

FACULTAD DE INGENIERÍA - UNIVERSIDAD DE LA
REPÚBLICA

TELEPRESENCIA APLICADA



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY

PROYECTO DE GRADO

INGENIERÍA EN COMPUTACIÓN

SEBASTIÁN MACÍAS
SALVADOR CALVO
FERNANDO CARIDE

TUTORES: TOMAS LAURENZO, EWELINA BAKALA, FERNANDO
GONZÁLEZ, GERMAN HOFFMAN

Agradecimientos

Este proyecto representó un gran esfuerzo humano y material, no solo de quienes lo llevamos a cabo, sino de muchas personas que de alguna u otra manera han realizado contribuciones importantes.

Por eso queremos agradecer a nuestras familias, parejas, y amigos, por su apoyo constante.

A aquellos amigos que colaboraron en la logística de las compras en el exterior.

A nuestros tutores, por su apoyo en los momentos justos.

A los voluntarios de las pruebas, y los estudiantes de Licenciatura en Psicología que las llevaron a cabo.

A docentes y estudiantes de Facultad de Ingeniería, por su cooperación a lo largo del proyecto.

Al Centro de Innovación en Ingeniería y la Fundación Julio Ricaldoni, por haber confiado en nosotros para darle otro alcance a este proyecto y brindarnos el apoyo material.

Resumen

Los avances en los dispositivos realidad virtual permiten acercar al usuario cada vez más, a la experiencia cognitiva de estar en una realidad artificial o remota. En este contexto, los dispositivos para la cabeza como Oculus Rift juegan un rol preponderante, ofreciendo al usuario estímulos visuales en pantallas de alta resolución, ocupando todo su campo visual, y aislándolo de estímulos visuales externos. Esta clase de sistemas cobran un gran valor cuando se considera la realización de tareas a distancia, permitiendo evitar traslados, riesgos, o mejorar la ejecución de las mismas. Sin embargo, la construcción de estos sistemas implica al día de hoy el desafío técnico de la integración de múltiples tecnologías, sumado a la comprensión de algunos aspectos de la percepción sensorial y de la conducta humana. Este trabajo estudia el potencial de los sistemas mencionados para la ejecución de tareas a distancia, a través de la construcción de una experiencia de telepresencia que permite al usuario visualizar un entorno remoto a través del Oculus Rift. Durante el mismo se exploran diferentes aspectos de la construcción del sistema y del diseño de la experiencia, así como sus potenciales usos aplicados. Para lograr acceder a escenarios remotos diversos, el sistema de adquisición de imágenes se monta sobre un dispositivo aéreo no tripulado (UAV). Se registran las incidencias relevantes y posibles mejoras. Finalmente se realiza una valoración cualitativa y cuantitativa del sistema construido así como de la experiencia de usuario. De estas se puede concluir la viabilidad de construir un sistema que permita una experiencia altamente inmersiva, con la versatilidad suficiente para ser utilizado con el fin de controlar un UAV en vuelo y poder ejecutar algunas tareas de observación a distancia.

Palabras clave: telepresencia, realidad virtual, UAV, Oculus Rift, HCI

Índice general

| | |
|---|-----------|
| 1. Introducción | 1 |
| 1.1. Estructura del documento | 1 |
| 1.2. Descripción del proyecto | 2 |
| 1.3. Objetivos | 3 |
| 1.4. Descripción del problema | 3 |
| 2. Estado del Arte | 7 |
| 2.1. Realidad virtual | 7 |
| 2.1.1. Inmersión | 8 |
| 2.2. Telepresencia | 8 |
| 2.2.1. <i>Flow</i> | 9 |
| 2.2.2. Definición | 9 |
| 2.2.3. Tecnologías involucradas | 11 |
| 2.3. Pantallas montadas en la cabeza | 12 |
| 2.3.1. Oculus Rift | 13 |
| 2.3.2. Realidad aumentada con Oculus Rift | 14 |
| 2.4. Vehículos UAV | 15 |
| 2.4.1. Sistemas de control de vuelo | 16 |
| 2.5. Protocolo de comunicación para UAV | 17 |
| 2.6. Antecedentes directos | 18 |
| 2.6.1. Oculus FPV | 18 |
| 2.6.2. Implementación de un <i>Tunnel In The Sky</i> para micro UAV | 19 |
| 3. Análisis y diseño de la experiencia de telepresencia | 21 |
| 3.1. Contexto | 21 |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 3.2. | Relevamiento | 22 |
| 3.2.1. | Escenario 1: obra portuaria | 23 |
| 3.2.2. | Escenario 2: relevamiento en áreas vastas y difícil tránsito, por ejemplo curso de ríos | 24 |
| 3.2.3. | Escenario 3: áreas de difícil acceso | 24 |
| 3.3. | Diseño de la experiencia | 24 |
| 3.3.1. | Visualización | 25 |
| 3.3.2. | Latencia | 25 |
| 3.3.3. | Control | 26 |
| 3.3.4. | Funcionalidades adicionales | 26 |
| 3.4. | Prototipo básico | 26 |
| 3.4.1. | Objetivos | 26 |
| 3.4.2. | Descripción | 27 |
| 3.4.3. | Componentes | 28 |
| 3.4.4. | Pruebas y resultados | 30 |
| 4. | Descripción de componentes y diseño del prototipo final | 35 |
| 4.1. | Diseño del prototipo | 37 |
| 4.1.1. | Sistemas remotos | 38 |
| 4.1.2. | Enlace aéreo de datos | 46 |
| 4.1.3. | Sistema de alimentación y distribución de corriente | 47 |
| 4.2. | Sistemas en tierra | 49 |
| 4.2.1. | Receptor analógico 5.8 GHz | 49 |
| 4.2.2. | Capturadoras de video | 50 |
| 4.2.3. | Enlace terrestre de datos | 50 |
| 4.2.4. | Computadora | 50 |
| 4.2.5. | Entorno de desarrollo para Oculus Rift | 51 |
| 5. | Arquitectura del sistema y aplicaciones | 53 |
| 5.1. | Sistema de control y despliegue de interfaz | 53 |
| 5.1.1. | Arquitectura | 54 |
| 5.1.2. | Módulos | 56 |
| 5.1.3. | Funcionamiento | 61 |
| 5.2. | Sistema de estación de tierra | 61 |
| 5.2.1. | Arquitectura | 62 |
| 5.2.2. | Características y funcionalidades | 63 |

| | |
|---|-----------|
| 6. Pruebas y resultados | 69 |
| 6.1. Pruebas de funcionamiento del prototipo y restricciones operativas | 70 |
| 6.1.1. Objetivos | 70 |
| 6.1.2. Desarrollo | 70 |
| 6.1.3. Análisis de resultados | 74 |
| 6.2. Pruebas de experiencia de usuario | 74 |
| 6.2.1. Percepción de objetos y alineación de cámaras | 75 |
| 6.2.2. Comparación de la adquisición estereoscópica y monoscópica con el dispositivo | 76 |
| 6.2.3. Conteo | 78 |
| 6.2.4. Ayudas de navegación | 79 |
| 6.3. Pruebas de evaluación de experiencia de usuario de participación interdisciplinaria | 80 |
| 6.3.1. Evaluación de aspectos básicos de la experiencia | 81 |
| 6.3.2. Evaluación de síntomas relacionados al uso del dispositivo de telepresencia | 86 |
| 6.3.3. Evaluación de percepción de latencia | 87 |
| 6.3.4. Prueba de conteo de postes | 88 |
| 6.3.5. Control del UAV en simultáneo al uso del sistema de telepresencia | 91 |
| 6.4. Conclusiones generales | 93 |
| 7. Conclusiones y trabajo a futuro | 95 |
| 7.1. Conclusiones | 95 |
| 7.2. Trabajos a futuro | 97 |
| 7.2.1. Utilización de sistema de adquisición y transmisión de imágenes digital | 97 |
| 7.2.2. Movimiento del sistema de adquisición de imágenes | 97 |
| 7.2.3. Ayudas de control automatizadas e interfaces de control natural para el UAV | 98 |
| 7.2.4. Enriquecimiento de la experiencia con realidad aumentada y procesamiento de imágenes | 98 |
| 7.2.5. Incorporación de sonido | 99 |
| 7.2.6. Utilización de UAV con mayor carga útil y autonomía | 99 |
| 7.2.7. Telepresencia aplicada | 99 |

| | |
|---|------------|
| A. Documentación técnica de componentes | 101 |
| A.1. UAV | 101 |
| A.2. Batería externa | 102 |
| A.3. Módulo regulador de alimentación | 103 |
| A.4. Dispositivo de Adquisición Estereoscópico | 104 |
| A.5. Cámara | 105 |
| A.6. Soporte de 3 ejes | 106 |
| A.7. Computadora | 106 |
| A.8. Enlace de datos de telemetría | 107 |
| A.9. Controladora de vuelo | 108 |
| A.10.Receptor local de imagen | 109 |
| A.11.Antenas omnidireccionales | 110 |
| A.12.Capturadora de video | 110 |
| B. Obtención de recursos | 113 |
| C. Manual de despliegue de instalación | 123 |
| C.1. Configuración de ambiente | 123 |
| C.2. Configuración | 123 |
| D. Manual de usuario | 127 |
| D.1. Periféricos | 127 |
| D.2. Sistema de estación de tierra | 127 |
| D.3. Sistema de control y despliegue de interfaz | 129 |
| D.4. Encendido del modo grabación de las cámaras | 130 |
| E. Origen y evolución del Oculus Rift | 131 |
| F. Síntomas adversos relacionados al uso del Oculus Rift | 137 |
| G. Usos de los UAV | 139 |
| H. ArduCopter | 143 |
| H.1. Componentes necesarios | 143 |
| H.2. Características | 143 |
| I. Configuración del kit de telemetría | 145 |

| | |
|--|------------|
| <i>ÍNDICE GENERAL</i> | 11 |
| J. Navegación aérea | 147 |
| K. Implementación de Mission Planner | 149 |
| L. Problemas en el desarrollo del prototipo básico | 151 |
| M. Incidencias generales relevantes | 153 |
| M.1. Desarrollo del prototipo de evaluación | 153 |
| M.1.1. Problemas con la interfaz USB | 153 |
| M.2. Desarrollo del prototipo final | 154 |
| M.2.1. Dificultades con la documentación técnica de componentes utilizados | 154 |
| M.2.2. Rotura de cámara | 154 |
| M.2.3. Dificultades con el desarrollo y configuración para Oculus Rift | 154 |
| M.2.4. Limitación del movimiento de las cámaras debido al tren de aterrizaje | 155 |
| M.2.5. Interferencia en la transmisión de imágenes | 155 |
| M.2.6. Señal de transmisión de datos de telemetría deficiente | 157 |
| M.2.7. Quema de fusible en placa principal del UAV | 157 |
| M.3. Accidente con el UAV | 158 |
| M.3.1. Descripción del accidente | 158 |
| M.3.2. Conclusiones | 160 |
| M.3.3. Consecuencias | 160 |
| Bibliografía | 161 |

Capítulo 1

Introducción

El presente documento contiene los resultados del trabajo realizado en el marco de la asignatura Proyecto de Grado de la carrera de Ingeniería en Computación, en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República Oriental del Uruguay. Dicho trabajo lleva el nombre de Telepresencia Aplicada.

Adicionalmente, el proyecto forma parte del programa de Apoyo para Proyectos de Innovación del Centro de Innovación en Ingeniería (CII), y su referencia en el mismo es UDELAR-4 Telepresencia Aplicada. En este marco el proyecto recibió fondos para su implementación. El trabajo es realizado en coordinación con la Fundación Julio Ricaldoni y la empresa CSI Ingenieros.

1.1. Estructura del documento

En este primer capítulo se realiza una descripción del proyecto y sus objetivos, y se hace una breve mención a los principales problemas a resolver.

En el segundo capítulo se presenta el resultado de un trabajo de investigación y relevamiento sobre el estado del arte referente a las diferentes áreas relacionadas.

En el tercer capítulo se describe el diseño de la experiencia, qué decisiones se tomaron para concebir la misma, y qué base teórica se utilizó. Se exponen también cuáles serán sus objetivos, y sus potenciales aplicaciones.

En el cuarto capítulo se detalla el diseño del prototipo y la elección de sus componentes, haciendo foco en el *hardware* a emplear y qué otras posibilidades existen para la implementación.

En el quinto capítulo se hace foco en las aplicaciones construidas, tanto en lo referido a su arquitectura como su desarrollo y funcionalidades.

En el sexto capítulo se explican las pruebas diseñadas, los datos obtenidos y los resultados de las mismas.

En el séptimo capítulo se exponen las conclusiones finales de este trabajo, y el trabajo a futuro vinculado a este proyecto.

1.2. Descripción del proyecto

La telepresencia puede ser definida como la experiencia de percepción de un ambiente mediada por un dispositivo tecnológico. Dicho ambiente puede estar separado en el espacio y en el tiempo y puede ser real o virtual [1]. En términos simples, algunos autores lo describen como la sensación de “estar ahí” (refiriéndose a la experiencia del usuario que percibe el ambiente remoto) [2].

El presente proyecto consiste en el estudio de la telepresencia utilizando como medio un dispositivo de visualización de realidad virtual altamente inmersivo (Oculus Rift) [3]. La adquisición de este dispositivo es resuelta por el Laboratorio de Medios de la Facultad de Ingeniería con el fin de llevar adelante un proyecto de grado de investigación y desarrollo sobre algunas de sus potencialidades. El trabajo incluye la construcción de un prototipo que permite la telepresencia a distancia que simula para el usuario la experiencia de estar montado sobre un Vehículo Aéreo no Tripulado (UAV por las siglas en inglés de *Unmanned Aerial Vehicle*).

La construcción del prototipo es acompañada de un trabajo previo de investigación sobre las tecnologías relacionadas. Se estudian los elementos y prácticas básicas de desarrollo con el dispositivo de realidad virtual Oculus Rift, y sistemas de control de UAV. Asimismo, se investiga la propia tecnología de los UAV, y los sistemas de adquisición y transmisión de imágenes montables sobre estos.

El trabajo previo también incluye el estudio de proyectos similares, y el conocimiento de base relacionado a realidad virtual y telepresencia.

