En el caso que nos acontece se corresponde con el segundo supuesto, donde la información virtual es una guía para comprobar que los elementos se han construido correctamente. Para obtener una mayor diferenciación visual entre ambos tipos el usuario podrá modificar las propiedades visuales de la imagen de fondo (brillo, color, saturación y contraste) y los planos o modelos 3D (transparencia, color y grosor de línea).
3. **Ocultar/Mostrar capas del modelo.** Una práctica habitual en el campo de la arquitectura y la construcción es dividir los planos y modelos 3D en capas de

acuerdo a distintas clasificaciones: unidades de ejecución, tipo de instalación, tipos de elementos, etc. Esta división hace que en muchas ocasiones el usuario solo observe en la realidad los elementos pertenecientes a alguna de las capas de la información virtual. En el momento de la inspección podrá ocultar y mostrar los distintos modelos y las capas de cada uno para obtener una visualización más clara de los elementos que desea revisar.

- 4. Composición de imágenes calibradas del escenario aumentado.** Como resultado de los pasos de recolección de información y configuración del escenario el usuario puede obtener una visualización aumentada de múltiples elementos de la construcción, pero también puede darse el caso en que algún elemento aparezca parcialmente en varias imágenes. El usuario podrá observar todas las fotos pertenecientes al escenario aumentado calibrado como si fuesen una única, por lo que el sistema deberá ser capaz de presentar las imágenes simultáneamente.

Medición en la escena aumentada

Durante el proceso de revisión descrito previamente el usuario puede encontrar desviaciones en la construcción que deberá medir de forma correcta para su posterior documentación. Para cada desviación encontrada el usuario deberá realizar una medición lineal por cada uno de los vértices exteriores del elemento. Cada medición representará la desviación de dicho vértice y en su conjunto será información suficiente para poder modificar el plano acorde al estado real del elemento construido. En este caso las mediciones lineales siempre relacionan un punto de la imagen con un punto del modelo virtual, o dicho de otro modo, relacionan el lugar donde se encuentra un elemento y el lugar donde debería estar. Para identificar el punto sobre la imagen con mayor precisión el sistema deberá asistir al usuario en la selección del punto. Para ello deberá realizar un análisis de los contornos de la imagen, detectar líneas rectas y a partir de estas líneas obtener la posición del punto seleccionado con mayor precisión que la de un pixel (precisión de sub-pixel). En la identificación del punto sobre la información virtual el sistema asistirá al usuario utilizando la información geométrica del modelo 3D para obtener la posición exacta del vértice seleccionado.

En el caso de comprobar la distancia entre elementos no presentes en el plano, la medición lineal se realizará utilizando dos puntos de la imagen, ambos calculados analizando la imagen, al igual que en el caso anterior.

Finalmente para medir y comprobar áreas el usuario deberá marcar los puntos que representan el contorno. Una vez definida la zona el sistema será el encargado de calcular el área de forma automática. Para la definición de puntos se utilizará información ,tanto de la imagen de fondo, como del modelo virtual. Para la definición de lados curvos en dichas áreas se utilizara un mecanismo basado en puntos de control, que pase por los puntos marcados (por ejemplo Curvas de Bezier). Deberá ser posible combinar lados rectos con lados curvos a elección del usuario.

En cada medición realizada el usuario deberá asignar un nombre representativo que permita su búsqueda e identificación. Además el sistema deberá almacenar la fecha en que se realizó dicha medición. Todas las mediciones deben ser editables a posteriori de forma que el usuario pueda refinarlas o modificarlas cuando lo crea conveniente.

Añadir anotaciones del estado actual de la construcción

Siempre que el usuario detecte una desviación durante la inspección, que no pueda describirse correctamente con las herramientas de medición anteriores, el usuario deberá añadir una anotación describiendo dicha desviación. Las anotaciones serán elementos de información con una posición concreta en el sistema de referencia de la construcción de forma que puedan visualizarse posteriormente. En cada anotación el usuario deberá introducir los siguientes valores:

- Fecha de la anotación
- Descripción clara y concisa del motivo de la anotación
- Posición 3D de la anotación
- Descripción del lugar siguiendo la notación de la obra (Edificio, sala, pared, etc.)
- Categoría/as. Este parámetro es opcional y se refiere a la categoría/as con las que está relacionada la anotación, por ejemplo: electricidad, carpintería, encofrado, etc.
- Incidencia. Este parámetro indica si la anotación se corresponde con una incidencia que deba ser corregida.
- Foto en detalle. Este parámetro es opcional aunque recomendable en todos los casos y se corresponde con una foto en detalle del objeto de la anotación.

4.3.4 Generación de resultados

El último bloque de la metodología engloba las actividades necesarias para generar los resultados e informes que formaran parte de la documentación As-Built

generada al finalizar la construcción. Esta documentación compuesta por planos, documentos, imágenes, etc. muestra el estado real de la construcción final y es el documento base utilizado en cualquier labor de mantenimiento o modificación posterior. La generación de resultados debe realizarse de forma automática por parte del sistema a partir de la información introducida por el usuario en los procesos anteriores. En esta metodología se indican a continuación el contenido, organización y formato de cada uno de los documentos que plasmará el resultado del proceso de control.

Planos As-Built

Los planos As-Built son los planos que incorporan las modificaciones realizadas durante el proceso de construcción y reflejan el estado final de la construcción. No es objetivo de esta metodología sustituir el proceso de diseño y creación de planos digitales, ni de ceñirse a un formato de archivo o proyecto concreto, pero sí dejar las bases para que a partir de la información generada durante el control del proceso constructivo puedan crearse los planos As-Built. Uno de los resultados por tanto deberá ser los planos y ó modelos originales incluyendo las anotaciones y mediciones en el formato adecuado para que sirvan como referencia para crear los planos As-Built finales en el software deseado por el usuario. Los distintos tipos de información que puedan incorporarse a los planos o modelos 3D dependerán del formato utilizado por el software de diseño. En esta metodología se marcan los parámetros mínimos que deberán exportarse para cada uno de los elementos creados, y que permitirán modificar los planos para ajustarlos a la realidad. Los parámetros mínimos para cada elemento creado durante la revisión son los siguientes:

- Mediciones lineales: nombre del elemento, los dos vértices (inicio y fin) y una línea de unión entre ambos.
- Mediciones de área: nombre del elemento, todos los vértices empleados y una línea que indique el contorno.
- Anotaciones: nombre de la anotación y un vértice que represente el punto de la anotación.

Informe mediciones

El informe de mediciones es un documento que recoge todas las mediciones realizadas durante la revisión, y que puede considerarse como un listado en el que se cuantifican las desviaciones detectadas durante la construcción. Este informe servirá de referencia al técnico durante la generación de los planos As-Built a partir de la

información exportada previamente. El informe de mediciones estará compuesto por un listado en orden alfabético (según el nombre asociado por el usuario a la medición) de todas las mediciones indicando la siguiente información dependiendo del tipo de medición:

- Medición lineal: Nombre, fecha, longitud, vértice de inicio y vértice final.
- Medición de área: Nombre, fecha, área calculada y lista de vértices.

Informe anotaciones As-Built

El informe de anotaciones es un documento que recoge todas las anotaciones realizadas por el usuario agrupadas por categorías. Este documento tendrá un capítulo por cada una de las categorías definidas durante la creación de las anotaciones, y en cada categoría tendrá una entrada por cada anotación ordenadas por fecha. En el caso de que una anotación pertenezca a varias categorías dicha anotación aparecerá en todos los capítulos correspondientes a dichas categorías en el informe. La entrada correspondiente a cada anotación tendrá el siguiente formato:

Fecha	< fecha de la anotación >		
Descripción	< descripción de la anotación >		
Categoría/s	< lista de categorías separadas por coma >		
Posición	< descripción del lugar > < posición 3D >		
Incidencia	< Si o No >		
<table border="1" style="width: 100%; height: 60px;"> <tr> <td style="width: 50%; text-align: center; vertical-align: middle;">Foto asociada</td> <td style="width: 50%; text-align: center; vertical-align: middle;">Captura de la zona en el plano</td> </tr> </table>		Foto asociada	Captura de la zona en el plano
Foto asociada	Captura de la zona en el plano		

Tabla 14. Ficha descriptiva de cada anotación en el informe de anotaciones As-Built

4.4 Sistema SICURA de seguimiento de obra

El sistema SICURA ha sido desarrollado para asistir al personal de obra en las tareas de revisión y control del proceso constructivo utilizando técnicas de Realidad Aumentada. Este sistema implementa las herramientas necesarias para que un usuario pueda poner en practica la metodología descrita previamente en este capítulo.

El sistema SICURA se ha desarrollado siguiendo una arquitectura modular compuesta por 8 módulos, Figura 62. La figura muestra el diseño centralizado del sistema

donde un módulo principal, denominado Núcleo SICURA, es el encargado de controlar al resto de módulos y manejar toda la información que describe el estado actual del sistema. Existen 3 módulos de entrada/salida de datos, un módulo encargado del interfaz y 3 módulos especializados en los que se implementan diferentes funcionalidades concretas que ofrece el sistema. A continuación se explica cada uno de ellos en detalle.

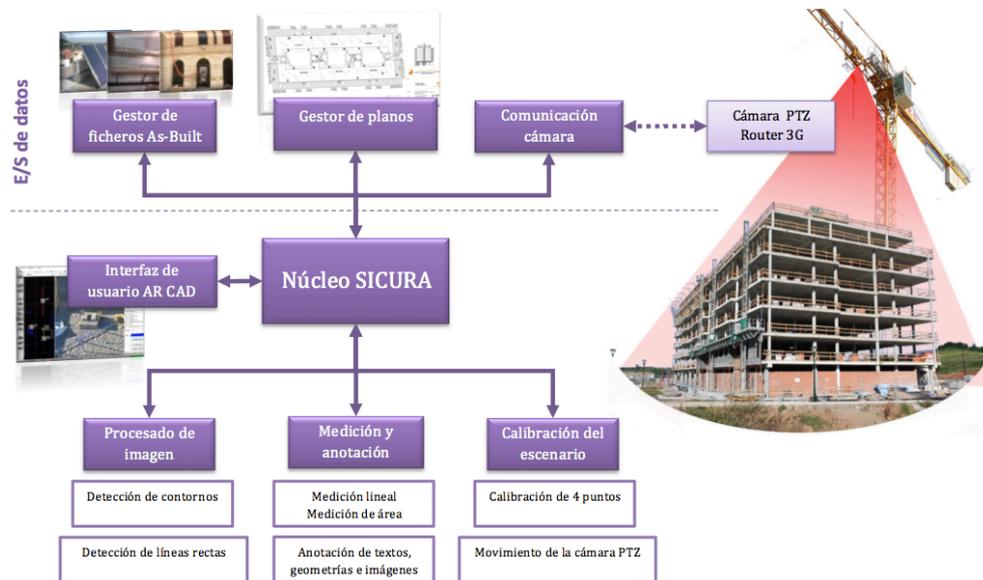


Figura 62. Arquitectura modular del sistema SICURA

4.4.1 Módulo Núcleo SICURA

El módulo Núcleo SICURA es el módulo principal del sistema cuya función principal es mantener los datos que describen el estado actual del sistema, ser capaz de almacenarlos y ofrecer un acceso controlado al resto de módulos para transformar y manejar dichos datos. Este módulo es también el encargado de generar los diversos informes, marcados en la metodología, derivados de la inspección y control del proceso constructivo. Estos informes se generan siguiendo el formato marcado en la metodología y en formato PDF.

En la Figura 63 se muestra el diagrama de clases que representa el modelo de datos empleado en el sistema. Como en todo sistema de Realidad Mixta, se manejan dos tipos de información: la que describe el mundo real y la información virtual que complementa la percepción del usuario. En dicho diagrama esta distinción se muestra con una línea discontinua que separa las clases asociadas a cada tipo. En la parte inferior, las

Para la persistencia de los datos se ha implementado una serialización de cada clase a XML, por lo que cada una de las clases es capaz de serializar o interpretar su contenido a partir de una cadena de texto en formato XML. Como resultado el estado actual del sistema SICURA queda recogido en un único fichero XML, dentro del nodo raíz <SICURA>. En cuanto a los archivos externos a los que hacen referencia algunas clases, su contenido no se almacena dentro del propio fichero XML, sino que se almacena la ruta donde se encuentra dicho archivo (atributo URL). En el momento de cargar el fichero, si alguno de estos ficheros no existe se informa al usuario de que indique la nueva ruta donde se encuentra el fichero.

4.4.2 Módulo gestor de ficheros As-Built

El módulo gestor de ficheros As-Built es el encargado de manejar las imágenes capturadas que representan el estado de la construcción. Estas imágenes se corresponden con ciertos elementos que el usuario desea resaltar, normalmente porque se ha producido una modificación durante la construcción de los mismos. En el sistema SICURA el usuario puede añadir información a estas imágenes: comentarios, categorías, posición, etc. Este módulo se encarga de gestionar la lectura y escritura de esta información en los metadatos de la imagen utilizando el formato EXIF. El formato EXIF fue creado por la Japan Electronic Industry Development Association y es el formato indicado para las cámaras digitales por el estándar ISO 12234-1 [Gulbins and Steinmuller. 2010]. EXIF define una cabecera almacenada en el segmento de aplicación de un fichero JPEG o como etiqueta en un fichero TIFF. Como resultado el fichero JPEG o TIFF mantiene un formato que es compatible con cualquier aplicación que no haga uso de la información EXIF.

Información	Formato	Campo EXIF
Fecha de la anotación	ASCII "YYYY:MM:DD HH:MM:SS"	306 (Date Time)
Descripción	ASCII	270 (Image Description)
Categoría/s	ASCII "Categoría1;Categoría2;..."	37500 (Maker Note)
Posición	ASCII "Lugar=<Descripción del lugar>;" ASCII "Px=<x> Py=<y> Pz=<z>;"	37510 (User Comments)
Incidencia	ASCII "[0-1]"	37510 (User Comments)

Tabla 15. Formato y campo EXIF utilizado para almacenar la información de la anotación correspondiente a cada imagen

De acuerdo con la metodología propuesta, este módulo permitirá almacenar en el archivo de imagen la información relacionada con cada anotación que realice el usuario. Esta información se almacena en distintos campos de la información EXIF de acuerdo con

el significado de cada uno. Esta forma de almacenar la información en la propia imagen da la posibilidad al usuario de catalogar posteriormente las imágenes con cualquier software que sea capaz de manejar los datos EXIF. En la Tabla 15 se muestra los datos almacenados para cada imagen.

4.4.3 Módulo gestor de planos

El módulo gestor de planos es el encargado de leer y escribir los planos y modelos en diversos formatos. Este módulo es por tanto el que dota al sistema SICURA de compatibilidad con el resto de Software de diseño CAD. Por un lado debe ser capaz de interpretar los planos y modelos creados en el Software de diseño para su revisión. Por otro debe ser capaz de exportar la información generada durante la revisión a un formato compatible con dicho Software incluyendo cómo mínimo la información indicada en la metodología. En la implementación del sistema SICURA, se ha utilizado el formato DXF como formato de intercambio con los distintos Software CAD. El formato DXF es uno de los más extendidos y utilizados a la hora de compartir información en arquitectura porque es compatible con la mayoría de programas de diseño del mercado (AutoCAD, IntellCAD, FreeCAD, Solid Edge, ArchiCAD, Illustrator, etc.).

En el proceso de carga de los planos este módulo es el encargado de analizar el modelo y generar la estructura de capas. Esta estructura de capas será utilizada posteriormente para poder manejar partes del plano de forma independiente (cambiar su color, mostrar/ocultar, etc.).

4.4.4 Módulo de comunicación con la cámara

El módulo de comunicación con la cámara es el encargado de controlar las posibles cámaras IP incluidas en el sistema. El sistema SICURA no solo permite utilizar imágenes previamente capturadas, sino que contempla el uso de cámaras IP para revisión de la construcción en tiempo real. Este módulo implementa las instrucciones necesarias para: controlar una cámara IP de tipo PTZ (orientación y zoom), configurar la resolución de captura y obtener las imágenes de la cámara.

En entorno de construcción las comunicaciones inalámbricas sufren gran cantidad de interferencias debido a la maquinaria eléctrica (especialmente motores) empleados por los trabajadores. Esto unido a la malas conexiones de red existentes en las instalaciones provisionales montadas durante la construcción conllevan bajos anchos de banda y la necesidad de optimizar al máximo posible el tráfico con la cámara IP. Con este

objetivo este módulo se encarga de adaptar de forma dinámica la resolución utilizada por la cámara acorde al uso de la misma. Por ejemplo durante el movimiento de la cámara la resolución se reduce al mínimo para obtener las imágenes más rápidamente y que la interacción del usuario con la cámara sea más fluida.

4.4.5 Módulo de calibración del escenario

El módulo de calibración del escenario es el encargado de calcular la posición y orientación de la cámara real en el momento de capturar la imagen de fondo. El cálculo de dicha posición se realiza utilizando los parámetros intrínsecos de la cámara y correspondencias entre puntos de control en la imagen que se desea calibrar y sus equivalentes en el modelo o plano virtual. Para la calibración el sistema SICURA utiliza 4 puntos (cumpliendo con lo marcado en la metodología). La definición de los puntos se realiza en dos ventanas separadas, la primera muestra la imagen aumentada y la segunda los modelos virtuales sin imagen de fondo. El usuario arrastra con el ratón los 4 puntos en ambas vistas observando el resultado en la vista aumentada para comprobar que el resultado es el correcto.

La posición y orientación de la cámara se denominan parámetros extrínsecos, y cada vez que se modifican los puntos de control se calculan de nuevo utilizando el fichero de parámetros intrínsecos y las funciones de OpenCV *cvFindExtrinsicCameraParams2* y *cvRodrigues2*. El resultado de ambas funciones se combinará para crear la matriz de proyección asociada a dicha cámara.

Además de calcular los parámetros extrínsecos este módulo se encarga también de calcular la matriz de homografía que transforma el plano de la imagen para hacerlo coincidir con el modelo virtual. Una matriz de homografía es una transformación proyectiva que determina la correspondencia entre dos figuras geométricas. En este caso, para calcular la matriz, se utilizan como formas geométricas de entrada las formadas por los puntos de calibración en la imagen real y sobre la información virtual. Esta matriz de homografía es utilizada en el interfaz de usuario para ofrecer una visualización centrada en los datos virtuales, los planos, donde las imágenes aparecen deformadas para encajar sobre los mismos.

