
Realidad aumentada sin marcadores: posibilidades, librerías y prueba de concepto.

Por
Colin Ulrich Cop,
Patricia Cabrero Villar,
David González Jiménez



UNIVERSIDAD COMPLUTENSE MADRID

Grado en Desarrollo de Videojuegos
FACULTAD DE INFORMÁTICA

Tutor:
Pedro Pablo Gómez Martín

MADRID, 2018–2019

Índice general

	Página
Resumen	9
Palabras clave	9
Abstract	11
Keywords	11
1. Introducción	13
1.1. Motivación	13
1.2. Objetivos	13
1.3. Metodología	14
1.4. Plan de trabajo	15
1. Introduction	17
1.1. Motivation	17
1.2. Objectives	17
1.3. Work methodology	18
1.4. Work plan	19
2. Antecedentes y estado del arte	21
2.1. Definición	21
2.2. Historia	21
2.3. Dispositivos	25
2.3.1. Google Glass	25
2.3.2. Hololens	26
2.3.3. Magic Leap	27
2.3.4. Aryzon	28
2.3.5. Otros dispositivos	29
2.4. Aplicaciones	29
2.4.1. Medicina	29
2.4.2. Educación	30
2.4.3. Arte	31
2.4.4. Fabricación	32
2.4.5. Publicidad	32
2.4.6. Turismo	33
2.4.7. Videojuegos	34
2.4.8. Comercio electrónico (<i>e-commerce</i>)	35

3. Realidad aumentada sin marcadores	39
3.1. Aspectos técnicos	39
3.1.1. Descripción	39
3.1.2. Métodos de seguimiento	40
3.1.3. Tecnologías implicadas en la RA sin marcadores	41
3.2. Librerías de realidad aumentada sin marcadores	46
3.2.1. Wikitude	46
3.2.2. ARKit	47
3.2.3. ARCore	48
3.2.4. Vuforia	49
3.2.5. Kudan	49
3.2.6. MaxST	50
3.2.7. 8th Wall	51
3.2.8. Easy AR	51
3.2.9. ARFoundation	52
3.3. Resumen de características	53
3.3.1. Tabla de funcionalidades	53
3.3.2. Lenguajes y plataformas soportados	53
4. Comparación y análisis de las librerías	55
4.1. Wikitude	56
4.1.1. Calidad de la documentación y primeros pasos	56
4.1.2. Evaluación de las capacidades de la librería	56
4.1.3. Conclusiones	57
4.2. ARKit	57
4.2.1. Calidad de la documentación y primeros pasos	57
4.2.2. Evaluación de las capacidades de la librería	57
4.2.3. Conclusiones	58
4.3. ARCore	59
4.3.1. Calidad de la documentación y primeros pasos	59
4.3.2. Evaluación de las capacidades de la librería	59
4.3.3. Conclusiones	60
4.4. Vuforia	60
4.4.1. Calidad de la documentación y primeros pasos	60
4.4.2. Evaluación de las capacidades de la librería	60
4.4.3. Conclusiones	61
4.5. Kudan	61
4.5.1. Calidad de la documentación y primeros pasos	61
4.5.2. Evaluación de las capacidades de la librería	62
4.5.3. Conclusiones	62
4.6. Maxst	63
4.6.1. Calidad de la documentación y primeros pasos	63
4.6.2. Evaluación de las capacidades de la librería	63
4.6.3. Conclusiones	64
4.7. 8th Wall XR	64
4.7.1. Calidad de la documentación y primeros pasos	64
4.7.2. Evaluación de las capacidades de la librería	64
4.7.3. Conclusiones	65

4.8. Easy AR	65
4.8.1. Calidad de la documentación y primeros pasos	65
4.8.2. Evaluación de las capacidades de la librería	65
4.8.3. Conclusiones	66
4.9. ARFoundation	66
4.9.1. Calidad de la documentación y primeros pasos	66
4.9.2. Evaluación de las capacidades de la librería	67
4.9.3. Conclusiones	67
4.10. Conclusiones pruebas de librerías	67
5. Pruebas de concepto	71
5.1. Primeros prototipos	71
5.1.1. Pruebas con ARToolKit	71
5.1.2. Harry Potter	73
5.1.3. DragonBall	75
5.1.4. Juego de cartas Yu-gi-oh	76
5.1.5. JengAR	78
5.2. Pruebas de concepto	79
5.2.1. Instrucciones de montaje de muebles en AR - AmueblAR	79
5.2.2. Visualizador de objetos en AR con gafas Aryzon - Visualizer 3D	82
5.2.3. Juego multijugador con <i>cloud anchor</i> - BombARdero+	84
6. Conclusiones y trabajo futuro	87
6.1. Futuros pasos	88
6. Conclusions and future work	89
6.1. Future work	90
7. Contribuciones	91
7.1. Colin Ulrich Cop	91
7.2. Patricia Cabrero Villar	92
7.3. David González Jiménez	93
Repositorios	95
Bibliografía y enlaces de referencia	100

Acrónimos

- RA: Realidad aumentada
- SDK: Software development kit (Kit de Desarrollo de software)
- SLAM: Simultaneous localization and mapping
- HMD: Head Mount Display
- API: Application Programming Interface
- IDE: Integrated Development Environment (Entorno de desarrollo integrado)

Resumen

La realidad aumentada (RA) se ha convertido en la última década en una tecnología accesible a millones de usuarios a través de sus dispositivos móviles. Basada inicialmente en el uso de marcadores, hoy en día existen algoritmos que permiten su uso sin marcadores que, pese al éxito de juegos como Pokemon Go, no han terminado de despegar de manera general.

Este trabajo de fin de grado plantea un análisis de las posibilidades de la realidad aumentada sin marcadores. A lo largo del proyecto se exploran y estudian las librerías existentes, de cara a descubrir sus similitudes y diferencias realizando pequeñas pruebas de concepto. Con los resultados obtenidos de este estudio se han realizado tres aplicaciones que explotan las características de las librerías y las tecnologías estudiadas. La primera aplicación que se desarrolló ayuda al montaje de muebles en realidad aumentada. En esta aplicación se puso a prueba la librería ARCore y sus funcionalidades sin marcadores. En segundo lugar, se ha desarrollado un videojuego multijugador de cara a mostrar sus posibilidades en el campo haciendo uso de los puntos de ancla en la nube y la detección de planos. Por último, se ha creado una aplicación que permite disfrutar de la experiencia de una manera más natural usando las gafas de Aryzon¹ interactuando con los objetos colocados en el plano escogido.

Palabras clave

Realidad aumentada, SLAM, ARCore, ARKit, RA sin marcadores, multijugador, seguimiento, detección de planos.

¹Gafas *cardboard* que permiten tener una experiencia de realidad aumentada [17].

Summary

In the last decade augmented reality (AR) has become an accessible technology to millions of users through their smartphones. Initially based on the use of markers, today there are algorithms capable of using it without markers. Despite the success of games like Pokemon Go, this technology has not yet been consolidated.

This thesis presents an analysis of the possibilities of augmented reality, focused on markerless AR. Throughout this project, existing libraries are explored and studied, in order to discover their similarities and differences by developing small proofs of concept.

With the results obtained from this study, three applications have been developed. These applications try to leverage all the potential of the libraries and the technologies studied. The first application helps the user in the furniture assembling process, showing it step by step, using ARCore and its markerless functionalities. Secondly, in order to show the AR capabilities in videogames, a multiplayer videogame was developed using cloud anchors and plane detection. Finally, the last application allows us to visualize the experience in a more natural way using Aryzon² glasses interacting with the objects placed in the chosen plane.

Keywords

Augmented reality, SLAM, ARCore, ARKit, markerless AR, multiplayer, tracking, plane detection.

²Cardboard glasses that allow us to have an AR experience [17].

Capítulo 1

Introducción

1.1. Motivación

En los últimos años la realidad aumentada se ha convertido en una tecnología madura y accesible por un gran número de usuarios. Apoyada por el auge de dispositivos móviles inteligentes y la mejora de sus componentes, la realidad aumentada está presente en un mayor público. Se trata de un tema de actualidad recurrente y de referencia en múltiples productos de innovación.

Se estima que el tamaño del mercado de la RA crecerá de 3.5 mil millones en el 2017 a más de 198 mil millones de dólares en el 2025 [49]. En los próximos años se espera que revolucione mercados como el arte, la educación, la publicidad, procesos de fabricación y montaje, turismo y especialmente el mundo de los videojuegos. Debido a este gran crecimiento del sector es un excelente tema para tratar de cara a conocer las limitaciones y puntos a destacar de cada una de las tecnologías existentes en la actualidad.

1.2. Objetivos

El objetivo principal del desarrollo de este proyecto será conocer las posibilidades y limitaciones de las librerías de realidad aumentada sin marcadores existentes en la actualidad. En base a este objetivo se fijaron los siguientes objetivos específicos:

1. Investigación de las principales librerías de realidad aumentada sin marcadores.
2. Implementación de pruebas de concepto de carácter básico de cada una de ellas para analizar los pros y contras.
3. Análisis de los resultados obtenidos de las pruebas de concepto.
4. Planteamiento e implementación de diferentes aplicaciones de realidad aumentada sin marcadores en función de los resultados obtenidos en el análisis.
5. Desarrollo de una aplicación/concepto de realidad aumentada en multijugador.

1.3. Metodología

Para llevar a cabo estos objetivos se investigará a través de fuentes en internet, artículos científicos, estudios previos y libros, todos ellos reflejados en la bibliografía y webgrafía. Estos recursos serán la base de la fundamentación del proyecto y por ello se abrirán dos vías de investigación principales: se analizará por una parte acerca de las diferentes librerías de desarrollo en realidad aumentada y por otra las diferentes aplicaciones en el mercado de esta tecnología.

La revisión bibliográfica que se llevará a cabo vendrá definida por las dos áreas del conocimiento que se deben investigar de cara a desarrollar el objetivo principal planteado. En el campo del conocimiento técnico de la realidad aumentada se investigará a través de bibliografía recomendada por profesores de la Facultad de Informática de la Complutense. Los libros más significativos por tratar serán “*Handbook of Augmented Reality*” de Borko Furht, “*Augmented reality games I, Understanding the Pokémon GO phenomenon*” de Vladimir Geroimenko y “*Augmented reality games II, The gamification of education, medicine and art*” de Vladimir Geroimenko.

Debido al continuo cambio que experimentan las tecnologías de realidad aumentada, gran parte de la investigación se verá supeditada a artículos científicos, así como a la documentación de las distintas librerías que lideran el mercado.

Una vez completada la investigación teórica se testearán diferentes librerías ya existentes con el objetivo de encontrar sus fortalezas y debilidades. A través de estas conclusiones se podrá llevar a cabo una prueba de concepto más sólida y veraz evitando cometer errores anteriormente observados.

Se buscará conocer las características específicas de las librerías escogidas delimitando los pros y contras de cada una de ellas. Para identificarlas se realizará un test definido y cerrado, poniendo a prueba las diferentes librerías en el mismo dispositivo de cara a establecer una comparativa entre todas. Estas aplicaciones de test se desarrollarán cuando sea posible en el entorno Unity.

Por último, se desarrollarán tres aplicaciones de mayor nivel de complejidad que nos permitirán explotar las virtudes de tres librerías diferentes de cara a mostrar y fijar las conclusiones extraídas del anterior estudio.

Para la creación de las aplicaciones, se utilizará como entorno de desarrollo principalmente **Unity 2019.2** y **Unity 2018.3**, uno de los motores de videojuegos punteros y referentes en la industria. Gracias a su versatilidad e interfaz intuitiva nos permitirá iterar rápidamente a lo largo de los test y pruebas de concepto. Este motor es uno de los escogidos por la facultad para estudiar a lo largo del grado de desarrollo de videojuegos con lo que nos resultará más cómodo y familiar, favoreciendo de nuevo la agilidad en el desarrollo.

Como IDE³ se utilizará **Visual Studio 2019** acompañado por Visual Studio Tools para Unity una extensión gratuita de Visual Studio que lo convierte en una completa herramienta con la que desarrollar aplicaciones y juegos multiplataforma con Unity. Esta

³IDE: Integrated Development Environment (Entorno de desarrollo integrado)

herramienta permite la integración de Visual Studio con el editor de Unity haciendo más eficaz el desarrollo.

El sistema de control de versiones escogido será **Github** ya que estamos habituados a la plataforma y nos permite integrarlo con herramientas como Visual Studio y Microsoft Teams.

La herramienta de seguimiento de tareas y comunicación entre el equipo escogida será **Microsoft Teams** dada su versatilidad y posibilidad de añadir herramientas.

1.4. Plan de trabajo

La primera parte del trabajo consistirá en informarnos e investigar sobre las librerías de RA sin marcadores que lideran el mercado esta parte se realizará conjuntamente por los tres. Se estudiarán las diferentes tecnologías que componen la experiencia de la RA en los dispositivos móviles para entender cómo funciona a bajo nivel y estar actualizados con la demanda del mercado de cara a poder hacer una prueba de concepto verosímil con las aplicaciones de RA actuales.

En una segunda parte, después de identificar las librerías que existen en el mercado, se probarán (las que sean posibles) teniendo en cuenta tanto los dispositivos y plataformas soportadas por cada una de ellas como la existencia o no de una licencia gratuita o de prueba. Se desarrollarán diversas aplicaciones de carácter básico a modo de test, que nos permitirán poner a prueba cada una de las principales librerías de realidad aumentada sin marcadores, comprobando su funcionamiento. Los test serán ejecutados en las mismas condiciones lumínicas y con el mismo dispositivo de cara a obtener una mayor precisión en la comparación. En este caso nos dividiremos el desarrollo de los test de manera equitativa.

Una vez que se hayan encontrado las librerías que mejor se ajusten a nuestras necesidades, se desarrollarán las siguientes pruebas de concepto:

- **Montar muebles de Ikea:** se mostrará el proceso de montaje de un mueble en realidad aumentada, ayudando al usuario a montar cada una de las piezas del proceso.
- **Juego multijugador:** se desarrollará un juego en el que poder poner a prueba las tecnologías de realidad aumentada sin marcadores combinada con puntos de localización en la nube(sección 3.1.3) permitiendo crear un juego multijugador.
- **Visualizador de modelos 3D con las gafas Aryzon** (sección 2.3.4): se hará uso de unas gafas de realidad aumentada tipo *cardboard* en las que podremos ver superpuesto un modelo 3D, se podrá interactuar con el modelo 3D a través del mando de Xbox permitiendo rotarlo, escalarlo y moverlo.

Capítulo 1

Introduction

1.1. Motivation

Over the last few years, the augmented reality has become a mature technology and it is accessible to a large amount of users. Supported by the rise of smartphones and the improvement of their components, augmented reality is increasingly being adopted by a larger audience. That is why this is an important and recurring topic in innovation products.

The augmented reality market is expected to grow from 3.5 million in 2017 to more than 198 million dollars by 2025 [49]. In the next few years it is expected to transform several markets like art, education, advertising, manufacturing processes, tourism and specially videogames among others. It is an outstanding topic due to the growth of this sector and that is why we decided to study the limitations and capabilities of the currently available technologies.

1.2. Objectives

The main goal of the thesis will be determining and studying the capabilities and limitations of the currently available markerless augmented reality libraries. In order to accomplish this, we established the following objectives:

1. Research and study of cutting-edge markerless augmented reality libraries.
2. Deployment of simple applications with each library in order to find its pros and cons.
3. Analysis of the results achieved by the previous applications.
4. Approach and implementation of different markerless augmented reality proof of concept based on the previously achieved results.
5. Development of a multiplayer augmented reality application.

1.3. Work methodology

To carry out these goals, we will investigate through internet sources, scientific articles, previous studies and books; all of them are reflected in the bibliography and webgraphy. These resources will be the basis of the project's foundation and that is why two main research channels will be opened: on one hand we will research and analyze the different augmented reality development libraries and on the other the different applications in the market for this technology.

The bibliographical review that will be carried out will be defined by two areas of knowledge that must be investigated in order to develop the main objective. In order to acquire technical knowledge of augmented reality, we will investigate through bibliography recommended by professors of the Complutense IT faculty. The most relevant books will be Borko Furht's "Handbook of Augmented Reality", Vladimir Geroimenko's "Augmented reality games I, Understanding the Pokémon GO phenomenon" and "Augmented reality games II, The gamification of education, medicine and art".

Due to the continuous change experienced by augmented reality technologies, the research will be strongly bounded to scientific articles, as well as to the documentation of the different libraries that lead the market.

Once the bibliographical research is completed, different existing applications will be tested in order to find their strengths and weaknesses. Thanks to these conclusions we will carry out a more solid and truthful proof of concept, avoiding previously observed mistakes.

We will seek to know the specific characteristics of the chosen libraries delimiting the pros and cons of each of them. To identify them, we will perform several defined and closed tests, testing the different libraries in the same device in order to establish a comparison between them. These test applications will be developed whenever possible in the Unity environment.

Finally, three applications of greater complexity will be developed that will allow us to exploit the virtues of different libraries in order to show and establish the previous study conclusions.

Unity **2019.2** and **2018.3** will be used as our development environment, as it is one of the leading videogame engines and it is a reference in the industry. Thanks to its versatility and intuitive interface it will allow us to iterate quickly throughout the tests and proofs of concept. We will be more comfortable with this engine as it is the one chosen by the faculty to study throughout the degree of videogame development, facilitating again the agility in development.

Visual Studio 2019 will be used as our IDE, accompanied by Visual Studio Tools for Unity, a free Visual Studio extension that makes it a complete tool with which to develop applications and multiplatform games with Unity. This tool allows the Visual Studio integration with Unity editor allowing us to develop more efficiently.

Github will be the system control version chosen, we are used to the platform and it allows us to integrate it with tools such as Visual Studio and Microsoft Teams.

The task tracking and communication tool between the team will be **Microsoft Teams** given its versatility and the possibility of adding tools.

1.4. Work plan

First of all we will work on researching and analysing cutting-edge markerless AR libraries. This part will be carried out jointly by the three of us. We will study the different technologies that make up the experience of AR on smartphones to understand how it works at a low level and thus be able to figure out the market demand in order to make a credible proof of concept with current RA applications.

Secondly, after identifying the libraries that exist in the market, those will be tested (those that are possible) considering the devices and platforms supported by each of them, also keeping in mind the licenses offered in each of them.

We will develop test applications with each library, these will allow us to evaluate each of the markerless augmented reality libraries, checking their efficiency. The tests will be executed in the same light conditions and with the same device in order to obtain a greater precision in the comparison. In this case we will divide the test development in an equitable manner.

Once the libraries that best fit our needs have been found, the following proofs of concept will be developed:

- **Assemble Ikea furniture:** the process of assembling a piece of furniture in augmented reality will be displayed. Helping the user in the assembling process.
- **Multiplayer game:** we will develop a game in which we will combine markerless technology with cloud anchors (section 3.1.3) allowing us to create an online multiplayer game.
- **3D models visualizer with Aryzon glasses** (section 2.3.4): we will use cardboard augmented reality glasses in which we can see a 3D model overlapped with the real world, in the application the user will interact with the 3D model through the Xbox controller allowing to rotate, scale and move it.

Capítulo 2

Antecedentes y estado del arte

2.1. Definición

Se llama realidad aumentada al conjunto de tecnologías que permite a un usuario ver en tiempo real contenido virtual superpuesto al mundo real mediante un dispositivo tecnológico. El objetivo de esta tecnología es simplificar y facilitar el trabajo de los humanos en ciertos sectores, y gracias al increíble crecimiento que se está dando en el desarrollo de la realidad aumentada, sobre todo en los dispositivos móviles, la convierte en una tecnología muy barata y accesible. A diferencia de la realidad virtual, la realidad aumentada no sustituye la realidad, sino que la complementa para ayudar a comprender mejor el entorno en el que nos rodea.

2.2. Historia

En la década de 1950, surgió por primera vez el término realidad aumentada cuando Morton Heilig, cinematógrafo estadounidense, pensó en un prototipo de cine que estimulara todos los sentidos del ser humano de manera efectiva, de modo que la experiencia de cine fuera más completa. Años más tarde, concretamente en 1962, Heilig construyó dicho prototipo, al que llamó Sensorama. Se trataba de un cine inmersivo y novedoso que incluía funcionalidades como 3D, visión angular (actualmente conocido como IMAX), vídeo en color, sonido en estéreo, además de estimular otros sentidos con aromas, viento, y vibraciones (figura 2.1). En la actualidad, estas funcionalidades están disponibles en algunos cines, por ejemplo la sala 4DX de Kinépolis [23].



Figura 2.1: Cartel publicitario de la máquina Sensorama

El HMD (*Human Mounted Display*) se inventó en 1968 por Ivan Sutherland, fue el primer sistema que permitía ver en tiempo real las aristas de sencillos objetos 3D (*Wireframe*) superpuesto al mundo real. Empleaba dos sistemas de *tracking* para calcular el registro de la posición y rotación de la cámara; uno mecánico y otro basado en ultrasonidos. Debido a su gran peso se ancló el artefacto al techo, lo que le dio un aspecto característico que inspiró su nombre “Espada de Damocles” (figura 2.2). Gracias a este dispositivo Sutherland pasó a la historia como uno de los pioneros de los cascos de realidad aumentada.

Sin embargo, no fue hasta 1992 cuando se acuñó el término de realidad aumentada tal y como lo entendemos hoy en día por Tom Caudell y David Mizell. Dos ingenieros de Boeing que proponían el uso de esta novedosa tecnología para mejorar la eficiencia y experiencia de las tareas realizadas por operarios humanos asociadas a la fabricación de aviones.

La aparición del primer videojuego en realidad aumentada ocurrió en el año 2000. Bruce Thomas demostró en el ISWC (*International Symposium on Wearable Computers*) su videojuego ARQuake. El sistema empleaba una brújula digital, un receptor de GPS y métodos de visión basados en marcas [5]. Los jugadores tenían que llevar una especie de ordenador portátil a la espalda, un casco de visión estereoscópica⁴ y un mando de dos botones [2] (figura 2.3(a)). El funcionamiento del HMD (figura 2.3(b)) consistía en un divisor de haz que recibía la imagen virtual desde una pantalla que permitía ver el mundo real y el virtual en los ojos del usuario. La imagen resultante (figura 2.3(c)) permitía una inmersión muy lograda para la época.

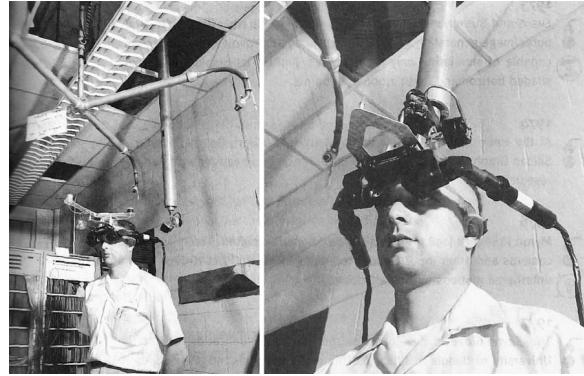
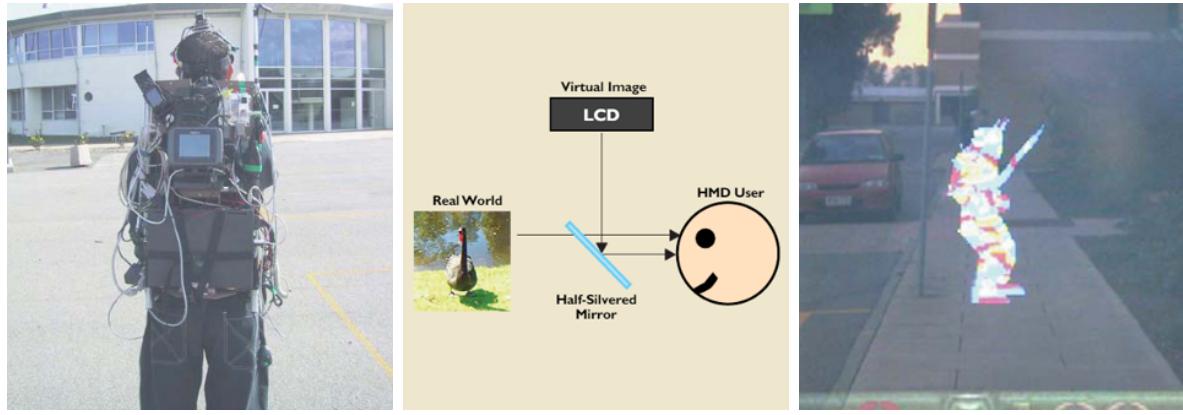


Figura 2.2: Ivan Sutherland “Espada de Damocles” 1968.