1.3. Objetivos

De acuerdo a los intereses consensuados entre los integrantes del equipo y los recursos materiales disponibles se definen para el presente proyecto los siguientes objetivos:

- Diseño y construcción de un prototipo experimental de telepresencia.
- Desarrollo de componentes de realidad aumentada.
- Evaluación de la experiencia.

1.4. Descripción del problema

A continuación se explicita la secuencia de tareas requeridas para la concreción de los objetivos presentados.

Evaluación del desarrollo con el dispositivo de realidad virtual Oculus Rift

Se requiere hacer una evaluación del dispositivo de realidad virtual Oculus Rift dada su reciente aparición, conocer su potencialidad, limitaciones, usos conocidos y técnicas de desarrollo particulares.

Definición de la experiencia y prototipo a construir

En función de la información recogida en la evaluación del dispositivo Oculus Rift, se debe definir una experiencia con una potencial aplicación a la industria, que aproveche las características particulares del mismo. Definida ésta, se debe diseñar un prototipo que la cumpla satisfactoriamente. Este dispositivo debe poder ser desplegado en diversos escenarios, por lo que se propone montarlo sobre un dispositivo UAV.

Elección y control del UAV

Definido el prototipo, y quedando como componente clave un UAV, resta definir qué modelo utilizar y cuáles serán los mecanismos de control.

Para esto se debe tomar como principal criterio la existencia de restricciones operativas como ser: carga útil (cantidad de masa adicional que puede transportar un vehículo), autonomía, maniobrabilidad en vuelo, entre otras. También deben ser evaluadas las forma de control y la posibilidad de operar entre los sistemas de telemetría y control de vuelo.

Diseño y construcción de dispositivo de adquisición estereoscópico

Para captar las imágenes que se muestran en el Oculus Rift se debe implementar un sistema de adquisición de imágenes que sea compatible con el sistema visual humano. Dichas imágenes deben tener tamaño, resolución, enfoque y campo de visión adecuadas para que el usuario perciba el mundo de forma fehaciente. El sistema de adquisición debe poder ser montado sobre el UAV, sobre un soporte que pueda reproducir los movimientos de la cabeza, y ser compatible con dispositivos de transmisión en tiempo real y baja latencia.

Diseño y construcción de un soporte que permita simular movimientos de la cabeza humana

Para poder reproducir los movimientos de la cabeza del usuario, se construye un montaje que permita girar el dispositivo de adquisición estereoscópico de forma similar a la cabeza humana. Además de tener la potencia necesaria para generar los movimientos previstos, estos deben ser rápidos y las señales de control compatibles con el dispositivo de transmisión de datos montados sobre el UAV. Se hace referencia a este montaje de aquí en más como soporte con servomotores.

Construcción e integración de sistemas de transmisión y adquisición de datos y transmisión de imágenes

Se construyes o integran sistemas existentes para comunicar los datos a intercambiar entre módulo local y remoto. Adicionalmente, hay que integrar y comunicar sensores (acelerómetro y GPS) con los datos de vuelo básicos, como posición del UAV y orientación. Dentro de los datos a transmitir se destacan, los datos de control del soporte de servomotores, imágenes adquiridas por el dispositivo de adquisición estereoscópico, datos de control

del UAV y datos de telemetría. Los sistemas de transmisión deben tener un alcance compatible con el uso definido.

Desarrollo de sistema de control y despliegue de interfaz

Se debe construir un sistema que tome las imágenes provenientes del enlace de transmisión y las despliegue de forma adecuada en el Oculus Rift. El sistema debe respetar las pautas definidas en el diseño de la experiencia, especialmente que las imágenes mostradas se generen con baja latencia y muestren la realidad de manera fidedigna.

Desarrollo de componentes de realidad aumentada

Se incorporan componentes de realidad aumentada que resultan útiles para los casos de uso que se generan.

Pruebas de campo

Se debe probar el prototipo en los casos de uso especificados, evaluando su aptitud para cumplir con los mismos. Se evalúan también aspectos propios de la experiencia, buscando obtener conclusiones sobre la telepresencia como experiencia en sí misma.

Capítulo 2

Estado del Arte

En este capítulo se introducen conceptos relevantes a las áreas vinculadas y se realiza una revisión de diferentes técnicas de interés para el proyecto.

2.1. Realidad virtual

Este trabajo se enfoca en resolver la construcción de un prototipo de telepresencia. el concepto subyacente, que incluye al de telepresencia, es el de realidad virtual [1]. Poniendo foco en la tecnología, se puede decir que la realidad virtual es una interfaz humano-computadora que provee un mundo en tres dimensiones, realista e inmersivo, en otras palabras, una simulación del mundo real generada por un *software* y experimentada mediante dicha interfaz [4] [5]. Esta visión se centra en los dispositivos que se utilizan, las mejoras técnicas, y los sistemas involucrados. En esta línea, también se menciona que las mejoras tecnológicas recientes, como el Oculus Rift, nos proveerán una interfaz más accesible y realista [4]. Sin embargo, estas definiciones son débiles en lo que refiere a definir qué es y no es la realidad virtual, muchas veces estas definiciones caen simplemente en la arbitrariedad de definir un dispositivo como de realidad virtual o no, lo cual ha sido fuertemente criticado por la academia [1].

Para orientar la construcción de una experiencia en un entorno virtual es necesario conocer qué ocurre en términos del usuario, qué clase de estí-

mulos perciben los mismos, o cómo puede lograrse que la realidad virtual sea más parecida a la percepción de la realidad. Es aquí donde cobran relevancia aquellas definiciones basadas en la experiencia. Algunos autores definen la realidad virtual como la ilusión de participar en un ambiente artificial en lugar de la observación externa del mismo. Dicha experiencia debe ser, inmersiva, interactiva, multi-sensorial y centrada en el observador [6]. Algunos van más allá, y establecen la frontera de la realidad virtual en nuestro pensamiento. Willian Bricken afirmaba que la psicología es la física de la realidad virtual [1]. Esto nos dejaría a la realidad virtual en una experiencia cotidiana por ejemplo la que ocurre al leer una carta o un libro, e imaginar una situación remota o ficticia.

Desde este punto de vista, parece importante entender el poder que tiene la mente humana, y los aspectos psíquicos y perceptuales que involucran este tipo de experiencias. Este enfoque teórico provee mayores elementos para analizar el diseño de una experiencia virtual, independientemente de los medios tecnológicos involucrados.

2.1.1. Inmersión

El término inmersión refiere al acto voluntario de obviar los distintos estímulos externos que hacen percibir la experiencia presentada como no real, permitiendo captar toda la atención y concentración del usuario involucrado [5]. Refiere a en qué medida un entorno virtual sumerge el sistema perceptual del individuo y a su vez bloquea otros estímulos del mundo físico [5]. Así, resulta posible clasificar la realidad virtual en dos vertientes, inmersiva y no inmersiva. La primera envuelve la mayor cantidad de sentidos posibles del usuario (generalmente empleando *hardware* especializado). La segunda, no inmersiva, es más común (no requiere de *hardware* especializado) y se encuentra a menudo en los videojuegos [5].

2.2. Telepresencia

Para trabajar el tema de telepresencia es importante conocer que significa, en términos del comportamiento humano, “estar presente”. En primer lugar parece estar relacionado con dónde se encuentra físicamente el cuerpo del usuario. Específicamente, se puede decir que la presencia es una

construcción del cerebro acerca de nuestro cuerpo [7].

2.2.1. *Flow*

En la vida cotidiana se dan situaciones donde la percepción de presencia se traslada a un sitio diferente a donde el cuerpo se encuentra físicamente. Cuando una persona va al cine, o juega algún juego o deporte, muchas veces olvida donde realmente se encuentra y se mezcla de alguna manera con la tarea o el ambiente que se le presentan. Para explicar esto el psicólogo Mihály Csíkszentmihályi acuñó el término *flow*, que trata acerca de la inmersión que un individuo siente al ejecutar una tarea [8]. Puede definirse *flow* como el estado emocional alcanzado cuando un individuo está realizando una tarea con alto grado de concentración y pierde la noción del transcurso del tiempo y preocupaciones ajenas a la misma. Este estado permite al individuo involucrarse más con la tarea que realiza. Los factores que identifica Csíkszentmihályi que permiten alcanzar y sostener el *flow* son: motivación, interés en la tarea, existencia de objetivos a alcanzar, resultados de las interacciones desplegados en tiempo real, y dificultad con que el individuo se ajusta a la tarea. Esto último particularmente incide en la pérdida de noción del tiempo y la sensación de control sobre la tarea que se ejecuta [9]. Para entender qué tan fuerte puede ser este sentimiento de presencia, la literatura describe casos donde la persona se siente tan inmersa y presente en un entorno virtual, por ejemplo de un videojuego, que se vuelve adicto a él [8].

2.2.2. Definición

De acuerdo a lo mencionado anteriormente, puede definirse la telepresencia de manera sencilla como la sensación de estar en un lugar donde no se está físicamente [7]. Como se definió en la introducción, la percepción del ambiente remoto es normalmente provista por un medio de comunicación. Estos medios de comunicación pueden ser más o menos sofisticados, no requiriendo a priori de tecnología avanzada. Algunas situaciones que inducen al sentimiento de telepresencia, y nos indican cómo funciona son [1]:

- La lectura de una carta de un amigo distante que evoca sentimientos de otro tiempo o espacio.

- En una llamada a un *call center*, el usuario puede sentir cierta incomodidad al no poder localizar a su interlocutor en un espacio remoto que no puede construir mentalmente por falta de información.
- Usuarios de videojuegos, que describen la experiencia de mover un auto animado como “manejar”.

Es interesante analizar la diversidad de los casos anteriores, y que parece haber elementos que trascienden el medio de comunicación utilizado, o el grado de complejidad del mismo. En este sentido, Reeves, en una disertación afirma que los factores que aportan para que la telepresencia se sienta como real son la combinación de procesos perceptuales, dirección consciente de la atención y narración de lo que está ocurriendo [2]. En otro enfoque, Sheridan identifica cinco variables que contribuyen al sentimiento de telepresencia, tres de ellos son tecnológicos: la extensión de la información sensorial, el control de los sensores relativo al ambiente, y la posibilidad de modificar el entorno físico. Dos de ellas están relacionadas al contexto y son la dificultad de la tarea y el grado de automatización en la misma [1].

Otro aspecto relevante en telepresencia, es que para tener una experiencia completa, además de satisfacer a los sentidos de información, parece importante tener la posibilidad de realizar alteraciones en ese medio remoto. Podemos definir la interactividad como la capacidad de intercambiar estímulos con el medio virtual [1]. Hay tres factores que contribuyen a la interactividad: *velocidad*, que es la tasa a la que la entrada puede ser ingresada en el entorno mediado, *rango*, que es la cantidad de acciones que puede tomar el individuo en el mundo virtual y *mapeo*, que es al abismo de ejecución de las acciones en el mundo mediado [1]. Con abismo de ejecución, nos referimos a las diferencias en los objetivos del usuario, expresados en términos psicológicos, y el estado real del sistema [10].

De las afirmaciones anteriores se desprende que el estudio de la telepresencia tiene componentes tecnológicos y otros que involucran al comportamiento y biología humana, y es importante tenerlos en cuenta la hora de diseñar un dispositivo de telepresencia.

2.2.3. Tecnologías involucradas

La componente tecnológica juega el rol de proveer al usuario los estímulos necesarios para el sentimiento de telepresencia. Estas interfaces de comunicación son diversas y no existe un único *hardware*, o un único paradigma a la hora de diseñar entornos virtuales. Generalmente es una combinación de componentes de *hardware* y programas capaces de brindar diversos niveles de experiencia sensorial. Una forma clásica de construir sistemas de telepresencia altamente inmersivos es intentando involucrar la mayor cantidad de sentidos posibles, con estímulos generados por computadoras. Su concepción se basa en servir las necesidades de los canales senso-motores de los usuarios. Son las demandas de estos sensores los que determinan el valor calidad y utilidad de un componente. En definitiva, el diseño del *hardware* y *software* de los sistemas de realidad virtual son una exploración de cómo vemos, escuchamos, tocamos, olemos y sobre todo, cómo pensamos.

De esta manera podemos ver a los sistemas de telepresencia cómo un arreglo de posibles dispositivos de entrada y salida de datos, cada uno sirviendo un canal senso-motor. Ambos tipos de canales son imprescindibles para diseñar una experiencia inmersiva.

Dentro de los dispositivos de salida se destacan las pantallas. Se estima que el 80% de la información que perciben las personas plenamente videntes ingresa a través de los ojos [11]. A su vez gran parte del cerebro está dedicado al procesamiento de estas imágenes. Es por esto que tienen gran relevancia los avances en las "pantallas montadas en la cabeza" (HMD por sus siglas *Head Mounted Display*), las cuales permiten enviar al aparato visual señales cada vez más realistas. Estos a su vez son capaces de generar una segunda señal perceptual muy importante, que es el movimiento de la escena en concordancia con el movimiento de la cabeza, y mostrar imágenes estereoscópicas [12]. Estos dispositivos se tratarán en profundidad en el capítulo siguiente.

Otros dispositivos de relevancia son aquellos que se ocupan de los sentidos del tacto y el oído. El sentido del tacto ha sido explorado en los que se conocen como "dispositivos hápticos"; existen varios ejemplos de estos, que, complementando aquellas aplicaciones centradas en el sentido de la vista, son capaces de brindar estímulos sensoriales realistas a un costo razonable. La experiencia sonora es de fundamental importancia en el desarrollo de la

realidad virtual. Pese a los avances verificados desde sus orígenes, generar una experiencia realista enfrenta dificultades vinculadas a las características del sistema perceptual humano. La generación de estímulos sonoros realistas se logra habitualmente mediante el uso de auriculares.

2.3. Pantallas montadas en la cabeza

Las pantallas montadas en la cabeza (HMD del inglés *Head-Mounted Displays*) son dispositivos de visualización de imágenes que consisten en una o dos pantallas montadas en un soporte o casco que permite mantenerlas frente a los ojos [4]. Pueden clasificarse según su transparencia. Los traslúcidos proyectan imágenes en un espejo parcialmente transparente, integrando las mismas en el campo visual del usuario, sobre todo lo que el usuario percibe naturalmente. En tanto los opacos interponen la pantalla en el campo visual del usuario, perdiendo esta referencia visual de su entorno [13]. Es en esta categoría en que se encuentra el dispositivo de realidad virtual Oculus Rift, el cual se describirá en detalle en la siguiente sección.