4.4.6 Módulo interfaz de usuario AR-CAD

El objetivo del sistema SICURA es introducir los beneficios de la Realidad Aumentada en el trabajo de revisión y control del proceso constructivo y para ello se ha

decidido no utilizar o crear frágiles dispositivos de visualización con sus propios métodos de interacción (como ocurre en la mayoría de aplicaciones AR). En el sistema SICURA se ha optado por aprovechar el conocimiento que ya tienen los usuarios de las herramientas CAD creando un interfaz similar. En las herramientas CAD el diseñador crea la información virtual, pero en el sistema SICURA también se incluyen todos los elementos necesarios para generar y utilizar las vistas aumentadas. De esta forma los usuarios al utilizar el sistema se sienten mucho más cómodos, puesto que el entorno es parecido al que utilizan a diario, y además el tiempo de aprendizaje es menor. A esta idea de extender los programas de CAD tradicionales la denominamos AR-CAD.

El interfaz de usuario se compone por un sistema de ventanas en el que encontramos ventanas de dos tipos: ventanas de configuración y ventanas de visualización. Las ventanas de configuración son ventanas con estructura de formularios a través de los cuales el usuario inserta u obtiene distintos tipos de información. Las ventanas de visualización son aquellas donde el usuario observa la escena aumentada y puede interactuar con la misma. Para ello se ofrecen dos modos de visualización diferentes atendiendo a donde se coloca la cámara virtual: centrado en la información real o centrado en la información virtual.

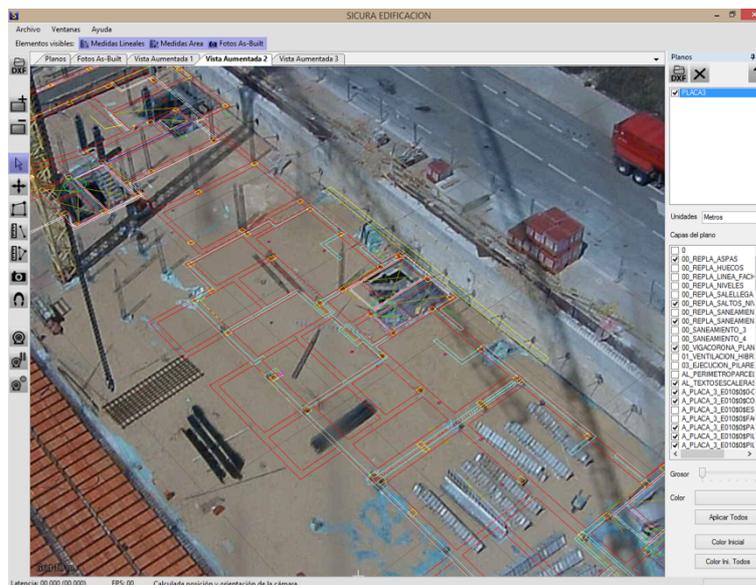


Figura 64. Visualización aumentada desde el punto de vista donde se capturó la imagen

El primer modo, centrado en la información real, se corresponde con los métodos de visualización AR convencionales donde la cámara virtual se coloca en la posición

calculada de forma que el usuario observa la imagen real de fondo y la información virtual superpuesta, Figura 64. En este modo el usuario puede realizar zoom y desplazarse pero estos movimientos se implementan modificando el frustum (o proyección) de la cámara virtual de forma que esta siempre permanece en la posición y orientación calculadas. Este modo sería el equivalente a un zoom digital donde la cámara pertenece estática pero el usuario puede enfocar la zona deseada para verla ampliada.

El segundo modo, centrado en la información virtual, se corresponde con los métodos de visualización de las herramientas de CAD. En este modo la cámara se coloca perpendicular al plano y las imágenes de fondo aparecen transformadas para coincidir con dichos planos (acorde a la calibración realizada previamente), Figura 65. En este modo, el usuario puede desplazarse y moverse de la misma forma que lo haría en los programas de CAD, y estos movimientos se implementan desplazando la cámara virtual siempre perpendicular a los planos. Este modo sirve para realizar inspecciones visuales y las imágenes reales solo deben tomarse como elementos de referencia puesto que al no observar las imágenes de fondo desde el punto de vista del que fueron capturadas, solo coinciden los objetos presentes en el plano de calibración. Este modo no debe utilizarse para realizar mediciones que involucren elementos reales, para lo que utilizaremos el modo centrado en la información real.

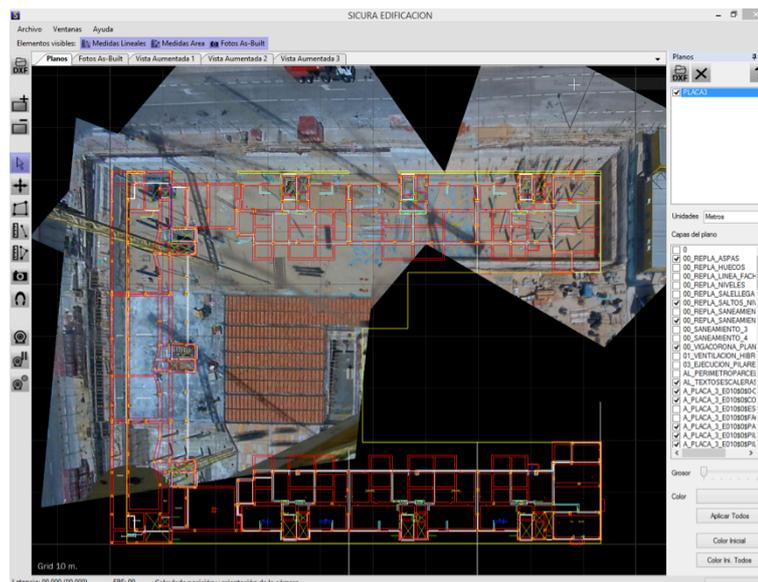


Figura 65. Visualización aumentada desde el punto de vista CAD

En la implementación de la visualización aumentada se ha utilizado como base la biblioteca OpenSceneGraph que ofrece un interfaz de alto nivel de la biblioteca de dibujado 3D OpenGL. Para transformar las imágenes de fondo se ha implementado un shader que modifica la imagen de acuerdo a la matriz de homografía calculada por el Módulo Background Calibration (apartado 4.4.5) durante la configuración del escenario aumentado. Este shader soluciona el problema de OpenGL de renderizado de planos compuestos por vértices irregulares, cómo se puede observar en la Figura 66. En dicha figura, el plano de la izquierda muestra la deformación de la textura producida por el modo en que OpenGL aplica la textura a cada uno de los triángulos que componen el plano. Esta deformación provoca que las información virtual, en este caso las 4 líneas de colores, no coincidan con el elemento al que se corresponden en la imagen original (centro de la figura). En la parte derecha de la figura, se observa como el shader corrige dicho problema produciendo la deformación esperada sobre la imagen al aplicarla sobre el plano de vértices irregulares. En este caso la información virtual encaja perfectamente, al igual que en la imagen original (centro).

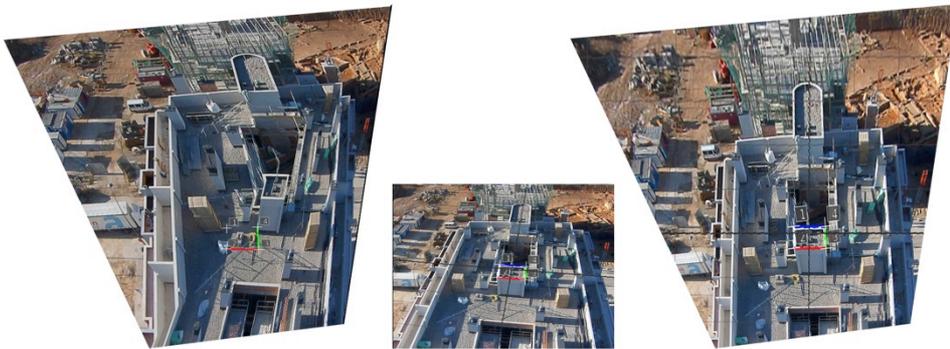


Figura 66. Error obtenido al aplicara una imagen sobre un plano OpenGL con vértices irregulares (izda.); corrección realizada con el shader (dcha.)

Durante la visualización aumentada el usuario puede modificar los parámetros visuales de cualquier elemento para hacerlo más o menos visible. En las aplicaciones de Realidad Aumentada a menudo la suma de información virtual y real hace que exista demasiada información y algunos detalles pasen desapercibidos. Para ello se ofrece la posibilidad de cambiar los parámetros visuales de tres formas: ocultar o mostrar, cambiar el color y grosor de línea o cambiar ajustes de la imagen. El primer caso se corresponde con la opción de ocultar todos aquellos planos o capas de planos que no se están comprobando en cada momento, de forma que la información virtual presente es solo la necesaria con lo que se simplifica la detección de errores. El segundo caso corresponde

con resaltar capas o modelos concretos, de esta forma no es necesario ocultar el resto de modelos puesto que el modelo resaltado se observa claramente. Por último se ofrece la posibilidad de modificar los parámetros de la imagen de fondo (brillo, contraste y saturación). Esta última opción es muy útil por ejemplo para distinguir los elementos reales y virtuales dejando la imagen con baja saturación. En este caso la imagen aparece en escala de grises mientras que la información virtual se representa en color. De esta forma no se pierde información pero ambos tipos son claramente distinguibles Figura 67.

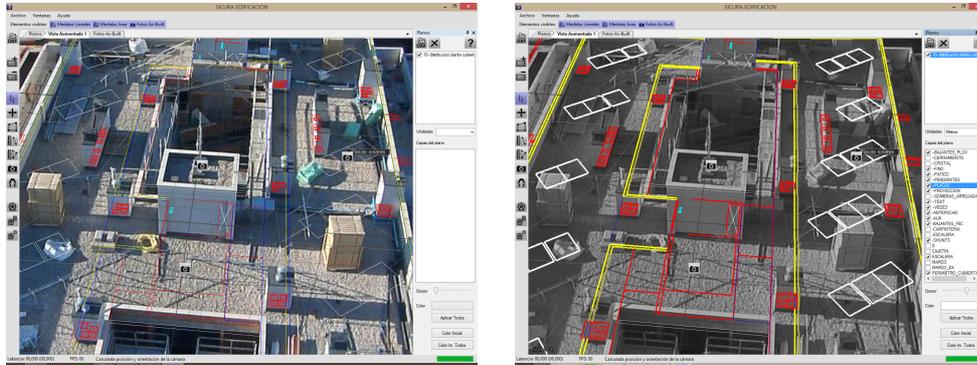


Figura 67. Modificación de los parámetros visuales de diversos elementos



Figura 68. Visualización del escenario aumentado utilizando una cámara PTZ

Para la inspección de elementos con imagen en tiempo real el interfaz de usuario permite controlar una o varias cámaras PTZ conectadas en red. En este modo de visualización aumentada el usuario no solo puede realizar zoom sobre la imagen, sino que puede cambiar la perspectiva de la cámara con unos sencillos controles basados en flechas. Este modo de visualización en directo permite no solo la inspección y control en tiempo real, sino que permite que un usuario se conecte de forma remota y pueda controlar varios entornos de construcción desde un único puesto de control. Además la

cámara PTZ, colocada en lugares estratégicos de la zona de construcción, permite observar y comprobar elementos que por algún motivo no son accesibles a pie. En cualquier momento el usuario puede capturar la imagen para realizar comprobaciones posteriores o para dejar constancia de algún defecto encontrado durante la inspección. En la Figura 68 se muestra un ejemplo de cómo al rotar la cámara cambia la perspectiva de la construcción mientras que la información virtual sigue correctamente superimpuesta sobre la imagen real.

4.4.7 Módulo de procesado de imagen

El módulo de procesado de imagen es el encargado de implementar el análisis de la imagen de fondo para mejorar la interacción del usuario durante el proceso de medición, anotación y calibración. El uso de características de la imagen para asistir al usuario produce un doble efecto en la interacción, mejorando tanto la precisión, como la velocidad en la selección de un elemento. Poniendo como ejemplo el caso en que un usuario quiere seleccionar el vértice de un elemento, presente en la imagen, para seleccionarlo con mayor precisión el usuario hace zoom hasta el punto en que la imagen se vuelve borrosa y es difícil distinguir dicho vértice. De esta forma el usuario utiliza un tiempo importante en encontrar el pixel exacto donde se encuentra dicho vértice, que no tiene porque coincidir exactamente con un pixel de la imagen. Por el contrario, utilizando características para asistir al usuario, cuando este acerca el ratón a una zona, donde se ha detectado alguna característica, el puntero se coloca directamente en la posición más próxima a dicho elemento(Figura 69 dcha.). De esta forma el usuario no necesita aplicar tanto zoom sobre la imagen para seleccionar un elemento y además realiza la selección con mayor precisión (precisión de sub-pixel).

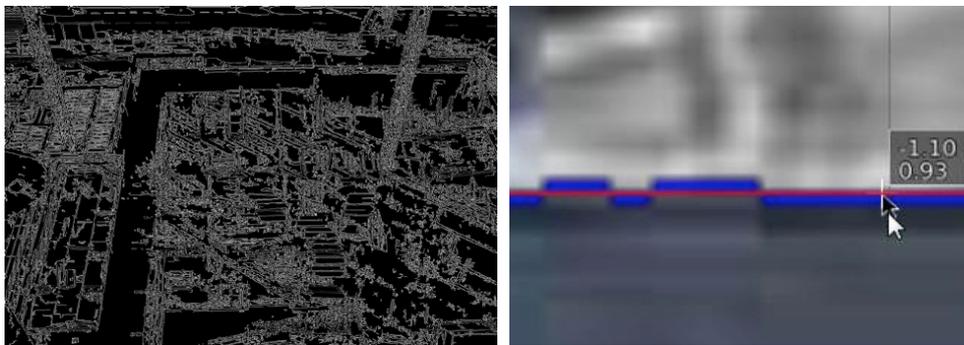


Figura 69. Resultado de la detección de contornos sobre la imagen (izda.); función de ajuste a línea del cursor durante la interacción del usuario (dcha.)

La precisión de sub-píxel en una imagen se obtiene gracias a la reconstrucción de formas presentes en la imagen a partir de la información de la misma, en este caso utilizando reconocimiento de líneas rectas sobre los contornos (Figura 69 izda.). Estas líneas permiten calcular los puntos de la misma con mayor precisión puesto que los puntos obtenidos ya no son unidades píxel, sino que se obtienen decimales, de ahí el nombre de precisión sub-píxel. En la Figura 69 (dcha.) se puede observar como la línea recta extraída (de color rojo) define el contorno de forma mucho más precisa que los píxeles de dicho contorno utilizados para su cálculo (de color azul).

Extracción de líneas rectas y vértices

Para implementar la extracción de líneas y vértices se ha utilizado como base la librería OpenCV de tratamiento de imágenes. La extracción de líneas se basa en detectar los contornos de la imagen para reconstruir líneas rectas en función de dichos contornos. Una vez obtenidas por combinación de las mismas se obtienen los vértices correspondientes. En la Figura 70, se muestra el algoritmo para la extracción de líneas rectas y vértices a partir de una imagen, junto con las funciones OpenCV utilizadas en cada paso.

El primer paso del algoritmo consiste en aplicar un desenfoque gaussiano a la imagen para eliminar el ruido de la imagen digital. Sin este desenfoque el proceso puede dar como resultado gran cantidad de líneas inexistentes que unen de forma aleatoria estos píxeles de ruido. Sobre la imagen suavizada se aplica un detector de contornos Canny utilizando un valor de umbralización calculado a partir de la imagen. El valor de umbralización adaptativo consigue que el algoritmo funcione independientemente de las condiciones de iluminación. Una vez obtenida la imagen binaria con los contornos, se aplica la transformada Hough para calcular las líneas rectas que forman dichos contornos. El resultado de este proceso muchas veces se corresponde con líneas partidas en trozos que no son interpretadas como la misma línea. Para solucionar este problema se aplica un proceso de combinación de estas líneas, Figura 70 dcha. En este proceso se comparan todas las líneas entre sí calculando el ángulo que forman y la distancia entre las mismas. Si ambas condiciones se cumplen se combinan ambas líneas en una formada por los dos vértices más distantes y se continúa con el proceso de combinación. Finalmente se aplica un proceso de combinación de las líneas para obtener los puntos de corte entre las mismas generando como resultado final una lista de líneas y una lista de vértices.

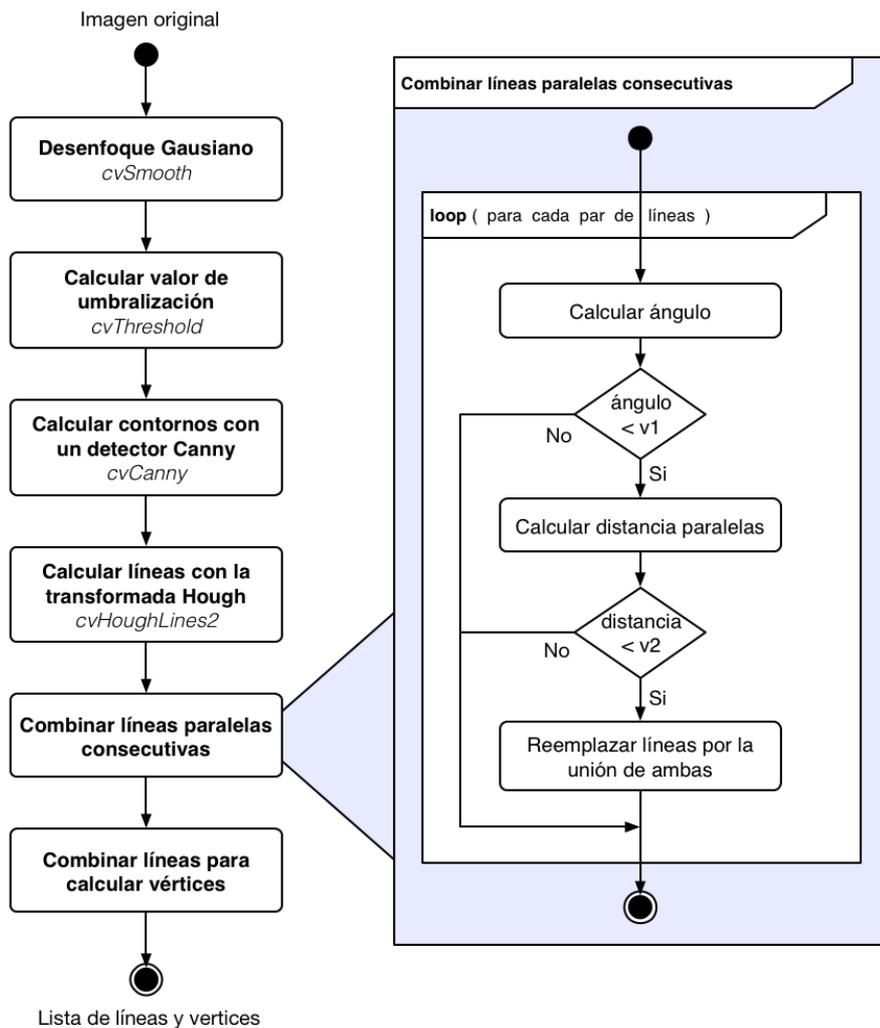


Figura 70. Algoritmo de extracción de líneas rectas a partir de la imagen original

4.4.8 Módulo de medición y anotación

El módulo de medición y anotación es el encargado de ofrecer aquellas funcionalidades relacionadas con la medida y anotación de posibles defectos encontrados. Para ello se ofrece al usuario cuatro herramientas diferentes:

- **Herramienta medición lineal.** Es la herramienta que permite definir dos puntos y calcula la distancia entre ambos. Esta herramienta recalcula la distancia mientras

el usuario mueve los puntos de forma que siempre tiene una noción de la distancia durante la definición de la misma.