⁴ Dos puntos de vista poco separados entre sí.



(a) Dispositivo utilizado

(b) Funcionamiento del HMD

(c) Visualización del videojuego

Figura 2.3: ARQuake [2]

En 2007, en el ISMAR (*International Symposium on Mixed and Augmented Reality*), Klein y Murray presentaron el sistema de *tracking* PTAM (Parallel Tracking and Modeling) una variante al SLAM, que separa la localización y el mapeado en hilos diferentes. El SLAM, descrito en detalle en la sección 3.1.3 es una tecnología que sirve para que localizar la posición dentro de un entorno y modelarlo. Separar estos dos procesos en hilos diferentes permitía conseguir unos resultados en tiempo real muy sólidos.

En 2008 se creó Wikitude, una aplicación que utilizaba el GPS para mostrar al usuario información de la Wikipedia según el lugar en el que estuviese, pudiendo obtener datos sobre monumentos, esculturas o construcciones que estuvieran cerca. La aplicación (figura 2.4) permite al usuario enfocar con la cámara del dispositivo obteniendo información como es el nombre del castillo, su origen, y la distancia a la que está.



Figura 2.4: Wikitude App 2008 [5].

Un año más tarde, en 2009, desarrolló el videojuego ARhrrrr!, del género shooter. El primer videojuego en realidad aumentada para *smartphone* con contenido 3D de alta calidad. Se generaba un mapa 3D sobre un marcador, y el objetivo era rescatar a los humanos de la ciudad y matar a los zombies (figura 2.5)[5].



Figura 2.5: Ejemplo del videojuego ARhrrrr!⁵.

En el mismo año, el estudio español Novorama creó el videojuego Invizimals, un juego de PSP (PlayStation Portable) que se convirtió en un éxito mundial, vendiendo más de 8 millones de copias en todo el mundo en el primer trimestre de 2010. Necesitaba usar la cámara adicional que se conectaba a la PSP, y gracias al uso de los marcadores, se podía registrar la posición del jugador.

En 2014 nació Project Tango, uno de los primeros desarrollos de realidad aumentada pensado para ser distribuido mundialmente en los *smartphones*. En 2015, Tango pasó a formar parte de Google. El objetivo era mapear espacios tridimensionales usando solamente un dispositivo portátil. Esta tecnología sólo se desarrolló para el dispositivo Phab2 Pro de Lenovo, el cual incluía 3 cámaras, algo inusual en aquel momento. Las tres funcionalidades principales para el desarrollo de esta tecnología han sido:

- Seguimiento del movimiento: Se trata del uso de las características visuales del entorno combinadas con los datos proporcionados por los sensores de movimiento incorporados en el teléfono, el acelerómetro y por el giroscopio, teniendo como objetivo realizar un seguimiento de los movimientos hechos del dispositivo.
- Reconocimiento del ambiente: Tango almacena la información del entorno que le rodea, buscando los puntos característicos en cada fotograma que recibe de las cámaras usando tecnologías explicadas con más detalle en la sección 3.1.3.
- Percepción de profundidad: Gracias a las cámaras especiales que incorpora el dispositivo, Tango podía calcular tamaños y distancias en el entorno que se encuentra.

Después de 3 años, en 2017, Google decidió cerrar el desarrollo de Tango y se centró en su tecnología actual, ARCore (sección 3.2.3), que es el competidor directo de ARKit (sección 3.2.2), la librería de Apple.

⁵Imagen sacada de <https://github.blairmacintyre.me/site-archive/ael-2015/research/games/arhrrrr/>

2.3. Dispositivos

A principios de la década de 2010 las empresas más importantes de software y hardware empezaron a interesarse en el desarrollo de dispositivos que permitiesen el uso de aplicaciones de realidad aumentada sin tener que recurrir a móviles o *tablets*. De esta forma, el uso de la realidad aumentada sería mucho más cómodo y abriría la puerta a un mundo completamente nuevo de posibilidades que hasta entonces eran desconocidas.

2.3.1. Google Glass

Uno de los primeros proyectos de hardware para realidad aumentada fueron las Google Glass, impulsadas por Google, que fueron presentadas por primera vez en abril de 2012. El prototipo (figura 2.6) consta de una montura de gafas sin cristales, que en su patilla derecha incorpora una cámara y un pequeño procesador que permite la superposición de imágenes virtuales sobre lo que está viendo realmente el usuario. Aunque el diseño ha ido variando a lo largo de los años con las diferentes generaciones de Google Glass, el modelo ha mantenido la misma funcionalidad y se ha ampliado con nuevas prestaciones.



Figura 2.6: Prototipo original de Google Glass⁶

Google comenzó a comercializar las gafas al año siguiente bajo el título de Glass Explorers al precio de 1500 dólares. Su público objetivo eran los desarrolladores, a los que se facilitó enormemente su labor con el fin de expandir los límites del nuevo hardware. Sin embargo, debido a que el dispositivo tomaba imágenes del mundo real y podía guardarlas y procesarlas se enfrentó a diversos problemas de privacidad. Una de las medidas que se tomaron por aquel entonces fue no aprobar ninguna aplicación que utilizase reconocimiento facial.

Ya en mayo 2014 salió a la venta para todos los públicos en Estados Unidos, retrasándose un mes en llegar a Europa. Las principales prestaciones que presentaba el dispositivo consistían en la consulta de mensajes, imágenes y otro tipo de datos presentes en los móviles sin necesidad de utilizarlos, poder consultar internet, siempre que se dispusiera de conexión, mediante órdenes de voz y grabar vídeo a una resolución de 720 píxeles [14].

Con el paso del tiempo y debido en parte a la falta de aplicaciones y a los problemas con la privacidad las gafas empezaron a fracasar en el mercado. Sin embargo Google cambió de estrategia y redirigió el objetivo de su producto. En 2017, las Google Glass Enterprise fueron presentadas y salieron a la venta, pero ahora se vendían a grandes empresas para

⁶Imagen sacada de <https://www.justinmind.com/blog/prototype-google-glass-applications>

facilitar el trabajo a sus empleados y hacerlo más cómodo mientras ganaban eficiencia. Con estas gafas se puede compartir lo que está viendo un usuario con el resto, así como obtener información rápida para el despeño de cualquier actividad, minimizando las distracciones y ganando en productividad.

El último paso de este dispositivo se ha dado en 2019, con el anuncio de las Google Glass Enterprise Edition 2 (figura 2.7), que mejora las prestaciones de sus antepasados añadiendo características como el uso de inteligencia artificial o incluyendo el nuevo procesador *Snapdragon XR1*. Aún no se conoce su fecha de lanzamiento, pero se ha anunciado que su precio ahora rondará los 1000 dólares. Pese a todo, no están pensadas para el público masivo sino para continuar mejorando el rendimiento de los trabajadores de las empresas [25].



Figura 2.7: Actuales Google Glass Enterprise 2⁷

2.3.2. Hololens

Microsoft, una de las empresas más importantes en el mundo del software, lanzó en el año 2016 su primer prototipo de gafas de realidad aumentada. Dicho prototipo, llamado Hololens, sólo se distribuía a desarrolladores y empresas por un precio de 3000\$. Se considera un HMD ya que son más grandes que unas simples gafas (figura 2.8). Este dispositivo proyecta imágenes 3D sobre los cristales, permitiendo disfrutar de una experiencia de realidad aumentada. Incluso permite interactuar con los objetos con las manos gracias a la tecnología de Kinect⁸.

⁷Imagen sacada de <https://www.google.com/glass/start/>

⁸Tecnología de Microsoft lanzada en 2010 que se usaba en la Xbox. Incluía reconocimiento de voz y de gestos.



(a) Hololens 1

(b) Hololens 2

Figura 2.8: Dispositivos Hololens⁹

Tres años más tarde, en el año 2019, Microsoft anuncia Hololens 2 (figura 2.8(b)), una versión mejorada de la misma que se puede obtener por 3500\$. Las posibilidades con este dispositivo son inquietantes. En su presentación, mostraron una demo que consistía en una conferencia a distancia, donde se veían hologramas de los usuarios remotos, y compartiendo la misma escena virtual. El reconocimiento de gestos permite interactuar con los objetos virtuales [42]. Esta tecnología abre un sinfín de posibilidades para colaborar y trabajar con gente de forma remota.

2.3.3. Magic Leap

Magic Leap es una empresa estadounidense fundada por Rony Abovitz en 2010, su primer producto del mercado fueron las gafas Magic Leap One, dispositivo que prometió marcar un antes y un después en el mundo de los dispositivos de realidad aumentada. No fue hasta 2018 cuando empezó a distribuirse en Estados Unidos.

Las Magic Leap poseen un chip fotónico único en la industria, este chip permite modificar el espectro de luz generando imágenes nítidas ante nosotros. Gracias a esta tecnología prometedora, la empresa consiguió 3.000 millones de dólares de inversión y se declaró al dispositivo como futuro revolucionario [13].

El producto está compuesto por una unidad principal con procesador y batería externo, unas gafas y un mando (figura 2.9(a)). Las gafas cuentan cámaras y sensores capaces de detectar el espacio en el que el usuario se encuentra. Sin embargo, este dispositivo posee un campo de visión muy reducido unos 50° frente a los 220° de visión de un humano. A pesar de esta limitación es uno de los dispositivos líderes en el mercado.

⁹Imagenes sacadas de <https://www.microsoft.com/es-es/hololens>



(a) Magic Leap One con su visor, unidad principal y mando. (b) Visualización en Magic Leap

Figura 2.9: Magic Leap¹⁰

2.3.4. Aryzon

Las gafas de Aryzon son unas gafas estilo *cardboard* de realidad aumentada compuestas por dos espejos que reflejan la imagen del *smartphone* al cristal por donde nosotros vemos el mundo real, permitiendo tener esa visión de realidad aumentada (figura 2.10). El funcionamiento es parecido al HMD que se usó en el año 2000 cuando se creó el ARQuake (figura 2.3(b)).



(a) Como funcionan las gafas Aryzon

(b) Ejemplo visualización Aryzon

Figura 2.10: Gafas Aryzon¹¹

Estas gafas son accesibles para cualquier usuario, ya que cuestan 30€ y permiten disfrutar de la realidad aumentada sin necesidad de estar sujetando el móvil con la mano. La empresa proporciona un SDK donde te facilita el desarrollo de la aplicación, ya que se necesita una vista estereoscópica.

¹⁰Imagen sacada de <https://www.magicleap.com>

¹¹Imagen sacada de <https://www.igadgetsworld.com/aryzon-diy-augmented-reality-headset/>

2.3.5. Otros dispositivos

Los productos más destacados a día de hoy son las Google Glass, Hololens y Magic Leap, sin embargo también cabe nombrar dispositivos como Epson Moverio y Vuzix.

Las *smartglasses* son un nicho de mercado de la realidad aumentada que revolucionará el mundo de la industria. Es por eso que las empresas tienen mucho interés en fabricar y desarrollar un producto con esta tecnología. Recientemente, Facebook ha confirmado la colaboración con la empresa de gafas Luxottica para crear un dispositivo de realidad aumentada llamado Orion. Llevará integrado un asistente personal de Facebook y el objetivo principal es sustituir al teléfono móvil. Por otra parte, de manera paralela, está desarrollando un dispositivo llamado Agios, el cual tiene integrado un sensor de movimiento, que se sincronizará a las gafas para trabajar conjuntamente [57].

Tras la salida del sistema operativo iOS 13, existen rumores de que Apple está trabajando en unas gafas de realidad aumentada, ya que han visto en el código y en la documentación referencias a un dispositivo de realidad aumentada [40]. Las especulaciones tienen unas expectativas muy altas, ya que ARKit (sección 3.2.2) es una de las librerías líderes en la realidad aumentada para *smartphones*.

2.4. Aplicaciones

En este apartado se recogen las principales aplicaciones por sectores que existen de la realidad aumentada. Estas son la medicina, educación, arte, seguridad, publicidad, turismo, e-commerce y videojuegos.

2.4.1. Medicina

El estrés intenso, incomodidad o la forma de vida sedentaria son factores que tienen un impacto negativo en el bienestar de las personas y su calidad de vida. Se han desarrollado numerosos prototipos para ayudar a la gente con este tipo de problemas. Por otra parte, las técnicas de *gamificación*¹² han sido usadas con éxito en aplicaciones cuyo fin es mejorar la salud de las personas incentivándolas a cambiar sus malos hábitos.

Además, ciertos conceptos de juegos de realidad aumentada pueden ser utilizados con propósitos de salud en ancianos. La actividad física es un aspecto clave al hacernos mayores. Algunas consideraciones conceptuales e investigaciones han ayudado a desarrollar entornos de realidad aumentada que sirvan a las personas mayores para hacer ejercicio y mejorar su calidad de vida.

Debemos mencionar también que además de ayudar a los pacientes, la realidad aumentada también es capaz de ayudar a los doctores, como podemos ver en la figura 2.11, los cirujanos se sirven de un programa que crea una proyección virtual sobre el cuerpo del paciente que funciona como guía en el transcurso de la operación.

¹² Técnica de aprendizaje que traslada mecánicas de los juegos al ámbito educativo-profesional con el fin de conseguir mejores resultados.

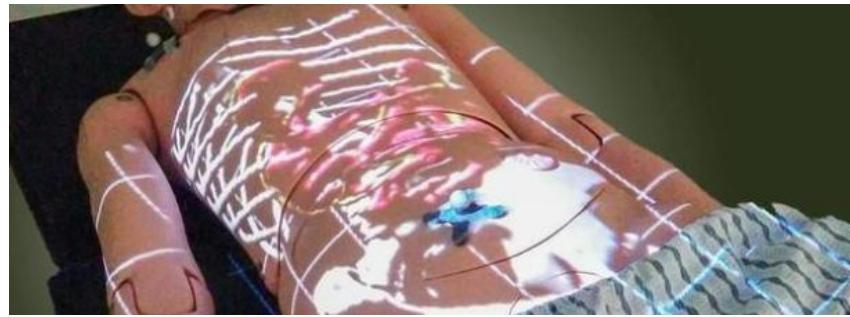


Figura 2.11: Uso de realidad aumentada en una intervención quirúrgica¹³.

Como éste, existen gran variedad de conceptos que implican el uso de la realidad aumentada para favorecer el bienestar y la calidad de vida de las personas [26].

Una de las aplicaciones dignas de mención es Brain Power, un software que se vale de dispositivos de realidad aumentada como las Google Glass para favorecer la integración de personas con síndrome de Asperger. La aplicación propone una serie de desafíos a modo de juego que mejoran las habilidades sociales de los pacientes y mide su progreso periódicamente [18].

2.4.2. Educación

Los juegos en realidad aumentada, en el sector de la educación, tienen el potencial de abrir el camino a nuevas formas de aprendizaje y adquisición de conocimientos, cambiando la experiencia del estudio. Aun así, todavía hay algunas dudas sobre cómo los juegos que utilizan la realidad aumentada pueden ser usados para expandir el proceso educativo convencional. Pese a este desconocimiento, es innegable que los métodos de aprendizaje basados en la gamificación y en el uso de la realidad aumentada han conseguido una mayor implicación de los estudiantes y un mayor interés por el aprendizaje de nuevas materias [26].

Un ejemplo de ello es la aplicación Elements 4D, surgida en Kickstarter, que proporciona una nueva visión de los elementos químicos y facilita el aprendizaje con una parte narrativa y otra jugable (figura 2.12).

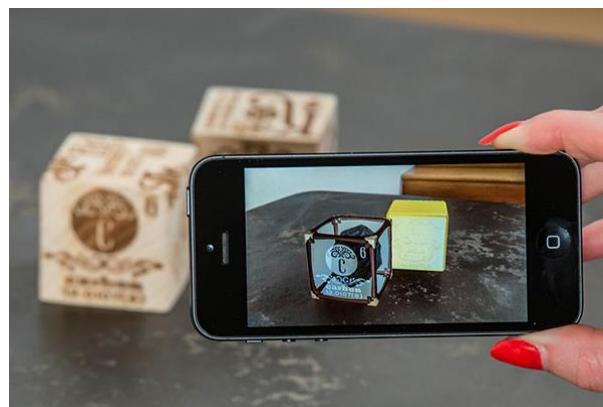


Figura 2.12: Juego educativo Elements 4D¹⁴

¹³Imagen sacada de <https://i2.wp.com/blogthinkbig.com/wp-content/uploads/2018/04>

Otra propuesta educativa, en este caso de la BBC, es Civilisations AR [56]. Consiste en un programa que emplea la realidad aumentada para representar diferentes objetos pertenecientes a civilizaciones y culturas del pasado con los que podemos interactuar. Además incluye funcionalidades como los rayos X, para explorar más a fondo, o guías audibles para obtener más información.

También existen aplicaciones que utilizan la realidad aumentada para ayudar a aprender idiomas, como en el caso de Mondly [56]. La aplicación utiliza un profesor virtual proyectado sobre el mundo real así como otros muchos objetos que facilitan la asociación de los términos con su significado, permitiendo aprender hasta 33 idiomas en una experiencia nueva y gratificante.

2.4.3. Arte

El arte es un campo en constante transformación que se renueva cada año para transmitir emociones desconocidas y contar nuevas historias que permanezcan en el recuerdo de los espectadores. Como no podía ser de otra forma, los artistas de vanguardia han querido probar nuevas formas de creación con el uso de la realidad aumentada, elaborando obras híbridas que se valgan tanto del arte tradicional como de figuras y elementos virtuales que aportan una nueva capa de expresión y profundidad.

En ocasiones, estas obras permiten incluso la interacción del espectador. Este hecho es especialmente notable, ya que no sólo permite el paso de una experiencia pasiva a una activa, sino que a veces la propia obra permite la extensión de su arte, que es complementado por la visión y las acciones del que la ve.

Uno de los ejemplos más recientes es Mirages & Miracles [22], una exposición de arte contemporáneo cuyo núcleo es la fusión de lo material y lo inmaterial, jugando con lo que consideramos real y falso. Los dibujos de la exposición han sido hechos a mano, pero con la ayuda de *tablets* los espectadores pueden ver la obra al completo y ver lo que está más allá de la simple pintura, con figuras virtuales minimalistas y evocativas. Los artistas son Adrien Mondot y Claire Bardainne, cuyas últimas obras aspiran a ser arte digital vivo.



Figura 2.13: Exhibición de Adrien M y Claire B *Mirages and Miracles*¹⁵.

¹⁴Imagen sacada de <https://www.researchgate.net/publication/317145820/figure/fig1/AS:498232876253185@1495799382235/Figura-3-Elements-4D-Fuente-http-crowdfundbeatcom.png>

¹⁵Imagen sacada de <https://graffica.info/adrien-m-claire-b/>

2.4.4. Fabricación

Con la constante mejora de la tecnología móvil y los múltiples avances en el campo de la realidad aumentada no sorprende la cantidad de aplicaciones con diferentes utilidades que podemos encontrar en el mercado. El sector industrial no es una excepción, siendo éste uno de los principales beneficiados por la evolución de este campo. De hecho, como comentábamos en la sección de historia, el término de realidad aumentada fue acuñado por dos trabajadores de este campo, ingenieros de Boeing, que utilizaban esta tecnología para facilitar la fabricación de aviones.

En la actualidad, valiéndose de estos sistemas, ya podemos empezar a hablar de fábricas inteligentes que mejoran la transmisión de información entre las máquinas y los operarios y permiten una mejor gestión de los recursos y de los datos disponibles, mejorando así la eficiencia y la productividad de forma drástica. Un ejemplo de ello está en el diseño industrial: disponiendo de las diferentes piezas virtuales, la realización de prototipos y el intercambio de los diferentes componentes es sumamente rápido y no tiene ningún impacto sobre otros modelos. Pero sus aplicaciones en una fábrica también se extienden al mantenimiento de la misma o incluso a la seguridad laboral [44].

Otra de las principales aplicaciones en este terreno es la formación de los operarios mediante el uso de textos explicativos o imágenes que aparecen en realidad aumentada.

Se puede observar en la figura 2.14 algunas de las aplicaciones en la industria, donde se puede señalar dónde hay una avería, o que hay que inspeccionar, muy útiles para compartir información entre trabajadores y evitar malentendidos.

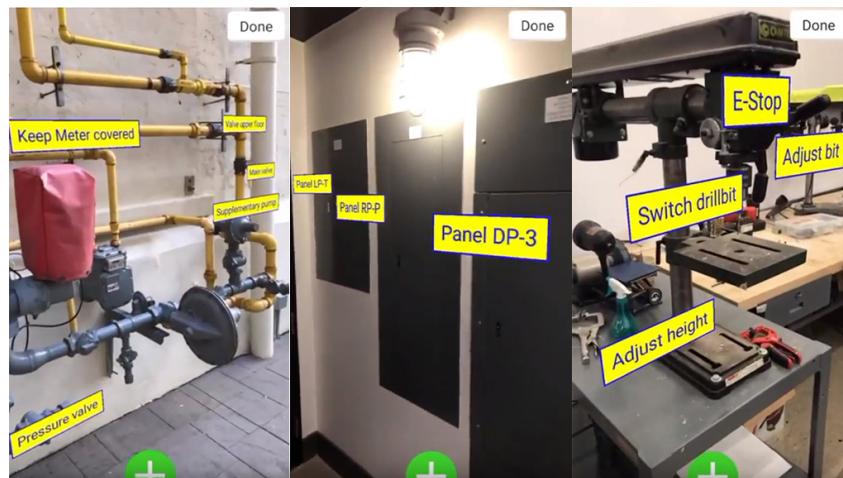


Figura 2.14: Ejemplos de uso en la Fabricación [48].

2.4.5. Publicidad

No es ningún secreto que el objetivo primordial de la publicidad es vender un producto a un comprador concreto. Desde el principio de los tiempos la publicidad ha sido agresiva y vistosa, con el fin de llegar a un público mayor y sorprender al que la presencia para que se plantee si necesita lo que se le está vendiendo. En los días que vivimos la publicidad se vale de todos los recursos que tiene a su alcance para ampliar sus horizontes, y la

tecnología de la realidad aumentada no es excepción. Los anuncios y aplicaciones de realidad aumentada son especialmente exitosos, ya que el usuario no sólo está viendo la publicidad, sino que es partícipe de ella y puede sumergirse en la experiencia con todos sus sentidos.

Multitud de empresas han empezado a incorporar la realidad aumentada en sus diferentes anuncios. Un ejemplo de ello en el campo del motor son las aplicaciones de BMW, que permiten la interacción por parte de los clientes con modelos virtuales de sus productos, como coches u otros vehículos [45].

Otro ejemplo del uso de esta tecnología en la publicidad es la idea de Burger King que se puede ver en la figura 2.15. Se trata de una campaña publicitaria que incentiva a los usuarios a “quemar” los carteles de la competencia mediante el uso de una aplicación móvil. Como recompensa por ello se recibe un cupón canjeable por una hamburguesa del Burger King [20].



Figura 2.15: Burger King campaña publicitaria¹⁶.

2.4.6. Turismo

En los últimos años hemos podido encontrar un gran aumento en el desarrollo de aplicaciones de realidad aumentada. Esto se debe principalmente a que la tecnología cada vez es mejor, más barata y accesible, y permite disfrutar de este campo a muchas más personas y de una forma más directa e intuitiva. Precisamente es necesario diseñar aplicaciones intuitivas y sencillas si van a ir dirigidas a un público que no esté habituado al mundo digital; como es en el caso de las aplicaciones de realidad aumentada en el sector del turismo [43].

Existen multitud de maneras en las que el usuario puede interactuar con el entorno en estas aplicaciones. Con esto el turista además de estar físicamente en un destino también puede interactuar con él, haciendo más completa su experiencia y obteniendo información o fuentes de ocio que de otras maneras habrían pasado inadvertidas. A día de hoy ya existen lugares como parques de atracciones que se valen de esta

¹⁶Imagen sacada de
<https://www.designboom.com/technology/burger-king-burn-that-ad-free-whopper-virtual-reality-03-21-2019/>

tecnología para guiar a los usuarios por el recinto y les ofrecen diferentes actividades y juegos para que su experiencia sea inolvidable. Un ejemplo de ello es el prototipo implementado por Lego para el parque Legoland Dinamarca. El usuario puede seguir a un guía virtual hecho de piezas Lego y previsualizar las atracciones antes de montarse [35].