Una característica fundamental de los HMD es la posibilidad de proveer imágenes estereoscópicas. Esto se logra mostrando una imagen diferente para cada ojo, y esto es algo que se puede hacer, por ejemplo, dividiendo la pantalla en dos. Esto contribuye de manera sustancial al proceso de percepción de la profundidad en los seres humanos. Otra característica notable es que se pueden montar sensores en el dispositivo, obteniendo datos de posición y velocidad de movimiento de la cabeza, los cuales pueden utilizarse para modificar las imágenes que se están mostrando [14].

La construcción e investigación con HMD comenzó en los años sesenta a través de proyectos militares, siendo Ian Sutherland quien construye el primero [15]. Es importante destacar que desde el comienzo se identificó en estos dispositivos el potencial de proveer a un operador humano con telepresencia y se consideró atractivo su uso aplicado para realizar tareas remotas. La motivación por el uso de esta tecnología se basaba en poder lograr el sentimiento de estar presente en el lugar donde se está realizando una manipulación de forma remota [15] [16]. Estos dispositivos también se concibieron en sus inicios para videojuegos, el propio Sutherland a mediados de los 60 logra el primer dispositivo interactivo, llamado "La espada de Damocles", donde también surge el primer *Head Mounted Device*(HMD)

con *Head Tracking*, y visión estereoscópica [16].

De todas formas, estos prototipos y los que los siguieron no lograron alcanzar un uso masivo o aplicado. Este logro hoy es posible gracias a los recientes avances tecnológicos, especialmente en las pantallas [4].

En la bibliografía consultada se hace referencia a estos dispositivos a través de las siglas HMD que refieren indistintamente a los términos *Head-Mounted Display*, *Head-Mounted Device* o *Helmet-Mounted Display* sin haberse encontrado diferencias conceptuales relevantes a este trabajo.

2.3.1. Oculus Rift

Un ejemplo de HMD es el dispositivo de realidad virtual Oculus Rift, desarrollado por Oculus VR. El mismo fue inicialmente propuesto como un proyecto en busca de financiación para hacer viable su concreción. Como consecuencia de esta campaña Oculus VR logró conseguir 2.4 millones de dólares para su desarrollo [17]. Previo al lanzamiento oficial del dispositivo se han puesto a disposición dos kits de desarrollo (DK1 y DK2) buscando que los desarrolladores empiecen a implementar programas para los mismos. Su lanzamiento oficial está previsto para el primer cuatrimestre de 2016, lo que lo posicionará como uno de los primeros HMD de realidad virtual diseñados para consumidores [18]. Cada ojo percibirá imágenes con una resolución de 1080×1200 , la tasa de refresco del dispositivo será de 90 Hz y contará con un amplio campo de visión [19]. Vendrá provisto de auriculares integrados, los cuales aumentarán la inmersión durante la experiencia. Permitirá captar los movimientos del dispositivo colocado en la cabeza del usuario para poder brindar información respecto a su rotación en tres ángulos, así como su posición, todo mediante la utilización de sensores (acelerómetro, giroscopio, magnetómetro) [20] [21].

El dispositivo utiliza lentes para dar acceso a un amplio campo visual [19]. La separación de los lentes es ajustable mediante un dial en la parte inferior del dispositivo, con el objetivo de brindar un alto rango de configuraciones de distancias interoculares. Esto les permite a los usuarios portadores de lentes utilizar el Oculus, y se ajusta a una gran variedad de tipos de rostro. El audio integrado que provee el dispositivo utiliza la tecnología *Real Space 3d Audio* de la empresa Visisonics [22].

El Oculus Rift mejora la inmersión en el ambiente virtual con respecto

a las pantallas convencionales, ya que la persona ya no debe interpretar las imágenes de la pantalla para sacar una conclusión sobre su situación en el mundo virtual, sino que las va a percibir casi como si estuviera allí mismo. Esto se logra básicamente de tres maneras [21].

- Usando el rastreo del movimiento de la cabeza, para que el *software* muestre la imagen del mundo virtual tal cual la percibiría el usuario.
- Imitando cómo funciona la vista humana, presentando imágenes diferentes a cada ojo.
- Bloqueando los estímulos visuales y sonoros del mundo exterior.

Para funcionar, el Oculus Rift debe estar conectado a una computadora con sistema operativo Windows. La computadora debe contar como mínimo con una tarjeta de video equivalente a la NVIDIA GTX 970 y un procesador equivalente al i5-4590 de Intel [23].

Los principales competidores del Oculus Rift son Project Morpheus de Sony Playstation y HTC Vive de HTC [24] [25].

Interfaz de desarrollo

Los contenidos para el Oculus Rift son desarrollados utilizando el SDK para PC, un *software* propietario gratuito disponible para el sistema operativo Windows (se planea dar soporte en el futuro para Linux y OSX). El SDK tiene la capacidad de leer valores de diferentes sensores, condensándolos en un único valor de orientación que es aplicable a los sistemas modernos de generación de imágenes. Se encarga de manejar los aspectos difíciles del desarrollo de contenido para el HMD, como ser la distorsión óptica y las técnicas avanzadas de generación de imágenes [26] [21].

Este SDK está directamente integrado con los populares motores para desarrollo de juegos Unity 5, Unreal Engine 4 y Cryengine. Esto permite a los desarrolladores crear contenidos con muy poco conocimiento de codificación específica de la temática [27] [28] [29].

2.3.2. Realidad aumentada con Oculus Rift

Una técnica que aparece como interesante para enriquecer la experiencia de telepresencia presentada al comienzo del capítulo, aprovechando las

facilidades que el Oculus Rift y los motores gráficos presentan para mostrar imágenes capturadas con la cámara y agregar componentes, es la realidad aumentada. La realidad aumentada es una visión directa o indirecta en tiempo real de un entorno físico del mundo real que se ha mejorado/aumentado añadiendo información virtual generada por computadora [30].

La construcción de dispositivos que combinen HMD y realidad aumentada no es sencilla, y al día de hoy existen varios problemas para ello, vinculados a intentar imitar el funcionamiento de la vista humana. Hay varios ejemplos de sistemas experimentales pero ninguno a nivel comercial que resuelva todos los problemas que incluye su construcción y uso [31].

Un ejemplo típico de construcción de estos dispositivos es colocar dos cámaras en la parte frontal de un HMD. Esto puede ser una solución rápida e interesante para una prueba de concepto, sin embargo tiene algunos de los problemas antes mencionados, entre los que se encuentran, la correcta alineación de las cámaras, ya que pequeñas desviaciones generan problemas en la percepción del espacio. Esto resulta especialmente notorio con objetos próximos a las cámaras, donde la posición paralela de las mismas no es consistente con lo que sería la orientación de los ojos en ese caso [31].

2.4. Vehículos UAV

Un vehículo aéreo no tripulado (UAV), comúnmente conocido como dron, es una aeronave sin un piloto humano a bordo. Su vuelo puede ser controlado tanto de forma autónoma por una computadora de a bordo o por control remoto de un piloto en tierra o en otro vehículo. La ICAO (*International Civil Aviation Organization*) clasifica los UAV en 2 tipos [32].

- Aeronaves autónomas.
- Aeronaves controladas remotamente, sujetas a la regulación civil bajo la ICAO y las normas aeronáuticas nacionales que rigen en cada país.

El método de lanzamiento y recuperación típica de un UAV se da a través de un sistema automático o mediante la interacción de un operador en tierra [33].

En Uruguay el uso de UAV es cada vez más frecuente, contando entre sus usuarios el Ministerio del Interior, emprendimientos agropecuarios, productores audiovisuales o simples aficionados [34].

La Dirección Nacional de Aviación Civil e Infraestructura Aeronáutica (Dinacia) resolvió reglamentar el uso de los UAV. Se obliga a los usuarios a registrar ante el organismo dispositivos cuya masa supere los 25 kilos [35]. Los usuarios de dispositivos medianos y grandes deben presentar ante la Dinacia el modelo y se les entrega un número de registro [35].

La normativa establece que todos los usuarios de UAV deben pedir autorización para sobrevolar eventos multitudinarios o áreas pobladas. Además restringe o prohíbe el sobrevuelo de zonas de tráfico aéreo (aeropuertos y aeródromos) [35].

2.4.1. Sistemas de control de vuelo

Se denomina sistemas de control de vuelo a las plataformas diseñadas para controlar UAV. Dentro de esta categoría se destaca en otras la plataforma de código abierto ArduCopter.

ArduCopter

ArduCopter fue desarrollado por la comunidad DIY Drones y se basa en la plataforma Arduino. Incorpora a los UAV de uso personal tecnologías avanzadas de pilotaje automático, dando acceso a una aeronave autónoma que cualquiera sea capaz de utilizar [36].

Es capaz de satisfacer todo tipo de requisitos de vuelo, desde misiones de vuelo rápido con visión en primera persona (FPV por sus siglas en inglés de *First Person View*) a fotografía aérea, pasando por misiones complejas totalmente autónomas que pueden ser programadas usando cualquiera de los 4 programas de estación de tierra disponibles. Todo el paquete ha sido diseñado con el objetivo de ser seguro, completo, adaptable a aplicaciones específicas y fácil de utilizar, incluso para usuarios novatos [36].

Alternativas

Existen algunas alternativas para el desarrollo con UAV. Resulta destacable el proyecto Open Pilot [37]. En base al análisis hecho, posee una do-

cumentación suficiente como para considerarlo un candidato para este tipo de implementaciones, así como un *hardware* apto para cumplir las funciones básicas de controladora de vuelo. Actualmente es utilizado principalmente para el desarrollo con pequeños UAV [38].

Pixhawk es otra plataforma interesante, tiene la misma base de código que el ya mencionado proyecto Arducopter, y surge por la necesidad de mejorar la capacidad de procesamiento de esta, ya que el procesador del Arduino Mega 2560 resulta insuficiente para soportar la ejecución de sistemas de control más complejos. Posee las mismas funcionalidades, y puede ser utilizado como controlador de vuelo autónomo, sin requerir de instrucciones de control remotas [38].

Finalmente, se puede mencionar a la DJI SDK, interfaz de desarrollo propietaria del fabricante norteamericano DJI, el mismo fabricante del UAV Phantom. Tiene como principal ventaja estar diseñada para el uso sobre los productos de DJI, como el Phantom I. Sin embargo, no todas las funcionalidades pueden ser utilizadas libremente, y todas las que impliquen realizar alteraciones a los comandos de control del UAV, requieren de una autorización de DJI. Esta SDK es de reciente aparición y no existía al momento de realizar el diseño del presente proyecto [39].

2.5. Protocolo de comunicación para UAV

MAVLINK, cuyo nombre completo es *Micro Air Vehicle Communication Protocol* es un protocolo que utiliza una librería de cabeceras diseñado para establecer una comunicación con los UAV. Permite empaquetar estructuras sobre canales seriales con gran eficiencia y enviarlas a una estación de control de tierra. Además brinda a los desarrolladores la libertad de crear mensajes y añadirles códigos específicos.

Este protocolo no tiene estados, pero normalmente las estaciones de tierra necesitan saber si el dispositivo está conectado o no, por este motivo existe el mensaje *Heartbeat*. Este debe ser enviado en intervalos de tiempo de entre 1 y 60 segundos, gracias a esto se puede saber si el dispositivo aún responde o se ha perdido la conexión [40].

2.6. Antecedentes directos

Los sistemas que se describen a continuación fueron seleccionados como antecedentes del presente proyecto dadas sus similitudes con el que se pretende desarrollar.

2.6.1. Oculus FPV

En este proyecto desarrollado en la Norwegian University of Science and Technology se ha intentado combinar el sistema de visualización que presenta el Oculus Rift con la movilidad de un UAV, concretamente el manejo de un soporte de cámaras adosado a un DJI Phantom 2 a través del HMD. En muchas situaciones, la necesidad de acceder a un determinado sitio con el objetivo de realizar una inspección visual del mismo es muy importante. En lugares de difícil acceso, los costos y riesgos que implica esta tarea pueden llegar a ser muy altos. En estos casos la utilización de un UAV equipado con cámaras, que transmiten las imágenes recibidas al HMD, puede resultar muy útil. El producto desarrollado permite controlar el UAV mediante su control remoto, mientras que el operador puede visualizar en el HMD las imágenes que las cámaras están captando. El operador también tiene la posibilidad de mirar a su alrededor, ya que la plataforma que sostiene las cámaras está sincronizada con los sensores de movimiento de cabeza del HMD [41].

La plataforma utilizada para sostener ambas cámaras permite el movimiento de las mismas en 2 ejes gracias a la utilización de 2 servomotores. Estos son controlados por un microcontrolador que está soldado al UAV. Luego de realizar la transformación a los ángulos de giro obtenidos del Oculus Rift, estos son enviados mediante la utilización de un transmisor inalámbrico serial conectado a la computadora que tiene el Oculus Rift. Un receptor en la plataforma del UAV recibe estas señales y se las envía al microcontrolador para que finalmente se muevan los motores [41].

Las imágenes transmitidas por las cámaras son captadas por un receptor conectado a la computadora del operador. Este se encarga de transformar las imágenes recibidas a formato digital para poder ser desplegadas posteriormente en la pantalla del HMD [41].

El presente proyecto tiene importantes similitudes con el descrito ante-

riormente. Los cambios incorporados incluyen mejoras en el *hardware* utilizado (cámaras, UAV, motores de mayor calidad) y la incorporación de elementos de realidad aumentada a la imagen transmitida por las cámaras.



Figura 2.1: Proyecto Oculus FPV

2.6.2. Implementación de un *Tunnel In The Sky* para micro UAV

El objetivo de este proyecto es la implementación de un túnel en el cielo para UAV, con el fin de ofrecer un sistema de guiado a la persona que se encuentra en control del vehículo. Un túnel en el cielo es un sistema que permite mostrar al piloto la orientación de su aeronave a través de una imagen en perspectiva tridimensional del camino en el aire. Esto se logra añadiendo a la imagen capturada por la cámara que vuela con el UAV, elementos de realidad aumentada. La cámara transmite las imágenes capturadas a un HMD, de modo de simular para el usuario del sistema la experiencia de encontrarse dentro del UAV [42].