- **Herramienta medición de área.** Es la herramienta que permite definir una lista de puntos sobre un plano, a partir de los cuales se calcula el área contenida. Esta herramienta permite añadir nuevos puntos con cada click del ratón hasta que el usuario pulsa la tecla enter. Una vez definidos los puntos el usuario puede modificarlos en cualquier momento para reajustar la medición. Esta herramienta calcula el área contenida en tiempo real mientras el usuario realiza la definición de la misma (a partir siempre de la definición del tercer punto). De esta forma el usuario tiene una noción del área que esta midiendo durante la definición de la misma. Esta herramienta permite la conversión de cualquier lado recto del contorno en lado curvo y viceversa. Cuando el lado se define como lado curvo aparecen dos nuevos puntos de control para modificar la curva, que siempre pasa por los puntos de los extremos. Para implementar los lados curvos se han utilizado curvas de Bezier.
- **Herramienta de anotación.** Es la herramienta que permite definir nuevas anotaciones en cualquier de las vistas aumentadas. Las anotaciones (siguiendo con lo marcado en la metodología) tienen los siguientes parámetros: Nombre, visible, fecha, comentarios, categoría/s, incidencia, descripción de la posición, posición 3D y foto. La herramienta de anotación se encarga de la gestión de las anotaciones sobre las vistas aumentadas (y definir su posición 3D), el detalle de cada anotación se gestiona en el formulario de gestión de anotaciones.
- **Formulario de gestión de anotaciones.** Es la herramienta que permite definir el contenido de cada una de las anotaciones y realizar búsquedas sobre el conjunto completo. El formulario de anotaciones, Figura 71 Dcha., se divide en una vista de imágenes y el detalle de la imagen seleccionada. El usuario puede seleccionar una anotación en cualquiera de las vistas aumentadas (con la herramienta de anotación) o en la lista de imágenes de este formulario. La parte superior del formulario muestra todos los campos editables de dicha anotación de forma que el usuario pueda modificarlos rápidamente. Este formulario además incluye un mecanismo de búsqueda de anotaciones basado en categoría/s, lugares o incidencia de forma que el usuario pueda gestionar un gran número de anotaciones no solo visualizándolas en el escenario aumentado. La información de cada anotación se almacena en los metadatos de la propia imagen, cómo se explica en el apartado 4.4.2.

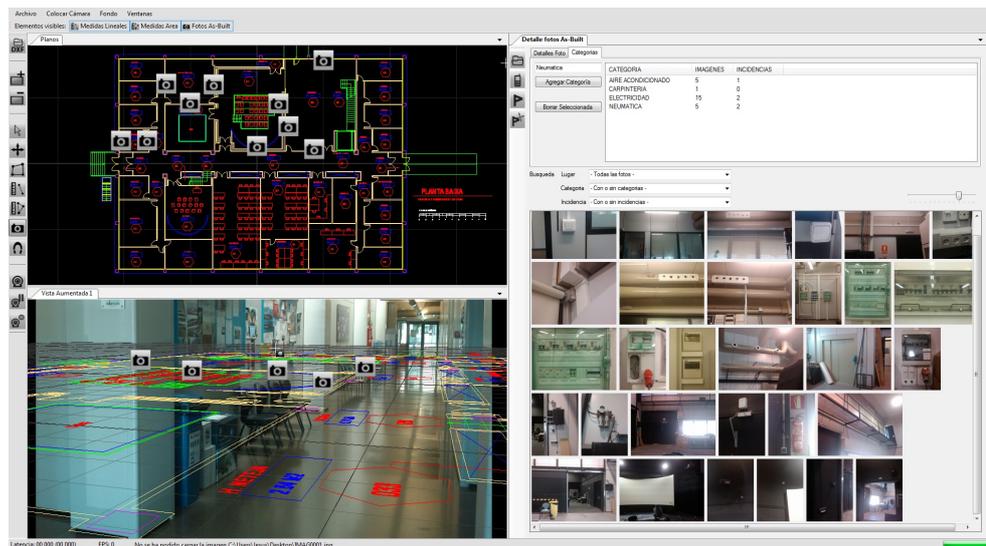


Figura 71. Anotaciones creadas en el escenario aumentado

4.5 Resultados experimentales

Con el objetivo de comprobar los resultados, tanto de la metodología propuesta, como del sistema implementado, se han realizado pruebas en diferentes escenarios de obra real. Estos escenarios representan tres prototipos de los trabajos de construcción que se realizan en obra civil: construcción de un parking de 3 plantas de gran superficie, rehabilitación de un edificio antiguo de 2 plantas y construcción de un edificio de viviendas de 7 plantas.

Estos tres escenarios han sido elegidos porque cada uno de ellos presenta características y problemáticas diferentes. En dos de los casos las comprobaciones se realizan sobre superficies horizontales, mientras en el tercero se realizan sobre fachadas verticales. Dos escenarios se encuentran en fase de cimentación, por lo que el sistema se utilizará sobre todo en trabajos de verificación. Mientras que el otro al tratarse de trabajos de rehabilitación el sistema se utilizará principalmente para añadir anotaciones y realizar mediciones de las zonas rehabilitadas. El escenario de construcción de un parking se corresponde con una zona de trabajo de gran maquinaria en área de trabajo de aproximadamente 10.000 m², mientras los otros dos son entornos de trabajo más comunes en edificación con un área inferior a 7.000 m². Además en cada uno de los escenarios se ha optado por un método diferente de adquisición de las imágenes del escenario real, acorde a las limitaciones de cada uno: cámara IP con video en tiempo real,

imágenes capturadas por un dron (vehículo aéreo no tripulado) o imágenes tomadas a pie con una cámara automática convencional.

Las pruebas se han desarrollado en el marco del proyecto SICURA financiado por el gobierno español en colaboración con la empresa DRAGADOS. Las dos primeras pruebas fueron realizadas por los respectivos jefes de obra para validar el funcionamiento del sistema. En la última prueba realizada en Rivas (Madrid), además del funcionamiento del sistema se realizó una sesión de evaluación con 12 usuarios donde se comparó el sistema con la manera de realizar mediciones tradicional utilizando una estación total. En la Tabla 14 se muestra una comparación de los diferentes escenarios donde se han realizado las pruebas del sistema. En los siguientes apartados se muestran las 3 pruebas realizadas describiendo en detalle el escenario, objetivos, metodología y resultados obtenidos en cada una de ellas.

	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3
Lugar	Aeropuerto de Manises (Valencia)	Complejo administrativo 9 de Octubre (Valencia)	Rivas (Madrid)
Fase de la construcción	Cimentación de la primera planta	Rehabilitación de la fachada	Cimentación de las plantas bajas
Descripción	Ampliación del parking de 3 plantas de 10.000 m ²	5 edificios de una antigua cárcel con dos plantas de aproximadamente 4.000 m ² cada uno	Edificio de viviendas de 7 plantas de 6.840 m ²
Objetivo	Comprobar el replanteo y la cimentación ya construida	Documentación de los trabajos de rehabilitación	Comprobar el replanteo y la cimentación ya construida
Tipo de fuente de imagen	Imágenes aéreas capturadas con un dron (vehículo aéreo no tripulado)	Imágenes capturadas a pie con una cámara automática	Vídeo en tiempo real de una cámara IP colocada en una grúa
Usuarios	Jefe de obra (arquitecto técnico)	Jefe de obra (Arquitecto técnico)	12 usuarios expertos en medición en obra

Figura 72. Tabla comparativa de los escenarios de pruebas

4.5.1 Escenario 1: Ampliación del parking del aeropuerto de Manises (Valencia)

Descripción del escenario

El primer escenario se corresponde con los trabajos de ampliación del parking del aeropuerto de Manises en Valencia. La nueva construcción se compone de una estructura de 3 plantas, sobre el nivel del suelo, con una cubierta superior de metal. Cada una de las plantas tiene un área aproximada de 10.000 m², con una forma no regular circunscrita en un rectángulo de 150 x 80 m. El área total se divide en 10 celdas, de forma que los

trabajos se llevan a cabo en cada una de las celdas de forma coordinada pero independiente, es decir, cada una de las celdas puede encontrarse en fases distintas de la construcción dependiendo de las decisiones de dirección de obra. En concreto las 6 celdas centrales se construirán coordinando el final de cada planta, mientras las 4 celdas exteriores se construirán una vez esta completada la cimentación de las 3 plantas de las celdas centrales.

En el momento de las pruebas se están realizando los trabajos de cimentación del nuevo aparcamiento. El proceso de cimentación es clave en la correcta construcción de cualquier edificación y pequeñas desviaciones pueden ocasionar importantes modificaciones en el proyecto final que suponga un elevado sobrecoste. El proceso de cimentación no se compone de una única tarea, sino que se divide en varias fases: replanteo, encofrado, hormigonado, desencofrado y curado. Estas fases se ejecutan de forma secuencial pero dada la extensión de la construcción no se ejecutan de forma simultánea en toda la planta. En este caso la cimentación de cada una de las plantas implica la creación de una losa de hormigón de unos 10.000 m² y un total de 320 pilares. Para comunicar las plantas entre sí el proyecto contempla la construcción de 2 rampas para vehículos y 8 escaleras para peatones.

Fuente de imagen: imágenes capturadas con un dron (vehículo aéreo no tripulado)

Siguiendo las recomendaciones de la metodología propuesta, para realizar tareas de revisión y control del proceso constructivo, las imágenes que describen el mundo real deben capturarse desde un punto, lo más perpendicular posible a la superficie que se desea medir. En este caso al tratarse del parking del aeropuerto no existen construcciones elevadas para realizar capturas de la superficie del nuevo parking. Además en este caso el colocar una cámara sobre la grúa queda descartado porque la altura de la grúa no es suficiente para observar correctamente todas las zonas del área de trabajo. Debido a estas restricciones, en esta prueba se utilizan imágenes capturadas desde un vehículo aéreo no tripulado (dron). En el sector de la construcción es común encontrar empresas que se dedican a ofrecer sus servicios de imágenes aéreas de forma periódica. Actualmente estas imágenes se utilizan para documentar los trabajos de construcción. En este caso en concreto se contrató el servicio para realizar capturas periódicas desde diferentes puntos de vista del área de construcción.

Objetivos

El objetivo principal de esta prueba es comprobar que se puede llevar a cabo la metodología propuesta para controlar el proceso constructivo, utilizando el sistema SICURA, durante la fase de cimentación de una construcción de pocas plantas pero gran extensión (parking de 3 plantas).

En este caso concreto para realizar comprobaciones sobre el entorno real durante la cimentación se persiguen los siguientes objetivos concretos:

- Configurar el escenario aumentado utilizando imágenes capturadas por un dron
- Visualizar correctamente el escenario aumentado
- Comprobar la posición de los 320 pilares de cada planta
- Comprobar la posición de los huecos de rampas y escaleras
- Realizar mediciones de las diferentes zonas de hormigonado

Metodología

Para realizar las pruebas se ha utilizado como información virtual los planos de estructura. Estos planos en formato DXF se componen de 20 capas, compuestas de líneas y textos con distintos colores asignados en el programa CAD de origen y un total de 46.952 vértices y 19.134 líneas. El plano utilizado se muestra en la .

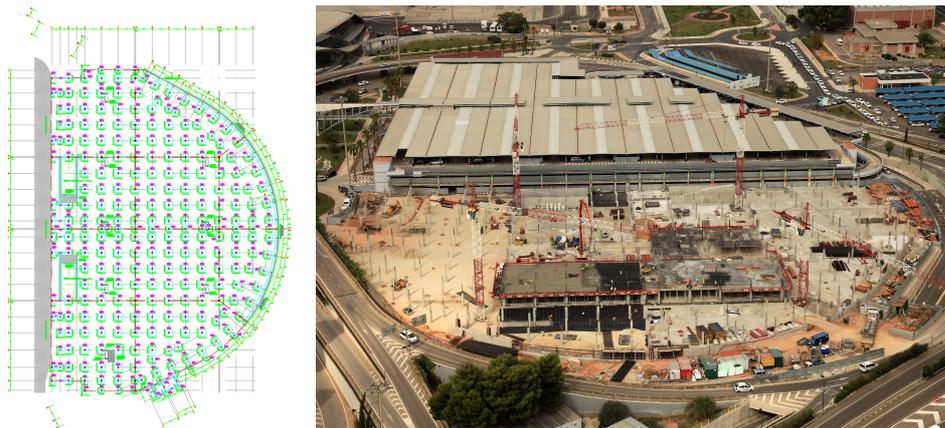


Figura 73. Plano y vista del entorno de trabajo

Para capturar las imágenes del mundo real se ha utilizado una cámara colocada sobre un dron. Las capturas se realizan desde varias perspectivas, a una altura mínima de 75 metros y máxima de 160 metros. La resolución de las imágenes capturadas por la cámara es de 3.924 x 2.616 píxeles y ofrece vistas completas de todo el área de trabajo,

como se puede observar en la Figura 73 (dcha.). Al utilizar imágenes de una empresa externa no es posible realizar una calibración de la cámara. Por ello se debe crear un fichero de los parámetros intrínsecos de la cámara a partir de la información EXIF de las imágenes. El formato de dicho fichero, y las formulas para calcular cada uno de los parámetros son las descritas en el apartado 4.3.1.

El ordenador utilizado para las pruebas fue un portátil Dell, con un procesador Intel Core 2 Duo T9300 a 2.5 GHz, 4 GB de memoria RAM y una tarjeta gráfica NVidia GeForce 8600M GT con una memoria de 512 MB dedicados. Este ordenador se conectó a la red de Dragados a través del puerto Ethernet de 100 Mbps y se colocó dentro de las oficinas provisionales de la obra.

Las pruebas del sistema son realizadas en diferentes fases de los trabajos de cimentación a lo largo de un año por el jefe de obra. El perfil del usuario es muy técnico, tiene la titulación de Arquitecto Técnico y es usuario experto de programas CAD. Durante dicho periodo el usuario realiza pruebas con el sistema orientadas a solucionar dos tareas concretas de su trabajo diario: revisión de pilares/huecos y medición de superficies de cimentación. Además de los resultados instantáneos que el usuario aplica en su trabajo real, para cada una de las pruebas el usuario almacena el proyecto completo con objetivo de poder analizar los resultados posteriormente. Antes de realizar las pruebas se realizó una sesión de formación de 2 horas en las que se presentó el proyecto SICURA, y se explicó el funcionamiento del sistema. Además durante la realización de las pruebas se ofrece soporte técnico al usuario para asesorarle en el uso de la herramienta cuando sea necesario. Finalmente se realiza una entrevista final en la que el usuario entrega los resultados recogidos y expresa su opinión sobre el funcionamiento y aplicación del sistema evaluado.

Resultados

Durante las pruebas realizadas por el jefe de obra, a lo largo de la cimentación del anexo del parking del aeropuerto de Manises (Valencia), se han obtenido los siguientes resultados destacables. En primer lugar, el usuario ha realizado correctamente la configuración del escenario aumentado utilizando cada una de las imágenes capturadas por el dron (y el fichero de configuración creado a partir de la información EXIF de la imagen). En la Figura 74 se observan tres ejemplos con tres vistas del escenario aumentado. En estos ejemplos se ha resaltado la separación entre las 10 celdas de trabajo (línea roja). Las imágenes pertenecen a distintos momentos de la cimentación, pudiéndose observar la evolución de los trabajos. Este primer resultado ha permitido al

jefe de obra realizar trabajos de inspección visual de toda la construcción y mantener un fichero con la evolución de los trabajos. El fichero generado permite al jefe de obra revisar cualquier elemento visible en las imágenes pudiendo realizar nuevas mediciones en momentos posteriores si fuese necesario.

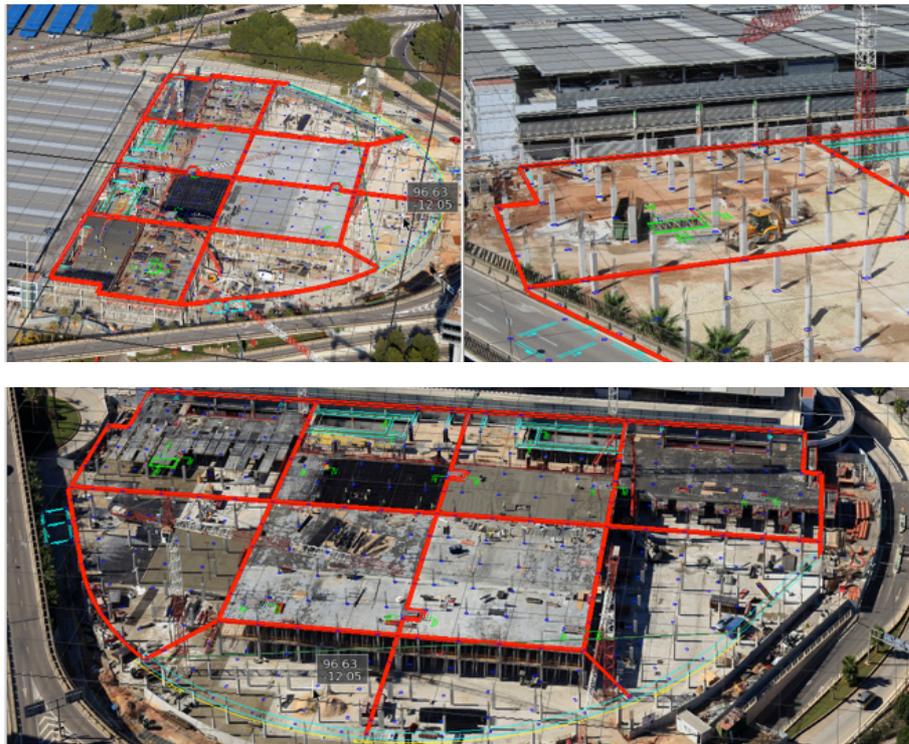


Figura 74. Diferentes vistas del escenario aumentado utilizando diferentes imágenes capturadas por el dron

El segundo resultado obtenido durante la evaluación ha sido la facilidad con que el jefe de obra ha sido capaz de identificar errores de bulto. Una vez configurado el escenario aumentado, el usuario puede realizar zoom sobre la imagen e inspeccionar en detalle la obra. En las pruebas la resolución de las fotos aéreas (3.924 x 2.616 píxeles) ha demostrado ser resolución suficiente para realizar las tareas de revisión y control en este escenario. Muestra de ello es la Figura 75, donde se observa en detalle una de las zonas de la imagen. En la visualización aumentada de dicha figura se puede observar la posición de los pilares en el plano indicada por las líneas azules, el hueco de la futura escalera indicado por líneas verdes y los límites de las celdas de trabajo indicados por líneas rojas. La posición de cada elemento virtual se muestra, en este caso, sobre el nivel final de la cimentación, por lo que las líneas azules aparecen elevadas sobre el suelo irregular aún sin

cimentar. En esta imagen vemos como, sin realizar ninguna medición adicional, el usuario puede observar fácilmente la ausencia de dos pilares en la parte superior izquierda. Esta rápida detección de errores de bulto es un resultado muy destacable del experimento, puesto que permite detectar en fases tempranas de la construcción errores que condicionarían la construcción final. En este caso se puede observar como los dos pilares ausentes no se han realizado para facilitar el acceso a las maquinas a la zona de trabajo.