Figura 2.16: Aplicación para el parque Legoland¹⁷.

Por supuesto, la realidad aumentada presenta otro beneficio primordial a la hora de viajar a otro país con una lengua diferente a la nuestra. Existen aplicaciones que con el uso de la cámara traducen en tiempo real carteles y cualquier tipo de texto de un idioma a otro. Como podemos observar en la figura 2.17, su uso es muy cómodo, sobre todo para los idiomas que no utilizan nuestro alfabeto, ya que no hace falta escribir el texto para traducirlo. Esto resulta increíblemente rápido y eficaz a la hora de obtener información y sin duda mejorará la experiencia turística en destinos internacionales.



Figura 2.17: Traductor de Google en RA¹⁸.

2.4.7. Videojuegos

El sector del ocio electrónico es en la actualidad más grande de lo que nunca ha sido. Se sabe que el dinero que mueve es mayor al que suman las industrias cinematográfica y discográfica juntas [8], y no sorprende a nadie el hecho de que la realidad aumentada haya encontrado aquí el nicho perfecto en el que asentarse y desarrollarse.

El auge de la industria del videojuego viene impulsado en los últimos años por la accesibilidad de los móviles y el desarrollo de juegos para estos dispositivos. De hecho, la aplicación que permitió la difusión masiva al público general de la realidad aumentada fue Pokémon Go en 2016 (aunque ya lo había conseguido en menor medida Invizimals en 2009), que se convirtió en un fenómeno mundial durante el verano de dicho año y que este año ha experimentado otro pico de facturación que no se alcanzaba desde su lanzamiento [29]. Una de las claves de su éxito fue innegablemente basarse en la conocida

¹⁷Imagen sacada de <https://www.youtube.com/watch?v=gSTJmO9nMpU>

¹⁸Imagen sacada de <https://www.muyinteresante.es/tecnologia/articulo/el-nuevo-google-translate-traduce-imagenes-y-voz-211421238921>

franquicia, sin embargo, cada ciertos años sale al mercado una nueva entrega de la saga principal en las consolas de Nintendo y no logra la difusión y fiebre masiva que sí consiguió esta aplicación, lo que nos sugiere que la realidad aumentada y la accesibilidad también son decisivos en el entusiasmo del público.



Figura 2.18: Captura del juego Pokémon Go¹⁹.

Como hemos comentado antes, la gamificación de otros sectores como la educación es una realidad, y muchos de los juegos que vemos en estos ámbitos se valen de la realidad aumentada para proporcionar al usuario una experiencia de aprendizaje nueva y más satisfactoria.

El futuro en este campo es sin ninguna duda de los más prometedores, puesto que un alto porcentaje de los jugadores afirma que si se llegase a prescindir de las pantallas de dispositivos móviles para el despliegue de aplicaciones en realidad aumentada y se utilizasen visores más pequeños y cómodos de alta durabilidad y precio asequible, no dudarían en utilizar esta tecnología en su tiempo de ocio habitual [47].

2.4.8. Comercio electrónico (*e-commerce*)

Los probadores virtuales están marcando tendencia en las nuevas generaciones de aplicaciones y estrategias de venta. Estas aplicaciones hacen uso de la realidad aumentada con tecnologías como el reconocimiento de rostros, reconocimiento de superficies o estimación de luces, y son punto de referencia en el mercado los siguientes ejemplos:

1. Ikea Place

Esta aplicación permite al usuario ver el catálogo de Ikea y una vez seleccionado el elemento verlo en la habitación real con las dimensiones reales del objeto.

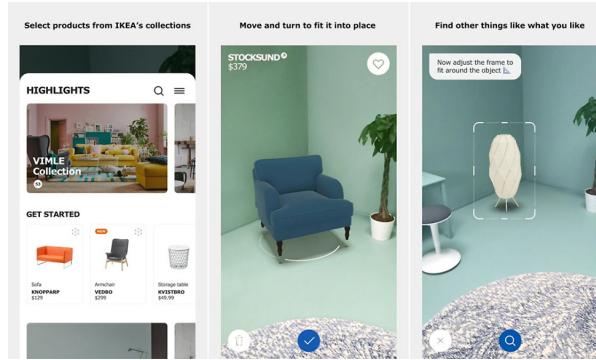


Figura 2.19: IKEA Place AR probador virtual²⁰.

2. YouCam Makeup

Esta aplicación es un excelente y conseguido ejemplo de e-commerce en el mundo de la belleza donde se aplica esta tecnología. La calidad del *tracking* del pelo es bastante precisa generando una experiencia agradable.



Figura 2.20: Imagen representativa de YouCam Makeup²¹.

3. L’Oreal (Modiface)

Esta Aplicación permite al usuario maquillarse con los productos de L’Oreal en realidad aumentada, así como escoger el color que mejor combine con sus prendas. Muestra los productos relacionados con esa tonalidad y ofrece la posibilidad de comprarlos dentro de la aplicación.

²⁰Imagen sacada de <https://www.droid-life.com/wp-content/uploads/2018/03/ikea-place-android-app-980x580.jpg>

²¹Imagen sacada de <https://www.techeblog.com/artificial-intelligence-software-hair-color-youcam-makeup-app/>

Resumen

Como se ha visto en este capítulo, la realidad aumentada ha ido creciendo y evolucionando desde 1950 con el prototipo de Sensorama hasta novedosas aplicaciones existentes en la actualidad.

En la actualidad la realidad aumentada está presente en multitud de sectores como la medicina, la educación, el arte, la publicidad, el turismo, la fabricación y los videojuegos. Ante el crecimiento y las posibilidades de esta tecnología se han desarrollado diferentes librerías que pasaremos a analizar en el siguiente capítulo.

Por otro lado, para un correcto conocimiento y análisis de las funcionalidades de estas librerías, también estudiaremos en el siguiente capítulo las tecnologías implicadas en la realidad aumentada sin marcadores.

Capítulo 3

Realidad aumentada sin marcadores

3.1. Aspectos técnicos

3.1.1. Descripción

La realidad aumentada es una tecnología que permite mezclar el mundo virtual con el mundo físico, añadiendo la información virtual a la información física ya existente en tiempo real, permitiendo al usuario comprender mejor el entorno que le rodea [1]. En la última década, con la aparición de los dispositivos móviles más potentes y las librerías gratuitas de realidad aumentada, el desarrollo de aplicaciones de RA se ha vuelto muy accesible para cualquier desarrollador. Esto implica un aumento drástico en el número de ideas y aplicaciones que surgen día a día.

En la actualidad existen tres tipos de seguimiento en la realidad aumentada:

- **Realidad aumentada con marcadores (2D y 3D):** Los marcadores son imágenes impresas, dibujos o objetos previamente escaneados en los que la aplicación reconoce el marcador y activa la experiencia sobre dicho marcador.
- **Realidad aumentada sin marcadores:** Esta es la tecnología más novedosa, ya que combina diferentes tecnologías como SLAM (detallado en el apartado 3.1.3), seguimiento del movimiento, reconocimiento del ambiente o detección de planos para proyectar el objeto y mantenerlo anclado en el mismo punto sin ayuda de ningún marcador.
- **Realidad aumentada por geolocalización:** Este tipo de experiencias vinculan a la RA con una ubicación geolocalizada específica. Normalmente se utilizan en exteriores y proporcionan información contextual sobre el ambiente que nos rodea.

Las posibilidades de la realidad aumentada sin marcadores están en pleno auge y cada vez aparecen más aplicaciones que mejoran la experiencia de usuario y facilitan el trabajo en algunos sectores como puede ser la industria, la arquitectura, la medicina o la educación.

3.1.2. Métodos de seguimiento

El seguimiento (*tracking*) es como conocemos al proceso de localización espacial del usuario en un entorno. Es uno de los aspectos clave en el desarrollo de aplicaciones de realidad aumentada ya que cuanto mejor sea la estimación de la posición y orientación del dispositivo, mejores y más acertados serán los resultados y la inmersión por parte del usuario [6].

Los algoritmos de *tracking* se encargan de calcular la posición del dispositivo en relación a los objetos de la escena física. Existen multitud de tecnologías y métodos en los que se apoyan para llevarlos a cabo, siendo los más comunes: sensores mecánicos, magnéticos, sónicos, dinámicos y basados en visión. Hoy en día estos últimos son los más extendidos, ya que la mayoría de los dispositivos desde los que se despliegan las aplicaciones de realidad aumentada, como móviles o tabletas, disponen de una o varias cámaras [5].

El *tracking* basado en cámaras de visión es un subcampo del *tracking* 3D, en el que se utilizan algoritmos de visión por ordenador para obtener de la manera más precisa posible el posicionamiento de seis grados de libertad del dispositivo (tres grados de posición y otros tres de orientación).

En este tipo de posicionamiento es necesario disponer de un conjunto de marcadores o referencias tridimensionales para situar la cámara con respecto a ellas. Aunque recientemente se ha tendido a utilizar en menor medida los marcadores físicos para dar una experiencia más rápida y cómoda al usuario, han sido una herramienta imprescindible en los primeros pasos de la realidad aumentada para la obtención de la localización relativa de la cámara. Según David Marimón [3], fundador y director general de Catchoom, se pueden distinguir dos aproximaciones distintas a la hora del tracking: los métodos *Bottom-Up* y los *Top-Down*.

Bottom-Up

Las aproximaciones del tipo *Bottom-Up* pretenden obtener la posición del dispositivo basándose en la información que recibe a través de la cámara.

Para este método de *tracking* la posición y orientación se calculan en base a la obtención de características geométricas de objetos y sus relaciones. Dependiendo de los datos procesados, el seguimiento puede ser con marcas o sin ellas.

El *tracking* basado en marcas era el método más extendido en los inicios de la realidad aumentada. Hace sus cálculos con la ayuda de marcadores físicos que en su mayoría presentan un gran contraste entre blanco y negro para que los sensores puedan percibirlos con mayor facilidad. Existen también marcadores que usan códigos de colores y diferentes formas geométricas, aunque después de ser sometidos a prueba se comprobó que los más sólidos eran los marcadores cuadrados. Por otra parte, este método es especialmente sensible a la oclusión, ya que cuando se pierde el marcador, es imposible calcular la posición del dispositivo. Por este motivo, se han diseñado algoritmos que pueden hacer frente a este problema mediante estimaciones que completan marcas que no son totalmente visibles.

Paralelamente, el *tracking* sin marcas se basa únicamente en las características intrínsecas de la escena, estructuras físicas de fácil percepción como las esquinas de una mesa.

Existen técnicas en este campo que utilizan información sobre superficies planas detectadas en el campo de visión, siendo su principal inconveniente su alto coste computacional. De hecho, actualmente este tipo de localización no lo pueden llevar a cabo todos los dispositivos del mercado.

Por otra parte, hay técnicas basadas en modelos. No están considerados marcadores porque son parte del medio natural, pero al igual que con éstos los cálculos se basan en el reconocimiento de los objetos que existen y que el programa está preparado para procesar.

Finalmente, existen métodos que actúan en escenarios donde no se es capaz de obtener planos o modelos. Sin embargo, estas técnicas no son utilizadas habitualmente por sus altos requisitos de cómputo.

Top-Down

Las aproximaciones del tipo *top-down* intentan estimar desde la posición actual del dispositivo si se está percibiendo lo que se esperaba. Es decir, primero se estima la posición y después se confirma esa estimación con los datos del medio.

En este caso, se emplean modelos de movimiento para hacer una predicción de la localización del dispositivo. Partiendo de esta estimación, se busca mediante la cámara una serie de referencias parciales que corrijan la predicción y mejoren el posicionamiento del observador. Por ello, todos los modelos *top-down* se ven obligados a trabajar con filtros y modelos de asociación de datos.

El uso de estos filtros permite combinar varios métodos de *tracking* y mantener un registro constante de los objetos y la cámara, aunque los marcadores, modelos o planos sean parcialmente visibles por oclusión o se hayan escapado del campo de visión.

Además del seguimiento óptico, se han desarrollado numerosas alternativas con las que proporcionar otros métodos de localización (como los *beacons* o la ubicación del GPS) y así complementar y facilitar una localización más precisa y correcta. A las aproximaciones que se valen de varias de estas técnicas se las denomina métodos de fusión.

3.1.3. Tecnologías implicadas en la RA sin marcadores

El objetivo de la realidad aumentada es integrar contenido virtual en el mundo real. Idealmente, dicho contenido se tendría que comportar exactamente como uno real, esto requiere una información muy precisa sobre la posición del dispositivo que usa el usuario con respecto al objeto virtual. Para ello, se han desarrollado diferentes tecnologías que junto a los sensores de los teléfonos actuales (giroscopio, acelerómetro, sensor de luz) y a la cámara, permiten disfrutar de una experiencia casi ideal [1].

SLAM (*Simultaneous localization and mapping*)

Esta tecnología se basa en una serie de algoritmos complejos que utiliza los datos de los sensores para construir un mapa de un entorno desconocido y a su vez para saber dónde está localizado el dispositivo [1]. Esta técnica es usada por robots y por vehículos autónomos. Unos de los ejemplos más presentes en la actualidad son los robots aspiradores, conocidos como *Roomba*.

El objetivo principal es saber la localización del usuario en el entorno. En el momento que empiezan los algoritmos, no se tiene ningún tipo de información del entorno. Normalmente, sólo tarda unos pocos segundos en crear un mapa aproximado del entorno con lo que calcula una posición inicial. Más adelante, el mapa creado va creciendo y mejorando en base a la información que obtiene desde el fotograma de la cámara.

Aunque este término empezó a aparecer en la década de los 90, las primeras implementaciones carecían de cámaras o sensores que proporcionaban información visual. SLAM estaba pensado para la navegación con robots en entornos desconocidos, hasta que en 2007 Georg Klein y David Murray vieron el potencial de esta tecnología usando sensores visuales en la realidad aumentada [9].

Reconocimiento del ambiente

Cuanto mejor entienda la aplicación cómo es el entorno que le rodea, mejor será la experiencia del usuario. Por ello, uno de los objetivos principales es el reconocimiento de superficies. El funcionamiento de esta tecnología consiste en procesar cada fotograma obtenido por la cámara y encontrar puntos característicos. Los puntos pueden ser cualquier cosa que ayude a identificar objetos (esquinas, líneas, bordes de objetos, colores, gradientes, etc). En el momento en el que se intenta detectar un plano en una superficie donde el color sea uniforme y carezca de textura o patrones seguramente no funcione con normalidad [31]. Con estos puntos, luego se construye una malla que va a servir como superficie en la escena de nuestra aplicación y con la cual podremos interactuar activándole las físicas y colisión.

Seguimiento instantáneo

El *tracking instantáneo* es una tecnología que no necesita ninguna información previa del entorno para instanciar el objeto, a contrario de la detección de planos. Cuando se empieza el seguimiento, se fija el punto de anclaje y todos los cálculos se realizan con el acelerómetro y el giroscopio, sin procesar apenas la información visual que obtiene de la cámara. Por este motivo, esta tecnología no necesita un alto nivel de luz para funcionar, de hecho EasyAR, una de las librerías que hemos analizado, ni siquiera necesita usar la cámara. La calidad de la experiencia es más pobre frente a la obtenida con reconocimiento de ambiente.

Estimación de la luz

Esta tecnología es muy importante ya que aporta un nivel de detalle excelente, los modelos 3D virtuales se comportan como si fueran reales, se iluminan con la iluminación del mundo físico y emiten sombras en la escena. La estimación de la luz es posible gracias a

la combinación de la información del seguimiento del movimiento y usando un algoritmo de análisis de imagen que determina la intensidad de la luz en la imagen del dispositivo. Cuanto más se mueva la cámara y más información recoja sobre el entorno, más precisos serán los datos de dónde viene la mayor fuente de luz, analizando el nivel de brillo de los píxeles de los fotogramas, por lo que se puede estimar la dirección en la que viene. A esta información se puede acceder desde Unity3D o el motor que se use, donde se le aplican los valores obtenidos a una la luz posicional.

Oclusión

El término oclusión se refiere a cuando un objeto se deja de ver cuando hay otro objeto o elemento que está en medio de la visión. Para disfrutar de una experiencia de realidad aumentada realista, esta tecnología es esencial, los objetos virtuales tienen que seguir esta regla, porque en el momento en el que cruza una persona delante del objeto, o el usuario pasa la esquina y se sigue viendo el objeto virtual, se arruina la inmersión que podemos llegar a conseguir. Conocer únicamente la posición del usuario respecto al punto de anclaje no es suficiente, es importante saber si existe algún objeto o superficie en medio que nos impide la visión [4]. La implementación de esta tecnología es complicada, por lo que no está presente en muchas librerías.

Detección de rostros

Uno de los usos más populares de la realidad aumentada en la actualidad es la detección de caras y su reconocimiento con aplicaciones como Instagram o Snapchat.

Cada cara está compuesta por al menos 80 rasgos distinguibles, como la distancia que existe entre los extremos de la mandíbula, la profundidad de las cuencas oculares o la separación que hay entre los agujeros de la nariz [7]. Los humanos somos especialmente buenos reconociendo estos rasgos porque tenemos una zona del cerebro dedicada específicamente a interiorizar patrones.

Basándose en el funcionamiento del cerebro de una persona se han desarrollado algoritmos que imitan estas asociaciones, dividiendo las caras en un conjunto de puntos de referencia que se llaman *nodal points* y en algunos casos buscando correspondencias con otras fotos tomadas anteriormente. Para tratar de identificar si lo que se está viendo es una cara se siguen los siguientes pasos: primero se comprueba si existe en la imagen un patrón similar al que formarían los rasgos de una cara, y después se pregunta de quién es esa cara. Sin embargo, no existen dos fotos de una misma persona que sean iguales, de manera que los algoritmos tienen que lidiar con 4 problemas fundamentales a la hora de reconocer la cara de una persona: el envejecimiento, la pose, la iluminación y las emociones.

En los últimos años se ha desarrollado un sistema de reconocimiento en 3D llamado *Deepface*, que es capaz de tomar una foto en 2D de un individuo y crear un modelo tridimensional. De esta forma, el sistema tendrá muestras de los rasgos faciales desde todos los ángulos disponibles, solucionando así el problema de la pose.

Por otra parte, el problema del envejecimiento también ha sido debidamente prevenido, ya que al crear la estructura 3D de la cara se tienen en cuenta los *nodal points* más

importantes y que menos varían con el transcurso de los años, como son las curvas de los ojos, de la nariz o de la barbilla. Pero lo que realmente ha supuesto un avance en este campo es el *deep learning*, un método de *Machine Learning* basado en redes neuronales que guía al programa redirigiéndole si va por mal camino. Cada vez que asocia una cara correcta o incorrectamente, registra el proceso por el que ha pasado para realizar la comprobación y queda guardado en un mapa que va ampliándose sucesivamente con cada acierto o error del sistema. De esta manera, cuantas más conexiones se creen mayor será la fiabilidad a la hora de reconocer una cara.

Facebook por ejemplo se vale de este método para el reconocimiento facial y posee una red neuronal de más de 20 millones de nodos, con una fiabilidad del 97.35 % (datos de 2015) [60] y que aun así es inferior a la capacidad de detección de una persona.

Se espera que con la mejora de la tecnología, el reconocimiento facial sea una forma de identificación tan válida como las huellas dactilares y que puedan identificarse las caras de las personas incluso en grabaciones de seguridad en calidad baja y sin color, así como un método de reconocer el género, edad y otras características del individuo para ofrecerle un servicio o producto más acorde con él en ámbitos como la publicidad.

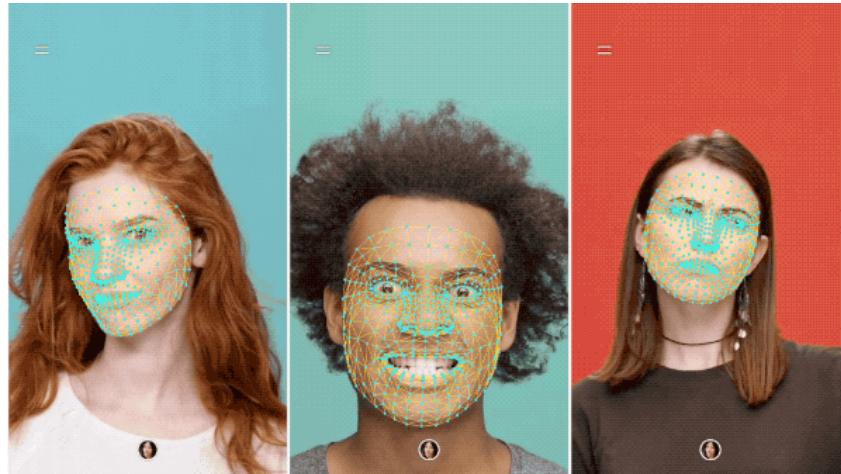


Figura 3.1: Detección de rostros²².

Puntos de ancla(*Anchor*)

Llamamos punto de anclaje o ancla, a un punto en el mundo real que se usa como referencia en el mundo virtual.

En la realidad aumentada tradicional el mecanismo utilizado para situar los objetos virtuales en el espacio real son los marcadores. La cámara identifica el patrón del marcador para localizar la rotación y posición del objeto en cuestión. Sin embargo, en la realidad aumentada sin marcadores no disponemos de este sistema para guiarnos, de manera que tenemos que buscar otra forma de hacerlo.

²²Imagen sacada de <https://ai.googleblog.com/2019/03/real-time-ar-self-expression-with.html>

Una vez localizado el plano o la superficie como explicábamos en secciones anteriores, las librerías de realidad aumentada sin marcadores son capaces de generar un objeto nulo cuya posición servirá como origen de coordenadas. Éste objeto es el llamado punto de ancla o *anchor*, que servirá para colocar objetos virtuales en el mundo físico.

Para hacer un buen uso de ellos se debe evitar colocar puntos de anclaje en superficies brillantes e intentar que la zona tenga una iluminación buena y consistente.

Puntos de ancla en la nube (*Cloud Anchor*)

El *cloud anchor* es un mecanismo que permite colocar objetos virtuales en una escena de manera que múltiples usuarios puedan interactuar y ver los mismos objetos desde dispositivos distintos. Los objetos colocados pertenecen al mismo lugar físico independientemente del dispositivo que se use para verlo. Su funcionamiento es similar al de los puntos de ancla comunes, que se utilizan para fijar un objeto en una posición, con la diferencia de que los *cloud anchors* se hospedan en los servidores en la nube. De esta manera varios dispositivos pueden consultarlos para situar los objetos en la aplicación.

Para ser utilizados, la aplicación en cuestión tiene que tener conexión a internet. Esta tecnología hoy en día sólo está implementada en las librerías ARCore y ARKit. El nombre de *cloud anchors* son actualmente propios del SDK de ARCore, están soportados tanto en Android como en iOS (siempre que el dispositivo lo permita) y funcionan de la siguiente manera: la librería tiene que generar primero un mapa de las proximidades del punto de ancla que será el centro de interés. Para ello, la cámara recopila información y características del entorno cercano desde diferentes ángulos y posiciones durante unos segundos. Cuanto más precisa sea la información recopilada, mejor será la experiencia del usuario. Una vez transcurrido el tiempo, los parámetros del punto se hospedan en la nube y se establece el anchor, devolviendo el servidor un número de identificación único (el *cloud anchor ID*). Cuando otro usuario de la aplicación dirige su cámara hacia el mismo punto de interés, el *cloud anchor* procesa las características visuales del entorno físico desde el nuevo punto de vista. Estas características son comparadas con el mapa 3D que se ha generado anteriormente por el otro dispositivo y se establece la posición y orientación del nuevo usuario con respecto a ello para que pueda ver los objetos virtuales con la mayor precisión posible.

Para identificar un punto de ancla en la nube desde otro dispositivo se debe apuntar al lugar en que está situado sin importar la posición del dispositivo, siempre y cuando haya una línea recta entre ambos y no estén separados por una distancia superior a 10 metros.

En el caso de ARKit la tecnología para el usuario es igual, pero internamente no funciona de la misma manera. Por temas de privacidad, ARKit no manda los datos a un servidor, si no que utiliza el framework *MultipeerConnectivity* de Apple para mandar la información del mapa (*ARWorldMap*) por una conexión cliente a cliente [59].