Para establecer una comunicación con el piloto automático y determinar planes de vuelo, se utiliza el protocolo MAVLINK. En una primera instancia, para realizar pruebas con el sistema, se utilizó la estación de tierra Mission Planner. Posteriormente fue desarrollada una librería de comunicación con el UAV mediante el protocolo MAVLINK. Esta permite recabar información acerca de la velocidad, posición y ángulos de giro del UAV [42].

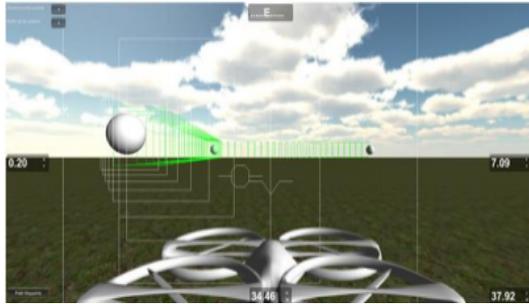


Figura 2.2: Proyecto Tunel en el Cielo para micro UAV

Para implementar la interfaz del sistema (en definitiva lo que verá el usuario final), se utiliza el motor para desarrollo de videojuegos Unity 3D, con el añadido de la librería implementada anteriormente [42].

A semejanza con el proyecto recién descrito, el presente incorpora elementos de realidad aumentada y utiliza el mismo motor gráfico para el desarrollo. También ambos proyectos utilizan el protocolo MAVLINK para la comunicación de datos entre estación de tierra y UAV.

Capítulo 3

Análisis y diseño de la experiencia de telepresencia

Para construir un prototipo que implemente telepresencia, y una vez revisado el estado del arte, es importante hacer una valoración integral de cuál podría ser su utilidad o aporte a la técnica, y qué aspectos de la telepresencia es pertinente abarcar.

El desarrollo de este prototipo es posible gracias al financiamiento del Centro de Innovación en Ingeniería. Este provee los fondos para la adquisición de los dispositivos necesarios para el desarrollo de un prototipo capaz de brindar prestaciones aplicables a la industria.

Una vez definido el uso que se le dará al prototipo, es importante analizar la experiencia a generar, especialmente a través de qué señales e información se inducirá la telepresencia. Esta experiencia debe ser además, confortable para el usuario.

3.1. Contexto

Existen numerosas situaciones que requieren de un minucioso relevamiento de un lugar determinado; la información mas valiosa es aquella que se obtiene a través del sentido de la vista.

En muchas ocasiones el relevamiento se hace de manera presencial, incluso cuando esto es muy costoso o implica riesgos para las personas que

lo realizan. Una alternativa es desarrollar un sistema capaz de brindar información por medio de imágenes, videos, u otro tipo de datos que hagan viable la toma de decisiones a distancia.

Esta problemática se da en diversas áreas de aplicación, y con diversos fines, comerciales, educativos, humanitarios y militares. Por ejemplo para acceder a una zona de emergencia, como el caso de un incendio, terremoto, inundación, derrumbe, donde exista peligro para la vida humana. En sectores productivos, la evaluación por parte de expertos de un terreno es de especial importancia, como por ejemplo para evaluar el estado de una plantación, campo, cría de animales, compra de terrenos.

Realizar un relevamiento presencial presenta dificultades como, el traslado de los expertos desde zonas lejanas, el acceso a zonas sin caminería, etc. El relevamiento remoto permite también valorar estructuras de difícil acceso (edificios altos, puentes, escenarios de catástrofe) y zonas de vasta extensión (obras civiles de gran porte, puertos, carreteras, etc). En el caso de que esta presencia remota requiera de gran inmersión en la situación, resulta razonable buscar una alternativa en la telepresencia. La telepresencia tiene como ventaja que la persona olvide donde se encuentra físicamente, trasladando su experiencia a un espacio virtual creíble que le permita involucrarse y concentrarse en una tarea. La telepresencia atenúa hasta tal punto el contacto con el entorno inmediato, que la persona al abstraerse del mismo, logra mejores resultados en la tarea emprendida [43].

La experiencia que se pretende diseñar permitirá que un observador remoto pueda percibir una realidad lejana de forma interactiva. Esto sería útil por ejemplo, para realizar la valoración de extensiones de tierra, que en general no estén próximas al usuario, eventualmente a miles de kilómetros, en otros países o regiones.

Un sistema de estas características aporta mayor valor que aquellos que muestran imágenes grabadas, permitiendo interaccionar directamente y en tiempo real con el entorno, pudiendo desplazarse al lugar deseado para realizar las valoraciones que determine.

3.2. Relevamiento

En función del contexto analizado, y el interés manifiesto de la empresa de Consultoría en Ingeniería Civil CSI Ingenieros, se realizó un relevamiento

de aplicaciones de interés para un prototipo de telepresencia. Esto se realizó a través de reuniones presenciales con la modalidad de lluvia de ideas con expertos en el área de consultoría civil, y proyectos de ingeniería en general. Se definió como lineamiento para realizar el relevamiento que el prototipo enviaría imágenes remotas en tiempo real, y que este podría desplazarse en el espacio recibiendo órdenes por parte del usuario.

Se busca un prototipo experimental que permita la ejecución de algún caso de uso puntual, que puede estar restringido a un entorno concreto y que permita evaluar la aplicación de telepresencia en un caso práctico.

Del relevamiento realizado, surge la existencia de una demanda de dispositivos que permitan facilitar la realización de las actividades descritas en los siguientes escenarios.

3.2.1. Escenario 1: obra portuaria

Se hace referencia a la obra del Puerto Logístico Punta Sayago, ejecutada por CSI, en Montevideo, Uruguay.

Se encontraron varias aplicaciones en un entorno acotado y con una alta diversidad y transversalidad. Con esto se refiere, a que el prototipo podría ser utilizado para tareas de diversa índole y profesionales de distintas áreas. Se citan por ejemplo:

- Valoración de sedimentos en las zonas donde se le gana terreno al mar. De especial interés ya que estas áreas están alejadas del obrador y son de difícil tránsito.
- Valoración de infraestructura en general. Se aprovecha la eventual versatilidad del prototipo para recorrer las distancias en la obra y su proyección en altura.
- Valoración de situaciones o incidencias en la obra (que surjan) y que requieran un traslado de un especialista en el área de la obra (que es de varios centenares de metros).
- Documentación de obra, realizada por los especialistas, tomando imágenes de manera automática o asistida por el prototipo. Es una tarea tediosa y para la que usualmente se dispone poco tiempo, el prototipo podría agilizar y/o automatizar la misma.

Se hace referencia puntual a la obra portuaria por ser de interés al momento del relevamiento. Se destaca, no obstante, que las actividades relevadas aparecen en las obras civiles en general.

3.2.2. Escenario 2: relevamiento en áreas vastas y difícil tránsito, por ejemplo curso de ríos

- Es de interés relevar el estado de las zonas aledañas y cursos de los ríos, especialmente durante eventos de sequía e inundación. Estos relevamientos muchas veces se hacen a través de fotos de terceros o sacadas en otro momento, lo cual dificulta la valoración de la situación. Disponer de un dispositivo interactivo de fácil despliegue y con buena accesibilidad permitiría valorar rápidamente las situaciones.
- Un ejemplo aplicación práctica en un ambiente próximo al lugar de desarrollo del proyecto es el Arroyo Malvín. Este se recomienda por los consultores de CSI para pruebas de concepto por su similitud con otros casos de evaluación de cursos de agua.

3.2.3. Escenario 3: áreas de difícil acceso

- Se reconoció útil en edificios industriales tanto en exteriores como interiores, que dispongan de gran despliegue vertical o difícil acceso.
- Otro caso es el relevamiento de la red de saneamiento, donde las dificultades surgen por tener una atmósfera tóxica en los alrededores.
- Operación de grúas. Se puede disponer del dispositivo estereoscópico montado en un lugar estratégico para mejorar la visualización en tareas que requieren precisión. Por ejemplo, encajar tubos en obra. Esta actividad requiere frecuentemente de múltiples intentos para ser completada, ya que no se posee una observación adecuada desde el puesto de operación.

3.3. Diseño de la experiencia

En base a las necesidades relevadas, se definen una serie de lineamientos para la experiencia.

3.3.1. Visualización

La experiencia permite al usuario visualizar un entorno remoto en tiempo real a través de un HMD, donde la interacción con el entorno remoto se percibe de manera natural. Esto significa que se presentan imágenes tridimensionales, y el giro de la cabeza del usuario permite cambiar el punto de vista.

Para ello, el usuario deberá colocarse sentado el HMD, y desde ese momento, quedará inmerso en la realidad que se presente a través de las imágenes remotas, pudiendo mover la cabeza libremente.

Se deberán reducir las interferencias y defectos en la imagen, producidos por la vibración del aparato o movimientos del soporte de servomotores.

3.3.2. Latencia

La latencia de respuesta al movimiento, así como la de despliegue de imagen debe ser apenas perceptible en un sistema de telepresencia. Las buenas prácticas de desarrollo para Oculus Rift fija como recomendación que la latencia entre el movimiento de la cabeza, y la generación de la imagen, se encuentre por debajo de los 20 ms, y en un máximo de 60 ms. Por encima de este tiempo, se corre riesgo de sufrir *simulation sickness* [44]. Lograr estos lapsos en un sistema que involucra partes mecánicas y tiempos de comunicación altos no es posible, es por esto que tomamos como referencia otros proyectos.

Como el prototipo está fuertemente orientado a la ejecución de tareas remotas, se puede tomar como referencia los trabajos sobre cirugías remotas con telepresencia [45]. En estos estudios se parte de que una latencia adecuada, y presente en varios sistemas de la actualidad es 300 ms. Se comprueba también que con tiempos de latencia de hasta 500 ms, es posible completar una cirugía, aunque eso implica también que aumentan el tiempo para completar las tareas, y la tasa de error, de forma sensible. En particular, se diseña la experiencia de los prototipos implementados en este proyecto para mantener la latencia por debajo de los 300 ms.

3.3.3. Control

El usuario también puede interactuar con el entorno, desplazándose a través del mismo. Esto lo logra a partir de la ejecución de comandos con el joystick del UAV. Los comandos serán ejecutados prescindiendo del sentido de la vista, ya que el campo visual del usuario se encuentra completamente abarcado por el dispositivo Oculus Rift.

3.3.4. Funcionalidades adicionales

Se agregará a las imágenes información básica del entorno remoto, aumentando la realidad percibida, con el fin de facilitar la tarea que esté ejecutando el usuario.

3.4. Prototipo básico

Para experimentar la telepresencia de forma básica, y antes de avanzar hacia la construcción de un sistema complejo, se definió la construcción de un primer prototipo.

Dicho prototipo fue presentado en el marco del evento Ingeniería de Muestra 2014¹. En dicha exposición el mismo fue probado por aproximadamente 300 usuarios, lo cual permitió obtener los primeros datos sobre la experiencia percibida

En el resto de este documento se hará referencia a este como “prototipo básico”.

3.4.1. Objetivos

Este prototipo tiene como finalidad relevar las principales dificultades técnicas y de diseño de la experiencia, así como evaluar a nivel de usuario un primer acercamiento a la experiencia inmersiva de la telepresencia. En esta etapa es importante realizar una evaluación que permita validar la experiencia del usuario (tiempos de respuesta, calidad de imagen, respuestas fisiológicas, etc).

¹Evento organizado anualmente por la Facultad de Ingeniería de la UDELAR en conjunto con la fundación Julio Ricaldoni.

Los resultados obtenidos aportan insumos para la toma de decisiones en lo que respecta a la pertinencia de los componentes de *hardware* seleccionados, así como su eventual sustitución por otros cuyo desempeño resulte más satisfactorio.

3.4.2. Descripción

El prototipo desarrollado consta de dos componentes principales: por un lado una cabeza robótica², y por otro una estación de trabajo (computadora) conectado al Oculus Rift, separados físicamente entre sí. En la estación de trabajo se ejecuta un programa encargado de enviar mensajes a la cabeza robótica (ArduCabeza), y otro de recibirlos de la misma (sistema de procesamiento de imágenes). El soporte de la cabeza robótica está constituido por 3 motores servo AX-12 conectados de forma de simular el movimiento de las articulaciones del cuello de una persona. Sobre ellos se encuentra una caja de polipropileno, que simula una cabeza humanoide, en cuyos ojos se colocan dos cámaras con transmisores de señal incorporados.



Figura 3.1: Cabeza robótica

Cuando el usuario del sistema se coloca el Oculus Rift, ArduCabeza se encarga de recibir información del mismo referida a los ángulos de giro de su cabeza, procesarla y transformarla en tres valores. Estos valores se envían a los tres motores para que hagan girar la cabeza robótica concordantemente con el movimiento de la cabeza del usuario.

²Dispositivo creado para dotar al prototipo de una estética acorde a la presentación del proyecto en Ingeniería de Muestra.

El otro programa se encarga de recibir las señales enviadas por las cámaras que se encuentran en la cabeza robótica, para, posteriormente enviar estas imágenes a la pantalla del Oculus Rift.

Esto le genera al usuario la sensación de estar en otro lugar, a través de una visión estereoscópica, ya que llega al ojo izquierdo una imagen que fue tomada desde un ángulo distinto a la recibida por el ojo derecho. La separación entre ambas cámaras es la misma que corresponde a la separación media entre los ojos de una cabeza humana; esto genera en el usuario la experiencia equivalente a la de un observador real colocado en la posición de la cabeza robótica [46]. Esta experiencia inmersiva se ve acrecentada por el control que el usuario tiene sobre los movimientos de la cabeza robótica, permitiéndole modificar a voluntad la dirección a la que apunta su cono de visión.

3.4.3. Componentes

En el diagrama 3.2 podemos distinguir las dos componentes principales previamente mencionadas: por un lado la estación de trabajo y por otro la cabeza robótica.

La estación de trabajo es donde ejecutan los programas ArduCabeza y sistema de procesamiento de imágenes, los cuales respectivamente, reciben y envían información al Oculus Rift. Esta recibe información del sistema de recepción de imágenes, el cual está constituido por:

- 2 conversores análogo-digital StarTech SVID2USB2 [47].
- 2 receptores análogos AV RC805 [48].