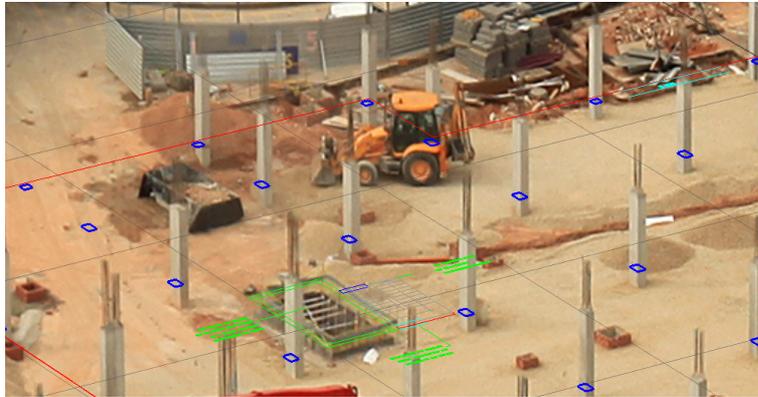


Figura 75. Detalle la posición de los pilares al nivel de la cimentación de la planta baja (líneas azules) donde se observa que faltan dos pilares. La diferencia de altura de las líneas azules indica el relieve irregular de la superficie inicial

Durante las pruebas realizadas, el usuario además de realizar labores de inspección ha utilizado las herramientas de medición para controlar los trabajos de hormigonado de cada planta. Una de las responsabilidades del jefe de obra es controlar el correcto abastecimiento de los materiales de obra, entre ellos el hormigón utilizado durante la cimentación. La extensa superficie de cada una de las plantas implica que el hormigonado se realice por secciones, por lo que la medición del área de cada superficie debe realizarse por separado. La herramienta propuesta ha permitido al usuario realizar las mediciones de dichas superficies, incluso durante los trabajos de cimentación, ya que no es necesario caminar sobre la superficie para realizar las comprobaciones. En la Figura 76 se muestra un ejemplo de medición de una superficie irregular sobre la que se está trabajando. Esta habilidad para realizar mediciones de superficies en cualquier momento, del que se disponga de una imagen, es un resultado importante destacado por el usuario en la entrevista final. Aunque sin precisar los errores obtenidos durante la medición de dichas áreas, el usuario destacó que los resultados obtenidos eran válidos para las tareas de control.

En la misma Figura 76 puede observarse otro resultado, y es que los controles de las propiedades de la imagen de fondo permiten mejorar la visualización de los elementos virtuales sobre la imagen. En este caso se ha reducido la saturación, incrementado el contraste y reducido el brillo. En la imagen se observa como la línea amarilla que representa la medición, se distingue mejor que sobre la imagen original. La imagen en escala de grises resultado mantiene la información del mundo real pero la diferencia de la información virtual. Los ajustes en la imagen de fondo dan como resultado que el usuario puede elegir la visualización aumentada que mejor se adapte a sus necesidades.

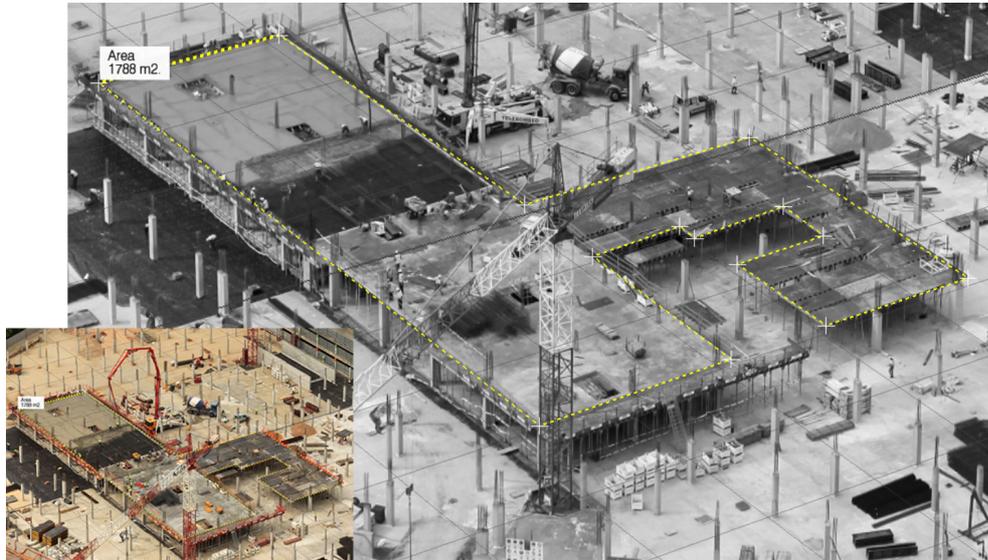


Figura 76. Ajuste de la saturación de la imagen de fondo en el programa SICUAR para mejorar la visualización de la medición del área de cimentación durante los trabajos de hormigonado. La línea amarilla representa la medición sobre el fondo con menor saturación (dcha.) y sobre la imagen original (izda.)

Finalmente durante la entrevista realizada con el usuario al finalizar las pruebas este manifestó la utilidad del sistema evaluado. El usuario resalto la gran ventaja que ofrece el sistema al ser capaz de ir revisando los trabajos de construcción, generando mediciones y obteniendo un informe final con todas ellas sin necesidad de realizar esta documentación de forma manual. Expresó su opinión de que la introducción de un sistema de este tipo, en la metodología de trabajo de Dragados, ahorraría tiempo en los trabajos de control y permitiría a los técnicos realizar comprobaciones de forma remota en cualquier momento. En cuanto a aspectos negativos destaco sobre todo el inconveniente de tener que recurrir a otra empresa para realizar las capturas aéreas y no

poder obtener imágenes en tiempo real. Este hecho limitó los momentos en los que el usuario pudo realizar las comprobaciones por medio de la visualización aumentada.

4.5.2 Escenario 2: Reforma del 9 Octubre (Valencia)

Descripción del escenario

El escenario se corresponde con los trabajos de rehabilitación de la antigua cárcel de Valencia, para su reconversión en oficinas, dentro del complejo administrativo Nou de Octubre. Concretamente las pruebas se han realizado durante la rehabilitación de las fachadas de los 5 edificios correspondientes a los antiguos pabellones de la cárcel. En la Figura 77, se puede observar el estado previo y el estado posterior de la rehabilitación.



Figura 77. Estado de los edificios antes (izda.) y después de la rehabilitación (dcha.)

Los trabajos de rehabilitación de la fachada se agrupan en 4 tipos: reconstrucción de zonas derruidas, reconstrucción de elementos parcialmente derruidos, eliminación de suciedad de la fachada y un tratamiento final para uniformizar el aspecto de la misma. A diferencia del caso anterior de estudio anterior (cimentación de un parking) donde la obra se dividía en 10 grandes zonas, en este caso los trabajos se realizan de forma dispersa en los puntos de las fachadas donde son necesarios por lo que la planificación y documentación de los mismos es mucho más costosa. Como trabajo previo un equipo de técnicos analiza cada una de las fachadas y documenta los trabajos necesarios en cada una de ellas. Este trabajo incluye para cada punto: añadir una anotación en el plano, describir el estado actual y describir los trabajos necesario para su rehabilitación, todo ello adjuntando las imágenes necesarias. En la actualidad esta labor se realiza sobre 2 tipos de documentos totalmente diferenciados, por un lado los planos y por otro la memoria descriptiva. Siendo el técnico quien mantiene manualmente las referencias numéricas que identifican los elementos en cada documento.

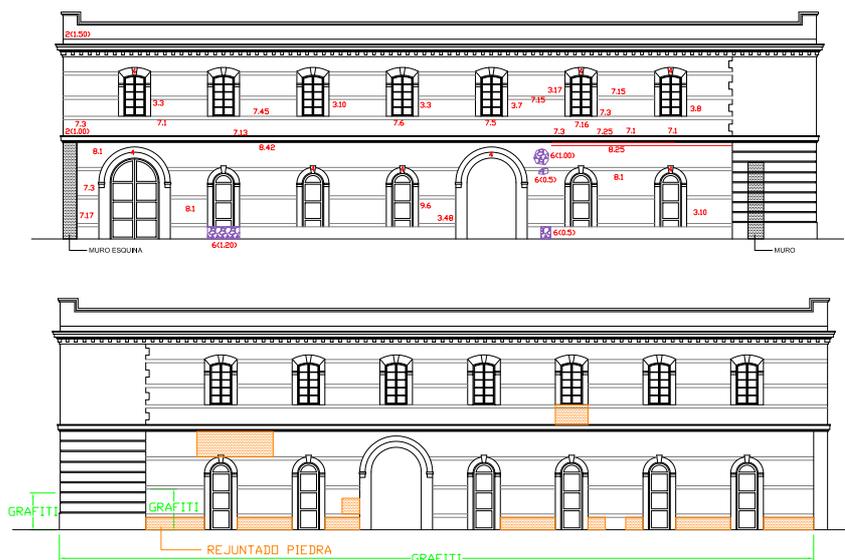


Figura 78. Ejemplos de los planos creados por los técnicos para documentar las actuaciones previstas sobre la fachada

Fuente de imagen: fotografías realizadas por el usuario

La metodología propuesta indica que para realizar comprobaciones sobre una superficie el método óptimo es utilizar imágenes perpendiculares a dicha superficie. En este caso puesto que se desea realizar comprobaciones sobre las fachadas, con una altura máxima de 4 alturas, se ha optado por realizar las capturas utilizando una cámara automática y un trípode. Aunque la posición óptima para capturar las imágenes es siempre desde una posición perpendicular a la superficie, en muchos casos no ha sido posible realizarlas de esta forma. En algunos casos elementos de la obra entorpecían la visión directa de los elementos. En otros la especial configuración en estrella de los edificios hacia imposible colocarse a una distancia suficiente para realizar imágenes de la fachadas completas. Por estos motivos muchas de las imágenes utilizadas están tomadas en perspectiva, lo que provoca en algunos casos resultados no deseados como se muestra en los resultados.

Objetivos

El objetivo principal de esta prueba es comprobar que se puede llevar a cabo la metodología propuesta para controlar el proceso de rehabilitación de fachadas, utilizando el sistema SICURA.

En este caso concreto para realizar comprobaciones sobre el entorno real durante la rehabilitación se persiguen los siguientes objetivos concretos:

- Configurar el escenario aumentando utilizando imágenes capturadas a pie por el usuario
- Visualizar correctamente el escenario aumentado
- Añadir anotaciones sobre el escenario aumentado para documentar los trabajos realizados
- Realizar mediciones de los distintos puntos de intervención sobre la fachada

Metodología

Para realizar las pruebas se ha utilizado como información virtual los 10 planos de las fachadas de los 5 edificios (frontal y trasera) creados por los técnicos durante la revisión previa del escenario. Estos planos en formato DXF se componen de 5 capas, compuestas de líneas y textos con distintos colores asignados en el programa CAD de origen. Los 10 planos tienen características muy similares, puesto que la topología de las fachadas es similar. Cada plano contiene alrededor de 90.000 vértices y 45.000 líneas. Dos de los planos utilizados se muestran en la Figura 78.

Para capturar las imágenes del mundo real se ha utilizado una cámara compacta Canon IXUS 210. Las capturas se realizan desde varias perspectivas, utilizando un trípode y siempre procurando colocarse en una orientación perpendicular a la fachada. La resolución de las imágenes capturadas por la cámara es de 1.600 x 1.200 píxeles y ofrece vistas parciales de las fachadas. La cámara fue calibrada antes de la prueba para obtener los parámetros intrínsecos. Para ello se capturaron 30 imágenes desde diferentes puntos de vista de un patrón en forma de tablero de ajedrez de 6 x 8 casillas. A partir de estas imágenes se realizó el cálculo de los parámetros intrínsecos utilizando la biblioteca OpenCV.

El ordenador utilizado para las pruebas fue un portátil Dell, con un procesador Intel Core 2 Duo T9300 a 2.5 GHz, 4 GB de memoria RAM y una tarjeta gráfica NVidia GeForce 8600M GT con una memoria de 512 MB dedicados.

Las pruebas del sistema son realizadas durante la fase final de los trabajos de rehabilitación de las fachadas, a lo largo de 2 semanas por el jefe de obra. El perfil del usuario es muy técnico, tiene la titulación de Arquitecto Técnico y es usuario experto de programas CAD. Durante dicho periodo el usuario realiza pruebas con el sistema orientadas a solucionar una tarea concreta, revisión y documentación de los trabajos de

rehabilitación realizados. Antes de realizar las pruebas se realizó una sesión de formación de 2 horas en las que se presentó el proyecto SICURA, y se explicó el funcionamiento del sistema. Además durante la realización de las pruebas se ofrece soporte técnico al usuario para asesorarle en el uso de la herramienta cuando sea necesario. Finalmente se realiza una entrevista final en la que el usuario entrega los resultados recogidos y expresa su opinión sobre el funcionamiento y aplicación del sistema evaluado.

Resultados

Durante el uso del sistema, por parte del jefe de obra, en los trabajos de rehabilitación de las fachadas se han obtenido los siguientes resultados destacables. El primer resultado es que se ha configurado correctamente el escenario aumentado utilizando como base las imágenes capturadas a pie por el usuario. En este caso cada imagen representa una vista parcial de alguna de las fachadas por lo que es necesario calibrar cada una de las imágenes obteniendo el resultado que muestra la Figura 79.

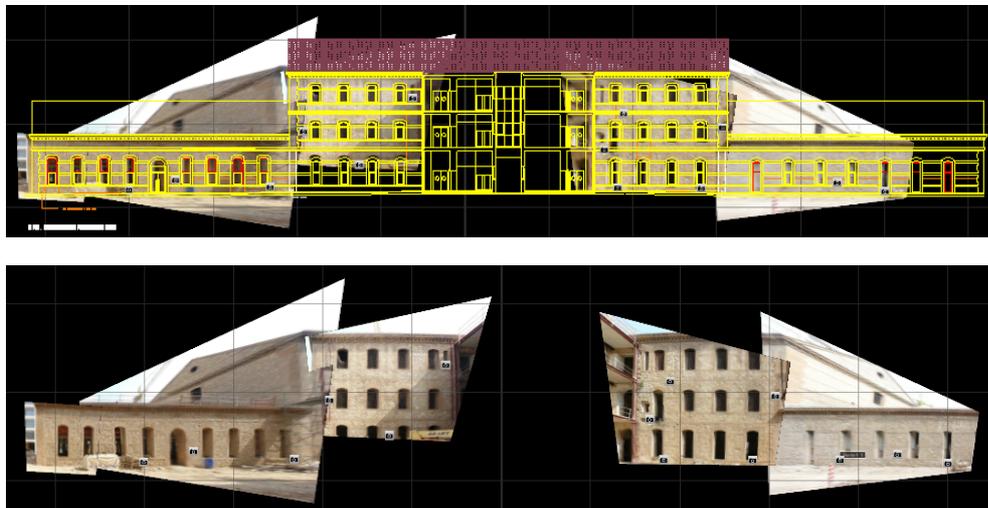


Figura 79. Vista desde el punto de vista CAD del escenario aumentado compuesto por 5 imágenes, correspondiente a la fachada trasera del edificio 2 (arriba); misma vista con todas las capas del planos ocultas para observar las anotaciones directamente sobre la imagen de la fachada (abajo)

En esta figura observamos el escenario aumentado, desde el punto de vista CAD, con el plano de la construcción superpuesto (arriba) y ocultando todas sus capas (abajo). En esta imagen se observa como el punto de vista CAD (con la proyección de las imágenes de fondo) muestra una vista similar a la que el usuario obtiene en el programa de diseño que utiliza habitualmente. En esta vista se observa como existe un exceso de información cuando toda la información se encuentra presente. Para ello las herramientas de ocultar y

mostrar elementos permiten generar resultados como el de la misma figura en la parte inferior. En este caso utilizando la opción de ocultar el plano el usuario puede observar solo las imágenes con las anotaciones incluidas. Esta vista es especialmente útil por ejemplo en el caso de que el usuario quiera revisar las anotaciones creadas.

El segundo resultado importante es que este método de inspección y revisión permite al usuario añadir información sobre la propia imagen del escenario real (mediciones y anotaciones). De esta forma el usuario no necesita mantener una documentación adicional, sino que en cada vista aumentada puede añadir la información que desee manteniendo toda la información en un único documento. En la Figura 80 se muestra un ejemplo de este resultado. En este caso la visualización aumentada se observa desde el punto desde el que se capturo la imagen de fondo. El usuario ha ocultado el plano virtual porque en este momento su necesidad no es comparar la realidad con dicho plano virtual, sino realizar anotaciones sobre dicha realidad. En la imagen observamos como el usuario ha añadido dos tipos de información virtual: 7 anotaciones y 4 mediciones de área.