Cabe mencionar también que los *cloud anchors* tienen una serie de limitaciones en el almacenamiento y el acceso a los datos. En el caso de Google, por ejemplo, sólo se puede acceder a ellos durante las 24 primeras horas después de haber sido colocados y 7

días después cualquier dato en la nube será borrado. El mapa hospedado en la nube no puede ser descargado por ningún usuario y no se puede determinar un lugar geográfico o reconstruir imágenes basándose en el mismo. Además, los datos que envía un dispositivo para que sean comparados con el mapa guardado no se almacenan nunca.

3.2. Librerías de realidad aumentada sin marcadores

En este apartado se describirán las principales librerías de realidad aumentada sin marcadores para más tarde estudiar las capacidades y posibilidades particulares de cada una de ellas en el apartado desarrollo. Por cada librería se recogerán los siguientes datos:

- Breve descripción
- Última versión
- Funciones
- Plataformas disponibles
- Tipos de licencia

Luego se compararán todas entre sí para resumir las funcionalidades que tienen, las plataformas con las que son compatibles y los lenguajes que soportan.

3.2.1. Wikitude

Desarrollada por Wikitude GmbH, es una de las librerías pioneras en el mundo de la realidad aumentada. Lanzaron su primera aplicación en el 2008, desde entonces, son líderes del mercado. La versión que hemos usado ha sido Wikitude SDK 8.7.0 (2019-08-13) [27].

Las principales funcionalidades son:

- Geo AR (Puntos de anclaje vía GPS)
- Reconocimiento de imágenes 2D (marcadores)
- Reconocimiento de objetos 3D

Las plataformas móviles soportadas son:

- Android
- iOS
- Windows
- Unity
- Cordova
- Xamarin

- Flutter
- Titanium

Soporte para Smart Glasses:

- Epson Moverio
- Hololens
- Vuzix

Otras plataformas:

- React Native
- Ionic
- Adobe Air
- Qt by Felgo
- LBAR

Licencias:

- SDK Startup. Gratuita para StartUps con menos de dos años de antigüedad y desarrolladores independientes que obtengan menos de 100.000\$ de beneficio en un año.
- Wikitude Demo. Licencia de 30 días con marca de agua 499€
- Wikitude SDK PRO (Sólo con marcadores y Geo AR). 1 año de licencia 1990€
- Wikitude SDK PRO 3D (Paquete completo). 1 año de licencia 2490€

3.2.2. ARKit

Esta librería está desarrollada por Apple, fue presentada por primera vez en la Apple Worldwide Developers Conference de 2017. La versión con la que trabajamos es la ARKit SDK 3.0 [15]. A diferencia del resto, para usar esta librería en Unity, no hace falta descargar ningún plugin, viene incluido en el paquete de Unity ARFoundation 2.2.

Funcionalidades:

- Reconocimiento de imágenes 2D (marcadores)
- Reconocimiento de objetos 3D
- Reconocimiento de rostro (hasta 3 simultáneamente)
- Oclusión
- SLAM
- Estimación de luces

- Puntos de anclaje en la nube

Las plataformas soportadas son:

- iOS
- Unity (via ARFoundation)
- Unreal Engine 4 [24]

La licencia es gratuita.

3.2.3. ARCore

Esta librería está desarrollada por Google, y fue lanzada en febrero de 2018 como respuesta para competir contra ARKit de iOS. La versión con la que trabajamos es ARCore SDK for Unity v1.11.0 (2019-05-05) [30].

Funcionalidades:

- Reconocimiento de imágenes 2D (marcadores)
- Reconocimiento de objetos 3D
- Reconocimiento de rostro
- SLAM
- Mapeado de áreas grandes
- Estimación de luces
- Puntos de anclaje en la nube

Las plataformas soportadas son:

- Android (Sólo los dispositivos soportados [32])
- Android NDK
- Unity (Android, iOS)
- Unreal Engine 4
- iOS

La licencia para usar ARCore es gratuita.

3.2.4. Vuforia

Esta librería está desarrollada por la empresa PTC. La versión que hemos utilizado ha sido Vuforia SDK Android 8.3.8 (2019-06-13) [53].

Funcionalidades:

- Reconocimiento de imágenes 2D (marcadores)
- Reconocimiento de objetos 3D
- Escáner de objetos 3D

Plataformas:

- Android
- iOS
- Windows
- Smart Glasses

Licencias:

- Básica, 42\$ al mes, limita el número de marcadores por licencia a 100.
- Básica con base de datos en la nube para los marcadores 99\$ al mes.
- Para la versión pro, la cual incluye marcadores ilimitados, acceso a API avanzada, y soporte en producción. Hay que contactar y hacen presupuesto a medida para la empresa.

3.2.5. Kudan

Kudan es una empresa que se dedica al desarrollo de la realidad aumentada, virtual y mixta, además de la conducción autónoma, drones y robots. La versión que hemos utilizado ha sido la Kudan SDK Unity 1.6.0 (2019-07-16) [58].

Funcionalidades:

- Reconocimiento de imágenes 2D (marcadores)
- SLAM

Plataformas:

- Unity (Android, iOS)
- iOS
- Android

Licencias:

- AR Indie: Gratis. Pensado para la fase de desarrollo, protegido con marca de agua.

- AR Business: 1500\$. Para las empresas con menos de un millón de dólares en ingresos.
- AR Enterprise: Para las empresas con más de un millón de dólares en ingresos, hay que contactar con Kudan y proporcionan un presupuesto personalizado.

3.2.6. MaxST

Maxst se fundó en 2010 y se dedica a la investigación y desarrollo de la tecnología de realidad aumentada. Han lanzado Maxst AR SDK, el cual hemos probado en la versión MaxstARSDK_Unity 4.1.3 [41].

Funcionalidades:

- Reconocimiento de imágenes 2D (marcadores)
- Reconocimiento de objetos 3D
- Reconocimiento de códigos de barras y QR

Plataformas:

- Unity (Android,iOS)
- Android
- iOS
- Windows
- macOS
- Epson Moverio BT-300,350 y ODG R-7

Licencias:

- Free. Gratis, para uso no comercial, incluye marca de agua.
- Pro-one. Para aplicaciones con menos de 100k descargas (no incluye actualizaciones). Pago único de 499\$
- Pro-Subscription. Subscripción anual, incluye actualizaciones 599\$ por año
- Enterprise. Para aplicaciones con más de 100k de descargas. Hay que contactar con Maxst para recibir un presupuesto.

3.2.7. 8th Wall

8th Wall desarrolla dos productos diferentes, 8th Wall Web y 8th Wall XR for Unity. El producto que vamos a analizar en el desarrollo es el 8th Wall XR for Unity 11.2.6.519, para que la comparación entre las librerías sea mas precisa, ya que la potencia que tiene en navegador es menor a la que puede llegar a tener una aplicación de Unity [10].

Funcionalidades:

- Reconocimiento de imágenes 2D (marcadores)
- 6 grados de libertad
- SLAM
- Estimación de la luz

Plataformas:

- Unity (Android, iOS)
- Web (A-Frame, BabylonJS, Sumerian, three.js) soportada en la versión web

El uso de 8th Wall XR de Unity es gratuito. En el caso de 8th Wall Web, la licencia se cobra según las visitas en la web. Aparte, se necesita una licencia de desarrollador que cuesta 250\$/mes.

Pago por visita (PPV)	Paquete estándar	PPV de alto tráfico	Paquete alto tráfico
1000\$/mes	3000\$/mes	6000\$/mes	6000\$/mes
0 visitas incluidas	500k visitas incluidas	0 visitas incluidas	5M visitas incluidas
0.01\$/visita	0.01\$/visita extra	0.0025\$/visita	0.0025\$/visita extra

Cuadro 3.1: Licencias 8th Wall

3.2.8. Easy AR

EasyAR es una compañía china que lleva en el mercado desde 2016. Hemos probado la versión EasyARSense Unity SDK v3.0.1(2019-07-07) [21].

Funcionalidades:

- Reconocimiento de imágenes 2D (marcadores)
- Reconocimiento de objetos 3D
- SLAM
- Grabación de pantalla

Plataformas soportadas:

- Unity (Android, iOS)

- Android
- iOS
- Windows

Licencias:

- EasyAR SDK Basic. Gratis
- EasyAR SDK Pro, 499\$ por licencia. Añade el reconocimiento de objetos 3D, la grabación de pantalla y reconocimiento de más de un marcador simultáneo.
- EasyAR SDK Pro trial. Lo mismo que el Pro, pero limitado a 100 usos por día.

3.2.9. ARFoundation

Este último no se trata exactamente de una librería, sino de un paquete de Unity (aún en fase experimental) que integra una API de alto nivel (wrapper) que permite tener el mismo código funcional para ARCore y ARKit, según si se compila el proyecto para Android o para iOS. La versión más reciente es ARFoundation 2.2 (Unity 2019.1), incluye las versiones más recientes de ambas librerías [50].

Soporta las mismas funcionalidades que ARCore y ARKit:

- Reconocimiento de imágenes 2D (marcadores)
- Reconocimiento de objetos 3D
- Reconocimiento de rostro
- Oclusión (iOS con ARKit)
- SLAM
- Mapeado de áreas grandes (ARCore)
- Estimación de luces
- Puntos de anclaje en la nube

Plataformas soportadas:

- Unity (Android, iOS)

Su licencia, al igual que ARCore y ARKit, es gratuita.

3.3. Resumen de características

3.3.1. Tabla de funcionalidades

A continuación, en la tabla 3.2 se puede ver un resumen de las funcionalidades que tiene cada una de las librerías que vamos a analizar. Más adelante, en la parte de comparación y análisis de las librerías, evaluaremos la calidad y eficiencia de estas funcionalidades para cada librería.

SDK	Marcadores 2D	Marcadores 3D	Tipo tracking	SLAM	Detección de rostro	Estimación de luces	Otras
Wikitude	✓	✓	Tracking instantáneo	✓	-	✓	Geo AR
ARKit	✓	✓	Detección de planos	✓	✓	✓	Oclusión, Cloud Anchor
ARCore	✓	✓	Detección de planos	✓	✓	✓	Cloud Anchor
Vuforia	✓	✓	Detección de planos	✓	-	✓	
Kudan	✓	-	Tracking instantáneo	✓	-	✓	
MaxST	✓	✓	Tracking instantáneo	✓	-	✓	
8th Wall XR	✓	-	Detección de planos	✓	-	✓	
EasyAR	✓	✓	Tracking instantáneo	✓	-	✓	Grabación de pantalla
AR Foundation	✓	✓	Detección de planos	✓	✓	✓	

Cuadro 3.2: Comparación de funcionalidades

Como vemos en la tabla 3.2, menos en el reconocimiento de rostro, casi todas las librerías tienen las mismas funcionalidades, por lo que a priori nos sirve cualquiera para realizar nuestras pruebas de concepto. Por lo que se probarán todas y se verán cuáles son las que mejor resultado proporcionan.

3.3.2. Lenguajes y plataformas soportados

Podemos ver en la tabla 3.3 que prácticamente todas las librerías soportan Android e iOS, con lo que podemos deducir que es donde más se está invirtiendo en el mercado. Quizás las *smartglasses* puedan brindar una experiencia de realidad aumentada más agradable, pero todavía está muy lejos de ser accesible para la mayoría de la población, mientras que un dispositivo móvil es mucho más asequible.

SDK	Unity3D (Android, iOS)	Unreal Engine 4	Java	Objective-C	C++	JavaScript
Wikitude	✓	—	✓	✓	—	✓
ARKit	✓	✓	—	✓	—	—
ARCore	✓	✓	✓	✓	—	—
Vuforia	✓	—	✓	✓	✓	—
Kudan	✓	—	✓	✓	—	—
MaxST	✓	—	✓	—	✓	—
8th Wall	✓	—	—	—	—	✓
EasyAR	✓	—	✓	✓	✓	—
AR Foundation	✓	—	—	—	—	—

Cuadro 3.3: Comparación de plataformas y lenguajes soportados

En la tabla 3.3, es muy fácil observar que Unity3D sale ganador, se puede trabajar con absolutamente todas las librerías, además gracias a su editor y entorno visual, resulta muchísimo más cómodo y ahorra mucho tiempo a la hora de desarrollar una aplicación de realidad aumentada.

Después de haber analizado las características de éstas librerías de realidad aumentada, en el siguiente capítulo sometemos a cada librería a una prueba para evaluar su funcionamiento.

Resumen

Existen diferentes formas de seguimiento en la realidad aumentada: utilizando marcadores, no utilizándolos y basándose en la geolocalización. Estos tipos de seguimiento pueden funcionar de dos maneras. La forma *Bottom-Up* busca calcular la posición del dispositivo en relación a la información que obtiene de la cámara. Esta información puede venir en forma de marcadores físicos, planos, patrones faciales, etc. Por otro lado, la forma *Top-Down* hace una estimación inicial de la posición de la cámara y después con la información que recibe corrige la aproximación previa.

En la realidad aumentada sin marcadores se utilizan una serie de tecnologías para calcular la posición de la cámara y los objetos virtuales en la escena física. Algunos de estos métodos son: SLAM, reconocimiento del ambiente, detección de occlusion, detección de rostros y puntos de anclaje.

En este capítulo hemos dado un vistazo rápido a las características principales de las librerías de realidad aumentada sin marcadores. En el siguiente capítulo profundizaremos más en el funcionamiento de cada una y las evaluaremos de acuerdo a las pruebas que hemos realizado.

Capítulo 4

Comparación y análisis de las librerías

De cara a analizar las librerías se desarrollará una aplicación con cada una de ellas. La aplicación consistirá en instanciar un dragón obtenido de la Asset Store de Unity [37].

Los test se desarrollarán en dos condiciones lumínicas diferentes, luz mínima y ambiental. Como luz mínima se considerará una sala de unos 20m² únicamente iluminada por un haz de luz perteneciente a una habitación contigua. En cambio, como luz ambiente se considerará esta misma sala iluminada por cuatro ventanas a la luz de la tarde.

El dispositivo que se utilizará para realizar todas las pruebas será el Pocophone F1. A excepción de las librerías ARKit y Vuforia, que serán probadas con un Iphone 8 Plus debido a que el Pocophone F1 no está en la lista de dispositivos soportados en Vuforia Fusion [54] y ARKit únicamente soporta dispositivos iOS.

Para realizar la evaluación de las capacidades y los límites de cada librería se realizará un test que consistirá en:

- Instanciar un objeto.
- Movernos alrededor de dicho objeto, para comprobar la estabilidad del punto de anclaje.
- Realizar movimientos bruscos y veloces en el teléfono para ver si pierde la referencia en algún momento.
- Sacar al objeto del campo de visión de la cámara y ver cómo reacciona cuando al volver.
- Alejarnos del objeto y ver hasta qué distancia sigue funcionando.
- Observar la calidad de las texturas.
- Observar la estimación de luces.

Una vez realizadas las pruebas el análisis de las librerías se estructurará en los puntos que se describen a continuación:

- Calidad de la documentación y primeros pasos: en este punto evaluaremos la dificultad para realizar una aplicación básica con cada librería, desde el momento en el que se descarga el SDK, hasta que se construye la aplicación.
- Evaluación de las capacidades de la librería: en este apartado se tendrá en cuenta las funcionalidades, las tecnologías que soporta y el nivel personalización dentro de la aplicación, es decir, hasta qué nivel podemos usar la API que nos proporcionan.
- Conclusiones: gracias al estudio realizado estableceremos unas conclusiones sobre el uso de cada librería y decidiremos si nos facilita el desarrollo de alguna prueba de concepto.

Las aplicaciones y desarrollo de las pruebas se encuentran almacenadas en el repositorio: <https://github.com/ar-tfg/DemosLibrerias>.

Los vídeos de las evaluaciones se encuentran almacenados en la siguiente lista de reproducción de Youtube <https://www.youtube.com/playlist?list=PLqQgTAUiabc8AQrcc48Jdglnytus9IoXe>.

4.1. Wikitude

4.1.1. Calidad de la documentación y primeros pasos

La experiencia al crear una aplicación usando Wikitude es buena. Te guían desde el momento en el que entras a la web para descargar el SDK que necesites, eso sí, hace falta registrarse y descargar una clave de licencia para que funcione la aplicación. Dicha clave hay que introducirla en el componente Wikitude Camera que trae el paquete. Todos estos pasos vienen documentados, para facilitar el proceso de prueba, el paquete incluye varias escenas montadas en las que se pueden probar diferentes tipos de tecnologías. Para hacer funcionar todas las escenas, es necesario que el *Package Name* de la aplicación sea “com.wikitude.unityexample”, ya que el SDK está protegido de esta manera. La documentación de la API es muy completa y está muy bien estructurada [28].

4.1.2. Evaluación de las capacidades de la librería

Condiciones de luz mínimas:

https://youtu.be/_4fLQas1NcM

Consigue instanciar el objeto dentro de un plano y posee buena iluminación. El plano falla cuando empezamos a movernos haciendo un giro de 45º no esperado, si estamos encima del modelo se pierde, si damos la vuelta completa sigue perdido. Necesitamos volver a referenciarlo por que no se recupera. La calidad del modelo y su textura es óptima para las condiciones de luz que posee. Se pierde la referencia fácilmente ante los giros. Cuando se realiza un movimiento de cámara en el que el punto de anclaje sale del campo de visión y más tarde se vuelve a enfocar a él, tarda un segundo en volver a posicionar el plano y su objeto. En esta prueba no hemos conseguido que pierda la referencia por distancia. Hace estimaciones con oclusión desapareciendo con la pared.

Condiciones de luz ambiente:

<https://youtu.be/wlqITlPTz3o>

Consigue instanciar el objeto dentro de un plano y posee buena iluminación. El plano falla cuando empezamos a movernos haciendo de nuevo un giro de 45º no esperado, si estamos encima del modelo se pierde pero en este caso se recupera con cierta facilidad. Podemos acercarnos bastante manteniendo el nivel de detalle. La calidad del modelo y su textura es óptima para las condiciones de luz que posee. Se pierde la referencia fácilmente ante los giros. Cuando se realiza un movimiento de cámara en el que el punto de anclaje sale del campo de visión y más tarde se vuelve a enfocar a él, tarda menos de un segundo en volver a posicionar el plano y su objeto. En esta primera prueba no hemos conseguido que pierda la referencia por distancia. Hace estimaciones con oclusión desapareciendo con la pared.

	Luz Ambiente	Luz Mínimas
Estabilidad del punto de anclaje	3	6
Estimación y calidad de iluminación	4	6
Resistencia a movimientos	1	2
Recuperación del ancla	8	8

Cuadro 4.1: Análisis Wikitude

4.1.3. Conclusiones

A pesar de ser una de las librerías pioneras en el sector, los resultados obtenidos no son tan buenos frente a sus competidores, por lo menos en lo que a realidad aumentada sin marcadores se refiere. Lo peor de esta librería es la resistencia a movimientos bruscos (y no tan bruscos), desde que el móvil sufre una pequeña agitación, el modelo desaparece, lo cual es desastroso. Por otro lado, hay que destacar es su intento de detectar oclusión, ha sido la única que ha reaccionado cuando hemos cruzado una pared.

4.2. ARKit

4.2.1. Calidad de la documentación y primeros pasos

La documentación de ARKit es muy extensa y detallada y con una comunidad amplia y activa favoreciendo el desarrollo de aplicaciones con esta tecnología. Existe un plugin para Unity que permite el desarrollo en la plataforma. Para hacer funcionar este SDK es tan sencillo como añadirlo desde el gestor de paquetes de Unity. Este paquete permite partir desde una escena vacía o desde el ejemplo aportado por el SDK, gracias al ejemplo la primera toma de contacto con la librería es bastante accesible. Además la documentación de los primeros pasos es una excelente guía para el conocimiento de la librería y el posterior desarrollo.

4.2.2. Evaluación de las capacidades de la librería

Condiciones de luz mínimas:

https://youtu.be/uwjq-bF_J4M

Necesita significativamente más luz para reconocer el plano, en parte debido al dispositivo. Para esta prueba tuvimos que aumentar la iluminación de la sala. La estimación de la iluminación es excelente como podemos ver a lo largo de la prueba. Al realizar un movimiento alrededor del modelo no se pierde ni se desestabiliza en ningún momento. Al posicionar el teléfono sobre el modelo sigue estable. Las texturas del modelo se ven de manera nítida y realista. En la prueba de resistencia a movimientos bruscos se desplaza el plano en ocasiones recuperándose en un breve periodo de tiempo (menor a un segundo). Cuando se realiza un movimiento en el que el modelo desaparece del campo de visión este no llega a desaparecer nunca del entorno virtual por lo que al volver a enfocar al punto de anclaje la transición es limpia.

Condiciones de luz ambiente:

<https://youtu.be/zcm59hRtJeQ>

Reconoce los planos casi instantáneamente, por lo que nos permite posicionar el objeto sin esperas. La calidad de las texturas son muy buenas y la estimación de luz es impresionante, la luz cambia mientras rodeamos al modelo, estando mas oscuro cuando nos encontramos a contraluz, e iluminado cuando nos situamos entre la luz entrante y el modelo. La estabilidad del objeto es sobresaliente, nos permite rodear el objeto y acercarnos todo lo posible sin que se mueva. La resistencia a movimientos bruscos es grande, situando al modelo siempre en su punto origen. Lo mismo ocurre en la prueba de sacar el punto de anclaje del campo de visión de la cámara, el objeto nunca desaparece, por lo que al volver a enfocar el punto de partida, vemos una transición muy natural.

	Luz Ambiente	Luz Mínimas
Estabilidad del punto de anclaje	10	10
Estimación y calidad de iluminación	9	10
Resistencia a movimientos	9	10
Recuperación del ancla	10	10

Cuadro 4.2: Análisis ARKit

4.2.3. Conclusiones

Como hemos comprobado anteriormente, en unas condiciones de luz mínimas el trabajo de esta librería ha sido casi excelente. Su único fallo era la resistencia a movimientos bruscos, la cual se arregla cuando las condiciones lumínicas son óptimas, pudiendo disfrutar de una experiencia perfecta. Si ya con la luz mínima era casi perfecta, con unas condiciones buenas de luz, estamos ante una de las mejores opciones a la hora de crear una experiencia de realidad aumentada. Cabe destacar que ARKit sólo está soportado en dispositivos iOS, por lo que se puede controlar mucho más el abanico de dispositivos en el que se va a usar la aplicación, lo cual es útil a la hora de asegurar el correcto funcionamiento de las aplicaciones.

4.3. ARCore

4.3.1. Calidad de la documentación y primeros pasos

Hacer funcionar una aplicación con ARCore es tan fácil como descargar el SDK desde su Github oficial [34], añadir una de las escenas de ejemplo a la build y seleccionar dentro de Unity3D la opción de “Player Settings ->XR Settings ->ARCore Supported”. Para probar la realidad aumentada con ARCore no hace falta registrarse ni obtener ninguna licencia para que funcione, exceptuando el uso de los *Cloud Anchors*, en el siguiente capítulo (5.2.3) explicaremos cómo activarlos. La documentación de los pasos a seguir y de la API es bastante completa, además al ser una de las librerías más usadas en la comunidad hay muchos tutoriales de los que puedes aprender. Para facilitar el desarrollo de aplicaciones con ARCore, Google ha desarrollado una aplicación *ARCore Instant Preview*, la cual se engancha vía USB o Wifi con el editor de Unity3D, y permite probar las aplicaciones en el teléfono sin necesidad de construir una aplicación.

4.3.2. Evaluación de las capacidades de la librería

Condiciones de luz mínimas:

<https://youtu.be/uSRztU8z18U>

Necesita más luz que las anteriores librerías para posicionar el objeto, debido a esto tuvimos que iluminar un poco más la sala. La estimación de la iluminación es excelente como podemos ver a lo largo de la prueba. Al realizar un movimiento alrededor del modelo no se pierde ni se desestabiliza en ningún momento. Al posicionar el teléfono sobre el modelo sigue estable. Las texturas del modelo se ven de manera nítida y realista. En la prueba de resistencia a movimientos bruscos no desaparece nunca ni vibra la imagen dando unos resultados óptimos. Cuando se realiza un movimiento en el que el modelo desaparece del campo de visión este no llega a desaparecer nunca del entorno virtual por lo que al volver a enfocar al punto de anclaje la transición es limpia.