La cabeza robótica está constituida por:

- 2 cámaras Boscam TR1 con transmisores analógicos [49].
- 3 motores AX-12 [50].

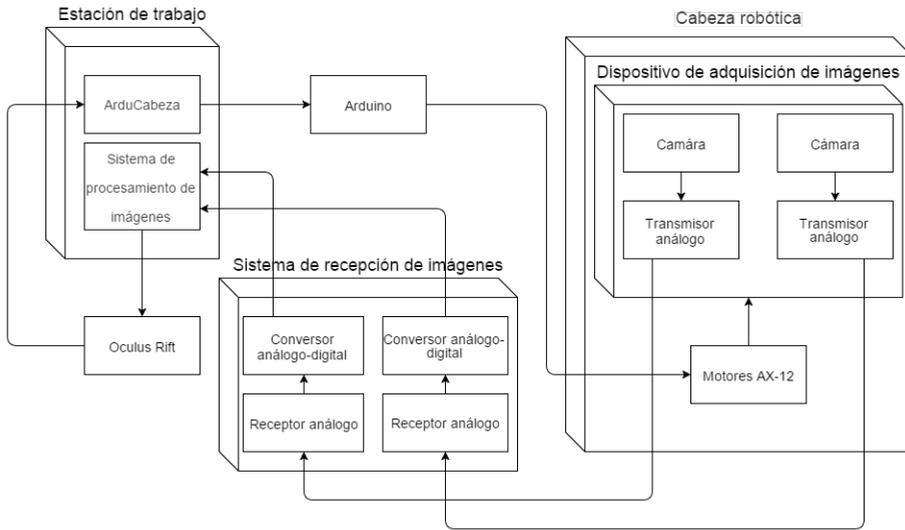


Figura 3.2: Arquitectura del prototipo

También podemos observar como componente, el sistema de recepción de imágenes. Este está compuesto por dos convertores análogo-digitales, cada uno de los cuales se encuentra conectado a un receptor análogo. En el diagrama se observa además al propio Oculus Rift y una placa Arduino MEGA 2560 [51].

ArduCabeza lee del Oculus Rift los valores referentes a la posición de la cabeza del usuario. Este programa se está ejecutando en la estación de trabajo, y se encarga de enviar los valores leídos al Arduino. El programa que se se ejecuta en el Arduino se encarga de recibir esta información, y en base a la misma indica a los motores AX-12 cuánto deben moverse. Su movimiento hace girar la caja de polipropileno de forma concordante al movimiento de la cabeza del usuario.

Las dos cámaras envían a través de sus respectivos transmisores análogos, las imágenes que están capturando en distintos canales. Cada uno de los receptores análogos en el sistema de recepción de imágenes, escucha en uno de los canales de transmisión.

Los dos flujos de datos recibidos son enviados a sus respectivos con-

versores análogo-digitales para luego recaer en el programa encargado del procesamiento de imágenes, que ejecuta en la estación de trabajo. En dicho programa se reciben los dos flujos de datos y se introducen en un motor gráfico con el objetivo de agregar un elemento de realidad aumentada al entorno. Este consiste en un avatar que brinda una experiencia en primera persona y que es visualizado por el usuario como si fuera su propio cuerpo. El flujo de datos es enviado al Oculus Rift para que el usuario finalmente pueda ver desde la perspectiva de la cabeza humanoide.

3.4.4. Pruebas y resultados

El prototipo quedó construido sin cumplir las especificaciones definidas debido al desperfecto de una de las cámaras. No obstante esto, se decidió continuar con la evaluación de otros aspectos de la experiencia, utilizando la imagen proveniente de una sola cámara y colocando la misma en el área correspondiente a las imágenes de cada ojo en el Oculus Rift. Esto, a nivel de experiencia, implica que la persona vea la misma imagen en ambos ojos, lo cual limita al cerebro la capacidad de percibir la profundidad y distancia de los objetos, al igual que al observar una imagen plana en un televisor [52].

Para este primer prototipo se decidió hacer dos tipos de prueba. En primer lugar una medición del tiempo de latencia del sistema, medida como el tiempo que transcurre entre el movimiento de la cabeza y el despliegue de la imagen correspondiente a esa posición. Esta medida será contrastada con la percepción de los usuarios de la latencia del sistema. En segundo lugar una evaluación cualitativa de la experiencia del usuario, donde se valoraron:

- Fidelidad del movimiento de la cabeza y su aporte a la experiencia.
- Claridad en la percepción de los objetos.
- Valoración de la experiencia por parte de los usuarios.
- Latencia del sistema y percepción de la misma por parte de los usuarios.
- Emociones manifestadas por los usuarios.

Pruebas de latencia

A continuación se expresa la latencia introducida por cada componente, y cómo se llega a cuantificarla. En los casos en que la medida de la latencia constituye una tarea dificultosa, se opta por tomar los datos teóricos de latencia medidos en experiencias similares. Otro punto interesante a destacar es que la latencia del sistema es variable en función del movimiento de la cabeza del usuario. Si esta está en reposo, el tiempo de latencia total está dado por la suma de los siguientes:

- Tiempo de adquisición, procesamiento y transmisión de la cámara.
- Tiempo de transmisión del enlace analógico.
- Tiempo de procesamiento de la capturadora de video.
- Tiempo de procesamiento de la imagen por el sistema.

Para medir la latencia de esta parte del sistema, se coloca un reloj en la propia pantalla, y se enfoca el mismo con la cámara. De esta manera, la latencia queda determinada por la diferencia entre los tiempos desplegados. Para este dispositivo, el tiempo medido en el reloj es 37.730 s, mientras que el reloj incorporado a la imagen procesada por el sistema es 37.558 s. La latencia de estas componentes es 172 ms.

Diferente es la situación al mover la cabeza. El tiempo que transcurre hasta que la imagen del lugar al cual está apuntando la cabeza, llega al usuario es mayor, ya que se debe considerar el tiempo que insume mover el soporte de servomotores hasta la posición adecuada. Para el caso, los tiempos del sistema son:

- Tiempo de adquisición de la señal de posición del Oculus Rift, siendo el promedio teórico en el Oculus Rift DK2 de 20ms [53].
- Tiempo de procesamiento de la señal del Oculus Rift y generación de comandos para la cabeza. Este es el insumido por la ejecución del código de generación de señales de control. Este tiempo es despreciable, se ejecuta en menos de 1 ms. Este se obtiene utilizando un medidor temporal a nivel de aplicación.

- Tiempo de respuesta de los motores, y velocidad de movimiento. El tiempo de respuesta del motor AX-12, desde que llega la señal de control hasta que comienza a moverse, fluctúa entre 17.4 ms y 50.2 ms según especificaciones del fabricante [54]. A este tiempo hay que sumarle lo que tarda el servo en alcanzar la posición deseada. A efectos de esta experiencia, dado que el Oculus Rift adquiere los ángulos con gran precisión, y se transmite a los motores AX-12 en pocos milisegundos, despreciaremos el tiempo que demoran los motores en alcanzar la posición de la cabeza.

Sumando las latencias de estos últimos dispositivos, la latencia total del sistema oscila entre 37.4 ms y 70.2 ms. La latencia final del sistema está comprendida en un entorno de 172 ms y 242 ms.

Evaluación de la experiencia

Con el fin de evaluar la experiencia, se montó la cabeza a 2.5 metros del suelo y se colocó el Oculus Rift a usuarios. Durante los 2 días de exposición el prototipo fue probado por aproximadamente 300 personas.



Figura 3.3: Ingeniería de Muestra 2014

Las preguntas que se realizaron a los usuarios son las siguientes:

- ¿Qué te parece la calidad de las imágenes?
- ¿Puedes distinguir los objetos con claridad?
- ¿Qué te parece la relación entre el movimiento de las imágenes y el movimiento de tu cabeza? ¿Se siente natural?
- ¿Cómo te sentiste?
- ¿Podías percibir el tiempo que transcurría entre que movías la cabeza y la imagen se ajustaba?

En base a las respuestas de los usuarios, se concluyó lo siguiente:

- Calidad de las imágenes: las cámaras mostraron una calidad aceptable, sin considerarse buena. Fue un comentario común de una decena de usuarios a los que les parecía que la calidad de la imagen no era tan buena.
- Claridad en la percepción de los objetos: Los usuarios no mostraban dificultades para identificar a las personas que aparecían en la imagen, que se encontraban entre 2 y 5 metros del sistema de adquisición de imágenes. Tampoco mostraban dificultades para reconocerse en el entorno y comprender lo que estaban percibiendo.
- Fidelidad del movimiento de la cabeza y aporte a la experiencia: el movimiento de la cabeza tenía un comportamiento que resultó natural a las personas, que no manifestaron comentarios negativos en relación a este. Por el contrario, dicho movimiento tuvo el resultado esperado, volviendo la experiencia más inmersiva. Los usuarios rápidamente comenzaban a explorar las posibilidades de movimiento del soporte de servomotores, una vez se ponían el casco, moviendo la cabeza en todas direcciones.
- Valoración de la experiencia por parte de los usuarios: la experiencia resultó gratificante para los usuarios, que en este caso, estaban motivados por la curiosidad de experimentar el sistema. Pocos usuarios manifestaron mareos o incomodidad, los mismos fueron alrededor de una decena. Los usuarios manifestaron satisfacción, incredulidad, curiosidad. Estas emociones eran más notorias en los niños.

- Latencia del sistema y percepción de la misma por parte de los usuarios: la latencia no fue percibida por casi ningún usuario. Aquellos que manifestaron un breve retraso en la imagen lo hicieron luego de realizar un movimiento brusco con la cabeza.

Capítulo 4

Descripción de componentes y diseño del prototipo final

El prototipo final tiene como propósito ser una prueba de concepto de telepresencia aplicada al sector productivo. Está orientado a la percepción altamente inmersiva de un espacio geográfico remoto, de manera interactiva. De los posibles usos relevados, se opta por construir un prototipo que pueda ser útil en el relevamiento de estructuras de gran despliegue vertical y obras civiles de gran porte.

Consta de dos módulos separados, uno remoto (UAV), y uno local (Oculus Rift, estación de trabajo y sistema de recepción de imágenes) como se puede observar en la Figura 4.1.

El módulo remoto está montado sobre un UAV Dji Phantom 2 e incluye el componente de adquisición de imágenes, un soporte de servomotores y un sistema de comunicación de datos.

El componente de adquisición está compuesto por dos cámaras de video que se encuentran a una distancia tal que permiten simular la visión estereoscópica de dos ojos humanos y sus respectivos transmisores de imagen. Se encuentra montado sobre un soporte con tres servomotores que permite simular los movimientos de la cabeza del usuario. Los datos de control del soporte con servomotores son recibidos a través de un Arduino extendido con funcionalidades de controladora de vuelo llamado APM Copter [55]. APM Copter está provisto de sensores que envían información de la posición, datos de navegación y estado del UAV al módulo local. La comu-

nicación de los datos anteriores se realiza por un enlace de radio.

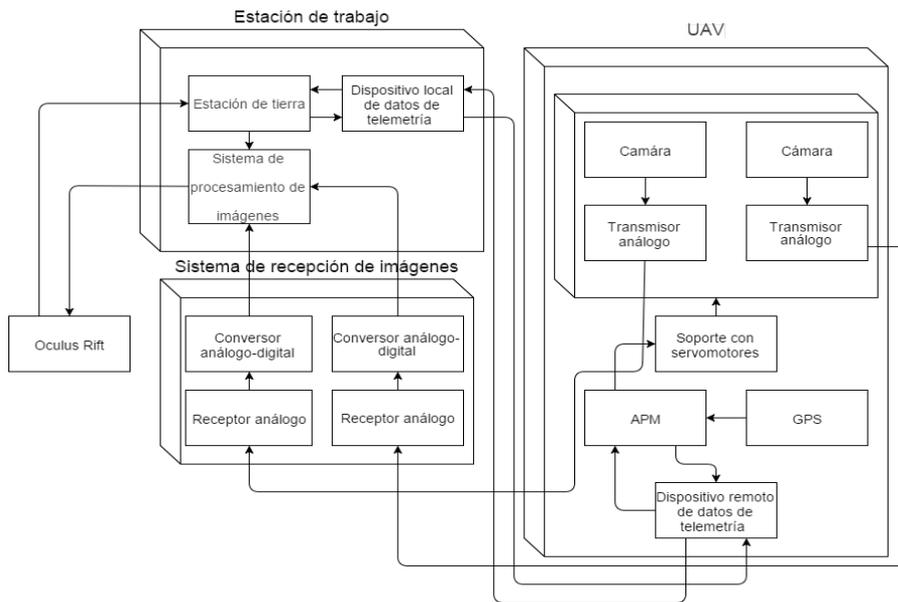


Figura 4.1: Arquitectura del sistema

El módulo remoto puede moverse en un medio distante, y permite capturar imágenes del mismo para que mediante el sistema, el individuo pueda percibir los estímulos visuales como si estuviera montado sobre el UAV.

El módulo local consta de dos sistemas. El primero recibe y procesa imágenes para desplegar en el Oculus Rift, e incorpora adicionalmente algunos componentes de realidad aumentada para enriquecer la experiencia [31]. El segundo sirve para la recepción y procesamiento de datos de telemetría provenientes de la nave, generación y envío de las señales de control remoto del soporte con servomotores. Posee funcionalidades básicas de planificación de misión, por ejemplo, un Sistema de Información Geográfico (SIG) para definir puntos de interés a ser visualizados, así como una interfaz visual para los datos de telemetría.

En términos del usuario el prototipo permite tener una percepción estereoscópica del medio remoto en el Oculus Rift que responde de forma

natural al movimiento de la cabeza. A su vez el usuario puede manejar el prototipo mediante el uso de un control de forma tal que le permita desplazarse con el medio remoto, por ejemplo ubicándose en una posición determinada para realizar la observación.

El prototipo incorpora algunos componentes de realidad aumentada para proveer ayudas a la navegación, y un sistema de estación de tierra para monitorear el estado del aparato.

Cabe agregar que el sistema desarrollado se construye de forma compacta con el objetivo de poder montar dispositivos sobre un UAV. Este sistema también puede ser montado sobre otros dispositivos controlados remotamente (auto, robot, helicóptero, etc), o cualquier estructura fija.