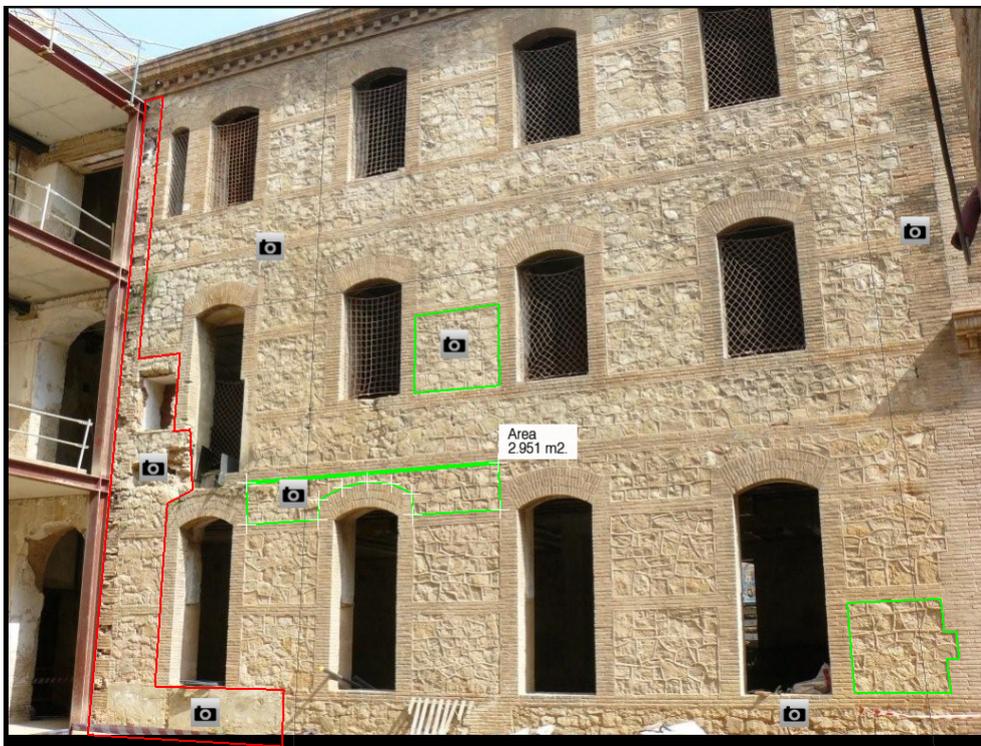


Figura 80. Anotaciones y mediciones realizadas sobre una de las fachadas para documentar los trabajos realizados

Las anotaciones (icono cámara) están colocadas en puntos donde se ha realizado alguna actuación, o debe realizarse. Además cada anotación lleva asociada una descripción, categoría (tipo de trabajo), fecha, si es una incidencia y una imagen asociada (en caso necesario). El usuario puede acceder a la información de cada anotación simplemente pinchando sobre ella, lo que conlleva un manejo mucho más fluido de la información. El uso de este sistema ofrece como resultado una información contextualizada de las anotaciones, puesto que ya no aparecen en un documento aparte, sino que aparecen sobre el punto del escenario real al que hacen referencia.

Las mediciones de área han permitido al usuario medir áreas de la fachada real sobre la propia imagen de dicha fachada. En este escenario las mediciones han resultado ser útiles en dos tareas concretas: medir zonas donde se debe realizar una actuación para planificar el tiempo y estimar el coste, o medir zonas ya reparadas para realizar el informe final. Con el objetivo de distinguir ambos tipos de mediciones el usuario ha utilizado un código de color, utilizando líneas rojas en las mediciones de trabajos pendientes y líneas verdes en las de trabajos ya realizados. En la Figura 80 se puede observar como en la parte izquierda se incluye una medición de área, la cual se ha utilizado para estimar el tiempo de actuación necesario. En el resto de la imagen encontramos tres mediciones verde que delimitan zonas ya reparadas. La posibilidad de crear mediciones con un número variable de puntos ha resultado ser adecuada par medir incluso zonas irregulares, como es el caso de la medición roja. En la Figura 81 se puede observar en detalle una medición realizada por el usuario en la que se incluye un lado curvo. En este caso el uso de los dos puntos de control utilizados para controlar la curva de Bezier correspondiente a ese lado, ha dado como resultado la definición de un área que reproduce fielmente la zona de trabajo que se deseaba medir.



Figura 81. Ejemplo de medición de área incluyendo lados curvos

Un resultado negativo encontrado durante las pruebas ha sido la configuración y visualización del escenario aumentado utilizando imágenes capturadas con demasiada perspectiva. En la Figura 82 se observa el escenario aumentado compuesto por dos imágenes de fondo. Estas imágenes como se puede observar en la parte inferior de la Figura 82, están capturadas con demasiada perspectiva.

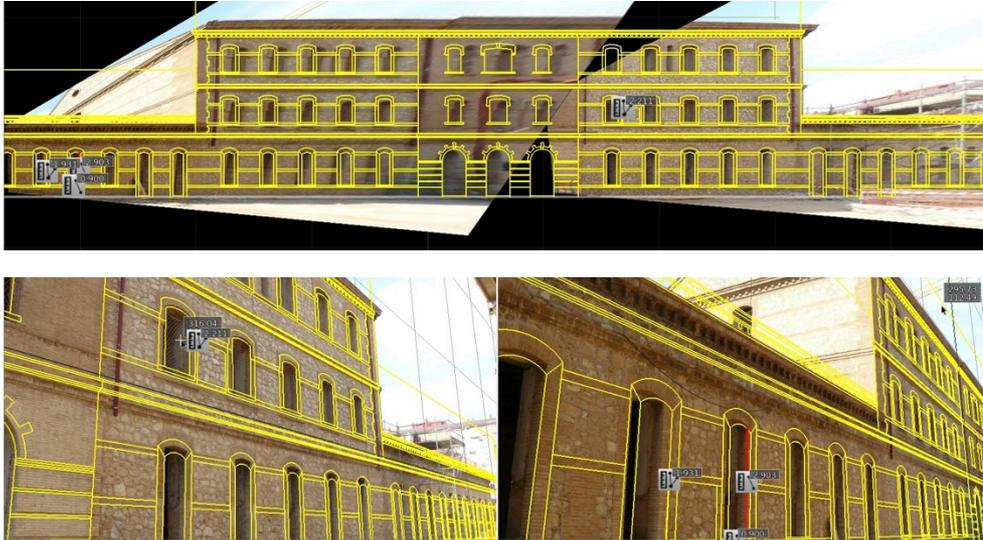


Figura 82. Ejemplo de error en la visualización desde el punto de vista CAD (arriba) al utilizar imágenes de fondo con demasiada perspectiva; vista de las dos imágenes desde el punto de vista de la cámara (abajo)

El resultado en este caso es la incorrecta visualización del escenario sobre todo desde el punto de vista CAD (parte superior de la imagen). En este punto de vista podemos observar, como la parte central y la parte derecha, correspondientes a las zonas más alejadas al capturar las imágenes de fondo, aparecen distorsionadas. Además en estas zonas, debido a la perspectiva y la distancia, los elementos de la construcción ocupan muy pocos píxeles en la imagen. Este hecho da como resultado que aunque no apareciesen deformados, las mediciones no serían fiables, puesto que la información del mundo real es insuficiente.

4.5.3 Escenario 3: Rivas (Madrid)

Descripción del escenario

El escenario se corresponde con la comprobación del proceso de cimentación de la primera planta de un edificio de viviendas de 7 plantas en Las Tablas (Madrid). El

edificio tiene una estructura formada por tres bloques en forma de C, con un superficie aproximada de 95 x 72 m. En el momento de las pruebas ya se han construido las plantas correspondientes a los sótanos y aparcamientos subterráneos, y los trabajos actuales son de cimentación de la primera planta.

El proceso de cimentación, como ya se ha explicado previamente, es clave en la correcta construcción de un edificio y dicho proceso se divide en varias fases. Estas fases se ejecutan de forma secuencial pero dada la extensión de la construcción no se ejecutan de forma simultánea en toda la planta. En este caso cada planta se divide en 8 zonas en las que se trabaja de forma independiente. Una vez se completa la cimentación de las 8 zonas se pasa a cimentar la siguiente planta superior de igual modo hasta concluir las 7 plantas. Cada una de las fases de cimentación involucra a distintos tipos de personal y durante algunas de ellas es muy complicado acceder a las zonas de trabajo para realizar comprobaciones.

Puesto que en cada una de las 8 zonas se realiza la cimentación por separado, en cada una de ellas nos podemos encontrar con unas condiciones de trabajo totalmente diferentes. En particular en este escenario nos encontramos los siguientes casos. En las zonas donde se lleva a cabo el replanteo aparecen marcadas en el suelo la futura posición de los pilares y huecos de la planta, con lo que el entorno es diáfano y de fácil tránsito. Sin embargo a partir del encofrado la zona de trabajo queda cubierta de estructuras metálicas y de madera sujetas por puntales que dificultan en gran medida el trabajo de medición. Durante la fase de hormigonado es cuando se crean físicamente las nuevas estructuras, que no serán visibles hasta que se retiren todos los elementos auxiliares en el desencofrado.

Fuente de imagen: Cámara IP colocada sobre una grúa

El edificio se encuentra en la primera fase de construcción, concretamente en la cimentación de la primera planta. La metodología propuesta indica que para realizar comprobaciones sobre una superficie el método óptimo es utilizar imágenes perpendiculares a dicha superficie, que además deben contener puntos de referencia para realizar la configuración del escenario aumentado. En este caso puesto que se desea realizar comprobaciones sobre la planta del primer piso es necesario una fuente de imagen elevada que abarque una zona considerable de dicha planta. La zona donde se encuentra el edificio en construcción es una zona de reciente urbanización, donde no existen estructuras elevadas cercanas desde las que capturar imágenes de la primera planta. Por este motivo se decide la colocación de una cámara PTZ en lo alto de una grúa

de 75 metros que permite obtener una vista adecuada para realizar comprobaciones sobre la planta del edificio, Figura 83 (dcha.).

Una cámara PTZ (Pan-Tilt-Zoom) es una cámara que incorpora dos motores y permite controlar de forma remota su orientación, elevación y zoom. La cámara utilizada para las pruebas es la cámara Toshiba IK-WB21A. Está cámara incorpora un zoom óptico de 22x y tiene una resolución máxima de 1280 x 960 píxeles. El ángulo de giro de $\pm 175^\circ$ a una velocidad de 300° por segundo, y un ángulo de elevación de -30° a 90° a una velocidad de 200° por segundo. Para la conexión incorpora un interfaz Ethernet (RJ45).

La cámara PTZ seleccionada incorpora una cúpula de protección para su colocación en exterior. Sin embargo, debido a las condiciones adversas del entorno de construcción, el clima no es el único factor que puede afectar a la cámara. El ruido eléctrico producido por los motores utilizados en la maquinaria de construcción hace necesario proteger el hardware de posibles picos de tensión. Además los mandos inalámbricos de la maquinaria interfiere con la señal WiFi lo que hace imposible utilizar este protocolo para conectar la cámara a la red corporativa de Dragados. Por estas razones se diseñó una caja de protección que incorpora los elementos necesarios para ofrecer una mayor resistencia tanto a climatologías adversas y golpes, como a problemas con el suministro eléctrico e interferencias. La caja de protección se compone por una cubierta IP65 con la parte inferior transparente por donde la cámara puede capturar las imágenes. En su interior un SAI (sistema de alimentación ininterrumpida), provisto de batería, protege a toda la electrónica de problemas eléctricos y un temporizador apaga el sistema durante la noche. Para mejorar la conexión inalámbrica un router 3G, perteneciente a la infraestructura de red móviles de Dragados, ofrece una conexión inalámbrica más robusta que la señal WiFi. En la Figura 83 (izda.) se muestra una imagen del montaje completo identificando cada uno de sus componentes.

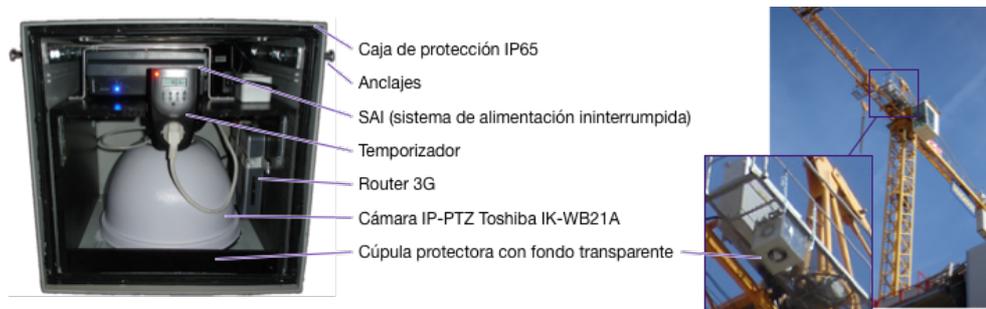


Figura 83. Caja de protección para la cámara IP (izda.); colocación en lo alto de una grúa (dcha.)

Objetivos

El objetivo principal de esta prueba es comprobar que se puede llevar a cabo la metodología propuesta para controlar el proceso constructivo, utilizando el sistema SICURA, durante la fase de cimentación de un edificio. En este caso para realizar comprobaciones sobre las señales creadas durante el replanteo y comparar la cimentación ya construida con la posición ideal marcada por los planos de obra. Para ello se pretende cumplir con los siguientes objetivos concretos:

- Configurar el escenario aumentando utilizando la cámara PTZ como fuente de imagen
- Visualizar correctamente el escenario aumentado en los dos tipos de vistas proporcionadas
- Comprobar la posición de 24 puntos de control colocados durante el replanteo

Metodología

Para realizar las pruebas se ha utilizado como información virtual los planos de estructura de la planta primera (denominada Placa 3). Estos planos en formato DXF se componen de 80 capas, compuestas de líneas y textos con distintos colores asignados en el programa CAD de origen y un total de 20.816 vértices y 11.875 líneas. El plano utilizado se muestra en la Figura 84 (izda.).

Para capturar las imágenes del mundo real, se ha utilizado la cámara Toshiba IK-WB21A colocada sobre una grúa, como muestra la Figura 83, a una altura de 75 metros. La cámara se ha conectado a la red corporativa de Dragados por medio de un router 3G colocado en su misma caja sobre la grúa. La resolución de las imágenes capturadas por la cámara es de 1280 x 960 píxeles y ofrece vistas parciales de la superficie de la primera planta, como se puede observar en la Figura 84 (dcha.). La cámara fue calibrada antes de la prueba para obtener los parámetros intrínsecos. Para ello se capturaron 30 imágenes desde diferentes puntos de vista de un patrón en forma de tablero de ajedrez de 6 x 8 casillas. A partir de estas imágenes se realizó el cálculo de los parámetros intrínsecos utilizando la biblioteca OpenCV.

El ordenador utilizado para las pruebas fue un portátil Dell, con un procesador Intel Core 2 Duo T9300 a 2.5 GHz, 4 GB de memoria RAM y una tarjeta gráfica NVidia GeForce 8600M GT con una memoria de 512 MB dedicados. Este ordenador se conectó a la red de Dragados a través del puerto Ethernet de 100 Mbps y se colocó dentro de las

oficinas provisionales de la obra de forma que los usuarios no tenían visión directa del escenario real que estaban comprobando.



Figura 84. Información virtual (izda.); imagen capturada por la cámara PTZ (dcha.)

Las pruebas se realizaron con 12 usuarios, 8 hombres y 4 mujeres, todos ellos trabajadores de la empresa Dragados. El perfil de los usuarios es técnico y todos ellos expertos en realizar trabajos de medición en entornos de construcción civil. La sesión de pruebas se dividió en cuatro partes: la primera parte un sesión de formación de 1 hora donde se dió a conocer el proyecto a los participantes, los pasos que debían seguir según la metodología propuesta y el uso de la herramienta SICURA. En la segunda parte cada uno de los usuarios utilizó la herramienta para comprobar la correcta posición de 24 puntos de control marcados durante el replanteo de 2 de las 8 zonas en que se divide el edificio. En la tercera parte los usuarios realizaron mediciones sobre el terreno de los mismos 24 puntos de control, en este caso mediante el método actual utilizando una estación de medición Leica. La segunda y tercera parte se realizaron simultáneamente dividiendo a los usuarios en dos grupos. De tal forma que uno de los grupos realizó primero la medición sobre el escenario real, mientras el otro grupo realizó primero la medición utilizando el nuevo método aumentado. De esta forma se pretende eliminar cualquier influencia del orden en que se realizan los procesos de medición sobre los resultados finales. Los puntos de control utilizados se identificaron de forma numérica en un plano junto con las coordenadas numéricas de cada uno de ellos, para facilitar su localización durante ambas pruebas. Finalmente se realizo una sesión de discusión con los usuarios donde indicaron sus apreciaciones sobre el nuevo método propuesto y rellenaron un cuestionario comparando ambos métodos de medición. Las categorías propuestas para evaluación ,con una puntuación donde 1 era la puntuación más baja y 5 la más alta, fueron:

- Usabilidad y facilidad de uso

- Habilidad para identificar los puntos de control sobre el entorno
- Eficiencia del sistema durante su uso
- Precisión del sistema
- Compatibilidad con los formatos de CAD utilizados
- Visualización
- Manejo de la herramienta
- Resistencia del equipamiento
- Requisitos de entrenamiento previo para el uso del sistema
- Almacenaje y transporte del equipamiento para su uso en obra

Resultados

El principal resultado obtenido es que en el escenario propuesto, fue posible realizar correctamente la calibración y visualización del escenario aumentado, como muestra la Figura 85. En dicha figura se observa un ejemplo de la visualización del escenario aumentado compuesto a partir de 3 imágenes de la construcción real capturadas con la cámara PTZ. A partir de estas tres imágenes y la información virtual se observa cómo se han generado los dos tipos de vistas descritos en la definición del sistema: desde el punto de vista donde se captura la imagen o desde el punto de vista CAD. Las tres ventanas de la parte derecha se corresponden con la visualización aumentada desde el punto de vista de la cámara PTZ de tres secciones contiguas de la primera planta. En estas vistas se aprecia la información real y virtual perfectamente alineada de forma que el usuario puede apreciar rápidamente las diferencias entre el estado real de los elementos, con respecto a su posición ideal representada por el plano 3D. En estas vistas la información virtual abarca mayor campo de visión que la imagen de fondo para ayudar al usuario a reconocer la zona específica de la construcción a la que pertenece la imagen. En la vista de la izquierda se muestra la vista CAD, en la que las imágenes del mundo real aparecen proyectadas bajo el plano de la construcción. Esta vista mantiene el mismo punto de vista de los programas CAD utilizados para crear los planos, con lo que se pretende que los usuarios se sientan familiarizados con la información y reconozcan fácilmente cada elemento. Esta vista con la información real proyectada bajo los planos es la denominada AR-CAD.