Condiciones de luz ambiente:

<https://youtu.be/PLXAEFJn4rQ>

En este caso reconoce los planos al instante gracias a las condiciones lumínicas. La estimación de la iluminación es sorprendente, ya que mientras giramos alrededor del modelo la luz reacciona a nuestros movimientos. Podemos observar que al posicionarnos en contraluz el objeto está menos iluminado que al comienzo de la prueba donde la luz era directa. En el segundo caso creemos que la intensidad de la luz estimada es un poco excesiva. Los movimientos de cámara se mantienen como en la primera prueba teniendo un resultado perfecto.

	Luz Ambiente	Luz Mínimas
Estabilidad del punto de anclaje	10	10
Estimación y calidad de iluminación	8	9
Resistencia a movimientos	10	10
Recuperación del ancla	10	10

Cuadro 4.3: Análisis ARCore

4.3.3. Conclusiones

Los resultados obtenidos con ARCore han sido magníficos. El único punto flojo es cuando las condiciones de luz son muy bajas, porque no es capaz de detectar la superficie. Quitando esa situación, la experiencia obtenida es muy buena, ya que es muy estable y posee estimación de luz que funciona casi a la perfección, exceptuando ciertos momentos en los que es excesivamente luminosa.

La mayor limitación de esta librería es su lista de dispositivos soportados [32]. A pesar de que esta lista va creciendo, aún quedan muchos dispositivos que no están soportados, por lo que el público al que puede llegar una aplicación de realidad aumentada usando ARCore es muy limitado.

4.4. Vuforia

4.4.1. Calidad de la documentación y primeros pasos

Los primeros pasos con esta librería en conjunto con Unity son muy ágiles y accesibles, gracias a una documentación de calidad podemos ser guiados paso a paso para la creación de una nueva experiencia de realidad aumentada. La integración con Unity es muy simple gracias a un paquete que podemos descargar desde el propio editor. Una vez instalado el paquete, los pasos necesarios para crear una aplicación que detecta una superficie, es tan simple como añadir dos objetos proporcionados por Vuforia y el modelo que queremos instanciar a la escena. Para que la aplicación funcione, es necesario registrarse en el portal de desarrollo de Vuforia [53] y generar una clave de licencia. Dicha clave hay que introducirla en el archivo de configuración que incluye el paquete.

4.4.2. Evaluación de las capacidades de la librería

Condiciones de luz mínimas:

https://youtu.be/4Y_Enzrx17w

El nivel de luz de la sala no supone ningún problema para posicionar el modelo. La calidad de las texturas del objeto son malas, además no existe ninguna estimación de iluminación sobre el modelo. El anclaje alrededor del objeto con movimientos suaves es malo ya que se mueve con nosotros. La estabilidad del objeto cuando nos movemos en sus proximidades es mala ya que el objeto cambia de posición a medida que nos acercamos. No conseguimos perder el objeto con la distancia. La capacidad de soportar movimientos bruscos es buena, ya que no pierde la posición del ancla. Al sacarlo del

campo de visión lo mantiene en su posición en todo momento.

Condiciones de luz ambiente:

<https://youtu.be/zIUj-jh7Uts>

Después de mejorar las condiciones de luz se mantienen los problemas de estimación de luz. La visualización del modelo renderiza las texturas de manera muy pobre siendo muy poco realista. La estabilidad del objeto mejora ya que podemos girar alrededor del objeto sin perder la referencia, permitiéndonos acercarnos en esta ocasión. Se mantiene la capacidad de soportar movimientos bruscos y la robustos en cuanto al campo de visión.

	Luz Ambiente	Luz Mínimas
Estabilidad del punto de anclaje	5	7
Estimación y calidad de iluminación	2	2
Resistencia a movimientos	10	10
Recuperación del ancla	10	10

Cuadro 4.4: Análisis Vuforia

4.4.3. Conclusiones

Los resultados obtenidos con Vuforia no son los esperados ya que se trata de una de las librerías pioneras en la realidad aumentada con marcadores y su resultado dista mucho de sus competidores. El listado de los dispositivos soportados [54] no tiene mucha coherencia ya que están los últimos dispositivos de las marcas principales del mercado como Apple o Samsung y sin embargo en las demás marcas encontramos productos muy antiguos generando problemática a la hora de cubrir un rango amplio de usuarios. Como punto fuerte podríamos establecer su detallada documentación. Además nos ha gustado mucho el detalle de tener una cuadrícula (100cm x 100cm) de referencia en Unity para poder saber las dimensiones del objeto en la realidad.

4.5. Kudan

4.5.1. Calidad de la documentación y primeros pasos

Los primeros pasos con Kudan no son tan gratificantes en comparación a sus competidores. Empezando por la descarga del SDK, ésta ni si quiera se encuentra en la página oficial [39], si no que se encuentra en XLSoft [58]. Una vez metido el SDK en Unity, en las carpetas vienen escenas de ejemplo, en las que podemos ver como se monta una aplicación con Kudan. Para que funcione correctamente, hace falta introducir este *Package Name* “com.xlsoft.kudanar” [38]. La documentación para los primeros pasos es aceptable, pero sobre el SDK y la API no hay documentación, únicamente los comentarios en los scripts. Una vez instalada la aplicación en el teléfono, no funcionará ya que la aplicación no pide los permisos para usar la cámara, y sin ellos Kudan no puede inicializarse. Para arreglar este error, hace falta añadir en algún script estas líneas de código:

```

1  using UnityEngine.Android;
2  Permission.RequestUserPermission(Permission.Camera);

```

4.5.2. Evaluación de las capacidades de la librería

Condiciones de luz mínimas:

<https://youtu.be/cLJMyV9bV6s>

El nivel de luz de la sala no supone ningún problema para posicionar el modelo. La calidad de las texturas del objeto es mala, además no existe ninguna estimación de iluminación sobre el modelo. El anclaje alrededor del objeto con movimientos suaves es aceptable pero en el momento que nos acercamos se pierde y hay que volver a referenciarlo. La estabilidad del objeto cuando nos movemos en sus proximidades es muy mala, cambiando de tamaño sin sentido aparente. La distancia máxima de captura es de siete metros aproximadamente. La capacidad de soportar movimientos bruscos es mala, pierde totalmente la posición del ancla con resultados incorrectos e incluso a veces pierde la referencia del todo. Al sacarlo del campo de visión no lo posiciona en el mismo punto donde estaba, llegando a perder en ocasiones el punto de referencia.

Condiciones de luz ambiente:

<https://youtu.be/JyjBmQZZ5E4>

Gracias a las condiciones de luz la estabilidad del objeto en la escena mejora sustancialmente, pudiendo dar la vuelta casi perfecta al objeto sin problemas, exceptuando la posición cenital que genera desestabilización breve en el objeto. Se mantiene la distancia máxima de siete metros. Además en esta ocasión la resistencia ante movimientos bruscos mejora considerablemente, sin llegar a ser correcta ya que pierde la referencia en una ocasión. En el caso del campo de visión recupera el objeto de manera más rápida sin llegar a volver a posicionar con precisión el objeto.

	Luz Ambiente	Luz Mínimas
Estabilidad del punto de anclaje	3	6
Estimación y calidad de iluminación	0	0
Resistencia a movimientos	2	7
Recuperación del ancla	3	6

Cuadro 4.5: Análisis Kudan

4.5.3. Conclusiones

Los resultados obtenidos con Kudan no son muy buenos, además de que no renderiza la cámara en la aplicación, por lo que se ve con un fondo negro, impidiendo que la experiencia sea tan inmersiva frente a las demás librerías. Los resultados con condiciones de luz mínimas han sido muy malos, y aunque cuando hemos aumentado la cantidad de luz ha mejorado bastante, no llega al nivel de los competidores.

4.6. Maxst

4.6.1. Calidad de la documentación y primeros pasos

Para usar Maxst, hace falta registrarse en su página web [41], y acceder a la descarga del SDK. Además, hay que generar una clave de licencia específica para nuestro *Package Name*. La documentación es buena en ambos casos, en la guía de integración y de la API. Una vez importada la librería en Unity, se puede ver que hay escenas de ejemplo ya hechas, por lo que simplemente hay que añadirlas a la *Build* de la aplicación. Se pueden probar las aplicaciones también desde el editor, usando una cámara que esté conectada al ordenador, el resultado es peor que en un móvil, ya que la cámara no tiene sensores, pero sirve para darnos una idea del tamaño de los objetos.

4.6.2. Evaluación de las capacidades de la librería

Condiciones de luz mínimas:

https://youtu.be/QFX_B8HX1yU

El nivel de luz de la sala no supone ningún problema para posicionar el modelo. La calidad de las texturas del objeto son notables, pero no existe ninguna estimación de iluminación sobre el modelo. El anclaje alrededor del objeto con movimientos suaves es aceptable pero en el momento que nos acercamos se pierde y no se llega a recuperar el punto teniendo que volver a referenciarlo. No somos capaces de dar la vuelta al modelo completo sin perderlo. No conseguimos perderlo con la distancia. La capacidad de soportar movimientos bruscos es mejorable ya que no desaparece el modelo, pero si pierde su referencia en el espacio moviéndolo a una posición diferente. Al sacarlo del campo de visión no lo posiciona de nuevo en la mayoría de las ocasiones. Sin embargo, cuando consigue mantenerlo, en la mayoría de ocasiones se desplaza del punto correcto y muy rara vez muestra la opción correcta.

Condiciones de luz ambiente:

<https://youtu.be/cspBAaQCfew>

La estabilidad ha mejorado notablemente, permitiendo dar la vuelta completa. En ocasiones pierde la referencia y se desplaza el modelo un poco si nos acercamos demasiado. Si se pierde el punto de visión por ejemplo cruzando una pared desaparece el modelo, pero si volvemos al punto de partida es capaz de recuperar la referencia en aproximadamente 7 segundos. La resistencia a los giros bruscos ha mejorado considerablemente llegando a ser casi perfecta, a veces se desplaza en algún fotograma pero se reposiciona rápidamente. Al sacar el modelo del campo de visión de la cámara y luego volver a meterlo rinde mejor con el entorno iluminado, consiguiendo que esté bien posicionado, eso sí, a veces sigue desapareciendo y volviendo a aparecer, impidiendo así una transición limpia.

	Luz Ambiente	Luz Mínimas
Estabilidad del punto de anclaje	4	6
Estimación y calidad de iluminación	1	1
Resistencia a movimientos	4	9
Recuperación del ancla	3	7

Cuadro 4.6: Análisis Maxst

4.6.3. Conclusiones

Apenas necesita tiempo para posicionar el ancla, no hay que esperar a que reconozca una superficie plana, pero la estabilidad debe mejorar un poco. A pesar de estar en unas condiciones lumínicas ideales, el modelo a veces se mueve cuando estamos muy cerca e incluso puede llegar a perderse la referencia. Esto es crítico si se quiere desarrollar una aplicación en la que se pueda mover alrededor de un punto, o acercarse mucho a él para poder verlo con detalle.

4.7. 8th Wall XR

4.7.1. Calidad de la documentación y primeros pasos

Para desarrollar aplicaciones de realidad aumentada con 8thWall, es necesario registrarse en su página web [10], descargar el SDK, y generar una clave de licencia, que tendremos que especificar en el objeto “XRAppSettings” que se encuentra dentro del paquete de Unity3D. Estos pasos vienen bien documentados en la guía que proporcionan, por lo que la calidad de la documentación es buena, también en la parte de la API. Tienen tutoriales subidos en los que enseñan y explican cómo desarrollar aplicaciones con su SDK. En los dispositivos que se encuentran en la lista de ARCore [32], 8thWall usa ARCore para la tecnología de realidad aumentada. Para los que no se encuentran en esa lista, tienen su propia tecnología, que no funciona tan bien pero por lo menos permite cubrir un rango muy amplio de dispositivos soportados. Para facilitar el desarrollo, han creado una aplicación para probar en el móvil desde el editor de Unity3D, llamada *8th Wall XR Remote*, que se puede encontrar en *Google Play* [12].

4.7.2. Evaluación de las capacidades de la librería

Condiciones de luz mínimas:

<https://youtu.be/6edM5PhhXj0>

El nivel de luz de la sala supone un problema para posicionar el modelo con lo que aumentamos el nivel de luz. La calidad de las texturas del objeto son buenas, además posee estimación de iluminación sobre el modelo correcta y muy eficaz. El anclaje alrededor del objeto con movimientos suaves es muy buena pudiendo dar una vuelta sin problema y acercarnos para ver el detalle del objeto sin que desaparezca. No conseguimos perderlo con la distancia en ningún momento. La capacidad de soportar movimientos bruscos es muy buena, nunca se pierde y su anclaje sigue en la posición correcta. Al

sacarlo del campo de visión lo mantiene creando una transición suave.

Condiciones de luz ambiente:

<https://youtu.be/5TBd3ml35RY>

La detección del plano es muy rápida. Mantiene y mejora la calidad de las texturas del objeto, así como la estimación de iluminación. El anclaje alrededor del objeto con movimientos suaves es muy buena pudiendo dar una vuelta sin problema y acercarnos para ver el detalle del dragón sin que desaparezca. No conseguimos perderlo con la distancia en ningún momento. La capacidad de soportar movimientos bruscos y movimientos fuera del campo de visión continua siendo muy buena.

	Luz Ambiente	Luz Mínimas
Estabilidad del punto de anclaje	10	10
Estimación y calidad de iluminación	8	8
Resistencia a movimientos	10	10
Recuperación del ancla	10	10

Cuadro 4.7: Análisis 8th Wall

4.7.3. Conclusiones

Aunque por debajo utilice la misma tecnología que ARCore, la capa que han desarrollado por encima simplifica bastante el uso de la librería y el desarrollo de una aplicación con realidad aumentada. Por esta razón, y por los resultados obtenidos, que han sido excelentes, esta librería una muy buena opción para desarrollar una aplicación. Además, el otro producto que desarrolla la empresa, 8th Wall for Web, permite llevar la realidad aumentada a un navegador de manera muy sencilla, sin necesidad de instalar una aplicación completa. Aunque los resultados no son tan buenos como en una aplicación desarrollada en Unity, se defiende muy bien [11].

4.8. Easy AR

4.8.1. Calidad de la documentación y primeros pasos

Es necesario registrarse para acceder a la descarga del SDK y generar una clave de licencia. Una vez importado el paquete dentro de Unity, hay que buscar el objeto “EasyARKey” y especificar la clave. Las escenas que vienen de ejemplo no son del todo intuitivas ni modificables, ya que para cambiar el objeto que se instancia hay que entrar y hacer unos cambios en el código. Lo ideal sería poder cambiarlo desde el editor. La documentación es mejorable, solo tienen una guía para hacer la *Build* en cada plataforma, pero no hay ninguna guía que explique como crear una aplicación desde cero, ni explican cuales son las clases y componentes importantes e imprescindibles.

4.8.2. Evaluación de las capacidades de la librería

Condiciones de luz mínimas:

https://youtu.be/G_iY6gdoMOU

Coloca el modelo enfrente del usuario automáticamente sin buscar ningún plano de referencia. La estabilidad del objeto es muy mala ya que no nos podemos acercar porque el objeto también se mueve cuando el usuario cambia de posición, lo mismo ocurre al intentar dar la vuelta sobre él. La calidad de texturas es aceptable y no posee estimación de luz. La resistencia a movimientos bruscos es buena, nunca se deja de ver el objeto y se mantiene en su posición, lo mismo ocurre al sacarlo del campo de visión.

Condiciones de luz ambiente:

<https://youtu.be/rA2uLYET5ck>

Continúan apareciendo los problemas sin podernos acercar al modelo ni dar la vuelta correctamente. Además aparece un nuevo problema donde la aplicación hace uso de muchos recursos generando un *framerate*²³ muy bajo, por debajo de los 30 fotogramas por segundo. Mejora su capacidad de resistir movimientos bruscos. El resultado de la prueba de sacar el objeto fuera del campo de visión también es bueno, es capaz de mantener la referencia de la posición.

	Luz Ambiente	Luz Mínimas
Estabilidad del punto de anclaje	2	3
Estimación y calidad de iluminación	1	1
Resistencia a movimientos	9	10
Recuperación del ancla	10	10

Cuadro 4.8: Análisis EasyAR

4.8.3. Conclusiones

Aunque la estabilidad del punto de anclaje no sea bueno, la librería instancia el objeto sin buscar un plano, de hecho no utiliza la cámara, únicamente hace uso del giroscopio y de la brújula digital. El uso que se le podría dar a esta librería es para una aplicación que esté pensada para usarse sin moverse del sitio, sin importar las condiciones de luz, la resistencia a los movimientos bruscos es muy buena, al igual que la reposición del objeto cuando se sale del campo de visión de la cámara y luego vuelve.

4.9. ARFoundation

4.9.1. Calidad de la documentación y primeros pasos

Usar ARFoundation es muy cómodo, ya viene integrado en Unity, simplemente hay que añadirlo desde el *Package Manager*. La documentación es buena y además hay varios tutoriales subidos por la comunidad, por lo que es fácil aprender a usar ARFoundation. Unity proporciona una serie de escenas de ejemplo que son muy útiles a la hora de entender el funcionamiento de la API y para realizar pruebas de concepto rápidamente [52].

²³Frecuencia a la cual un dispositivo muestra los fotogramas

4.9.2. Evaluación de las capacidades de la librería

Condiciones de luz mínimas:

<https://youtu.be/MrYmYtdJKrY>

El nivel de luz de la sala no supone ningún problema para posicionar el modelo y reconocer el plano. La calidad de las texturas del objeto son notables, además existe estimación de iluminación sobre el modelo pero no es del todo correcta. El anclaje alrededor del objeto con movimientos suaves es buena nos podemos acercar y alejar manteniendo el nivel de detalle. No conseguimos perderlo con la distancia. La capacidad de soportar movimientos bruscos es casi perfecta ya que no desaparece el modelo, pero a veces se mueve un poco recolocándose en un breve período de tiempo. Al sacarlo del campo de visión lo mantiene en su posición.

Condiciones de luz ambiente:

<https://youtu.be/y3jS70BuPck>

La calidad de la iluminación y de la textura es bastante buena, por lo que da una impresión de realismo. La estabilidad del punto de anclaje es perfecta, podemos dar la vuelta completamente, acercarnos para ver el más mínimo detalle sin que el modelo se desplace ni se deje de ver. La resistencia a los movimientos bruscos es perfecta, no desaparece nunca el modelo ni se mueve de su posición inicial, ocurre igual con la prueba de sacarlo del campo de visión, el modelo permanece en su posición y permite una transición limpia y natural cuando se vuelve a enfocar a su punto de anclaje.

	Luz Ambiente	Luz Mínimas
Estabilidad del punto de anclaje	10	10
Estimación y calidad de iluminación	8	9
Resistencia a movimientos	9	10
Recuperación del ancla	10	10

Cuadro 4.9: Análisis ARFoundation

4.9.3. Conclusiones

Sin duda es una de las opciones más razonables para desarrollar una aplicación de realidad aumentada de calidad. ARFoundation engloba ARCore y ARKit en una misma API, lo que permite tener una aplicación en ambas plataformas usando el mismo código. El único punto flojo es el rango de dispositivos que soportan la tecnología, que son prácticamente los mismos que ARCore [32]. Quizás hoy en día el público al que puede llegar la aplicación es demasiado reducido, pero con el paso del tiempo irá creciendo drásticamente, gracias a la mejora del hardware de los dispositivos.

4.10. Conclusiones pruebas de librerías

A continuación, en la figura 4.10, se encuentra un resumen con la evaluación de las funcionalidades de cada librería y la nota resultante. Se recuerda que cada prueba se ha sometido en las mismas condiciones de entorno y con los mismos dispositivos.

	Wikitude	ARKit	ARcore	Vuforia	Kudan	MaxST	8th Wall XR	EasyAR	ARFoundation
Calidad de la documentación	10	9	9	8	2	9	9	7	8
Estabilidad del punto de ancla	6	10	10	7	7	6	10	3	10
Comportamiento con luz ambiente	6	10	10	7	6	7	10	5	10
Comportamiento con luz mínima	3	9	10	6	3	3	10	5	9
Estimación de luces y calidad de imagen	6	10	9	2	0	2	8	1	9
Total (puntuación)	6,2	9,6	9,6	6,6	3,6	5,4	9,4	3,5	9,2

Cuadro 4.10: Análisis de las características de las librerías de RA sin marcadores

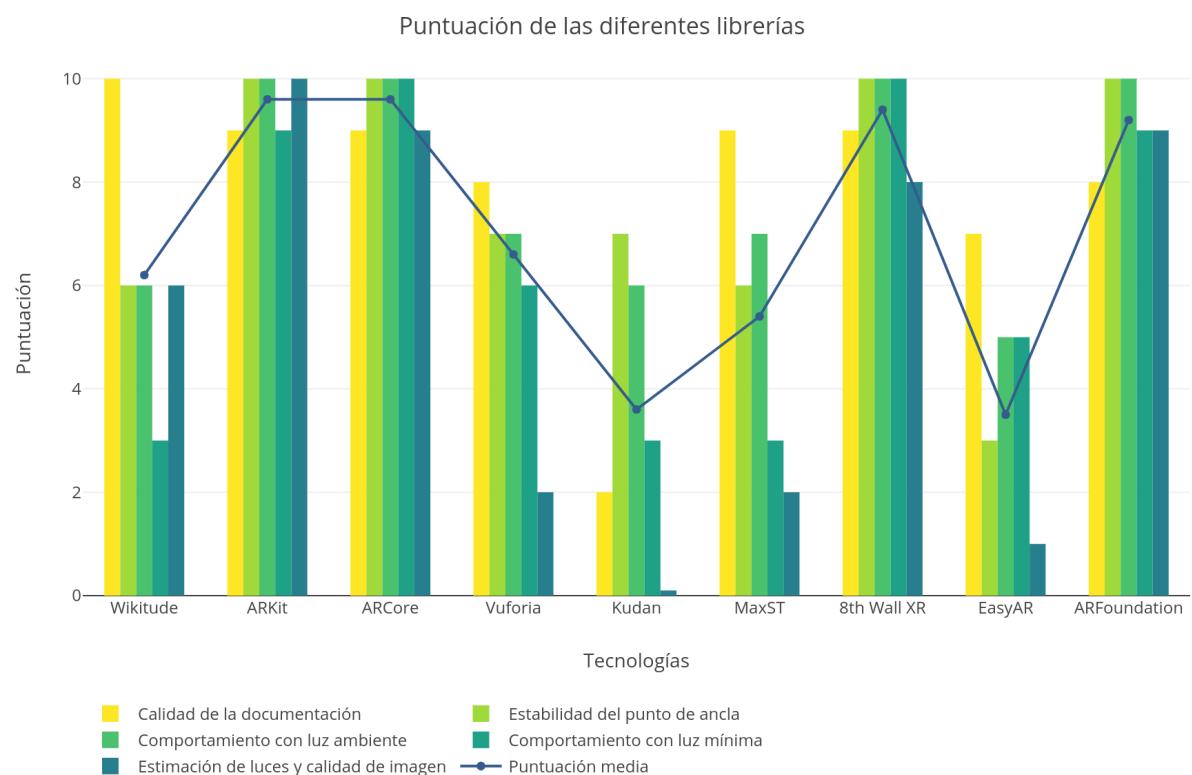


Figura 4.1: Puntuación de las librerías

Como se puede observar en la tabla 4.1, una vez probadas y comparadas todas las aplicaciones de carácter básico de las librerías, es evidente que ARKit y ARCore son claros ganadores a nivel general, pero entraremos en detalle para ver las funcionalidades y limitaciones de cada una, por lo que vamos a definir nuestra opinión sobre su uso.

Lo primero que podemos observar es que las librerías que usan detección de planos tienen una precisión y estabilidad increíble, permitiendo un paseo libre por el entorno sin que el ancla presente ningún desplazamiento o cambio de escala. Por el otro lado, tenemos las librerías que utilizan *instant tracking*, aunque su resistencia a movimientos bruscos y a giros sea muy buena en algunos casos, la estabilidad del punto de anclaje cuando nos

movemos es bastante pobre.