4.1. Diseño del prototipo

Para diseñar el prototipo se tuvieron en cuenta, antes de definir las componentes, las diferentes funcionalidades que debe cumplir. El prototipo para poder cumplir su cometido debe implementar las siguientes funcionalidades:

Módulo local

- Control de vuelo.
- Comunicación de datos de posición de la cabeza.
- Procesamiento y despliegue de imágenes en el Oculus Rift.
- Generación de componentes de realidad aumentada.

Módulo remoto

- Movimiento del dispositivo de adquisición estereoscópico.
- Adquisición de imágenes.
- Transmisión de imágenes.
- Alimentación eléctrica.

Posteriormente se analizaron las técnicas y tecnologías que podrían implementarlo. Se comenzó por analizar sistemas actualmente utilizados en UAVs, aeromodelismo, y proyectos que implementan alguna de las componentes de nuestro proyecto.

Luego de esto debió definirse la adquisición de un total de 15 componentes. La tarea de diseño constituyó un gran desafío técnico, ya que cada componente debía interoperar. Las restricciones fueron de distinta índole, desde aspectos de la electrónica de los dispositivos, hasta cuestiones de compatibilidad de formato de los datos que se transmiten.

Muchas veces, la elección de un dispositivo generaba restricciones para todas las demás componentes, como por ejemplo, la carga útil del UAV, o implicaba la compra de un nuevo dispositivo.

A nivel general, las principales restricciones son:

- El prototipo debe tener un tiempo de vuelo de al menos 15 minutos, para alcanzar puntos de misión en un radio de obra portuaria.
- La latencia entre el movimiento de la cabeza del usuario, y la tasa de refresco de las imágenes correspondientes no puede superar el tiempo medido para el prototipo básico, que fue del orden de los 300 ms.

4.1.1. Sistemas remotos

UAV

Uno de los componentes fundamentales del sistema es el UAV, por lo tanto es de suma importancia que la elección del mismo se realice de forma meditada, teniendo en cuenta todos los posibles escenarios de aplicación. Existen diferencias entre los UAV; según su tipo, cuentan con ciertas características que los vuelven más adecuados para la realización de determinadas tareas. Algunos son diseñados para volar en ambientes cerrados sin circulación de viento, otros lo están para resistir fuertes corrientes, etc. El dispositivo elegido debe poseer especificaciones tales que permitan cumplir con los requerimientos funcionales del sistema (peso, batería, carga útil, alcance de señal).

Teniendo en cuenta estos requerimientos se realiza la búsqueda en el mercado de un dispositivo que cumpla con los mismos. Varios UAV cumplen con ellos. Sin embargo hay otro factor que es fundamental a la hora

de inclinarse por uno: el costo. Las limitaciones presupuestales imponen restricciones al monto de dinero que se puede invertir en el UAV, por dicho motivo se opta por uno que cumple máximamente con los requerimientos dentro de las restricciones económicas. El elegido es el DJI Phantom 2 [56].

La batería interna debe poseer una carga que le permita volar por un tiempo mínimo de 15 minutos. La incorporada en este dispositivo le permite mantenerse en el aire durante aproximadamente 25 minutos. Analizando los escenarios de aplicación identificados en el Capítulo 3, se desprende que para realizar las tareas planteadas, el UAV debe mantenerse en vuelo por un tiempo razonable (ej: relevamiento del curso de un río). Si el UAV tuviera una autonomía de pocos minutos, su batería debería recargarse continuamente, generando pérdidas de tiempo y discontinuidad en la tarea. En el peor de los casos el sistema podría ser incapaz de cumplir con sus objetivos (ej: la distancia entre el lugar de despegue y la zona a relevar excede la permitida por la autonomía de vuelo).

Tiene que estar diseñado para realizar vuelos en exteriores, en zonas con corrientes de aire moderadas y tener un alcance de 1000 metros al control.

La masa de este dispositivo es de 1000 gramos, y de acuerdo a las especificaciones que proporciona el fabricante puede volar de manera estable con un peso de hasta 1300 gramos. Esto da margen para incorporar al mismo hasta 300 gramos en dispositivos adicionales. El UAV debe poder volar con los siguientes componentes incorporados:

- Un soporte con servomotores [57].
- Dos cámaras Boscam TR1 [49].
- Una controladora APM 2.6 [58].
- Un *power module* para el APM [59].
- Una batería TURNIGY 1.0 [60].

La masa total de estos componentes es de 450 gramos, valor que está 150 gramos por encima de la masa recomendada por el fabricante debido a que la batería y el Power Module, no previstos en primera instancia, debieron ser incorporados a consecuencia de la quema del fusible de la salida auxiliar del UAV (ver sección 2.7 del apéndice M). Este sobrepeso podía representar

un serio problema para la integridad del dispositivo ya que un sobrepeso puede derivar en un vuelo deficiente con riesgo de caída o en la imposibilidad de despegar. Es por esto que se realizó una investigación para evaluar si de todas formas el UAV podía soportar esta sobrecarga y se constató que varios usuarios del Phantom 2 afirman en foros y videos que es capaz de volar de forma estable con cargas mayores a los 450 gramos [61] [62].

El DJI Phantom 2 posee una controladora de vuelo que le permite incorporar dispositivos sin que el equilibrio se vea afectado. Es capaz de estabilizarse por sí solo y volar de acuerdo a los comandos enviados por el piloto, resolviendo de forma autónoma -mediante el uso de sus sensores- los posibles problemas de estabilidad derivados del agregado de dispositivos.

El dispositivo se maneja mediante la utilización el control remoto original, que está compuesto por dos palancas. Una de ellas permite controlar el movimiento del UAV en el plano horizontal(atrás, adelante, izquierda, derecha), y la otra los movimientos de ascenso, descenso y rotación sobre su propio eje.

Dispositivo de adquisición estereoscópico y soporte de servomotores

Sistema de cámaras y montaje El sistema de cámaras permite adquirir imágenes estereoscópicas que serán posteriormente desplegadas en el Oculus Rift. Su elección debe considerar principalmente que puedan ser montadas sobre un UAV, y sus imágenes puedan ser transmitidas en tiempo real, lo cual condiciona la salida de video y formato del mismo. El modelo escogido es el Boscam TR1, un equipamiento pensado para el vuelo en primera persona, que tiene la particularidad de tener integrado un transmisor analógico de radiofrecuencia. La resolución del sensor de la cámara es de 5 megapíxeles(MP) y la imagen capturada puede ser utilizada en vivo a través de una salida en formato NTSC, que tiene una resolución de 720 x 480 pixeles.

Simultáneamente se graba en 5MP en una tarjeta micro SD. El campo de visión horizontal de la cámara (FOV por las siglas en inglés de *Field of View*) es 130°, lo cual supera los 110° de las lentes del Oculus Rift, lo que permite generar una imagen que cubre todo el campo de visión del usuario, quedando la misma con dimensiones adecuadas. Por sus prestaciones, las

imágenes generadas por esta cámara son de calidad suficiente como para que el usuario pueda distinguir objetos en el rango de operación, y percibir parcialmente la sensación de profundidad.

Para poder realizar la adquisición estereoscópica, las cámaras se montaron con sus focos en forma paralela, y las mismas separadas a una distancia equivalente a la distancia entre las pupilas promedio, que equivale a 63.5 mm [63]. Estas propiedades son deseables para poder brindar una experiencia estereoscópica confortable y realista, siendo una implementación de baja complejidad [31]. Las piezas construidas para el soporte consisten en 2 planchas de acrílico de 3 mm de espesor, con dimensiones 38 mm x 106 mm, y 83 mm x 18 mm. Las mismas tienen agujeros perforados con una cortadora láser de acrílico para poder asegurar las cámaras con tornillos y arandelas. Los tornillos son del tipo cilíndrico, de 2 mm de espesor. Adicionalmente se agregaron espacios en la placa de acrílico destinados a la ventilación, puesto que es usual el sobrecalentamiento de las cámaras.

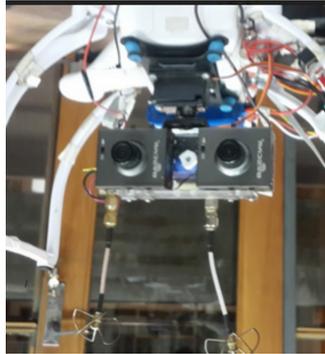


Figura 4.2: Sistema de cámaras

Sistema de transmisión El sistema de transmisión consta de los dos transmisores incorporados en las cámaras. La frecuencia de transmisión es de 5.8 GHz, permitiendo elegir entre 8 canales. Permite transmitir imágenes en el formato NTSC que tiene una resolución de 720×480 , y 29.97 cuadros por segundo, lo cual representa a nuestro criterio una calidad aceptable para mostrar imágenes en el Oculus Rift [64]. Cada transmisor tiene una potencia

de 200mW, lo cual le da un rango de transmisión teórico de 600 m, dentro de los cuales las imágenes se transmiten correctamente. El canal de transmisión utilizado es configurable mediante cuatro interruptores en la parte posterior. La antena del transmisor fue cambiada por una del tipo “hoja de trébol”, de polarización circular, que demuestran menor interferencia durante el vuelo, tanto en nuestra experiencia como en proyectos similares con respecto a la antena de dipolo original [65]. Esto se describe en detalle en la incidencia descrita en la sección M.2.5.

Es importante marcar que los costos de los sistemas de transmisión analógicos para UAV son en general un orden de magnitud más económicos que los sistemas digitales, razón por la cual se descartaron estos últimos para la construcción del prototipo. Este dispositivo es adecuado para la transmisión porque su frecuencia de transmisión no coincide con la frecuencia de control del UAV (2.4 GHz). Su peso también es adecuado, ya que junto con las cámaras su peso es 40 gramos en cada unidad de la TR1, incluyendo la antena.

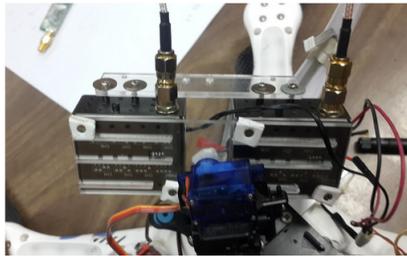


Figura 4.3: Sistema de transmisión

Soporte con servomotores El soporte con servomotores consta de una liviana plataforma plástica con lugar para dos servomotores estándar Turnigy TG9E, un servo Corona 929, y mecanismos de rotación conectados a los mismos que permiten que el extremo de la plataforma pueda orientarse en cualquier ángulo. Sobre este extremo, se conecta el sistema de adquisición estereoscópico, de esta manera pueden reproducirse los movimientos de la cabeza del usuario del sistema.

El servo Corona 929 está ubicado en la base del soporte, permitiendo el

movimiento de giro en el eje horizontal. Permite un giro de 90° alrededor de su eje, corresponde al ángulo euleriano *yaw*. Corresponde aclarar que lo más adecuado es la utilización de un engranaje que tenga una amplitud de movimiento de 180° . Sin embargo, no existía la disponibilidad de los mismos al momento del cierre del prototipo. Los TG9e están montados sobre el propio soporte, y su engranaje principal es plástico, permiten un giro de 90° . Permiten los movimientos denominados *roll* y *pitch*. Ambos tipos de servos son controlados a través de señales analógicas, mediante lo que se conoce como modulación del ancho del pulso (PWM, del inglés *Pulse Width Modulation*). El ángulo de rotación de estos, quedará determinado por el ancho de un pulso eléctrico que es aplicado a través del cable de control [66]. Cada motor debe ser alimentado con una línea de 5V de corriente continua.



Figura 4.4: Soporte con servomotores

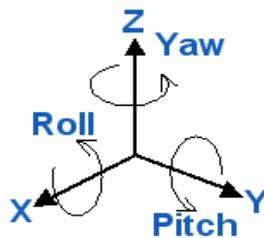


Figura 4.5: Rotaciones

La plataforma a su vez está montada sobre un soporte anti vibración, que consta de dos platos de fibra de carbono conectados por cuatro cilindros

de goma. Esta última se encuentra montada mediante tornillo, directamente sobre la parte inferior del fuselaje del UAV.

El sistema de cámaras se coloca atornillado al engranaje plástico del motor inferior, mediante un tornillo cilíndrico de 2 mm de espesor.

Controladora de vuelo APM 2.6

Para poder controlar los motores del soporte de las cámaras y realizar la comunicación con sensores montados en el UAV, se utilizó un dispositivo que puede montarse sobre el UAV, tiene salidas para enviar señales de control a servomotores y permite comunicar datos de forma remota a larga distancia, el APM 2.6. La necesidad de utilizar un dispositivo de este tipo responde a que no es posible realizar estas tareas a través de dispositivos que vengán incorporados al UAV Dji Phantom 2.

El APM 2.6 forma parte del proyecto de código abierto ArduCopter, que provee una solución completa de controladora de vuelo, basada en el Arduino MEGA 2560. Esta incluye el firmware instalado en el APM, así como un sistema de control de tierra [36].

Del gran número de funcionalidades y características que posee, se utilizan:

- Entrada para conectar un dispositivo de telemetría de radiofrecuencia, que permite intercambiar mensajes MAVLINK entre la estación de tierra y el APM.
- Sensores internos y externos, GPS, barómetro, brújula, acelerómetros, para utilizar sus datos en aplicaciones.
- Indicador de batería, para monitorear el estado de los sistemas montados en el UAV.
- Salidas de control para servomotores.

A su vez, se utiliza las siguientes funcionalidades del *software* de estación de tierra:

- Disponibilidad del código fuente para realizar adaptaciones y agregar funcionalidades.

- Funcionalidad de configuración y conexión remota del enlace de telemetría.
- Ingreso de puntos de ruta.
- Visualización de información del UAV: posición, dirección, altura, velocidad, etc.
- Librería de comunicación con el UAV.

Conexiones de alimentación y control de servomotores

El APM tiene dos salidas destinadas al control de servomotores o dispositivos similares, capaces de transmitir señales de amplitud de pulso modulada (PWM). Estos son los pines denominados S10 y S11 como se aprecia en la figura 4.6. El cable de señales de control del motor que manipula el ángulo *yaw* se conecta al pin S10, y el correspondiente al *pitch* al S11.