Las zonas inferiores del plano aparecen sin imagen real porque en el momento de las pruebas todavía no se había realizado el replanteo de dicha zona y se utilizaban temporalmente para almacenar material, por lo que la visualización aumentada no tenía sentido en esa zona.

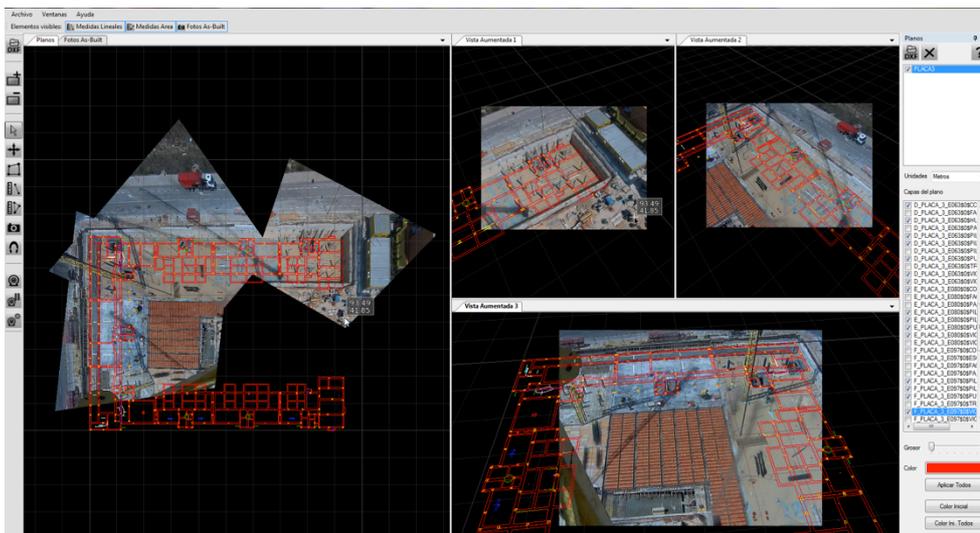


Figura 85. Visualización del escenario aumentado compuesta por cuatro vistas aumentadas



Figura 86. Detalle de la visualización aumentada donde se observa que la información real y virtual aparecen perfectamente alineadas (izda.); medición lineal realizada en el escenario aumentada con los planos ocultos (dcha.)

Atendiendo a los objetivos particulares marcados para este escenario de pruebas, observamos que la configuración del escenario se ha realizado de forma correcta puesto que la información real y virtual aparece alineada perfectamente como muestra la Figura 86 (izda.). Además en la misma figura, parte derecha, se observa cómo es posible realizar mediciones de los elementos presentes en la imagen una vez calibrado el sistema. En

dicha figura aparecen dos mediciones lineales del hueco de escalera planteado, con una de ellas resaltada indicando el valor numérico de dicha medición.

Finalmente, como resultado del último objetivo, la medición de los 24 puntos de control. Destacar que durante las pruebas todos los usuarios fueron capaces de identificar los puntos sobre el escenario aumentado y comprobar con la herramienta de medición que se encontraban en las coordenadas correctas, con un error máximo de 2 centímetros. Algunos usuarios probaron el funcionamiento de la herramienta de medición lineal para comprobar que las distancias entre ellos eran correctas, simulando los procesos de medición tradicionales. La comprobación de que los 24 puntos son correctos es el resultado esperado puesto que habían sido colocados previamente por los topógrafos durante el replanteo real de la obra. El error máximo de 2 centímetros encontrado durante las comprobaciones es el error introducido por el sistema SICURA, al realizar la mezcla entre la información real y virtual.

Resultados de la evaluación de los usuarios

Tras realizar las mediciones de los 24 puntos de control de forma satisfactoria con ambos sistemas, se pidió a los usuarios que rellenarán una breve encuesta puntuando de 1 a 5 algunos aspectos importantes del uso del sistema en un entorno real. En la Tabla 16 se muestra la media y desviación estándar de los resultados de las encuestas a los usuarios para cada uno de los sistemas: CSE (sistema de medición convencional) y S-AR (sistema de medición aumentado).

Al observar los resultados de la tabla observamos que ambos sistema alcanzan valores similares, sobre todo en el parámetro eficiencia del sistema durante su uso. Por otro lado el sistema de medición convencional ofrece mejores prestaciones en cuanto a precisión, visibilidad, resistencia y almacenaje/transporte. Mientras que el sistema propuesto obtiene mejores puntuaciones en cuanto a usabilidad, habilidad para identificar los puntos de control y compatibilidad con los formatos CAD.

Durante la charla posterior a las pruebas con los usuarios, se apreció un alto nivel de aceptación de la herramienta sobre todo por la capacidad de realizar trabajos de control de la obra de forma remota con una precisión aceptable. Algunos usuarios comentaron que el proceso de calibrado necesitaba ser mejorado, puesto que en ocasiones no es fácil encontrar puntos de control fiables, lo que puede ocasionar que no se pueda generar la visualización aumentada. En cuanto al interfaz los usuarios encontraron comprensibles ambos tipos de visualización aumentada y resaltaron la

facilidad con la que podrían detectarse errores de bulto. En cuanto a la precisión obtenida por el sistema durante las pruebas, con un error máximo de 2 cm., lleva a un usuario a indicar que este sistema todavía no podría sustituir el proceso de medición actual, pero que reduce en gran medida las medidas que se deben tomar in-situ para realizar el control diario.

Parámetro de evaluación	CSE: Valor medio	CSE: Desviación estándar	S-AR: Valor medio	S-AR: Desviación estándar
Usabilidad y facilidad de uso	2.80	0.36	3.22	0.84
Habilidad para identificar los puntos de control sobre el entorno	2.74	0.25	3.30	0.98
Eficiencia del sistema durante su uso	3.12	0.34	3.13	0.52
Precisión del sistema	3.40	0.36	3.21	0.41
Compatibilidad con los formatos de CAD utilizados	2.11	0.21	3.60	0.35
Visualización	3.33	0.34	2.70	1.31
Manejo de la herramienta	2.80	0.64	2.96	0.58
Resistencia del equipamiento	3.90	0.12	2.52	0.26
Requisitos de entrenamiento previo para el uso del sistema	2.53	0.81	2.44	1.12
Almacenaje y transporte del equipamiento para su uso en obra	3.01	0.52	2.80	0.92

Tabla 16. Resultados de la evaluación del sistema SICURA, valor mínimo 1 y valor máximo 5

4.6 Conclusiones

En este capítulo se han mostrado las aportaciones realizadas al uso de Realidad Aumentada para el control del proceso constructivo, y la generación de información As-Built que describa las modificaciones detectadas. Los procesos de construcción requieren de una monitorización constante por parte del personal especializado, ya que pequeños errores afectan al resto de actuaciones posteriores. La Realidad Aumentada ofrece un mecanismo de interacción perfectamente aplicable a esta tarea, puesto que permite al usuario visualizar la información virtual complementando su percepción del mundo real.

Con el objetivo de aplicar estas ventajas al proceso de revisión del proceso constructivo, se han desarrollado dos grandes aportaciones en este capítulo. En primer lugar, se ha desarrollado una metodología, que indica al personal responsable cómo realizar dicho control aprovechando las ventajas de la Realidad Aumentada. En segundo lugar se ha creado un sistema denominado SICURA que permite llevarla a cabo. De la combinación de ambos elementos se obtienen los siguientes resultados positivos:

- Un sistema de inspección de obra para ayudar en el proceso de replanteo.
- Se complementan los mecanismos de medición actuales mejorando la detección de errores.
- Permite revisar el proceso de construcción de forma remota o en diferido.
- Facilita la comprensión de los planos y su relación con el mundo real.
- Facilidad de detección de errores de bulto en las fases tempranas de construcción gracias a la visualización aumentada.
- Permite realizar mediciones y anotaciones durante la inspección de la escena aumentada.
- Mejora la interacción en un interfaz de Realidad Aumentada utilizando características de la imagen de fondo.

Para la evaluación de ambos elementos, metodología y sistema, se han elegido tres escenarios reales de obra donde realizar diferentes pruebas. Los escenarios de prueba se han elegido para abarcar un amplio rango de posibles entornos de construcción, y tras las pruebas el sistema demuestra ser útil en todos ellos. A continuación se muestran las conclusiones obtenidas en cada uno de los apartados.

4.6.1 Metodología de control del proceso constructivo por medio de AR

El primer paso para aplicar los beneficios de la Realidad Aumentada al proceso de control de la construcción consiste en la creación de la metodología que debe seguirse. La metodología propuesta divide el proceso de control en 4 fases: recolección de información, configuración del escenario, revisión y anotación y finalmente la generación de resultados. En la fase de recolección de información se ha explicado cómo obtener la información virtual y del mundo real de forma que permita analizarla por medio de Realidad Aumentada. En la configuración del escenario se ha explicado cómo debe crearse el escenario aumentado a partir de la información recolectada. Dicho escenario es la base del proceso de revisión y anotación, donde se ha explicado cómo deben realizarse las comprobaciones. Finalmente se ha definido el proceso de creación automática de

informes, los cuales recogen toda la información As-Built generada durante la revisión. Para ello se ha definido la información y forma en que debe mostrarse de cada una de las posibles anotaciones y mediciones realizadas durante la revisión.

La metodología propuesta se ha desarrollado de forma detallada y genérica, de forma que permita a cualquier encargado de obra controlar el proceso constructivo por medio de Realidad Aumentada en cualquier escenario de construcción.

4.6.2 Sistema SICURA

En la segunda parte del capítulo se muestra el sistema SICURA creado para llevar a cabo la metodología propuesta. Este sistema se ha creado en el marco de un proyecto financiado por el gobierno español con la colaboración de la empresa de construcción DRAGADOS. El sistema SICURA implementa todos los mecanismos necesarios de Realidad Aumentada, abstrayendo al usuario del funcionamiento a bajo nivel de dicha tecnología. Con el objetivo de mejorar la adaptación a la herramienta, se ha mantenido un interfaz similar al de los programas CAD, dando lugar a lo que se ha denominado AR-CAD. En este nuevo sistema se aprovecha el nivel de conocimientos de los usuarios en el manejo de programas CAD, introduciendo nuevas herramientas para la inspección y documentación. Estas herramientas permiten al usuario crear escenarios aumentados en los que la información virtual (planos) y real (imagen de la construcción) aparecen combinadas mejorando su comprensión. Gracias al nuevo interfaz un usuario puede inspeccionar la construcción, observando al mismo tiempo cómo debería ser según los planos, con lo que se consigue una rápida detección de errores. Una vez detectados los errores las herramientas de medición y anotación permiten al usuario documentar cualquier modificación de forma rápida y precisa. En este sentido el análisis de imagen asiste al usuario durante el proceso por medio de la detección de características en la imagen real que puedan medirse con respecto a la información virtual. Como resultado final, el sistema SICURA permite generar automáticamente informes As-Built, los cuales reflejan el estado real de la construcción, incluyendo todas las modificaciones detectadas y documentadas.

4.6.3 Resultados experimentales

La metodología y el sistema SICURA se han probado en tres escenarios reales: ampliación del aparcamiento del parking de Manises, rehabilitación y reforma del complejo 9 de Octubre y construcción de un edificio de viviendas en Rivas (Madrid). Estos 3 escenarios se han escogido por representar distintos tipos de construcción con

problemáticas diferentes. En el primero de ellos se ha realizado el control del proceso de cimentación utilizando las imágenes aéreas. En el segundo se ha documentado la rehabilitación de fachadas utilizando imágenes capturadas por el propio jefe de obra con una cámara convencional. Finalmente en el tercer caso se ha utilizado un cámara IP colocada sobre una grúa para controlar la construcción de un edificio de viviendas. En los tres casos las herramientas propuestas han demostrado ser útiles, obteniendo una buena valoración por parte de los jefes de obra que se han encargado de utilizarlas.

Capítulo 5

Conclusiones y trabajo futuro

A lo largo de esta memoria se han presentado soluciones al problema de creación de contenidos AR en los campos de formación, industria y construcción. Más concretamente se han presentado soluciones para la creación de ayudas visuales AR (orientadas a formación e industria) y para la creación de información As-Built en construcción. Para ello se ha seguido la metodología marcada al principio del trabajo, realizando un análisis de la situación actual de la tecnología, describiendo en detalle cada uno de los problemas concretos, proponiendo una solución, y tras implementarla, se han probando la solución con usuarios reales para validar su funcionamiento.

A continuación se resumen los logros alcanzados y las principales contribuciones realizadas, teniendo en cuenta los objetivos propuestos al principio del trabajo. Tras esta valoración se enumeran las publicaciones científicas derivadas de este trabajo. Finalmente se exponen posibles líneas de trabajo futuro de esta tesis.

5.1 Conclusiones y aportaciones

El objetivo principal marcado al inicio de esta tesis es el de *“crear nuevos métodos que faciliten la edición de contenidos AR a usuarios no expertos en Realidad Aumentada”*. Este objetivo ha sido el hilo conductor de todo el trabajo realizado y se ha cumplido gracias a las aportaciones en los dos casos principales presentados: la creación de ayudas visuales AR y la edición de información As-Built.

Creación de ayudas visuales AR

Las ayudas visuales AR permiten aumentar la percepción del usuario con información virtual durante el aprendizaje o realización de una tarea. Sin embargo, esta característica tan deseable, se ve frenada por la dificultad de crear los contenidos de dichas ayudas. La juventud de la tecnología, la falta de herramientas comerciales

asentadas y la diversidad de tecnologías implicadas en los sistemas AR, tienen como consecuencia que solo usuarios expertos puedan crear dichos contenidos. Para dar solución a este problema en el capítulo 3 se han analizado en detalle las ayudas visuales AR, sus posibles contenidos para finalmente proponer un nuevo mecanismo de edición que ha demostrado ser válido tras las pruebas experimentales.

En primer lugar, se ha aportado un completo análisis de los posibles contenidos factibles de aparecer en una ayuda visual AR, incluyendo sus requisitos de edición y representación (tal y como marcaban los objetivos). Este análisis ha sido la base para definir una clasificación de los contenidos en función de la existencia, o no, de una relación espacial con lugares u objetos reales concretos. A partir de dicha clasificación, se obtiene la segunda aportación, consistente en un modelo de edición que extiende el modelo de presentación basado en diapositivas digitales. En dicho modelo se divide el proceso de creación en 2 procesos, en el que la edición 2D simplifica la creación y reutilización de contenidos existentes, mientras la edición 3D da solución al problema de creación de contenidos virtuales que requieren una relación espacial con el mundo real. En la edición 3D se ha aportado un nuevo sistema de creación basado en añadir la información virtual a una descripción del mundo real que sirve como referencia. En la descripción del mundo real se combinan: información geométrica, referencias de los sistemas de captura, opacidad de los elementos, etc. todos ellos creados a partir de un interfaz gráfico 3D. Este nuevo sistema, abstrae al usuario del funcionamiento de los sistemas AR a bajo nivel, dando solución a los objetivos marcados de permitir a usuario no expertos crear contenidos AR. Además, se ha aportado una estructura de datos que no solo contiene la información virtual, sino también la descripción del mundo real, con el objetivo de ofrecer un medio de intercambio de información con otras aplicaciones futuras.

Las pruebas experimentales presentadas al final del capítulo 3 han demostrado, por un lado, que el mecanismo propuesto mejora la edición de contenidos AR, y por otro, que es aplicable en ayudas con temáticas y características totalmente dispares. El estudio con usuarios presentado demuestra que tanto usuarios expertos, como usuarios no expertos, se sienten cómodos con el mecanismo de edición basado en referencias. Los usuarios alcanzaron los objetivos marcados, con unos resultados de velocidad y precisión que hacen concluir que el nuevo sistema abstrae al usuario de las complejidades de un sistema AR durante la edición de contenidos. Los distintos casos en los que se ha aplicado el sistema propuesto, dentro del marco de varios proyectos financiados, da muestra de la generalidad del sistema de edición. En dichos casos se muestra su aplicación en casos tan

dispares, como por ejemplo, la formación para asistencia de personas con movilidad o el mantenimiento de una excavadora.

Creación de información As-Built

La información As-Built es aquella que describe el estado real de una construcción. Esta información es generada de forma constante, al revisar cada uno de los elementos durante su construcción. En este caso la Realidad Aumentada ofrece un interfaz de revisión, donde la construcción real puede observarse combinada con los planos virtuales que indican cómo debería realizarse dicha construcción de forma ideal. En el capítulo 4 de esta tesis, se explican las aportaciones realizadas no solo para comparar la construcción real con el modelo virtual ideal, sino las herramientas aportadas para documentar las diferencias encontradas durante el proceso de revisión, es decir, crear la información As-Built.

El proceso de construcción conlleva que no todos los elementos puedan ser revisados en cualquier momento, por ello en primer lugar se aporta una metodología que indique a los usuarios cómo llevar a cabo el proceso de revisión utilizando AR. Esta aportación, incluye las instrucciones y guía a un usuario sin conocimientos sobre un sistema AR para que pueda aplicar dicha tecnología a la creación de información As-Built. Como segunda aportación en el capítulo 4 se incluye el sistema SICURA creado para llevar a cabo la metodología propuesta. En este sistema se incluyen herramientas de visualización y edición que facilitan al usuario tanto la comparación de los elementos reales con su versión ideal virtual, cómo la generación de información As-Built a partir de las características de los elementos reales. Para ello se aporta un modelo de edición denominado AR-CAD, en el que se aprovecha el conocimiento de los usuarios en programas CAD, extendiendo dicho modelo para incluir herramientas AR. En particular, el módulo de extracción de líneas, facilita al usuario la creación de información As-Built a partir de los contornos de las imágenes de la construcción real. En dicho capítulo, se aporta una estructura de datos que incluye, tanto los escenarios aumentados configurados, como la información As-Built creada en el proceso de revisión de dichos escenarios.

Las pruebas experimentales realizadas en el marco del proyecto SICURA, en colaboración con la empresa DRAGADOS, han demostrado que tanto la metodología como el sistema aportados son aplicables en obras reales de diversas características. Las diversas pruebas han demostrado facilitar el trabajo de los usuarios, frente al proceso de documentación manual que se realiza actualmente. Esto junto con las valoraciones

recogidas de los usuarios lleva a concluir que las aportaciones realizadas son adecuadas para la generación de información As-Built por medio de AR.