Si queremos realizar una aplicación donde la estabilidad y precisión del ancla sea estricta, lo más seguro es optar por usar la tecnología de detección de planos. Además de la precisión que proporcionan estas librerías, también implementan la estimación de luz, la cual aporta una pincelada de realismo muy importante para la experiencia inmersiva. Las limitaciones de esta tecnología vienen dadas por el entorno, ya sea por el espacio libre que haya para reconocer un plano, por el nivel de luz o por el tipo de superficie. Si la superficie es de color liso, seguramente haya dificultades para reconocer el plano, y finalmente debido al alto coste computacional, la cantidad de dispositivos soportados.

Los puntos fuertes de las librerías que utilizan *instant tracking* suplen las limitaciones vistas anteriormente. Su uso es recomendado en aplicaciones pensadas para ser usadas en cualquier entorno, sin depender ni del nivel de luz ni de la superficie que nos rodea, y para cuando no sea necesario moverse en el entorno. Además, cubre un rango muy amplio de dispositivos [55], por lo que se puede llegar a un público mayor.

Si miramos la calidad de la experiencia, está claro que usando la detección de planos, como puede ser ARKit y ARCore, obtenemos mejores resultados frente al *instant tracking*, pero no es suficiente para posicionarse como la principal solución para todas las ideas del mercado. Aunque los resultados obtenidos por el *instant tracking* sean peores, sus posibilidades de funcionar en casi cualquier dispositivo, momento y entorno hace que sea una opción a tener en cuenta para muchas aplicaciones.

Capítulo 5

Pruebas de concepto

5.1. Primeros prototipos

Antes de analizar las capacidades de las librerías sin marcadores se realizaron algunos prototipos en los que se ponía a prueba las funcionalidades con marcadores. De esta manera nos permitió conocer las diferencias entre ambos tipos de aplicaciones. Una vez conocidas estas diferencias se desarrollaron prototipos en los que se pone a prueba las funcionalidades de la realidad aumentada sin marcadores. Seguimos este orden de desarrollo para ir avanzando por las diferentes etapas por las que ha pasado este campo en todo su proceso evolutivo. Estos prototipos se describirán a lo largo de las siguientes secciones.

5.1.1. Pruebas con ARToolKit

En nuestros primeros pasos en el mundo de la realidad aumentada exploramos algunas librerías como ARToolKit, con el fin de familiarizarnos con el desarrollo de este tipo de aplicaciones.

ARToolKit es una de las librerías de desarrollo pioneras en el ámbito que investigamos, disponible desde el año 2004 para descargar de manera gratuita y que cuenta con más de 160.000 descargas desde entonces. Se distribuyó para diversas plataformas como SGI IRIX (que dejó de utilizarse en 2006), Linux, MacOS y Windows y fue desarrollada originalmente por el Dr. Hirokazu Kato para posteriormente pasar a manos del Human Interface Technology Laboratory en la Universidad de Washington y ARToolworks.Inc en Seattle.

Muchas librerías posteriores se han basado en el código de ésta para ampliar sus funcionalidades, dando lugar a algunas como ARTag (que promete mayor fiabilidad a la hora de procesar imágenes por su mejor manejo de la luz), FLARToolKit (consistente en un *port* en ActionScript 3), ARDesktop (que facilita la creación de interfaces) o *Studierstube Tracker* (que mejora sus características, pero deja de ser de código abierto). Además de todas las derivaciones de ARToolKit, también podemos encontrar software no orientado a programadores como ATOMIC Authoring Tool, que permitía a cualquier usuario el desarrollo de una aplicación de realidad aumentada de manera sencilla y con una interfaz intuitiva. Esta herramienta acabó cayendo en desuso a principios de la década de 2010 debido a que ya existían librerías mejores que ARToolKit y mejores

alternativas en lo que a SDK se refiere.

Al ser ARToolKit una de las primeras herramientas para el desarrollo de realidad aumentada, no contemplaba un uso de esta sin marcadores. Una de las mayores dificultades a las que se enfrentó fue el seguimiento del “ojo” del usuario, es decir, el foco de la cámara del dispositivo. Para saber desde qué perspectiva debía dibujar los elementos virtuales la aplicación necesitaba saber a dónde está mirando el usuario en el mundo real. La librería solventa este problema utilizando algoritmos de visión que calculan la localización y orientación de la cámara basándose en marcadores físicos en tiempo real. Los marcadores que es capaz de identificar consisten en la mayoría de los casos en un cuadrado negro bien contrastado con un fondo e interior blancos. Además, cada marcador, para diferenciarse del resto incluye pequeñas variaciones como otras figuras geométricas dentro del cuadrado.

Para nuestros experimentos con ARToolKit, en lugar de utilizar la librería original, utilizamos una adaptación de la misma para ser utilizada en Unity3D, que puede encontrarse actualmente en <https://github.com/artoolkit/arunity>. Esta extensión nos permite el acceso a componentes como *ARController* y *ARMarker* dentro del editor.

Para el desarrollo de este “HolaMundo” con ARToolKit en Unity hemos seguido los siguientes pasos: creamos un *GameObject*²⁴ que servirá como “raíz” de la escena y otro que actuará como gestor del sistema de realidad aumentada. Al gestor le incluimos el componente *ARController*, que está encargado de las opciones de vídeo y del seguimiento de los marcadores. Dentro de éste modificamos la capa a la que debe prestar atención.

Por otra parte, el objeto raíz de la escena incluye la luz direccional y la cámara, y además le añadimos el *script* *AROrigin*, que permite situar espacialmente la escena. La cámara, además de su *script* de cámara por defecto, debe recibir el componente *ARCamera* para poder detectar los marcadores.

Ahora hay que crear un objeto que llevará la información del marcador y le añadimos el componente *ARMarker*, que lleva la etiqueta del marcador que hace de identificador único. Este componente tiene dos tipos de patrones (figura 5.1) para identificar por defecto: *hiro* y *kanji*. En este caso utilizaremos el patrón *hiro*.

²⁴Objeto de Unity3D



Figura 5.1: Tipos de patrón ARToolkit

Añadimos a la raíz de la escena un objeto que será contenedor del objeto 3D que queremos que aparezca cuando enfocamos al marcador y que lleva el script *ARTrackedObject* y dentro del campo *Marker Tag* introducimos el identificador del marcador asociado al objeto.

Conclusiones:

Si bien esta librería fue útil en su día para sentar las bases del desarrollo de programas en realidad aumentada, hoy en día no se encuentra documentación actualizada y la página web que le daba soporte ha desaparecido [16]. Además, sus funcionalidades son muy limitadas y su rendimiento es muy inferior al que presentan otras alternativas más actuales como Vuforia, que permite también el uso de marcadores.

5.1.2. Harry Potter

Se pueden ver los resultados en el vídeo <https://vimeo.com/331236805>.

Después de descartar ARToolkit, nos decantamos por hacer las pruebas con Vuforia, que tiene soporte tanto para realidad aumentada con marcadores como sin ellos. Además, la documentación es reciente y ofrece una serie de posibilidades que nos interesaba aprovechar, como por ejemplo su integración con Unity3D.

Para implementar los prototipos pensamos en aplicaciones que fueran rápidas de codificar, pero que pudieran aportar algo interesante a los ojos de los usuarios. Tras un tiempo de debate encontramos curiosa la idea de que “escaneando” con el móvil un cartel o las viñetas de un cómic se pudiese obtener información no presente a simple vista en el mundo real, aportándole una capa más de profundidad y dinamismo a la experiencia del observador. A continuación comentamos el proceso de desarrollo.

Suscribiéndonos a la web de Vuforia se nos da la posibilidad de crear una base de datos con imágenes que nosotros mismos tomemos o escojamos para la aplicación. Este servicio de Vuforia ofrece un número limitado de bases de datos que podemos crear, pero es posible expandirlo y encontrar otras funcionalidades con los planes Basic o Pro. En

nuestro caso no lo consideramos necesario y procedimos a buscar una imagen que nos sirviese como marcador. En esta primera aproximación nos basamos en los periódicos mágicos que aparecen en la saga de películas de Harry Potter y encontramos la página del periódico en la que aparece el prisionero de Azkaban (la cárcel de este universo literario). Al subir al servidor de Vuforia la imagen, la web nos muestra una estimación de cuánto de reconocible es el marcador basándose en el contraste que existe entre la saturación de las distintas partes en las que divide la foto (figura 5.2). Se nos señalan los principales puntos de la foto que usará la librería para identificar el marcador. Cuantos más haya y más repartidos estén mejor será su calidad. De esta forma se puede decidir como desarrollador si utilizar cierta imagen como marcador o buscar otra con unas características mejores y que haga la experiencia más cómoda de cara al usuario.

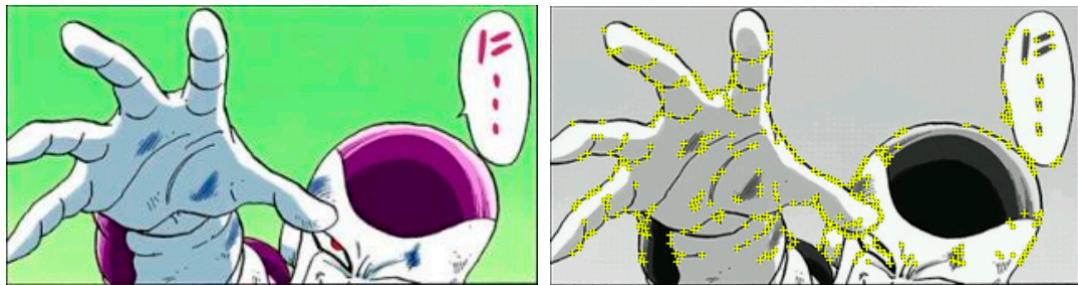


Figura 5.2: Estimación de Vuforia

Como explicábamos, nosotros utilizamos la imagen que incluimos en la figura 5.3, recortando el cuadrado en el que aparece la foto del preso que es la que utilizaremos como marcador. A continuación tuvimos que buscar el fragmento animado del periódico que aparece en la película, que no nos llevó mucho tiempo puesto que debido a la popularidad de la saga estaba disponible en varias páginas web. Después ajustamos con un editor el tamaño del vídeo para que coincidiera con las dimensiones de la foto, como podemos observar en la imagen de la figura 5.3.



Figura 5.3: Aplicación del periódico de Harry Potter

Ahora viene el momento de utilizar Unity. Desde el editor, y con el paquete de Vuforia instalado procedimos a importar la base de datos que nos da Vuforia con la ilustración convertida en marcador. Realizar un uso básico y a modo de prueba de esta librería para el desarrollo de un ejemplo en RA es bastante sencillo ya que puede hacerse incluso sin escribir una sola línea de código.

Necesitamos en la escena un objeto que sea del tipo *AR Camera*, que se encargará de renderizar la escena y detectar los marcadores. Usando este objeto podemos prescindir de la cámara tradicional. A continuación introdujimos el objeto *Image Target*, también dentro del paquete de Vuforia y lo configuramos para que el componente *Image Target Behaviour* utilice la base de datos que tenemos y la imagen que le corresponde. Como hijo del *Image Target* incluimos el objeto virtual que queremos que aparezca al encontrar el marcador. En este caso, un objeto del tipo *Quad* (es decir, un rectángulo vacío) nos servirá. Ajustamos el ancho y el alto al tamaño del padre y le añadimos el componente *Video Player* para que reproduzca el vídeo. Con esto sólo necesitamos compilar la aplicación y pasar el archivo a un móvil que lo soporte para probar la aplicación.

5.1.3. DragonBall

Se pueden ver los resultados en el vídeo: <https://vimeo.com/331236593>.

La siguiente aplicación que desarrollamos está impulsada por la idea de leer un cómic en realidad aumentada. Utilizamos una página del manga de Dragon Ball para este ejemplo y le aplicamos el mismo procedimiento que al programa anterior, aunque con un par de excepciones, puesto que la cámara ahora en lugar de llevar el *tracking* de un solo marcador, lleva uno por cada viñeta. De esta forma se reproducen los cuatro vídeos a la vez.

En primer lugar, escogimos una página con unas viñetas nítidas para que los marcadores tuvieran suficientes características distintivas como para que Vuforia las reconociese con facilidad. Una vez seleccionada (figura 5.4) continuamos con el proceso de subida al servidor de Vuforia para obtener la base de datos. La parte difícil vino a continuación, pues tuvimos que encontrar el capítulo de la serie animada en el que sucedieran los hechos de esa página del cómic, para después recortar los fragmentos correspondientes a cada viñeta y ajustar el breve vídeo de cada una al tamaño justo de la misma. Una vez teníamos todos los recursos ya sólo había que introducirlos en el editor de Unity, creando esta vez cuatro *Target Images* (uno para cada viñeta) y un *Quad* con el vídeo propio para cada uno.

El resultado es muy vistoso y puede llegar a convertirse en una forma de ampliar la inmersión o mejorar la experiencia de los lectores habituales.



Figura 5.4: Página del cómic con RA

Cabe destacar que actualmente la tecnología está limitada en este ámbito, ya que pese a que muchos dispositivos como tabletas o móviles soportan la realidad aumentada con marcadores es de cierta manera incómodo tener que estar enfocando con la cámara al lugar en cuestión para obtener la información o la experiencia adicional y resulta cansado después de unos cuantos usos.

5.1.4. Juego de cartas Yu-gi-oh

Se pueden ver los resultados en el vídeo <https://vimeo.com/331237916>.

Llegados a este punto, queríamos comprobar cómo sería el desarrollo de un juego que utiliza realidad aumentada con marcadores. Nos basamos para ello en el juego de cartas de Yu-Gi-Oh, que tiene su origen en un cómic japonés del mismo nombre y que alcanzó gran popularidad en la década de los 2000 en todo el mundo. El juego es de temática similar al de las cartas Magic, en el que cada carta representa un monstruo, cada uno con sus propios atributos, valores de ataque y defensa y otras características, que se enfrentan contra los monstruos del oponente siguiendo un sistema de reglas y turnos bastante complejo. Además de las cartas de monstruo existen otras que modifican los valores de las mismas o tienen otros efectos en la partida. Para facilitar el desarrollo, simplificamos todas estas condiciones y nos centramos en algunos aspectos esenciales: la partida se va sucediendo por turnos, las criaturas pertenecen a uno u otro jugador según su posición en la mesa y dentro de un turno el jugador puede decidir si el monstruo que está bajo su control ataca o defiende.

Lo verdaderamente interesante de este juego es que en la saga de cómic (y posterior serie animada de televisión) los jugadores juegan sobre un tablero electrónico sobre el que colocan las cartas y aparece una representación holográfica de las criaturas de las mismas. Esta tecnología de ciencia ficción se escapa un poco de nuestro alcance y presupuesto, pero sí que podemos intentar una recreación más simple con nuestros conocimientos de realidad aumentada y ver a los monstruos por medio de la pantalla de nuestros dispositivos móviles, como ya hicieron anteriormente juegos como Invizimals en

2009 o Pokémon Go en 2016.

Para desarrollar esta aplicación volvimos a utilizar el motor Unity con Vuforia. Utilizamos dos cartas del juego como marcadores para que durante el uso del programa proyectaran los modelos 3D de los monstruos correspondientes. Para los modelos buscamos algunas de las criaturas más conocidas de la franquicia y así evitamos tener que realizar nosotros a mano el proceso de modelado y generación de texturas. Encontramos en la página “The model resource”²⁵ los personajes que buscábamos (Kuriboh y Jinzo) y seleccionamos las cartas con sus imágenes para crear la base de datos que contendría los marcadores.

Aunque los modelos encontrados eran correctos, carecían de animaciones, lo que limitaba la calidad del resultado. Sin embargo, en sus respectivos archivos sí pudimos encontrar un *rigging*²⁶ básico (esqueleto animable). Por esto, nos aventuramos a utilizar Blender, un programa de modelado, iluminación, renderizado y animación entre otras muchas características con el que estamos familiarizados por su uso en varios proyectos durante el grado y que además es software libre. Realizamos animaciones de estado de reposo, ataque, defensa, movimiento y de recibir daño para ambas criaturas, además de las transiciones entre estos estados para evitar saltos poco realistas e incómodos en la simulación.

Una vez guardadas todas las animaciones, el propio archivo de Blender puede ser directamente importado a Unity para utilizar todos los objetos y texturas que se encuentran en él. Esto nos facilitó mucho el trabajo al no tener que convertir los modelos a otro formato con la posible pérdida de información en los modelos o las animaciones. Una vez dentro del editor creamos los objetos que servirían como marcadores y les asignamos a cada uno su imagen correspondiente de la base de datos proporcionada por Vuforia. Como objeto hijo de cada marcador, le asignamos la figura correspondiente y creamos un *prefab* con todo ello, ya que de querer ampliar el juego con más cartas cada una debería hacer referencia a un monstruo distinto.

Llegó la hora de ponernos a codificar. Establecimos un objeto vacío que sirviese de *Game Manager* y llevase la lógica del juego, es decir, el transcurso de los turnos y las elecciones del jugador. Para empezar a jugar se sitúan las cartas sobre la mesa, una frente a la otra. Basándose en la orientación inicial de los marcadores cuando son detectados por la cámara, el juego asigna cada criatura al jugador al que le pertenece. Una vez pasada esta fase de reparto, le toca el turno al primer participante, que debe seleccionar uno de los monstruos en su control. Una vez hecho esto, aparecen tres botones en la pantalla: dos de ellos son para decidir si la criatura debe atacar o defender y el tercero cancela la selección y vuelve a la fase en la que se pide que escojas un monstruo. Si escoges atacar, el siguiente paso será buscar al objetivo del ataque, para lo que se pedirá seleccionar uno de los enemigos. Acto seguido, tu criatura se dirigirá a la del rival, la atacará haciéndole daño (que repercutirá en sus puntos de vida) y volverá a su carta de origen para pasar al turno del contrincante. Si por el contrario se elige la opción de defensa, el monstruo adoptará una postura defensiva que le permitirá cubrirse de los ataques enemigos y al acabar terminará el turno actual. A continuación será el turno del rival, que tendrá las

²⁵ <https://www.models-resource.com>

²⁶ Proceso de crear un sistema de controles digitales y agregárselos a un modelo 3D para que así pueda ser animado fácilmente y eficientemente

mismas posibilidades, aunque en este caso jugaremos contra la máquina y sus acciones serán reducidas.

Para gestionar todo el grafo de animaciones necesitamos un objeto *Animator Controller* que lleve las condiciones para pasar de un estado al siguiente y volver para cada uno de los modelos. Todos estos cambios se recogen a nivel de código una vez pulsamos los botones de selección de acción.

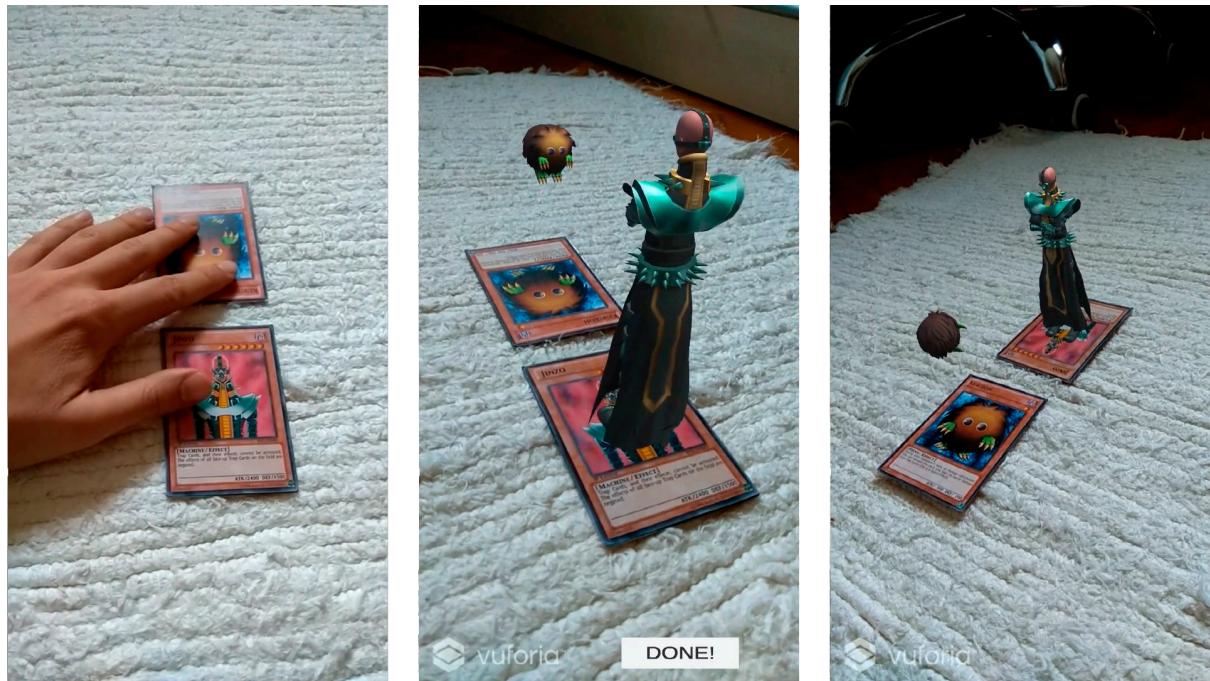


Figura 5.5: Visualización del juego de cartas

Con estas pequeñas muestras habríamos terminado nuestra incursión en la realidad aumentada con marcadores y estaríamos preparados para el siguiente paso, en el que prescindiríamos de ellos.

5.1.5. JengAR

Se pueden ver los resultados en el vídeo <https://youtu.be/TzndzVwH3rI>.

Este prototipo fue creado para probar la realidad aumentada sin marcadores y la interacción con objetos virtuales, añadiendo la posibilidad de cambiar el punto de ancla de algunos objetos sobre la marcha y moviendo el resto de objetos de forma natural usando físicas. Decidimos desarrollar un prototipo rápido donde se instancia una pila de bloques en un plano. Si nos acercamos un bloque y mantenemos pulsado la pantalla, el bloque se ancla a nuestro movimiento, por lo que hay que realizar movimientos suaves y cuidadosos, para no tirar la torre.

Cuando se pulsa la pantalla se calcula el punto que se encuentra en la mitad de la pantalla y se lanza un *raycast*²⁷, si éste detecta un bloque, se marca como seleccionado,

²⁷Rayo que se lanza desde un punto origen hasta un punto final para comprobar si existe algún elemento en el camino

se fija la distancia entre su posición y la nuestra, y empieza a moverse junto a nosotros, manteniendo la distancia inicial.

En la figura 5.6 se pueden observar algunas capturas de la aplicación.



Figura 5.6: Visualización del JengAR

5.2. Pruebas de concepto

Una vez desarrollados los prototipos y haber estudiado las posibilidades de la realidad aumentada, propusimos crear pruebas de concepto más complejas que tuvieran utilidad en el día a día. Decidimos desarrollar tres aplicaciones:

- Aplicación instructiva (AmueblAR), que permite visualizar el proceso de montaje de un mueble en realidad aumentada, sin necesidad de observar las instrucciones en un papel plano.
- Aplicación inmersiva (Visualizer 3D), útil para observar y manipular modelos 3D en tiempo real.
- Un videojuego multijugador online (BombARdero+), en el que se puede jugar desde distintos dispositivos a la vez.

5.2.1. Instrucciones de montaje de muebles en AR - AmueblAR

Se pueden ver los resultados en el vídeo https://youtu.be/o-N_Jpdt9Do.

En nuestra investigación hemos visto que una utilidad popular en el campo de la realidad aumentada sin marcadores son las aplicaciones de decoración de interiores

(sección 2.4.8). Ikea, por ejemplo, ha lanzado Ikea Place, una aplicación de realidad aumentada para dispositivos móviles que permite visualizar cualquier habitación de tu casa con muebles virtuales. De esta manera podemos decidir si encajan con nuestro salón y si las medidas son las adecuadas para después comprar el mueble en la tienda física.

Sabemos que comprar sofás o estanterías por piezas es en ocasiones más barato y facilita enormemente el transporte, sin embargo la parte en la que muchos compradores experimentan problemas es a la hora de montarlos. Muchos son incapaces de ver en el plano de las instrucciones en qué lugar va cada tornillo o de qué forma se unen las patas. Por eso, la aplicación que nosotros hemos propuesto consiste en un pequeño manual de instrucciones en realidad aumentada sin marcadores. De esta manera se puede ver en todo momento el modelo 3D del mueble, rotarlo y además desplazarte alrededor de él para apreciar en detalle cada uno de los pasos en el proceso de montaje.