Para conectar la corriente se utilizaron las salidas de corriente del carril inferior del Arduino. En el diagrama de la figura 4.6 se visualiza cómo están hechas las conexiones.

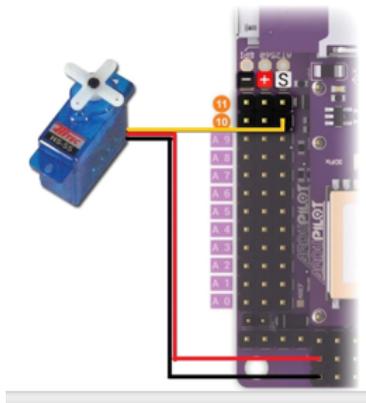


Figura 4.6: Control de servomotores

Es importante tener en cuenta que el circuito eléctrico del Arduino está dividido en dos secciones separadas por el *jumper* JP1 4.7. La única dife-

rencia en términos de energía es que la sección derecha está protegida por un fusible que limita la intensidad de corriente a 500mA, la de la izquierda no tiene límite. Como la sección izquierda queda sin protección no se debe sobrecargar la línea ya que es la misma línea que va al procesador, y si existe un pico de consumo el procesador podría reiniciarse. Sin el *jumper* JP1 la sección *outputs* queda sin energía.

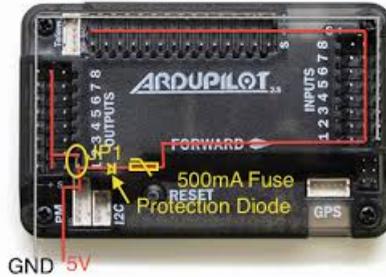


Figura 4.7: Esquema del circuito de alimentación del APM

Esta configuración es provisional, ya que lo más adecuado para estos casos es conectar la entrada de corriente del servo directamente a una fuente de 5 V. En nuestra implementación podría lograrse agregando un regulador de voltaje o una fuente conmutada en la salida de la batería. Esta implementación se descarta porque aumentaría el peso del prototipo.

4.1.2. Enlace aéreo de datos

Para comunicar el UAV con los sistemas montados, es necesario utilizar un enlace de datos. El kit de telemetría es un transmisor de radiofrecuencia en la banda de 433 MHz, diseñado especialmente para conectarlo con el APM. Por lo tanto basta con conectarlo a este último para que comience a funcionar, recibiendo a través de esta única conexión la alimentación necesaria y el enlace de datos. Este dispositivo permite la transferencia de 250 KBPS, con un rango de 300 m. Su potencia máxima de transmisión es de 100 mW, y es muy liviano, siendo su masa solamente 4 gramos. Este dispositivo es apto para el prototipo ya que su frecuencia de transmisión no

interfiere con la de los enlaces de imágenes y control.



Figura 4.8: Kit de telemetría

El dispositivo permite el intercambio de los datos captados por los sensores del APM, así como recibir los datos de control para el soporte de servomotores. El *firmware* de este dispositivo es un proyecto de código abierto, e implementa algunas mejoras a la comunicación como por ejemplo: corrección de errores y optimizan para transferencia de paquetes MAVLINK, que es el formato que utiliza la estación de tierra para comunicar la información. Posee una serie de parámetros ajustables que permiten por ejemplo, activar y desactivar la conexión de error, reducir el ancho de banda para aumentar el alcance y regular la potencia del transmisión [67], lo cual es útil para mejorar la performance del enlace.

El dispositivo está adosado al tren de aterrizaje izquierdo del UAV.

4.1.3. Sistema de alimentación y distribución de corriente

Sobre el UAV se deben montar una serie de componentes que permitan alimentar de corriente eléctrica a todos los dispositivos. Las entradas de corriente de los dispositivos montados en el UAV aceptan voltajes variables de entre 5 y 12 Volts, a excepción del Power Module, que acepta 11.1 V Para asegurar la estabilidad en el funcionamiento del sistema, es necesario que la fuente provea una potencia adecuada.

El DJI Phantom 2 está provisto de una salida de 11.1 V destinada originalmente a alimentar el sistema cámaras Visión +, propietario del fabricante. Esta salida soporta intensidades de corriente adecuadas a un sistema de servomotores y cámaras como el que se montó, y proviene del circuito principal del UAV, conectado a la batería. Si bien esta constituye la fuente ideal para los sistemas montados, y en las etapas iniciales se utilizó con éxito, debió ser descartada por el incidente detallado en M.2.7, en el cual quedó inutilizable.

Por ese motivo, se eligió alimentarlos con una batería que cumpliera los requerimientos, y fuera lo más compacta posible, siendo la escogida por su bajo peso, la TURNIGY 1.0(ver Anexo 4). La misma fue adherida a la parte inferior del fuselaje del aparato mediante cinta de doble faz altamente resistente. Dispone de una entrada de corriente para conectar un cargador de batería de 3 celdas, y una salida de 11.1 V la cual es conectada al módulo regulador de corriente.



Figura 4.9: Batería TURNIGY 1.0

El módulo regulador de corriente es un dispositivo que se encarga de asegurar que el APM reciba una alimentación estable, así como para medir la intensidad de corriente y voltaje que entrega la batería. Cobra especial relevancia si los motores del aparato están conectados a la batería, y el APM es utilizado como módulo de control de vuelo. Las fluctuaciones en las demandas de corriente de los motores de los rotores del UAV, así como en la velocidad de descarga del dispositivo, pueden alterar la ejecución de las instrucciones en el procesador del APM [59]. Si bien no es el caso de este prototipo, resulta útil para mantener una alimentación estable. En

la implementación, los servomotores son alimentados a través del APM que soporta una corriente máxima de 500 mA. Nuevamente esto no es un problema serio, ya que el APM no está siendo utilizado como controladora de vuelo, y el consumo medido en funcionamiento de los motores no alcanza los 500 mA. En la experiencia los motores se comportaron correctamente, y no hay indicios de que altere el funcionamiento del equipo.

El módulo regulador de corriente tiene una salida dedicada al APM, que provee corriente 5.37V y un máximo de 2.25 A, así como otra para datos de intensidad y voltaje circulante por el mismo. La otra salida de corriente entrega el mismo voltaje que le ingresa de la batería, con una intensidad máxima de 90 A, y es utilizada en nuestro sistema para alimentar las cámaras y transmisores. Al sistema se le agregó un interruptor que conecta y desconecta todo el circuito anterior a la batería.

Este sistema cumple satisfactoriamente el cometido de alimentar con corriente eléctrica estable a todos los dispositivos montados en el UAV. Tiene la particularidad de que requiere añadir una batería extra, lo cual constituye una desventaja importante, ya que aumenta la masa del UAV. En caso de utilizar el APM como controladora de vuelo, se puede mejorar la conexión a los servomotores, utilizando un transformador en miniatura de corriente continua (de 12V a 5V). Estos tienen un peso aproximado de 40g.

4.2. Sistemas en tierra

4.2.1. Receptor analógico 5.8 GHz

El receptor permite capturar las imágenes enviadas por el UAV. Se opta por un sistema de recepción compatible con el transmisor escogido, denominado RC805, que utiliza la misma frecuencia(5.8 GHz) y los mismos 8 canales, los cuales son ajustables. Se utilizan dos receptores de este tipo, que funcionarán en canales diferentes, correspondientes a los canales utilizados por el sistema de transmisión. La antena de recepción es de polarización circular, del tipo hoja de trébol, del mismo tipo que las utilizadas para el transmisor. Los receptores se conectan a una batería de 11.1 V de corriente continua.

El video transmitido se coloca en una salida de video compuesto RCA

que será conectada a una capturadora de video.

4.2.2. Capturadoras de video

Las capturadoras de video se encargan de transformar la imagen en formato analógico, provistas por el sistema de transmisión, en imágenes digitales para ser procesadas por la computadora. El dispositivo elegido con este fin es el StarTech SVID2USB2. El fabricante no especifica la latencia [47].

Posee una entrada de video compuesto RCA, que acepta el video en formato NTSC, proveniente del receptor. El video es transformado en formato MPEG con una resolución de 720×480 píxeles a 30 cuadros por segundo, pudiendo ser accedido en tiempo real a través de la interfaz USB 2.0 a la computadora. Se utiliza una capturadora por cada canal de transmisión, pudiendo funcionar ambas conectadas a la misma computadora sin ningún tipo de conflicto.

4.2.3. Enlace terrestre de datos

El enlace de datos presentado en la sección 4.1.2 se comunica con una antena de tierra encargada de recibir las señales. Dicha antena se conecta a un puerto USB en la computadora. Una vez conectada, permite enviar comandos de conexión a través del *software* de estación de tierra.

4.2.4. Computadora

El sistema no puede funcionar sin la existencia de una computadora que se encargue de la comunicación entre los distintos componentes, y la ejecución de los programas. Se optó por la computadora portátil MSI GT70 ONC; sus especificaciones se pueden encontrar en el Apéndice A.

Cuenta con un procesador Intel core i7 de cuarta generación, 3GB de memoria RAM y una tarjeta de video NVIDIA GeForce GTX 870M. Es una computadora que brinda altas prestaciones y está diseñada para ejecutar aplicaciones con alta demanda de procesamiento gráfico.

Todas estas especificaciones lo hacen idóneo para la ejecución de programas con alto consumo de recursos, como son aquellos diseñados para ser

desplegados en el Oculus Rift. Para lograr una verdadera sensación de inmersión para los usuarios del sistema la pantalla se debe actualizar a tasas muy altas del orden de los 60 fps. Cuenta con 5 puertos USB y una salida HDMI, lo que cumple satisfactoriamente con las demandas en materia de conexión de periféricos.

Dos puertos USB se utilizan para la conexión de ambas capturadoras de video, mediante los cuales las imágenes transmitidas por las cámaras incorporadas al UAV llegan a la computadora. A otro de los puertos USB va conectado el kit de telemetría, utilizado con el objetivo enviar mensajes al APM para movilizar los motores que sostienen las cámaras, y recibir información acerca del estado del UAV. El Oculus Rift insume otros dos puertos USB, además de la salida HDMI, actúa como segunda pantalla y se encarga de desplegar la interfaz que el usuario utiliza a la hora de poner en uso el sistema.

En la computadora corren el sistema de estación de tierra y el sistema de control y despliegue de interfaz.

4.2.5. Entorno de desarrollo para Oculus Rift

Para el desarrollo del sistema de control y despliegue de interfaz se opta en primera instancia por utilizar una herramienta que tenga soporte para acceder fácilmente a los valores de los sensores del Oculus Rift. Los fabricantes del *hardware* proveen una API para desarrolladores escrita en el lenguaje de programación C++ [68]. Para acceder a las mismas operaciones provistas por la API en un lenguaje de más alto nivel, independientes y empresas han desarrollado manejadores que se ocupan de traducir el lenguaje de la API a otros que brinden primitivas de más alto nivel para el manejo de los datos [69] [70].

Luego de tener en cuenta los siguientes factores:

- Facilidades para el desarrollo con Oculus Rift según la experiencia del equipo.
- Plataforma sugerida por el fabricante del dispositivo [71].

Para la construcción del programa se opta por utilizar el motor para desarrollo de videojuegos Unity 3d, en desmedro de otras alternativas como

ser openFrameworks o Unreal Engine. Esté a nuestro entender brinda una interfaz intuitiva por medio de la cual se puede acceder a las funcionalidades brindadas por el Oculus Rift.

Unity 3D está orientado al desarrollo de aplicaciones con una fuerte componente de presentación. El motor habilita a los desarrolladores a realizar operaciones de traslación, rotación y escalamiento para los objetos de la escena, y brinda una vasta gama de primitivas que permiten dibujarla [72].

Unity 3d funciona utilizando los ciclos de refresco de pantalla, por cada uno de ellos ejecuta ciertas operaciones definidas por el programador. Estos ciclos son utilizados para actualizar la información brindada por los sensores del Oculus Rift, de forma de conocer la posición de la cabeza del usuario y girar la cámara que observa la escena en base a los datos recabados.

La escena está compuesta por varios objetos de distinta índole. A dichos objetos se les puede agregar texturas y comportamientos a ser ejecutados en cada refresco de pantalla. A cada uno de estos comportamientos los define una función implementada en un *script* asociada al objeto, escrita en un lenguaje de programación de alto nivel (C# o Javascript). Además de los *scripts* previamente mencionados se pueden utilizar clases C# no vinculadas a ningún objeto de la escena. Uno de los componentes fundamentales es la cámara. Su función es capturar y mostrar la escena al usuario de la aplicación, manipulándola se puede observar la escena de varios ángulos diferentes. No existe una limitación en lo que refiere a la cantidad de cámaras de una escena, el *framework* brinda la posibilidad de establecer qué objetos de la escena se visualizan con cada una de las cámaras. En la sección 5.1.2 se define como son utilizados los componentes mencionados para la creación de la escena.

Respecto al desarrollo, no es recomendable ejecutar operaciones que insumen mucho tiempo de ejecución en la etapa de actualización de los objetos de la escena, ya que esto provoca que se generen menos cuadros por segundo y con cierto retraso. Hasta que ejecutan todos los comportamientos asociados a los objetos de la escena no se pasa al cuadro siguiente [72].

Capítulo 5

Arquitectura del sistema y aplicaciones

En este capítulo se describen los dos programas desarrollados: sistema de control y despliegue de interfaz, y sistema de estación de tierra. Estos dos programas deben comunicarse entre sí para lograr el funcionamiento del sistema.

5.1. Sistema de control y despliegue de interfaz

El primer componente fundamental es el sistema de control y despliegue de interfaz, un programa que corre en cualquier computadora de gama media-alta (tarjeta de video equivalente a la NVIDIA GTX 770 y procesador equivalente al i5-4590 de Intel). Se trata de una aplicación cuyos cometidos principales son:

- Obtener el *streaming* de datos provisto por ambas cámaras situadas en el UAV para procesarlos y posteriormente desplegarlos en un dispositivo de salida de video de la computadora. Para generar una experiencia lo más inmersiva posible se utiliza como salida de video el dispositivo de realidad virtual Oculus Rift.
- Establecer una conexión con el sistema de estación de tierra con el fin de:

- Recabar información del estado del UAV para realizar operaciones en la interfaz.
- Recibir datos ingresados por el usuario que está utilizando el sistema de estación de tierra.
- Enviar al sistema de estación de tierra un comando para iniciar o detener el movimiento de los motores que sostienen las cámaras.