5.2 Líneas de trabajo futuro

Los trabajos llevados a cabo en esta tesis dejan abiertas varias líneas de investigación que podrían llevarse a cabo en el futuro:

Aplicación de los sistemas de generación de contenidos a dispositivos móviles

Tanto la creación de ayudas visuales AR, como la edición de información As-Built, se han llevado a cabo pensando en un entorno de trabajo PC (*Personal Computer*), ya que es la plataforma más adecuada en la actualidad. Los dispositivos móviles, que prácticamente ofrecen unas prestaciones equiparables a las de un PC, ofrecen una forma de interacción totalmente diferente, donde el usuario se mueve por el entorno real para crear la información virtual en cualquier momento a su alrededor. Como trabajo futuro debería investigarse en que modo los dispositivos móviles podrían ayudar a usuarios no expertos a crear la información virtual asociada al mundo real que le rodea. En este aspecto también debería analizarse cómo incluir la gran cantidad de información que se maneja simultáneamente en un programa de edición, dentro de las limitadas capacidades de representación de un dispositivo móvil.

Mecanismos automáticos de descripción del mundo real

En ambos casos de edición propuestos (ayudas visuales AR e información As-Built) la edición de contenidos virtuales se realiza sobre una descripción del mundo real. Especialmente en el primer caso, dicha descripción es realizada de forma manual por el usuario, por lo que un mecanismo automático de descripción del mundo real simplificaría esta tarea. Los algoritmos de reconocimiento visual de tipo SLAM (Simultaneous Localization And Mapping) y PTAM (Parallel Tracking And Mapping) podrían ser una base para la descripción automática de la geometría, pero no suficientes. Dicho mecanismo, no solo debería incluir la geometría del mundo real, sino que además debería ser capaz de generar información para los diferentes sistemas de captura de movimiento y características visuales como la opacidad.

Sistemas colaborativos en la nube

La generación de contenidos es una tarea que a menudo es realizada por diversos autores o equipos de trabajadores, sin embargo no es habitual que varias personas

trabajen sobre el mismo elemento al mismo tiempo. Las metodologías de desarrollo de proyectos tienden a dividir el trabajo entre los trabajadores por lo que pese a trabajar en equipo cada persona realiza la edición de unos contenidos u otros. Los sistemas en la nube ofrecen un entorno donde varias personas pueden realizar el trabajo de forma colaborativa, es decir, simultáneamente realizan la edición de los contenidos. Este aspecto debería analizarse, para ver cómo esta característica puede mejorar la edición de contenidos AR. La interacción en grupo sobre los mismos elementos puede enriquecer el proceso de edición, sin embargo debe tenerse en cuenta cómo ofrecer dicha interacción manejando la concurrencia de información, prioridades de accesos, nuevos mecanismos de interacción basados en trabajo en grupo, etc.

Detección automática de modificaciones durante la construcción

En la actualidad existen sistemas que comparan de forma automática la geometría de construcciones reales con modelos 3D utilizando hardware especial, por ejemplo escáneres laser que generan la nube de puntos de dicha construcción y la comparan con un modelo 3D de referencia. En la solución propuesta en este trabajo, no se utiliza ningún hardware especial de adquisición, aunque sí podrían investigarse mecanismos de control automáticos y predictivos. El sistema propuesto en este trabajo, permite a un usuario crear información As-Built por medio de Realidad Aumentada, y aunque ofrece herramientas que ayudan al usuario, debe ser este quien identifique y describa la modificación detectada. En este aspecto podrían combinarse los modelos BIM (Building Information Modelling) que ofrecen información de la construcción, con técnicas de análisis de imagen y reconocimiento para identificar puntos críticos, realizar controles periódicos programados por el usuario, controlar de forma automática, etc. todo ello incluyendo la captura de la información necesaria para generar un documento As-Built.

5.3 Publicaciones relacionadas

Publicaciones relaciones con la creación de ayudas visuales AR:

- Gimeno J.; Morillo P.; Orduña J.M.; Fernández M. *An Advanced Authoring Tool for Augmented Reality Applications in Industry*. **Actas de las XXIII Jornadas de Paralelismo**, 2012.
- Gimeno J.; Morillo P.; Orduña J.M.; Fernández M. *An Occlusion-Aware AR Authoring Tool for assembly and repair tasks*. **Proceedings of GRAPP'12, Best Paper Award**, Roma, 2012.

- Gimeno J.; Morillo P.; Orduña J.M.; Fernández M. *A new AR authoring tool using depth maps for industrial procedures*. **Journal Computers In Industry, Special Issue: Imaging in Industry**. Volume 64, Issue 9, pp 1263-1271, Diciembre 2013.
- Gimeno J.; Morillo P.; Orduña J.M.; Fernández M. *An Easy-to-Use AR Authoring Tool for Industrial Applications*. **Computer Vision, Imaging and Computer Graphics. Theory and Application. Communications in Computer and Information Science**. Volume 359, pp 17-32, Springer Berlin Heidelberg. ISBN: 978-3-642-38240-6. 2013.

Publicaciones relacionadas con la aplicación de AR para la creación de información As-Built durante en la revisión y control del proceso constructivo:

- Gimeno J.; Morillo P.; Casas S.; Fernández M. *An Augmented Reality (AR) CAD System at Construction Sites*. Libro **Augmented Reality, Some Emerging Application Areas, Editado por Andrew Yeh Ching Nee, Capítulo 2**. Año 2011. ISBN: 978-953-307-422-1.
- Gimeno J.; Riera J.V.; Morillo P.; Fernández M. *A New Approach to the Management of the Setting Out in Construction based on Augmented Reality Techniques*. **Proceedings of the Seventh International Conference on Engineering Computational Technology**, Valencia, 2010.
- Bárcena Martín, C.; Gimeno Sancho, J.; Rios Ortal, E. *Proyectos SICURA. Aplicación de la Realidad Aumentada en Procesos Constructivos*. **II Congreso nacional de investigación y edificación**, Madrid, 2010. ISBN: 978-84-693-2844-8.

Conclusions and future work

In this work solutions to AR authoring content in the fields of education, industry and construction have been presented. Two detailed solutions have been proposed, the first for the creation of AR visual aids (education and industry), and the second for the creation of As-Built information (construction). For this purpose, the methodology marked at the beginning of the work has been followed: analysing the current state of technology, describing in detail each of the specific problems, proposing a solution, implementing it and finally testing the solution with real users to validate its performance.

In the next paragraphs the main achievements and contributions are summarized, taking into account the objectives set at the beginning of the work. Finally, the research publications resulting from this work and possible future lines of investigations are presented.

5.1 Conclusions and contributions

The main objective set at the beginning of this thesis is to " create new authoring tools and methods to facilitate AR content creation to non-experts in AR". This objective has been the theme of all the work done and has been met by contributions in the two major cases presented: creating AR visual aids and authoring of As- Built information.

Creating AR visual aids

AR Visual aids augment user's perception with virtual information during learning or performing a task. However, this desirable feature is not widely used because of the difficulty of creating the aid's contents. The youth of this technology, the lack of authoring tools and the big number of different technologies involved in AR systems, result that only expert users can create such content. To solve this problem, in Chapter 3, AR visual aids and their contents have been analysed in detail, to propose a new authoring system that has proven its validity after the experimental tests.

In the first place, a comprehensive analysis of contents feasible to appear in a AR visual aid has been presented, including the requirements of authoring and presentation (marked as targets). This analysis has been the basis for defining a classification of content based on the presence, or not, of a spatial relationship with places or specific real objects. From this classification, the second contribution, consisting of a new authoring model extending the existing digital slides presentation model is obtained. In this model the creation process is divided into two processes. The 2D edition simplifies the creation and reuse of existing content while 3D edition solves the problem of virtual content authoring where spatial relationship with the real world must be created. In the 3D edition a new authoring system has been created, based on add virtual information to a description of the real world used as a reference. In real world's descriptions: geometric information, referral systems capture, opacity of the elements, etc. have been combined, and all of them are created from a 3D graphical interface. This new system abstracts the user of AR systems complexity while creating the AR visual aid, giving solution to the main target of allowing non-expert user to create AR content AR. A data structure has been provided, too, which contains the virtual information and the description of the real world, so would be possible to share information with other future applications.

The experimental evidences presented at the end of Chapter 3 have shown, first, that the proposed mechanism improves AR content editing, and on the other, which is applicable in aid disparate themes and features. The study shows that both presented users expert, as non-experts, are comfortable with the editing system based on references. Users reached all the proposed targets, with good results of speed and accuracy so can be concluded that the new system abstracts the user from the complexities of an AR system while editing AR content. The system has been tested in different cases so different as, for example, teaching how to assist people with mobility problems of performing machinery maintenance tasks. The various cases in which the proposed system has been tested, within the framework of several funded projects, demonstrates the generality of the authoring system.

Authoring of As-Built information

As-Built information is that which describes the actual state of a construction. This information is constantly generated by checking each of the elements during construction. In this case Augmented Reality provides a review interface, where the actual construction can be seen combined with the virtual planes that represent how the construction should be performed ideally. In Chapter 4, the contributions to compare the

actual construction to the ideal virtual model, and the system provided to do so and to document the differences found during the review process (As-Built information) are explained.

During the construction process not every element can be reviewed at any time, so first a methodology that instructs users how to conduct the review process using AR is provided. This contribution includes instructions and guidance to a user without knowledge of an AR system, so he can apply this technology to the creation of As-Built information. As a second contribution, in chapter 4, the SICURA system created to carry out the proposed methodology is included. This system includes visualization and authoring tools that enable the user both, the comparison of actual items with its virtual ideal version, and the generation of As-Built information from the characteristics of the actual items. A new authoring environment called AR-CAD has been proposed, taking advantage of the user's CAD software knowledge, and extending the traditional CAD model to include the necessary AR tools. The proposed lines extraction module, helps the user to create As-Built information from the contours of the images of the actual construction. In this chapter a data model that includes both increased configured settings, such as As-Built information created in the process of reviewing these scenarios is provided.

The experimental tests, in collaboration with the Dragados company and within the SICURA project founded by the spanish government, have proved that both the methodology and the system are valid to be applied in real work places. The tests have shown how the contributions facilitate the work of users, compared to the actual manual documentation process. These tests in conjunction with the collected user ratings leads to the conclusion that the contributions are suitable for the generation of As-Built information through AR.

5.2 Future work

The work carried out in this thesis left open several lines of research that could be conducted in the future:

Authoring of AR contents using mobile devices

Both authoring of AR visual aids and creation of As-Built information systems have been designed with a PC (Personal Computer) environment in mind, because it is the most appropriate design platform today. Mobile devices, which have reached almost the

same computational performance as a PC, offer a totally different way of interaction, where the user moves through the real environment to create virtual information at any time around him. In the future, should be investigated how mobile devices could help non-expert users to create virtual information associated with the real world around them. One of the problems of this kind of interaction would be for example: how to include the large amount of information handled simultaneously in an authoring program within the limited rendering capabilities of a mobile device.

Automatic generation of real world's descriptions

In both authoring cases proposed (AR visual aids and As-Built information) virtual content editing is done using a graphical description of the real world. Especially in the first case, the user performs the description manually, so that an automatic mechanism for real-world description would simplify this task. The visual recognition algorithms, for example: SLAM (Simultaneous Localization And Mapping) and PTAM (Parallel Tracking And Mapping) could be the basis for automatic description of the geometry, but they would not be enough. This mechanism should include not only the geometry of the real world, but should also be able to generate information for the different tracking systems and visual characteristics such as opacity.

Collaborative cloud systems

Authoring of AR contents is a task that is often carried out by several authors or teams of workers, but it is unusual that several people work on the same element at the same time. The project development methodologies tend to divide the work among workers so despite teamwork each person performs a content editing or another. Cloud systems provide an environment where multiple people can do the work in a collaborative manner; in other words, they can edit the contents simultaneously. This aspect should be analysed to investigate how this feature can improve AR content authoring. Group interaction on the same elements can enrich the authoring process, but must be considered how to handle the concurrency of information, access priorities, new mechanisms of interaction based on group work, etc.

Automatic error detection and generation of As-Built information

Nowadays there are systems that automatically compare the geometry of real buildings with 3D models using special hardware such as laser scanners, which generate the point cloud of such construction to compare it with a reference 3D model. In the solution proposed in this paper, no special hardware acquisition has been used, although

automatic and predictive control mechanisms could be. The proposed allows a user to create As-Built information via Augmented Reality, but although it provides advanced tools to do that, the user must identify and describe the detected changes using those tools. In this aspect BIM models (Building Information Modelling) could be combined with image analysis and recognition techniques and to identify critical hot spots, perform regular checks scheduled by the user, automatic control, etc. including capturing all of the information required to generate the final As-Built document.

5.3 Related research publications

Research publications related to AR visual aids:

- Gimeno J.; Morillo P.; Orduña J.M.; Fernández M. *An Advanced Authoring Tool for Augmented Reality Applications in Industry*. **Actas de las XXIII Jornadas de Paralelismo**, 2012.
- Gimeno J.; Morillo P.; Orduña J.M.; Fernández M. *An Occlusion-Aware AR Authoring Tool for assembly and repair tasks*. **Proceedings of GRAPP'12, Best Paper Award**, Roma, 2012.
- Gimeno J.; Morillo P.; Orduña J.M.; Fernández M. *A new AR authoring tool using depth maps for industrial procedures*. **Journal Computers In Industry, Special Issue: Imaging in Industry**. Volume 64, Issue 9, pp 1263-1271, Diciembre 2013.
- Gimeno J.; Morillo P.; Orduña J.M.; Fernández M. *An Easy-to-Use AR Authoring Tool for Industrial Applications*. **Computer Vision, Imaging and Computer Graphics. Theory and Application. Communications in Computer and Information Science**. Volume 359, pp 17-32, Springer Berlin Heidelberg. ISBN: 978-3-642-38240-6. 2013.

Research publications related to authoring of As-Built information:

- Gimeno J.; Morillo P.; Casas S.; Fernández M. *An Augmented Reality (AR) CAD System at Construction Sites*. Libro **Augmented Reality, Some Emerging Application Areas**, Editado por Andrew Yeh Ching Nee, **Capítulo 2**. Año 2011. ISBN: 978-953-307-422-1.
- Gimeno J.; Riera J.V.; Morillo P.; Fernández M. *A New Approach to the Management of the Setting Out in Construction based on Augmented Reality*

Techniques. Proceedings of the Seventh International Conference on Engineering Computational Technology, Valencia, 2010.

- Bárcena Martín, C.; Gimeno Sancho, J.; Rios Ortal, E. *Proyectos SICURA. Aplicación de la Realidad Aumentada en Procesos Constructivos. II Congreso nacional de investigación y edificación*, Madrid, 2010. ISBN: 978-84-693-2844-8.

Bibliografía

- 13th LAB. 2013. PointCloud SDK. [Online] <http://developer.pointcloud.io/>, Visitado: Febrero, 2015.
- ABAWI, D.F., DÖRNER, R., HALLER, M. AND ZAUNER, J. 2004. Efficient mixed reality application development. In *1st European Conference on Visual Media Production (CVMP)*, 289-294.
- ATOMIC. 2009. ATOMIC AR authoring tool. [Online] <http://www.sologicolibre.org/projects/atomic/en/index.php>, Visitado: Febrero, 2015.
- AUG. 2015. Instamotion. [Online] <http://www.mobileaug.com/instamotion/>, Visitado: Febrero, 2015.
- Autodesk. 2015a. 3D Studio Max. [Online] www.autodesk.es/products/3ds-max, Visitado: Marzo, 2015.
- Autodesk. 2015b. Mental Ray. [Online] www.autodesk.com/products/mental-ray-standalone, Visitado: Marzo, 2015.
- Autodesk. 2015c. 123D Catch. [Online] www.123dapp.com/catch, Visitado: Marzo, 2015.
- AZUMA, R.T. 1997. A survey of augmented reality. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments* 6, 355-385. .
- BAE, H., GOLPARVAR-FARD, M. AND WHITE, J. 2013. High-precision vision-based mobile augmented reality system for context-aware architectural, engineering, construction and facility management (AEC/FM) applications. *Visualization in Engineering* 1, .
- BARBADILLO, J. AND SÁNCHEZ, J.R. 2013. A Web3D authoring tool for augmented reality mobile applications. In *Proceedings of the 18th International Conference on 3D Web Technology*, ACM, 206-206.

- BAUER, M., BRUEGGE, B., KLINKER, G., MACWILLIAMS, A., REICHER, T., RISS, S., SANDOR, C. AND WAGNER, M. 2001. Design of a component-based augmented reality framework. In *Augmented Reality, 2001. Proceedings. IEEE and ACM International Symposium on*, 45-54.
- BERGIG, O., HAGBI, N., EL-SANA, J. AND BILLINGHURST, M. 2009. In-place 3D sketching for authoring and augmenting mechanical systems. In *Mixed and Augmented Reality, 2009. ISMAR 2009. 8th IEEE International Symposium on*, 87-94.
- BICHLMEIER, C., WIMME, F., HEINING, S.M. AND NAVAB, N. 2007. Contextual anatomic mimesis hybrid in-situ visualization method for improving multi-sensory depth perception in medical augmented reality. In *Mixed and Augmented Reality, 2007. ISMAR 2007. 6th IEEE and ACM International Symposium on, IEEE*, 129-138.
- BILLINGHURST, M., KATO, H. AND POUPYREV, I. 2001. The MagicBook: a transitional AR interface. *Computers & Graphics* 25, 745-753. .
- BIMBER, O., FRÖHLICH, B., SCHMALSTIEG, D. AND ENCARNAÇÃO, L.M. 2006. The virtual showcase. In *ACM SIGGRAPH 2006 Courses*, ACM, 9.
- BIMBER, O. AND RASKAR, R. 2005. *Spatial Augmented Reality: Merging Real and Virtual Worlds*. A. K. Peters, Ltd, Natick, MA, USA.
- J. L. Blanco. 2013. MRPT.ORG: Application: camera-calib (Camera intrinsic calibration). [Online] http://www.mrpt.org/list-of-mrpt-apps/application_camera-calib/, Visitado: Mayo 2015.
- Blender.org. 2015. Blender. [Online] www.blender.org, Visitado: Marzo, 2015.
- BOURGUET, M. 2003. Designing and Prototyping Multimodal Commands. In *in proceedings of INTERACT'03*, 717-720.
- CAREY, R. AND BELL, G. 1997. *The annotated VRML 2.0 reference manual*. Addison-Wesley Longman Ltd., .
- CARMIGNANI, J., FURHT, B., ANISETTI, M., CERAVOLO, P., DAMIANI, E. AND IVKOVIC, M. 2011. Augmented reality technologies, systems and applications. *Multimedia Tools and Applications* 51, 341-377. .