El funcionamiento es muy sencillo: para empezar escaneamos el plano para que el programa cree una superficie donde colocar el mueble. A continuación tocamos la pantalla en el lugar en el que queremos colocarlo. Ahora podemos rotar el mueble hacia izquierda y derecha para dejarlo en una posición en la que nos resulte cómodo acercarnos y alejarnos mientras vemos los pasos de montaje. Finalmente, al pulsar el botón de aceptar entramos en la fase de construcción. En ella tenemos un botón a cada lado de la pantalla: el de la izquierda retrocede al paso anterior y el de la derecha avanza al paso siguiente. Mientras se suceden las animaciones que van explicando cómo armar progresivamente el mueble el usuario puede moverse libremente con su dispositivo para apreciar los detalles e incluso retroceder si no ha entendido bien el paso a seguir.

Para el desarrollo hemos utilizado la librería ARCore en Unity, que permite el despliegue de realidad aumentada sin marcadores. Utilizando la tecnología que nos vienen dada por la librería buscamos una serie de puntos en el suelo que nos permitirán crear un plano virtual. Una vez generada esta superficie el plano se representa gráficamente en pantalla con la unión de los puntos. A continuación dividimos la aplicación en tres estados: despliegue, rotación y montaje.

Empezamos en la fase de despliegue, en la que el programa está continuamente esperando la interacción del usuario. Cuando se toca la pantalla, se comprueba si ha habido colisión con el plano virtual, y de ser así se instancia el mueble en el lugar en el que hemos tocado. Si este proceso se ha llevado a cabo con éxito, pasamos a la fase de rotación. Aquí aparecen dos botones azules a los lados de la pantalla y uno verde en la parte inferior. Los botones laterales llevan una referencia al mueble para que al ser pulsados lo roten en una u otra dirección. El botón inferior por otra parte nos sirve para comunicarle a la aplicación que estamos conformes con la posición actual del objeto y que puede pasar a la siguiente fase.

Finalmente nos encontramos con dos nuevos botones a los laterales, que como hemos explicado anteriormente se encargan de adelantar y retroceder los pasos de montaje. El sofá tiene un componente *Animator Controller* que lleva el árbol de estados. Este árbol consta de 10 estados fijos, en los que se queda el mueble una vez ha terminado su animación correspondiente y 18 estados móviles o animaciones, que se reproducen cuando se pulsan los botones de avanzar o retroceder. Para ello, existe una variable que

controla el avance y otra que hace lo propio con el retroceso, que se anulan una vez se entra en un estado estático y se activan al pulsar el botón que corresponde, pasando así a la animación del paso siguiente o anterior.

Cabe destacar el proceso de creación del mueble en sí mismo, que en el caso del ejemplo se trata del sofá *Kivik*. Como no era posible encontrar un modelo dividido en piezas y fácilmente animable se realizó un modelo desde cero con la ayuda de la documentación que encontramos en la web de Ikea. El mueble consta de las siguientes piezas: el asiento del sofá, el respaldo del sofá, el asiento de la *cheslong*²⁸ y su respaldo, los dos brazos, dos escuadras, una pletina, ocho patas, dieciocho tornillos con sus correspondientes tuercas y arandelas, cinco cojines cuadrados y un cojín alargado para la *cheslong*. Excluyendo los tornillos, que los encontramos en una página de recursos gratuitos [19], todos los demás fueron creados por nosotros en Blender, herramienta de la que ya hemos hablado anteriormente. Una vez terminadas las piezas del sofá, las texturizamos con colores azules y aspecto de sofá, y por otro lado las piezas como los tornillos o las escuadras una textura metálica.

Pensamos que podríamos empezar a animar cada parte por separado dentro de un objeto conjunto del que fueran hijas todas las piezas, pero para que Unity pueda interpretar cada acción como propia de un objeto mayor a las partes es necesario hacer un *rigging* que abarque todas piezas del sofá. Una vez construido el esqueleto se le asigna a cada hueso el objeto que se va a encargar de mover. Este proceso ocasionó algunos problemas, al tratarse de un objeto compuesto ciertos huesos acababan emparentándose automáticamente con partes del sofá que nos les correspondían. La única solución fue establecer manualmente los pesos (es decir, la influencia que tiene cada hueso sobre una parte concreta) sobre los diferentes conjuntos de vértices hasta que conseguimos el resultado que esperábamos.

En lo referente a las animaciones nos fue muy útil el vídeo que tiene publicado la cuenta de Ikea España en la plataforma Youtube [36] en el que se explica el procedimiento que se sigue para construir el sofá. Habiéndolo analizado dividimos el montaje en 9 pasos diferenciados y los animamos también en Blender, haciendo desaparecer las partes que no se están utilizando en ese momento para que sea más claro y fácil verlo.

Al contrario que en los ejemplos con marcadores en los que pudimos exportar directamente el archivo de Blender para su uso en Unity, aquí nos dio problemas ya que el editor dejó de reconocer los *clips* de vídeo de algunas animaciones. Solventamos este problema exportando el objeto desde el programa de modelado en formato “fbx”, pero nos surgió otro nuevo inconveniente, todas las partes del sofá habían perdido sus texturas. Ya desde Unity creamos los materiales por separado y se los asignamos a cada pieza. Fue un proceso bastante agotador, pero consideramos que el resultado es satisfactorio y útil, además ofrece nuevas posibilidades en un campo que no deja de crecer.

²⁸ Tipo de sofá que posee una prolongación lo suficientemente larga en forma de L como para soportar las piernas humanas.

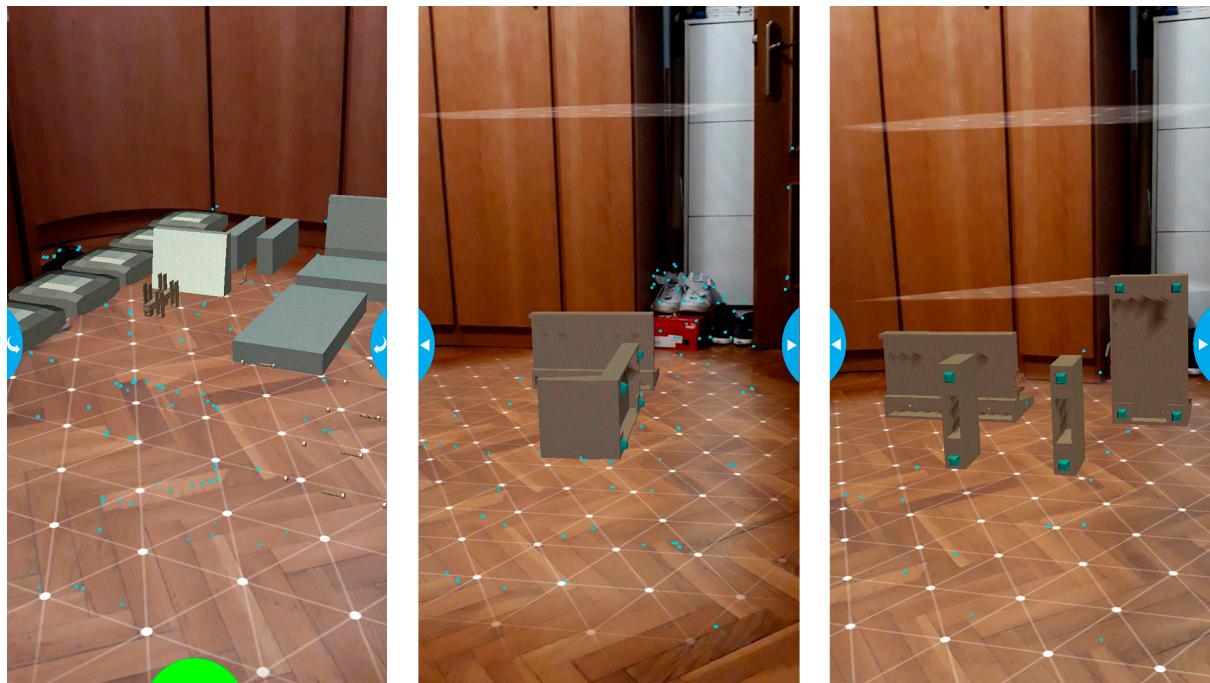


Figura 5.7: Capturas de la aplicación AmueblAR

5.2.2. Visualizador de objetos en AR con gafas Aryzon - Visualizer 3D

En la fase de investigación, pensamos que una de las limitaciones de la realidad aumentada en dispositivos móviles es el hecho de tener que sujetar el móvil con las manos, por lo que el control y la experiencia de usuario se ve condicionada negativamente. Una vez identificamos este problema decidimos buscar un *headset low cost* de realidad aumentada, encontrando las gafas de Aryzon [17]. Se trataba del producto perfecto para iniciarnos en el desarrollo de RA con *headset*.

Decidimos desarrollar una aplicación en la que se pudiera ver objetos y/o modelos 3D y poder caminar alrededor de ellos. Para añadirle más funcionalidad, usamos un mando de *Xbox One* que nos permitirá mover, rotar y escalar el modelo a nuestro gusto, con el objetivo de poder manipular la aplicación sin necesidad de tocar el móvil, ya que éste estará colocado en las gafas.

Para el desarrollo de la aplicación usamos el SDK de Aryzon, ya que nos facilita la vista estereoscópica para simular los ojos y ARCore para la tecnología de realidad aumentada.

Se decidió usar la detección de planos de ARCore, ya que queríamos usar la realidad aumentada sin marcadores y movernos alrededor del modelo, y como hemos visto en las pruebas, la estabilidad de los puntos de anclaje de ARCore es muy buena.

Para el desarrollo de esta prueba de concepto, necesitamos el SDK de Aryzon y el SDK de ARCore, y los modelos sacados del *Asset Store* de Unity [37]. Se desarrolló un *script* para manipular con el mando de Xbox One los objetos que instanciamos. Los controles son:

- El *joystick* izquierdo sirve para mover el objeto en los ejes X y Z
- La cruceta (D-PAD) vertical para mover el objeto en el eje Y
- El *joystick* derecho para rotar el objeto
- La cruceta (D-PAD) horizontal para escalar el objeto.
- Botón [A] permite instanciar el objeto en el lugar en el que estemos mirando
- Botón [X] cambia el objeto que se va a instanciar
- Botón [B] permite activar y desactivar el *render* de los planos que ha encontrado la aplicación, para tener una visión más limpia.

El mayor problema que nos encontramos al desarrollar la aplicación fue la documentación respecto al *mapeo* del mando, ya que cambia según la plataforma en la que se utiliza. La de Android no estaba actualizada y no coincidían los botones y los ejes que nos proporcionaba la documentación.

El resultado final es bueno, ya que tener el teléfono fijo en nuestros ojos gracias a las gafas, hace que podamos tener las manos libres para poder controlar y manipular lo que queramos ver. El precio de las gafas es un precio asequible para el público, y en nuestro caso hemos utilizado un mando de *Xbox One* oficial, pero existen mandos *bluetooth* para los *smartphones* que también se pueden conseguir muy baratos. Usando la realidad aumentada de esta manera abre las posibilidades a nuevas mecánicas de juego y seguramente suponga una revolución en la realidad aumentada de “bolsillo”.

Lo que se ve en la figura 5.8 es la aplicación usando ARCore y el SDK de Aryzon, el modelo que vemos en la imagen, se proyecta a través del sistema de cristales explicado anteriormente, permitiendo una visión del mundo real y el modelo 3D superpuesto en el plano encontrado.

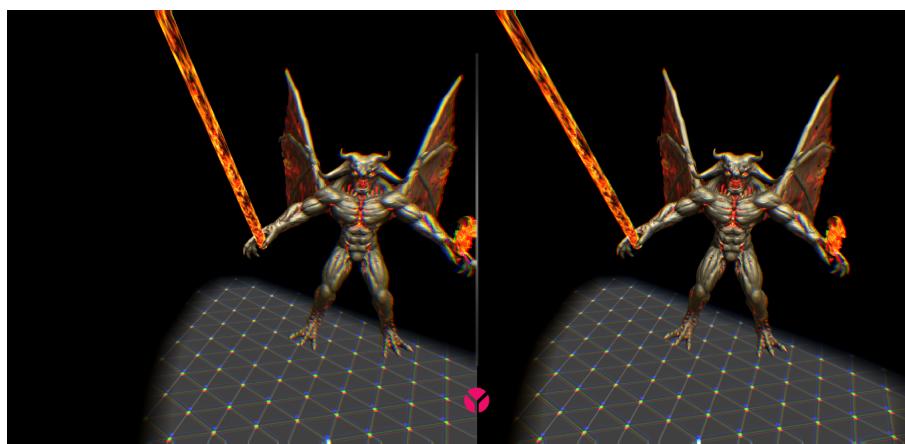


Figura 5.8: Proyección estereoscópica del móvil

5.2.3. Juego multijugador con *cloud anchor* - BombARdero+

Se pueden ver los resultados en el vídeo https://youtu.be/MX5_5ui2WUw.

Muchos usuarios han tenido contacto alguna vez con la realidad aumentada, sin embargo, existe una tecnología que muy pocos han probado, la realidad aumentada multidispositivo. Esta permite ver en tiempo real los objetos virtuales en el mismo punto del mundo físico a través de distintos dispositivos, gracias a los *cloud anchors* explicados anteriormente en la sección 3.1.3.

El objetivo principal del videojuego es destruir el mayor número de edificios posible. Para ello, cada jugador controla su propio avión (figura 5.9), éste consta de una velocidad constante hacia delante, y para controlar su trayectoria existe en la parte inferior izquierda de la pantalla un *joystick* que permite mover el avión hacia arriba, abajo, derecha e izquierda. En la esquina inferior derecha se encuentra un botón que al pulsarlo, se lanza una bomba en la posición del avión, dicha bomba sirve para destruir los edificios que se encuentran en la ciudad.

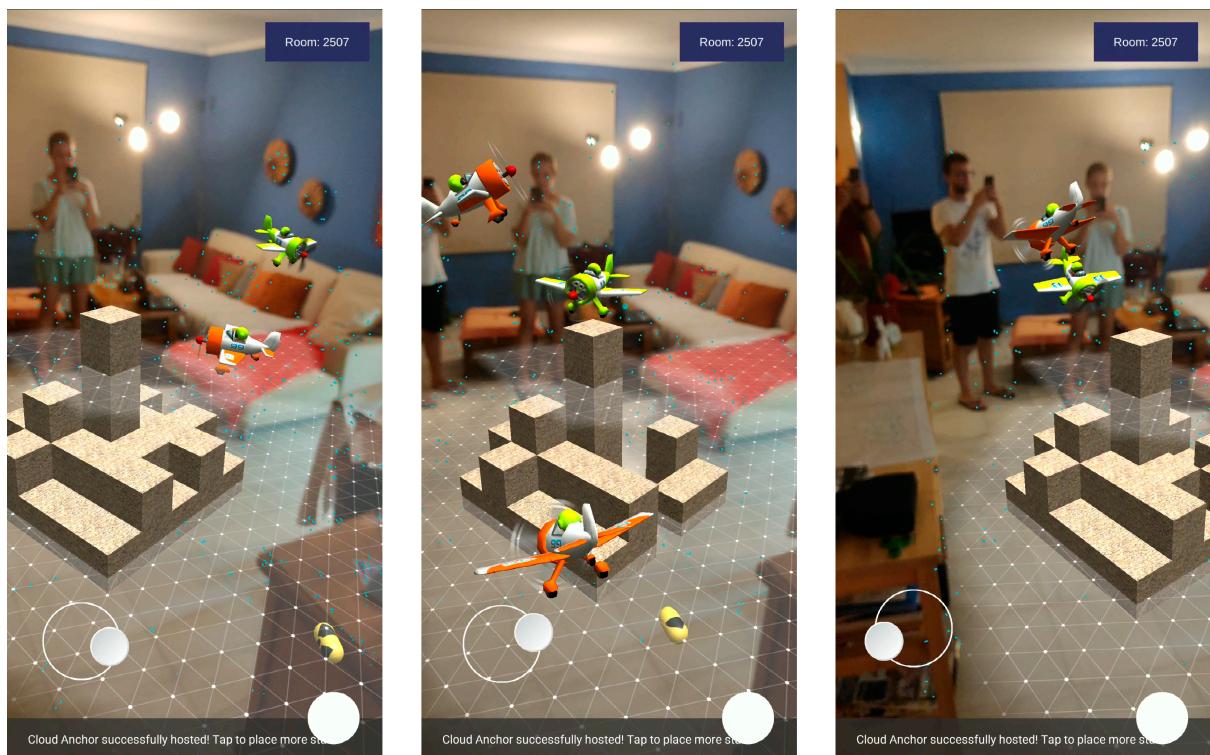


Figura 5.9: Visualización del BombARdero+

Los Cloud Anchors suben la información del punto de anclaje a la nube, permitiendo compartir esa información con otro dispositivo. Para usarlos, hace falta conseguir una clave de licencia de *ARCore Cloud Anchor API* en Google Cloud Platform [33]. Una vez conseguida la credencial, hay que introducirla en Unity3D, “Edit ->Project Settings ->Google ARCore ->Cloud Anchor API Keys”. En los ejemplos que ofrece Google, la implementación de los Cloud Anchor utiliza la *Multiplayer High Level API(Multiplayer HLAPI)* de Unity, por lo que también hay que activar el servicio de multijugador en nuestro proyecto desde el *dashboard* de Unity [51]. Una vez realizado estos dos pasos, al compilar la escena de ejemplo, debería funcionar. En esa escena, un usuario tiene que

crear una sala e instanciar un objeto, el punto de anclaje principal, que se convertirá en las coordenadas (0,0,0) del entorno. Este punto de anclaje tarda unos diez segundos en subirse a la nube y estar disponible para más usuarios, que al entrar a la aplicación le aparece un listado con las salas disponibles.

Primero tuvimos que mirar como funciona la implementación de Google de los *cloud anchors*, para entender el proceso de cómo se subía el punto de anclaje a la nube y la cantidad de información de control que teníamos. Este proceso fue bastante sencillo, ya que el código de ejemplo es muy entendible e intuitivo. Una vez conseguido implementar con los *cloud anchors* el BombARdero (que habíamos programado anteriormente en monojugador), hubo que hacer retoques a los *scripts* y añadir componentes de la multiplayer HLAPI a los objetos, para implementar la parte multijugador.

En el *Cloud Anchor Network Manager* hay que registrar el objeto que se va a instanciar cada vez que entra un jugador a la partida, en nuestro caso es un avión. El avión en un principio está desactivado y se activa en el momento en el que se almacena o resuelve el ancla principal.

Capítulo 6

Conclusiones y trabajo futuro

Gracias a este estudio podemos hacer una estimación bastante certera de cuál es el estado, las capacidades y las limitaciones de las librerías y la tecnología de realidad aumentada en la actualidad cumpliendo de esta manera nuestro objetivo principal con creces.

La realidad aumentada sin marcadores es una tecnología muy nueva, además es accesible a un gran número de usuario gracias a los *smartphones*. En los últimos años se han desarrollado diferentes librerías que facilitan el desarrollo de las aplicaciones con RA sin marcadores. Dichas librerías se actualizan frecuentemente introduciendo nuevas características y mejorando las existentes con el fin de enriquecer la experiencia. Tras la finalización del proyecto, podemos extraer varias conclusiones sobre las diferentes librerías expuestas en este trabajo, proporcionadas tanto por los resultados obtenidos como por la investigación llevada a cabo durante estos meses.

Gracias a las pruebas desarrolladas con las principales librerías del mercado podemos establecer que Google y Apple lideran en calidad, por lo que ARCore y ARKit, son una de las opciones más viables para una aplicación que exige estabilidad y precisión. También cabe destacar el esfuerzo por parte del equipo de desarrollo de Unity3D para implementar la API de ARFoundation, que nos permite desarrollar aplicaciones de realidad aumentada para Android e iOS con el mismo código.

Por otra parte, tenemos librerías que son más inestables, pero son capaces de funcionar en casi todos los dispositivos [55] y en un gran porcentaje de entornos y condiciones. Esto hace que el uso de estas librerías, como pueden ser Vuforia, EasyAR, o Maxst, sean una opción a elegir para aplicaciones que no requieran una estabilidad tan minuciosa.

Después de haber probado todas las librerías vistas anteriormente, queda de manifiesto que se ha conseguido que la estabilidad sea prácticamente perfecta en la mayoría de los casos. También observamos un gran avance en la estimación de luces, muy lograda en casos como ARCore y ARkit, aportando mayor realismo a la experiencia inmersiva. Concluimos que los desarrolladores de ambas empresas líderes (Apple y Google) están optando por revolucionar el mercado con tecnologías como la oclusión y los *cloud anchors*. La realidad aumentada es una tecnología muy novedosa, por lo que avanza muy rápidamente, aproximadamente cada mes y medio ARCore recibe una nueva actualización. De hecho, durante el desarrollo de este trabajo, las librerías sufrieron

actualizaciones importantes con la inclusión de nuevas características.

Gracias a la extensa documentación existente y a los tutoriales creados por la comunidad, el aprendizaje del desarrollo de aplicaciones con realidad aumentada sin marcadores resulta cómodo y accesible para el desarrollador. Esta accesibilidad nos ha permitido el desarrollo de tres aplicaciones destinadas a tres sectores diferentes y nos ha resuelto problemas y dudas que han surgido durante el desarrollo de las mismas.

6.1. Futuros pasos

Como futuros pasos se puede extender el **análisis a las funcionalidades de las *smartglasses*** de realidad aumentada. Estos dispositivos dominan actualmente el mercado y es interesante someterlos a las mismas pruebas y sacar las posibilidades y limitaciones de cada uno.

Por otro lado, todas las pruebas que hemos realizado nosotros han sido en interiores, por lo que se deberían de realizar pruebas en un espacio abierto en el exterior y comprobar el comportamiento.

Además es importante analizar la experiencia de usuario en la realidad aumentada. Es unos de los problemas que hemos identificado, ya que la mayoría de los usuarios que prueban por primera vez una aplicación de realidad aumentada suelen estar desorientados impidiéndoles disfrutar de la experiencia.

Para complementar nuestro trabajo, es interesante hacer un estudio sobre otras funcionalidades que soportan algunas librerías, como el reconocimiento facial, la oclusión, los cloud anchors. Con este tipo de investigación se podría ampliar nuestro trabajo integrando más funcionalidades en el documento de evaluación de las librerías de realidad aumentada.

Capítulo 6

Conclusions and future work

Thanks to this study we are able to define an accurate evaluation of the state, capabilities and limitations of augmented reality libraries and technology, achieving our main goal.

Markerless augmented reality is a new technology and it is accessible to a great number of people thanks to smartphones. In the last years, augmented reality libraries have been developed that ease the AR application development, these libraries are being updated introducing new features that improve the experience. After the fulfillment of the project, we can establish several conclusions about the different libraries mentioned in this paper, based on the research carried out during these months and the results obtained with the tests.

Thanks to the developed tests, we can establish that Google and Apple lead in terms of quality. ARCore and ARKit are one of the most viable options for an application that demands stability and precision.

It is also noteworthy that Unity3D development team is making a great effort to implement the ARFoundation API, which allows us to develop augmented reality applications for Android and iOS with the same source code.

On the other hand, we have low cost libraries that are more unstable, but are capable of working on almost all devices[55] and in a large percentage of environments and conditions. This makes the use of libraries, such as Vuforia, EasyAR, or Maxst, an option to use for applications that do not require such demanding stability.

After testing all the libraries seen above, it is clear that the stability is practically perfect in most cases. We also see a great advance in the estimation of lights, remarkable in cases such as ARCore and ARKit, providing greater realism to the immersive experience.

We can conclude that the developers of both leading companies (Apple and Google) are disrupting the market with technologies such as occlusion and cloud anchors. Augmented reality is a very new technology, so it evolves very quickly, approximately every month and a half ARCore receives a new update; without going any further while we were doing this work, we have been able to observe many important changes in the library.

Thanks to an extensive documentation and tutorials created by the community, learning to develop markerless AR applications is accessible to the developer. This accessibility has allowed us to develop three applications for three different sectors and it has solved some problems and doubts that came up during their development.

6.1. Future work

As future steps, the analysis can be extended to the functionalities of augmented reality smartglasses. These devices currently dominate the market so it is interesting to submit them to the same tests and draw conclusions from each one.

On the other hand, we have done all the tests indoor, so it is important to test the libraries in an open space and study its behaviour.