- CASTLE, R.O., KLEIN, G. AND MURRAY, D.W. 2008. Video-rate Localization in Multiple Maps for Wearable Augmented Reality. In *Proc 12th {IEEE} Int Symp on Wearable Computers, Pittsburgh PA, Sept 28 - Oct 1, 2008*, 15-22.
- CAUDELL, T.P. AND MIZELL, D.W. 1992. Augmented reality: an application of heads-up display technology to manual manufacturing processes. In *System Sciences, 1992. Proceedings of the Twenty-Fifth Hawaii International Conference on*, 659-669 vol.2.
- CHANDRA, R. 2005. Impact of Media and technology in Education. Gyan Publishing House, .
- Crytek GmbH. 2015. Cry Engine. [Online] www.cryengine.com, Visitado: Marzo, 2015.
- DÄHNE, P. AND KARIGIANNIS, J.N. 2002. Archeoguide: System architecture of a mobile outdoor augmented reality system. In *2013 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)*, IEEE Computer Society, 263-263.
- DOIL, F., SCHREIBER, W., ALT, T. AND PATRON, C. 2003. Augmented Reality for Manufacturing Planning. In *Proceedings of the Workshop on Virtual Environments 2003*, Zurich, Switzerland, ACM, New York, NY, USA, 71-76.
- Dokeos. 2015. Dokeos. [Online] www.dokeos.com/, Visitado: Marzo, 2015.
- DÖRNER, R., GEIGER, C., HALLER, M. AND PAELKE, V. 2003. Authoring Mixed Reality — A Component and Framework-Based Approach. 112, 405-413. .
- DUNSTON, P. AND SHIN, D. 2009. Key Areas And Issues For Augmented Reality Applications On Construction Sites. 157-170. .
- Epic Games Inc. 2015. Unreal Engine. [Online] www.unrealengine.com, Visitado: Marzo, 2015.
- FEINER, S., MACINTYRE, B., HÖLLERER, T. AND WEBSTER, A. 1997. A touring machine: Prototyping 3D mobile augmented reality systems for exploring the urban environment. *Personal Technologies* 1, 208-217. .
- FEINER, S., MACINTYRE, B. AND SELIGMANN, D. 1993. Knowledge-based augmented reality. *Communications of the ACM* 36, 53-62. .

- FIALA, M. 2005. Artag rev2 fiducial marker system: Vision based tracking for AR. In *Workshop of Industrial Augmented Reality*.
- Fitnect. 2015. Probador AR basado en Kinect. [Online] <http://www.fitnect.hu/>, Visitado: Febrero, 2015.
- FOXLIN, E. 1996. Inertial head-tracker sensor fusion by a complementary separate-bias Kalman filter. In *Virtual Reality Annual International Symposium, 1996., Proceedings of the IEEE 1996,IEEE*, 185-194, 267.
- GEIGER, C., KLEINJOHANN, B., REIMANN, C. AND STICHLING, D. 2001. Mobile ar4all. In *Augmented Reality, 2001. Proceedings. IEEE and ACM International Symposium on,IEEE*, 181-182.
- GIMENO, J., PARDO, F., MORILLO, P. AND FERNÁNDEZ, M. 2010. A Mobile Augmented Reality System to Enjoy the Sagrada Familia. In *Proceedings of Eurographics*.
- Google. 2015. SketchUp. [Online] www.sketchup.com, Visitado: Marzo, 2015.
- Google. 2014. Google Glass. [Online] www.google.com/glass/, Visitado: Marzo, 2015.
- GULBINS, J. AND STEINMULLER, U. 2010. The Digital Photography Workflow Handbook. Rocky Nook, .
- GUPTA, S. AND JAYNES, C. 2006. The universal media book: tracking and augmenting moving surfaces with projected information. In *Mixed and Augmented Reality, 2006. ISMAR 2006. IEEE/ACM International Symposium on*, 177-180.
- HAKKARAINEN, M., WOODWARD, C. AND RAINIO, K. 2009. Software Architecture for Mobile Mixed Reality and 4D BIM Interaction. In *Proc. 25th CIB W78 Conference,Istanbul, Turkey,1-3 Oct*, 517-524.
- HAMPSHIRE, A., SEICHTER, H., GRASSET, R. AND BILLINGHURST, M. 2006. Augmented Reality Authoring: Generic Context from Programmer to Designer. In *Proceedings of the 18th Australia Conference on Computer-Human Interaction: Design: Activities, Artefacts and Environments,Sydney, Australia,ACM,New York, NY, USA*, 409-412.

- HARINGER, M. AND REGENBRECHT, H.T. 2002. A pragmatic approach to augmented reality authoring. In *Mixed and Augmented Reality, 2002. ISMAR 2002. Proceedings. International Symposium on*, 237-245.
- HENDERSON, S.J. AND FEINER, S. 2009. Evaluating the Benefits of Augmented Reality for Task Localization in Maintenance of an Armored Personnel Carrier Turret. In *Proceedings of the 2009 8th IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, IEEE Computer Society, Washington, DC, USA, 135-144.
- HENRYSSON, A., BILLINGHURST, M. AND OLLILA, M. 2005. Face to face collaborative AR on mobile phones. In *Mixed and Augmented Reality, 2005. Proceedings. Fourth IEEE and ACM International Symposium on*, 80-89.
- HILL, A., MACINTYRE, B., GANDY, M., DAVIDSON, B. AND ROUZATI, H. 2010. KHARMA: An open KML/HTML architecture for mobile augmented reality applications. In *Mixed and Augmented Reality (ISMAR), 2010 9th IEEE International Symposium on*, 233-234.
- HP. 2015. Sprout. [Online] sprout.hp.com, Visitado: Septiembre, 2015.
- IBÁÑEZ, M.B., DI SERIO, Á, VILLARÁN, D. AND DELGADO KLOOS, C. 2014. Experimenting with electromagnetism using augmented reality: Impact on flow student experience and educational effectiveness. *Computers & Education* 71, 1-13. .
- Ilias. 2015. Ilias Open Source E-Learning. [Online] www.ilias.de/, Visitado: Marzo, 2015.
- ISHII, H. AND ULLMER, B. 1997. Tangible Bits: Towards Seamless Interfaces Between People, Bits and Atoms. In *Proceedings of the ACM SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, Atlanta, Georgia, USA, ACM, New York, NY, USA, 234-241.
- JINDAN ZHU, KAI ZENG, KYU-HAN KIM AND MOHAPATRA, P. 2012. Improving crowd-sourced Wi-Fi localization systems using Bluetooth beacons. In *Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks (SECON), 2012 9th Annual IEEE Communications Society Conference on*, 290-298.
- KATO, H., BILLINGHURST, M., POUPYREV, I., IMAMOTO, K. AND TACHIBANA, K. 2000. Virtual object manipulation on a table-top AR environment. In *IEEE*

- and ACM International Symposium on Augmented Reality, 2000.(ISAR 2000).
Proceedings, 111-119.
- KATO, H. AND BILLINGHURST, M. 1999. Marker tracking and HMD calibration for a video-based augmented reality conferencing system. In *Augmented Reality, 1999. (IWAR '99) Proceedings. 2nd IEEE and ACM International Workshop on*, 85-94.
- KAUFMANN, H. 2000. Construct3D: An Augmented Reality Application for Mathematics And Geometry Education. In *Proc. 10 th ACM international Conference on Multimedia*, 656-657.
- KESIM, M. AND OZARSLAN, Y. 2012. Augmented Reality in Education: Current Technologies and the Potential for Education. *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 47, 297-302. .
- KIRKLEY, S. AND KIRKLEY, J. 2004. Creating next generation blended learning environments using mixed reality, Video Games and Simulations. *TechTrends* 49, 42-53. .
- KLEIN, G. AND MURRAY, D. 2007. Parallel Tracking and Mapping for Small AR Workspaces. In *Proc. Sixth {IEEE} and {ACM} International Symposium on Mixed and Augmented Reality {(ISMAR'07)}*, November, Nara, Japan.
- KOYAMA, T. 2009. Introduction to flartoolkit. *Adobe System Incorporated* .
- KRUEGER, M.W., GIONFRIDDO, T. AND HINRICHSEN, K. 1985. VIDEOPLACE—an artificial reality. In *ACM SIGCHI Bulletin*, ACM, 35-40.
- L, H.M. 1962. Sensorama simulator. .
- LAMOUNIER, E., Jr., BUCIOLI, A., CARDOSO, A., ANDRADE, A. AND SOARES, A. 2010. On the Use of Augmented Reality Techniques in Learning and Interpretation of Cardiologic Data. *2010 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (Embc)* 610-613. .
- Layar. 2015a. AR Browser. [Online] <https://www.layar.com/>, Visitado: Febrero, 2015.
- Layar. 2015b. Layar Creator. [Online] <https://www.layar.com/creator/>, Visitado: Febrero, 2015.

- LEDERMANN, F. AND SCHMALSTIEG, D. 2005. APRIL: a high-level framework for creating augmented reality presentations. In *Virtual Reality, 2005. Proceedings. VR 2005. IEEE,IEEE*, 187-194.
- LEE, K. 2012. Augmented Reality in Education and Training. *TechTrends* 56, 13-21.
- LEROTIC, M., CHUNG, A.J., MYLONAS, G. AND YANG, G. 2007. Pq-space Based Non-photorealistic Rendering for Augmented Reality. In *Proceedings of the 10th International Conference on Medical Image Computing and Computer-assisted Intervention, Brisbane, Australia, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg*, 102-109.
- LOOSER, J., GRASSET, R., SEICHTER, H. AND BILLINGHURST, M. 2006. OSGART-A pragmatic approach to MR. .
- MACINTYRE, B., GANDY, M., DOW, S. AND BOLTER, J.D. 2004. DART: a toolkit for rapid design exploration of augmented reality experiences. In *Proceedings of the 17th annual ACM symposium on User interface software and technology, ACM*, 197-206.
- MANN, S. 1997. Wearable computing: A first step toward personal imaging. *Computer* 30, 25-32. .
- MARNER, M.R., SMITH, R.T., WALSH, J.A. AND THOMAS, B.H. 2014. Spatial User Interfaces for Large-Scale Projector-Based Augmented Reality. *Computer Graphics and Applications, IEEE* 34, 74-82. .
- Metaio. 2015a. Metaio Creator. [Online] <http://www.metaio.com/products/creator/>, Visitado: Febrero, 2015.
- Metaio. 2015b. Metaio Engineer. [Online] <http://www.metaio.com/engineer/>, Visitado: Febrero, 2015.
- Metaio. 2014. Junaio. [Online] <http://www.junaio.es/>, Visitado: Febrero, 2015.
- Metaio. 2012. AREL. [Online] <https://dev.metaio.com/arel/overview/>, Visitado: Febrero, 2015.
- Microsoft. 2015. HoloLens. [Online] www.microsoft.com/microsoft-hololens, Visitado: Marzo, 2015.

- MILGRAM, P., TAKEMURA, H., UTSUMI, A. AND KISHINO, F. 1994. Augmented Reality: A Class of Displays on the Reality-Virtuality Continuum. In *Proc. Telemanipulator and Telepresence Technologies, SPIE*, Philadelphia, PA, 282-292.
- NAVAB, N., TRAUB, J., SIELHORST, T., FEUERSTEIN, M. AND BICHLMEIER, C. 2007. Action- and Workflow-Driven Augmented Reality for Computer-Aided Medical Procedures. *Computer Graphics and Applications, IEEE* 27, 10-14. .
- Inc NewTek. 2015. LightWave 3D. [Online] www.lightwave3d.com/, Visitado: Marzo, 2015.
- NINCAREAN, D., ALIA, M.B., HALIM, N.D.A. AND RAHMAN, M.H.A. 2013. Mobile Augmented Reality: The Potential for Education. *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 103, 657-664. .
- NyARToolKit. 2015. NyARToolKit. [Online] nyatla.jp/nyartoolkit/wp/, Visitado: Marzo, 2015.
- LLC Oculus VR. 2015. Oculus Rift. [Online] www.oculus.com/rift, Visitado: Marzo, 2015.
- OSFIELD, R. AND BURNS, D. 2004. Open scene graph. *2005-08-15*][*2007-10-08*].<http://www.openscenegraph.org> .
- J. Pilet, A. Geiger, M. Ozuysal, V. Lepetit and A. Mazzone. 2008. BazAR. [Online] <http://cvlab.epfl.ch/software/bazar>, Visitado: Febrero, 2015.
- PORTER, S.R., SMITH, R. AND THOMAS, B. 2010. Supporting the industrial design process with spatial augmented reality. .
- PovRay. 2015. PovRay. [Online] www.povray.org/, Visitado: Marzo, 2015.
- PyARTK. 2015. PyARTK. [Online] mgldev.scripps.edu/projects/pyartk/, Visitado: Marzo, 2015.
- Qualcomm Inc. 2015. Vuforia. [Online] www.qualcomm.com/products/vuforia, Visitado: Marzo, 2015.
- RASKAR, R., WELCH, G. AND FUCHS, H. 1998. Spatially augmented reality. In *First IEEE Workshop on Augmented Reality (IWAR'98)*, Citeseer, 11-20.

- REITMAYR, G., EADE, E. AND DRUMMOND, T. 2005. Localisation and Interaction for Augmented Maps. In *Proceedings of the 4th IEEE/ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, IEEE Computer Society, Washington, DC, USA, 120-129.
- ROS MARTÍNEZ DE LAHIDALGA, IKER. 2008. Moodle, la plataforma para la enseñanza y organización escolar. .
- ROSENBERG, L.B. 1993. Virtual fixtures: Perceptual tools for telerobotic manipulation. In *Virtual Reality Annual International Symposium, 1993., 1993 IEEE, IEEE*, 76-82.
- SEICHTER, H., LOOSER, J. AND BILLINGHURST, M. 2008. ComposAR: An intuitive tool for authoring AR applications. In *Mixed and Augmented Reality, 2008. ISMAR 2008. 7th IEEE/ACM International Symposium on*, 177-178.
- Soulbit7. 2015. AR Invaders. [Online] <http://invaders.soulbit7.com/>, Visitado: Febrero, 2015.
- STAFFORD, A., PIEKARSKI, W. AND THOMAS, B. 2006. Implementation of God-like Interaction Techniques for Supporting Collaboration Between Outdoor AR and Indoor Tabletop Users. In *Proceedings of the 5th IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, IEEE Computer Society, Washington, DC, USA, 165-172.
- SUTHERLAND, I.E. 1968. A head-mounted three dimensional display. In *Proceedings of the December 9-11, 1968, fall joint computer conference, part I*, ACM, 757-764.
- THOMAS, B., CLOSE, B., DONOGHUE, J., SQUIRES, J., DE BONDI, P., MORRIS, M. AND PIEKARSKI, W. 2000. ARQuake: An outdoor/indoor augmented reality first person application. In *Wearable computers, the fourth international symposium on*, IEEE, 139-146.
- THOMAS, B., PIEKARSKI, W. AND GUNTHER, B. 1999. Using Augmented Reality to Visualise Architecture Designs In An Outdoor Environment. In *UNIVERSITY OF SYDNEY, AUSTRALIA*.
- Total Immersion. 2015. Total Immersion AR Pro SDK. [Online] www.totalimmersion.com/products/dfusion-suite/dfusion-pro, Visitado: Marzo, 2015.

- Total Immersion. 2011. D'Fusion Studio. [Online] <http://www.t-immersion.com/products/dfusion-suite/dfusion-studio>, Visitado: Febrero, 2015.
- Ubisoft. 2015. Rabbing Rabids alive & kicking. [Online] <http://rabbids.ubi.com/bwaaah/es-ES/home/index.aspx>, Visitado: Febrero, 2015.
- Unity Technologies. 2015. Unity3D. [Online] www.unity3d.com, Visitado: Marzo, 2015.
- VINOT, J., LETONDAL, C., LESBORDES, R., CHATTY, S., CONVERSY, S. AND HURTER, C. 2014. Tangible Augmented Reality for Air Traffic Control. *interactions* 21, 54-57. .
- WAGNER, D., LANGLOTZ, T. AND SCHMALSTIEG, D. 2008. Robust and unobtrusive marker tracking on mobile phones. In *Mixed and Augmented Reality, 2008. ISMAR 2008. 7th IEEE/ACM International Symposium on*,IEEE, 121-124.
- WAGNER, D. AND SCHMALSTIEG, D. 2007. Artoolkitplus for pose tracking on mobile devices. na, .
- WAGNER, D., SCHMALSTIEG, D. AND BILLINGHURST, M. 2006. Handheld AR for Collaborative Edutainment. In *Proceedings of the 16th International Conference on Advances in Artificial Reality and Tele-Existence*, Hangzhou, China, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 85-96.
- WAGNER, D., PINTARIC, T., LEDERMANN, F. AND SCHMALSTIEG, D. 2005. Towards Massively Multi-user Augmented Reality on Handheld Devices. In *Proceedings of the Third International Conference on Pervasive Computing*, Munich, Germany, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 208-219.
- WANG, Y., LANGLOTZ, T., BILLINGHURST, M. AND TIM BELL. 2009,. An Authoring Tool for Mobile Phone AR Environments. In *New Zealand Computer Science Research Student Conference (NZCSRSC 2009)*, 1-4.
- WERNHUAR TARNG AND KUO-LIANG OU. 2012. A Study of Campus Butterfly Ecology Learning System Based on Augmented Reality and Mobile Learning. In *Wireless, Mobile and Ubiquitous Technology in Education (WMUTE), 2012 IEEE Seventh International Conference on*, 62-66.

- WILSON, K.L., DOSWELL, J.T., FASHOLA, O.S., DEBEATHAM, W., DARKO, N., WALKER, T.M., DANNER, O.K., MATTHEWS, L.R. AND WEAVER, W.L. 2013. Using Augmented Reality as a Clinical Support Tool to Assist Combat Medics in the Treatment of Tension Pneumothoraces. *Military medicine* 178, 981-985. .
- WOO, M., NEIDER, J., DAVIS, T. AND SHREINER, D. 1999. OpenGL programming guide: the official guide to learning OpenGL, version 1.2. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., .
- YOUNG, M. 1971. Pinhole Optics. *Appl.Opt.* 10, 2763-2767. .
- YU, D., JIN, J., LUO, S., LAI, W. AND HUANG, Q. 2010. A Useful Visualization Technique: A Literature Review for Augmented Reality and its Application, limitation & future direction. 311-337. .
- ZAUNER, J., HALLER, M., BRANDL, A. AND HARTMAN, W. 2003. Authoring of a mixed reality assembly instructor for hierarchical structures. In *Mixed and Augmented Reality, 2003. Proceedings. The Second IEEE and ACM International Symposium on,IEEE*, 237-246.
- ZHANG, Z. 2012. Microsoft kinect sensor and its effect. *MultiMedia, IEEE* 19, 4-10.