It is also important to analyze the user's experience in augmented reality. It is one of the main problems that we have identified, since most users who try an augmented reality application for the first time are often disoriented. This situation prevents them from enjoying the experience.

To complement our work, it is interesting to study other functionalities that support some libraries as facial recognition, occlusion or cloud anchors. This kind of research would extend our thesis widening the scope of the evaluation document for augmented reality libraries.

Capítulo 7

Contribuciones

7.1. Colin Ulrich Cop

Antes de empezar el proyecto, tuve mis primeros pasos desarrollando aplicaciones de realidad aumentada con marcadores usando la librería Vuforia. Más tarde, adquirí un teléfono que soportaba ARCore por lo que empecé a probar la realidad aumentada sin marcadores.

Las primeras aplicaciones desarrolladas consistían en instanciar diferentes objetos y hacer que interactuasen entre ellos. Empecé a investigar sobre las librerías disponibles y las iba probando, sobre todo 8th Wall, que aún no tenía el SDK abierto y tuve que enviar una solicitud personal. Con esta librería, también pude probar la realidad aumentada en la web. Durante el curso, en la asignatura *Videojuegos en dispositivos Móviles*, impartida por Pedro Pablo Gómez Martín, tuvimos que programar el juego Bombardero Amstrad-CPC. Tras la práctica, me pareció buena idea desarrollar dicho juego en realidad aumentada. Una vez implementadas las mecánicas básicas, el desarrollo se quedó pausado. También hice el prototipo de JengAR visto anteriormente.

Cuando descubrimos la existencia de los *cloud anchors*, aún no disponíamos de dos dispositivos en los que poder probar esa tecnología, pero decidimos que una de las pruebas de concepto iba a ser un juego multijugador *online* usando los *cloud anchors*. Me empecé a informar respecto a cómo hacer un juego multijugador en Unity, por lo que estuve aprendiendo la *Multiplayer High Level API*, y por otro lado también usé el plugin Photon [46], porque vi que se usa mucho y es más completo que la API de Unity3D. Me encargué de crear las aplicaciones usando todas las librerías, exceptuando ARKit y Vuforia, para el posterior análisis de cada una. Dicho análisis fue realizado junto a Patricia, los dos nos reunimos para probar todas las aplicaciones en el mismo entorno y mismas condiciones. Junto a Patricia encontré las gafas Aryzon [17], y se nos ocurrió crear una aplicación en la que se pudiera observar y manipular objetos 3D.

Cuando la facultad nos proporcionó un teléfono que soportase ARCore, pude empezar la prueba de concepto BombARdero+, que se pudo adaptar bien a los *cloud anchors* gracias a que ya tenía un proyecto con los *prefabs* y *scripts* hechos anteriormente. Patricia me ayudó a adaptar dicho proyecto al multijugador y a implementar las funcionalidades requeridas para que funcionase correctamente *online*.

Con respecto a la memoria, antes de empezar a escribir, me informé en varios libros y webs sobre la historia de la RA, ya que me encargué de escribir la definición e historia. Por otro lado, tuve que estudiar varias tecnologías implicadas en la RA sin marcadores, como el SLAM, reconocimiento del ambiente, oclusión, estimación de luces, e hice un estudio completo sobre las funcionalidades y licencias de cada librería que hemos visto. Patricia y yo hemos realizado el capítulo 4 entero, donde tuvimos que someter cada una de las aplicaciones a un test y evaluar su rendimiento en diferentes condiciones de luz. Finalmente, junto a Patricia, traduje la introducción y las conclusiones al inglés.

7.2. Patricia Cabrero Villar

Mi primer contacto con la realidad aumentada fue cuando realicé mi trabajo fin de grado cuando cursé el Grado de Diseño Gráfico y Multimedia, donde desarrollé una aplicación de realidad aumentada con marcadores específica para niños con trastorno del espectro autista. Después de esta primera aproximación al mundo de la realidad aumentada me pareció interesante continuar formándome y aprendiendo en lo que refiere a este campo, con lo que decidí proponer como tema la realidad aumentada sin marcadores.

Una vez establecido el tema investigué en busca de tecnologías disponibles y bibliografía actualizada para poder tener una base sólida sobre la que apoyarme para el desarrollo del proyecto. De esta manera surgieron títulos como *Handbook of Augmented Reality* de Carmigniani y Furth que me ayudó a comprender con mayor profundidad la tecnología a tratar y como punto de referencia del paradigma actual establecí el libro *Augmented reality games II, The gamification of education,medicine and art* de Geroimenko.

Realizada la investigación fui la encargada de establecer la estructura y plan de trabajo que seguiríamos a lo largo del proyecto para poder llevar a cabo los objetivos propuestos conjuntamente. En un primer paso plasmamos entre los tres los conocimientos adquiridos en la fase de investigación mostrando los antecedentes, historia y librerías de realidad aumentada en el capítulo 2 y 3.

Más tarde definí las pruebas y características que observaríamos en los *test* de las diferentes librerías junto con mi compañero Colin. El desarrollo de las aplicaciones se dividió de manera que yo realicé las aplicaciones de Vuforia y ARKit ya que era necesario un dispositivo iOS para su correcto funcionamiento. Una vez tuvimos desarrolladas todas las pruebas de las librerías se probaron todas bajo las mismas condiciones de luz y tecnología, esta evaluación fue llevada a cabo por Colin y por mí, estableciendo conjuntamente las puntuaciones y conclusiones de cada librería. Gracias a estas pruebas Colin y yo pudimos establecer una evaluación global de las librerías actuales y con estas conclusiones decidir las pruebas de concepto que desarrollaríamos en una segunda fase.

Por último, en esta segunda fase se decidió desarrollar una aplicación multijugador (BombARdero+), una inmersiva (Aryzon) y una instructiva (AmueblAR). El desarrollo de estas aplicaciones se decidió dividir entre los integrantes ya que permitía un desarrollo más ágil y debido a la necesidad de dos teléfonos en el caso del multijugador. Debido a esto realicé junto con mi compañero Colin la aplicación multijugador BombARdero+ y el visualizador de objetos en 3D para las gafas Aryzon. En el caso de la aplicación

multijugador focalicé mis esfuerzos en comprender el funcionamiento de la API de multijugador de Unity para poder utilizarla en consonancia con los *cloud anchors*. Mi papel en el desarrollo de la visualización de objetos con las gafas Aryzon fue el de investigar acerca de la posibilidad de implementar la visión estereoscópica junto con ARCore.

7.3. David González Jiménez

Dado que al inicio del trabajo la tecnología de mi móvil era la más anticuada y la única que no soportaba el uso de librerías que permitiesen trabajar con realidad aumentada sin marcadores, mis primeros pasos consistieron en documentarme y utilizar librerías preparadas para funcionar con marcadores, como Vuforia y ARToolKit.

En una primera incursión con ARToolkit pude encontrar un paquete que lo integraba en Unity y una documentación bastante precaria sobre cómo utilizar este *plugin*. Tras unas cuantas búsquedas conseguí hacer una aplicación muy básica que funcionase en mi dispositivo a modo de aproximación, que está explicada en la sección correspondiente a las pruebas con ARToolKit.

Ahora que ya había tocado los orígenes de la realidad aumentada podía ponerme manos a la obra con la librería Vuforia, también integrada en Unity. Por este entonces seguía sin tener acceso a tecnología que permitiese ejecutar aplicaciones de realidad aumentada sin marcadores, de manera que los prototipos que realicé con esta librería también utilizaban marcadores. Sin embargo, los resultados fueron mucho más satisfactorios y vistosos porque Vuforia pone a disposición del desarrollador gran cantidad de herramientas que hacen el trabajo más sencillo y dan mejores resultados. Los prototipos que realicé en este caso fueron dos aplicaciones para el visionado de vídeos virtuales sobre imágenes reales que se exponen en detalle en los apartados correspondientes a las pruebas con Vuforia con marcadores. Pude hacer con éxito un cartel animado basado en la saga de Harry Potter y una página de cómic de DragonBall en la que se reproduce un pequeño vídeo en cada viñeta.

En última instancia, y con el fin de hacer una aplicación algo más compleja con marcadores hice la implementación de un juego de cartas por turnos en la que las criaturas que están dibujadas en los naipes aparecen como modelos 3D al verlas a través de un móvil. El juego consta de turnos donde el rival es controlado por una inteligencia artificial. Todo este desarrollo puede leerse en la sección correspondiente en el capítulo del juego implementado en realidad aumentada con marcadores.

Finalmente, la facultad me proporcionó un móvil que permitía por fin el despliegue de aplicaciones que usan realidad aumentada sin marcadores, así que mis compañeros y yo nos repartimos diferentes aplicaciones para realizar en ellos. Yo escogí basándome en el concepto de Ikea Place una aplicación que sirviese como manual de instrucciones para cualquier usuario que quisiera montar un mueble en su casa. La aplicación consta de un sofá cuyo montaje se divide en 9 pasos diferenciados que el usuario puede pasar hacia delante y detrás, así como rotar o moverse alrededor del sofá a voluntad para facilitar la comprensión del ensamblaje. El proceso de desarrollo y la idea desarrollada se pueden

consultar en la sección que habla sobre la aplicación AmueblAR.

Por último añadir que además del desarrollo de las aplicaciones anteriores, me he documentado sobre diferentes aspectos del funcionamiento de la realidad aumentada, como son los *cloud anchors* o la detección de caras para escribir dichas secciones en la memoria, así como las diferentes aplicaciones y avances que se han producido recientemente en campos como la educación, el arte, la medicina, la publicidad o el turismo en relación a las tecnologías de la realidad aumentada, además de los diferentes métodos de *tracking* existentes hasta el momento.

Repositorios

Repositorio principal: <https://github.com/ar-tfg/>

Repositorio de la memoria: <https://github.com/ar-tfg/Memoria>

Repositorio pruebas de concepto: <https://github.com/ar-tfg/DemosLibrerias>

Vídeos de las pruebas de concepto: <https://www.youtube.com/playlist?list=PLqQgTAUiabc8AQrcC48Jdglnytus9IoXe>

Repositorio de la aplicación Yu-gi-oh: <https://github.com/ar-tfg/Yu-gi-oh>

Repositorio de la aplicación de Harry Potter: <https://github.com/ar-tfg/HarryPotter>

Repositorio de la aplicación de Dragon Ball: <https://github.com/ar-tfg/DragonBall>

Repositorio del juego JengAR: <https://github.com/ar-tfg/JengAR>

Repositorio del juego BombARdero+: <https://github.com/ar-tfg/BombarderoOnline>

Repositorio de la aplicación Visualizer3D: <https://github.com/ar-tfg/Visualizer3D>

Repositorio de la aplicación AmueblAR: <https://github.com/ar-tfg/AmueblAR>

Índice de figuras

2.1. Cartel publicitario de la máquina Sensorama	21
2.2. Ivan Sutherland “Espada de Damocles” 1968.	22
2.3. ARQuake	23
2.4. Wikitude App 2008	23
2.5. Ejemplo del videojuego ARhrrrr!	24
2.6. Prototipo original de Google Glass	25
2.7. Actuales Google Glass Enterprise 2	26
2.8. Dispositivos Hololens	27
2.9. Magic Leap	28
2.10. Gafas Aryzon	28
2.11. Uso de realidad aumentada en una intervención quirúrgica	30
2.12. Juego educativo Elements 4D	30
2.13. Exhibición de Adrien M y Claire B <i>Mirages and Miracles</i>	31
2.14. Ejemplos de uso en la Fabricación	32
2.15. Burger King campaña publicitaria	33
2.16. Aplicación para el parque Legoland	34
2.17. Traductor de Google en RA	34
2.18. Captura del juego Pokémon Go	35
2.19. IKEA Place AR probador virtual	36
2.20. Imagen representativa de YouCam Makeup	36
3.1. Detección de rostros	44
4.1. Puntuación de las librerías	68
5.1. Tipos de patrón ARToolkit	73
5.2. Estimación de Vuforia	74
5.3. Aplicación del periódico de Harry Potter	74
5.4. Página del cómic con RA	76
5.5. Visualización del juego de cartas	78
5.6. Visualización del JengAR	79
5.7. Capturas de la aplicación AmueblAR	82
5.8. Proyección estereoscópica del móvil	83
5.9. Visualización del BombARdero+	84

Índice de cuadros

3.1. Licencias 8th Wall	51
3.2. Comparación de funcionalidades	53
3.3. Comparación de plataformas y lenguajes soportados	54
4.1. Análisis Wikitude	57
4.2. Análisis ARKit	58
4.3. Análisis ARCore	60
4.4. Análisis Vuforia	61
4.5. Análisis Kudan	62
4.6. Análisis Maxst	64
4.7. Análisis 8th Wall	65
4.8. Análisis EasyAR	66
4.9. Análisis ARFoundation	67
4.10. Análisis de las características de las librerías de RA sin marcadores	68

Bibliografía

- [1] Julie Carmigniani y Borko Furht. “Augmented Reality: An Overview”. En: 3.^a ed. Vol. 4. 5. Handbook of Augmented Reality. Nueva York: Springer, jul. de 1993. Cap. 1, págs. 03-46.
- [2] Wayne Piekarski y Bruce Thomas. *ARQuake: The Outdoor Augmented Reality Gaming System*. 1.^a ed. Bubok Publishing S.L, 2002.
- [3] D. Marimon. “Advances in Top-Down and Bottom-Up Approaches to Video-Based Camera Tracking”. Tesis doct. France: École Poly- technique Fédérale de Lausanne., jul. de 2007.
- [4] Guan Tao y Wang Cheng Wang Tian Yuan. “Real-Time Occlusion Handling in Augmented Reality Based on an Object Tracking Approach.” En: *MDPI* 10.10 (jul. de 2010).
- [5] J.A Albusac Jiménez y J.J Castro Sánchez C. González Morcillo. *Realidad Aumentada. Un enfoque práctico con ARToolkit y Blender*. 1.^a ed. Bubok Publishing S.L, 2012.
- [6] Shoaib Ehsan y Adrian F. Clark Erkan Bostancı Nadia Kanwal Nadia. “User Tracking Methods for Augmented Reality”. En: *International Journal of Computer Theory and Engineering* 5 (2013), pág. 98.
- [7] BBC Earth Lab. *How Does Facial Recognition Work? / Brit Lab*. 2015. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=1aHub80AHFk> (visitado 02-09-2019).
- [8] DEV. *Libro Blanco del Desarrollo español de videojuegos 2018*. 1.^a ed. 2018.
- [9] Maxst. *SLAM, Core technology of AR, What is it?* 2018. URL: <https://medium.com/maxst/slam-core-technology-of-ar-what-is-it-e6c9ae4839b4> (visitado 02-09-2019).
- [10] 8thWall. *8th Wall developer documentation*. 2019. URL: <https://www.8thwall.com/index.html> (visitado 01-09-2019).
- [11] 8thWall. *8th Wall Jini Web Demo*. 2019. URL: 8th.io/jini (visitado 08-09-2019).
- [12] 8thWall. *8th Wall XR Remote*. 2019. URL: <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.the8thwall.XRRemote&gl=ES> (visitado 08-09-2019).
- [13] La Vanguardia Álex Barredo. *Probamos las Magic Leap, las gafas de realidad aumentada que van a cambiarlo todo*. 2019. URL: <https://www.lavanguardia.com/tecnologia/20190217/46505226926/magic-leap-analisis.html> (visitado 07-07-2019).
- [14] Glass Almanac. *The History of Google Glass*. 2019. URL: <http://glassalmanac.com/history-google-glass> (visitado 18-09-2019).
- [15] Apple. *Apple Developer Documentation*. 2019. URL: <https://developer.apple.com/augmented-reality/arkit/> (visitado 01-09-2019).

- [16] ARToolKit. *ARToolKit Webpage*. 2019. URL: artoolkit.org (visitado 09-09-2019).
- [17] Aryzon. *Aryzon official Website*. 2019. URL: <https://www.aryzon.com> (visitado 09-09-2019).
- [18] Realidad en Aumento. *7 aplicaciones de realidad aumentada que están revolucionando la medicina*. 2019. URL: <https://realidadenaumento.es/realidad-aumentada-en-la-medicina/> (visitado 19-09-2019).
- [19] Cbspicer. *Modelo 3D de tornillos*. 2019. URL: <https://www.turbosquid.com/3d-models/free-bolt-assemby-nut-3d-model/317816> (visitado 09-09-2019).
- [20] Designboom. *Burger King encourages users to 'burn' rival ads in augmented reality campaign*. 2019. URL: <https://www.designboom.com/technology/burger-king-burn-that-ad-free-whopper-virtual-reality-03-21-2019/> (visitado 19-09-2019).
- [21] EasyAR. *EasyAR*. 2019. URL: <https://www.easyar.com/view/sdk.html> (visitado 01-09-2019).
- [22] Elemmetal. *'Mirages & miracles': entre lo real y lo imaginario*. 2019. URL: <https://elemmetal.com/2019/02/15/mirages-miracles-entre-lo-real-y-lo-imaginario/> (visitado 19-09-2019).
- [23] Kinepolis España. *Cine 4DX*. 2019. URL: <https://kinepolis.es/movie-formats/4dx> (visitado 19-09-2019).
- [24] E. Games. *Getting started with Unreal Engine 4 and Arkit*. 2019. URL: <https://www.unrealengine.com/en-US/blog/getting-started-with-ue4-and-arkit> (visitado 01-09-2019).
- [25] Damián García. *Google hace oficiales a las Glass Enterprise Edition 2*. 2019. URL: <https://andro4all.com/2019/05/google-glass-enterprise-edition-2-lanzamiento-precios> (visitado 18-09-2019).
- [26] V. Geroimenko. *Augmented reality games II, The gamification of education, medicine and art*. 1.^a ed. Springer, 2019.
- [27] Wikitude GmbH. *Wikitude Documentation*. 2019. URL: <https://www.wikitude.com/download/> (visitado 01-09-2019).
- [28] Wikitude GmbH. *Wikitude Unity Documentation*. 2019. URL: <https://www.wikitude.com/external/doc/documentation/latest/unity/gettingstartedunity.html#getting-started> (visitado 08-09-2019).
- [29] Sergio C. González. *Pokémon GO ha facturado hasta abril de 2019 un 33 por ciento más que en 2018*. 2019. URL: https://as.com/meristation/2019/05/07/noticias/1557204572_736806.html (visitado 19-09-2019).
- [30] Google. *ARCore developer documentation*. 2019. URL: <https://developers.google.com/ar/> (visitado 01-09-2019).
- [31] Google. *ARCore Fundamental Concepts*. 2019. URL: <https://developers.google.com/ar/discover/concepts> (visitado 02-09-2019).
- [32] Google. *ARCore supported devices*. 2019. URL: <https://developers.google.com/ar/discover/supported-devices> (visitado 08-09-2019).
- [33] Google. *Google Cloud Platform*. 2019. URL: <https://console.cloud.google.com/home/dashboard> (visitado 09-09-2019).

- [34] Google. *Google's Github*. 2019. URL: <https://github.com/google-ar/arcore-unity-sdk/releases> (visitado 08-09-2019).
- [35] Jachim van Huut. *The Augmented Reality Wayfinding app we made as a concept for Legoland Denmark*. 2019. URL: https://twitter.com/jachim_van_huut/status/1100348709991313408 (visitado 19-09-2019).
- [36] Ikea. *Instrucciones de montaje del sofá KIVIK - IKEA*. 2019. URL: https://www.youtube.com/watch?v=F_2Mh3aa0Zs (visitado 09-09-2019).
- [37] Protofactor Inc. *HEROIC FANTASY CREATURES FULL PACK Volume 1*. 2019. URL: <https://assetstore.unity.com/packages/3d/characters/creatures/heroic-fantasy-creatures-full-pack-volume-1-5730> (visitado 13-09-2019).
- [38] Kudan. *Kudan License Keys*. 2019. URL: <https://www.xlsoft.com/doc/kudan/development-license-keys/> (visitado 08-09-2019).
- [39] Kudan. *Kudan official webpage*. 2019. URL: <https://www.kudan.io/> (visitado 08-09-2019).
- [40] Macrumors. *iOS 13 Code Suggests Apple Testing AR Headset*. 2019. URL: <https://www.macrumors.com/2019/09/02/apple-glasses-starboard-garta-ios-13/> (visitado 20-09-2019).
- [41] Maxst. *Maxst developer documentation*. 2019. URL: <https://developer.maxst.com/> (visitado 01-09-2019).
- [42] Microsoft. *HoloLens 2 AR Headset: On Stage Live Demonstration*. 2019. URL: <https://youtu.be/uIHPPtPBgHk?t=377> (visitado 20-09-2019).
- [43] Neosentec. *5 Beneficios de la realidad aumentada en turismo*. 2019. URL: <https://www.neosentec.com/5-beneficios-de-la-realidad-aumentada-en-turismo/> (visitado 09-09-2019).
- [44] Neosentec. *Realidad Aumentada en la Industria 4.0*. 2019. URL: <https://www.neosentec.com/realidad-aumentada-en-la-industria-4-0/> (visitado 09-09-2019).
- [45] Neosentec. *Realidad Aumentada en Publicidad y Marketing*. 2019. URL: <https://www.neosentec.com/realidad-aumentada-en-la-publicidad/> (visitado 09-09-2019).
- [46] PhotonEngine. *Photon Unity3D Networking Framework*. 2019. URL: <https://www.photonengine.com/pun> (visitado 15-09-2019).
- [47] Caracol Radio. *Realidad Aumentada, el futuro de los gamers y no tan gamers*. 2019. URL: https://caracol.com.co/radio/2019/03/28/tecnologia/1553785800_494234.html (visitado 19-09-2019).
- [48] Placenote SDK. *Using Placenote for industrial collaboration*. 2019. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=TO6s0ePf41c> (visitado 09-09-2019).
- [49] Statista. *Topic: Augmented Reality (AR)*. 2019. URL: <https://www.statista.com/topics/3286/augmented-reality-ar/> (visitado 07-08-2019).
- [50] Unity. *About AR Foundation*. 2019. URL: <https://docs.unity3d.com/Packages/com.unity.xr.arfoundation@2.1/manual/index.html> (visitado 01-09-2019).
- [51] Unity. *Unity Dashboard Services*. 2019. URL: <https://developer.cloud.unity3d.com/projects/> (visitado 09-09-2019).

- [52] Unity. *Unity's Github*. 2019. URL: <https://github.com/Unity-Technologies/arfoundation-samples> (visitado 09-09-2019).
- [53] Vuforia. *Vuforia developer documentation*. 2019. URL: <https://developer.vuforia.com/pricing> (visitado 01-09-2019).
- [54] Vuforia. *Vuforia Fusion Supported Devices*. 2019. URL: <https://library.vuforia.com/articles/Solution/vuforia-fusion-supported-devices.html> (visitado 09-09-2019).
- [55] Wikitude. *Instant Tracking: Augmented Reality Uses Cases And How-to*. 2019. URL: <https://www.wikitude.com/blog-instant-tracking-augmented-reality-uses-cases-and-how-to/> (visitado 15-09-2019).
- [56] Xataka. *11 apps para sacar partido a la realidad aumentada en tu móvil*. 2019. URL: <https://www.xataka.com/moviles/11-apps-para-sacar-partido-partido-a-realidad-aumentada-tu-movil> (visitado 19-09-2019).
- [57] Xataka. *Facebook se alía con Ray-Ban para desarrollar sus gafas de realidad aumentada*. 2019. URL: <https://www.xataka.com/realidad-virtual-aumentada/facebook-se-alia-ray-ban-para-desarrollar-sus-gafas-realidad-aumentada-llegarian-2023-como-sustituto-al-movil-cnbc> (visitado 20-09-2019).
- [58] Xlsoft. *Kudan developer documentation*. 2019. URL: <https://www.xlsoft.com/en/products/kudan/price.html> (visitado 01-09-2019).
- [59] Lior Wolf Yaniv Taigman Ming Yang y Marc'Aurelio Ranzato. *Creating a Multiuser AR Experience*. 2019. URL: https://developer.apple.com/documentation/arkit/creating_a_multiuser_ar_experience?language=objc (visitado 02-09-2019).
- [60] Marc'Aurelio Ranzato Yaniv Taigman Ming Yang y Lior Wolf. *DeepFace: Closing the Gap to Human-Level Performance in Face Verification*. 2019. URL: <https://research.fb.com/publications/deepface-closing-the-gap-to-human-level-performance-in-face-verification/> (visitado 02-09-2019).