5.1.1. Arquitectura

Para el desarrollo de nuestra aplicación se utilizó una arquitectura en tres capas:

- Capa de servicios: se encarga de establecer una conexión remota mediante servicios web con otro programa desarrollado (sistema de estación de tierra). Este provee datos como ser: posición del UAV, puntos de ruta y datos de navegación. Además permite enviar datos al sistema de estación de tierra para realizar el control de los motores que sostienen las cámaras en base a la posición de la cabeza del usuario provisto del Oculus Rift.
- Capa de negocios: por encima de la capa de servicios se encuentra la capa de negocios. Esta se encarga de realizar operaciones sobre los datos obtenidos por medio del intercambio de información con el sistema de estación de tierra a través de la capa de servicios. Esta capa también opera sobre los datos provistos por la capa superior, obtenidos mediante la interacción del usuario con el sistema (posición de la cabeza y teclas presionadas). Está constituida por dos grandes componentes:
 - Controlador de motores: se encarga de inicializar o detener un proceso en el sistema de estación de tierra. Este proceso es el encargado de tomar información referente al movimiento de la cabeza del usuario para posteriormente enviarla al APM. Este último es finalmente el encargado de mover los motores que sostienen las cámaras para que sus movimientos sean congruentes con los de la cabeza del usuario.

- Controlador de posición: obtiene información de la capa de servicios sobre la posición del UAV y los puntos de ruta establecidos para luego de realizar ciertas operaciones con los mismos para dibujarlos en la escena en el lugar correcto.
- Capa de presentación: la capa de presentación de nuestra aplicación está compuesta por una escena explorada por dos cámaras separadas entre sí por la distancia promedio entre los ojos del humano. Cada una de las imágenes obtenidas por estas cámaras se dibuja en la sección de la pantalla del Oculus Rift asignada a cada uno de los ojos del usuario. Además, se dibujan en la escena elementos de realidad aumentada que ayudan al usuario a llegar a los destinos asignados en su plan de vuelo.

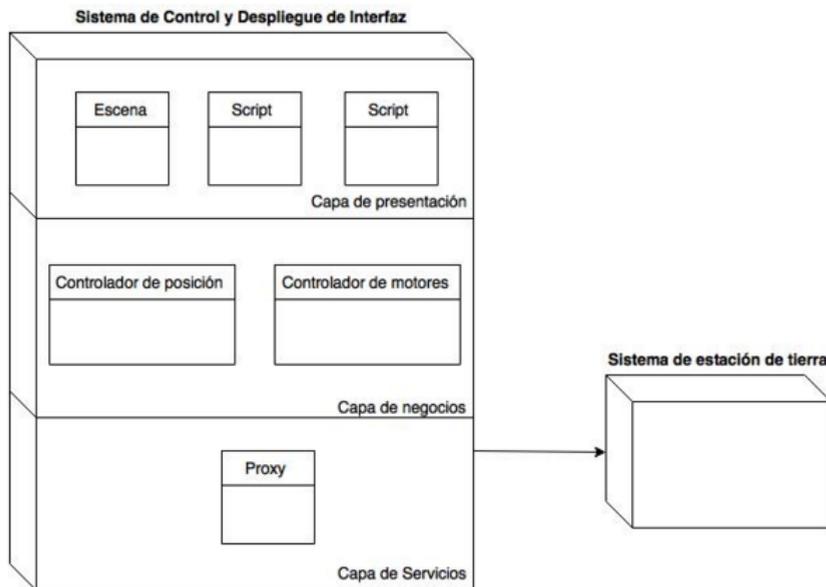


Figura 5.1: Arquitectura sistema de control y despliegue de interfaz

5.1.2. Módulos

Armado de la escena

La escena que se muestra al usuario representa un mundo en tres dimensiones donde cada punto de la misma se corresponde a una ubicación del mundo real explorado mediante el UAV.

El proceso de armado de la escena consiste en la incorporación de los siguientes componentes:

Cámaras: para explorar la escena es fundamental contar con dos cámaras; las imágenes capturadas por éstas se despliegan en el Oculus Rift de tal modo que el usuario las visualiza de manera independiente en cada uno de sus ojos. Se encuentran en la escena en la posición que corresponde al UAV en el mundo Unity. Para obtener las coordenadas que permiten ubicarlas es necesario invocar al controlador de posición. Se disponen de manera paralela y a una distancia de 63.5 mm (distancia entre los ojos promedio de los humanos) [46]. Al respetarse esta distancia entre las cámaras de Unity, los lentes del Oculus Rift y las cámaras incorporadas al UAV se logra el efecto de visión estereoscópica.

Prismas: posicionados delante de las cámaras se encuentran dos prismas superpuestos y del mismo tamaño. Cada uno de estos se encuentra en una capa distinta que Unity permite visualizar de forma independiente: capa izquierda y capa derecha. Cada cámara visualiza los componentes (en el presente proyecto, los prismas) de la escena que se encuentran en las capas que le fueron asignadas (izquierda o derecha según la ubicación de la cámara). El *stream* de video que proviene de cada una de las cámaras del UAV se coloca como textura del prisma correspondiente. Esto permite a cada cámara de la escena observar las imágenes transmitidas por las respectivas cámaras incorporadas al UAV. Los prismas ocupan todo el campo de visión de las cámaras, por lo tanto cada cámara ve como fondo de la escena las imágenes transmitidas. Esto se logra definiendo el tamaño de los prismas y la distancia entre estos y las cámaras manteniendo la relación representada en la figura 5.2. Los prismas están muy alejados de las cámaras, a una distancia tal que es posible agregar componentes adicionales entre estas y

los prismas. De esta forma el usuario tiene la potestad de visualizar componentes de realidad aumentada delante del fondo. La posición de los prismas es relativa a la de las cámaras, por lo tanto al desplazar o girar las mismas, estos se mueven concordemente para mantener distancias y posiciones.

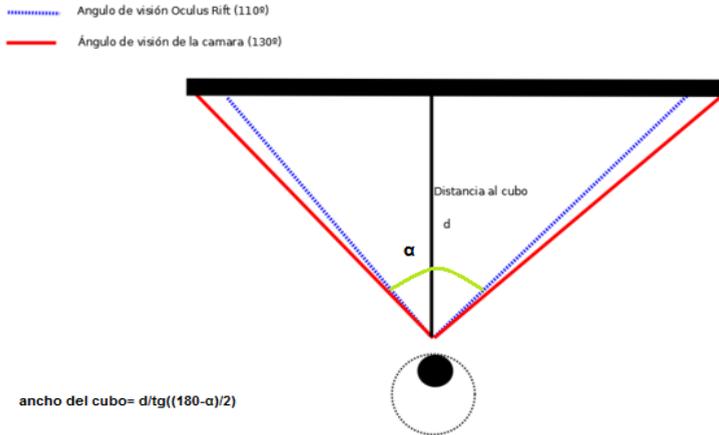


Figura 5.2: Relación de distancias a los prismas

Puntos de ruta: en la escena se despliegan los puntos de ruta definidos en el Sistema de Estación de Tierra (ver sección 5.2), dibujados como diamantes verdes en la ubicación de los puntos de destino establecidos. Al iniciar el programa se despliega el primer punto de ruta en la escena y se mantiene hasta que el usuario se encuentra en un radio de 10 metros alrededor del mismo. Cuando esto sucede, el punto desaparece y el siguiente en la ruta definida se muestra en la escena. Este proceso se repite hasta que el usuario recorre todos los puntos de ruta establecidos. Por ejemplo se puede establecer un recorrido que inicie en el edificio de la Facultad de Ingeniería, pase por la cancha de Maeso F.C. (punto 1) y acabe en el estadio Franzini (punto 2). Al iniciar el programa se visualiza un diamante verde sobre la cancha de Maeso F.C, al llegar a esta ubicación el mismo desaparece y aparece uno nuevo sobre el estadio Franzini, al arribar al mismo se finaliza el recorrido.

Para poder dibujar los mencionados puntos de ruta en la posición correcta es necesario acceder al controlador de posición.



Figura 5.3: Punto de ruta

Indicador de dirección: una flecha roja se despliega en la escena ubicada en el campo visual del usuario en la región central superior. Esta apunta al siguiente punto de ruta en el recorrido establecido. La misma es una ayuda de navegación que permite al usuario del programa saber en todo momento qué dirección debe seguir para cumplir con el recorrido establecido, incluso cuando el punto de ruta se encuentra fuera del campo visual del usuario. Para poder dibujarla de manera correcta es necesario acceder al controlador de posición para obtener la ubicación del usuario y del siguiente punto de ruta. Luego accediendo a primitivas de alto nivel que provee Unity, se dibuja un segmento de recta que une origen y destino. Posteriormente se acorta su tamaño, se posiciona en la región central superior del usuario y se le asigna un modelo 3d con forma de flecha.

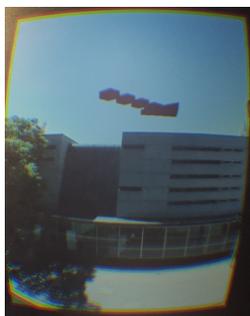


Figura 5.4: Indicador de dirección

Interfaz de comunicación

Para obtener información referente a la posición del UAV, la ubicación de los puntos ruta establecidos en el plan de vuelo y los datos de navegación es necesario establecer una comunicación con el sistema de estación de tierra. Este último provee una interfaz de servicios web mediante la cual es posible consultar estos datos. La misma interfaz también provee de un servicio que permite indicarle al sistema de estación de tierra si se quiere activar o desactivar el proceso encargado de mover los motores que sostienen las cámaras. Se crea un *proxy* que centraliza toda la comunicación con el sistema de estación de tierra que provee funciones de alto nivel para realizar las operaciones previamente mencionadas.

Controladores

Controlador de motores: Se agrega a la escena un componente vacío y se le asocia un *script* al mismo. El único objetivo de este componente es esperar por la interacción del usuario y realizar una operación; no se dibuja en la pantalla y funciona como un demonio ejecutando en segundo plano. Inicialmente los motores que sostienen las cámaras no se mueven cuando el usuario mueve su cabeza. El usuario puede ejecutar un comando que invoca un servicio de la capa de comunicación para activar o desactivar (dependiendo del estado actual) el movimiento de los mismos.

Controlador de posición: al inicializar la aplicación, este controlador invoca los servicios de la interfaz de comunicación para obtener las posiciones del UAV y de la lista de puntos de ruta establecidos. Los datos de posición son provistos en el sistema de coordenadas geográficas WGS84 [73]. La altura se encuentra expresada en metros sobre el nivel del mar. Para definir la altura, Unity trabaja con un sistema de coordenadas ortogonales tridimensionales [72]. En este mundo una unidad corresponde, en términos de percepción del usuario, así como en el mundo físico, a un metro. Para realizar la correspondencia se define un punto de coincidencia entre el sistema WGS84 y el mundo Unity. Se eligen con este fin los puntos de coordenadas (-34.965478, -56.607984) del sistema WGS84, y (0, 0) de Unity.

Luego, se calculan las distancias geodésicas que corresponden a las diferencia de latitud y longitud del punto a representar al punto origen [74]. Esas distancias en metros, se definen como las coordenadas Unity en la que debe dibujarse el objeto. Con esta sencilla aproximación, se están proyectando puntos del geode sobre un plano. Vale aclarar que se realiza una implementación simple y aproximada, que tiene como único fin, probar el efecto de las ayudas de navegación sobre la experiencia. El punto elegido sobre la superficie terrestre corresponde a una ubicación sobre el Río de la Plata, próxima a la ciudad de Montevideo. Se puede tomar arbitrariamente cualquier otro punto que diste pocos kilómetros del área de operaciones, de esta manera, el error de la proyección será menor a un metro, lo cual, para el presente proyecto, es considerado aceptable [74]. Se toma este punto para que valores positivos de distancia geodésica se correspondan directamente con coordenadas del mundo Unity.

Luego de obtenidos estos datos y transformados al formato necesario, se almacenan la posición actual del UAV y las posiciones de los puntos de ruta establecidos. Los componentes de la escena consultan estos datos para dibujarse en la posición correcta.

Para determinar la posición del UAV, o sea del usuario en la escena, y en definitiva, de las cámaras de Unity, es necesario obtener datos de manera continua sobre la posición del mismo. Esto demanda el consumo continuo del servicio que provee de esta información. Por este motivo se toma la decisión de implementar un hilo de ejecución que se encarga en segundo plano de obtener estos datos. Este se encarga de comunicarse con el sistema de estación de tierra y almacenar los datos obtenidos. Cuando estos datos

están almacenados, el hilo actualiza una bandera que indica que hay nuevos datos disponibles. En este momento el controlador de posición accede a estos valores, actualiza la posición actual del UAV y baja la bandera.

El controlador de tierra también es el encargado de determinar si el usuario ha llegado al siguiente punto de ruta. Para realizar esto en cada ciclo de ejecución calcula la distancia que hay entre las posiciones del UAV y el siguiente punto. Si esta distancia es menor a 10 metros se determina que el usuario ha alcanzado el punto de ruta y se procede a eliminarlo y dibujar el siguiente.

5.1.3. Funcionamiento

Al iniciar el programa el usuario provisto del Oculus Rift observa las imágenes capturadas por las cámaras del UAV. Este puede manejar el UAV mediante el uso del control remoto para explorar las zonas de interés cercanas. Si el usuario desea una experiencia más inmersiva puede ejecutar un comando para que los movimientos de su cabeza sean mapeados a los de los motores que sostienen las cámaras. En caso de querer visualizar las ayudas de navegación, el usuario puede ejecutar un comando que despliega en pantalla los puntos de ruta seleccionados para la misión actual en el sistema de estación de tierra y el indicador de dirección.

5.2. Sistema de estación de tierra

El sistema de estación de tierra se basa en el programa de código abierto Mission Planner (v 1.3.19) desarrollado por Michael Osborne, miembro de la comunidad virtual DIY DRONES [75]. Este tipo de sistema se conoce como “Control de Estación de Tierra”, o GCS (del inglés *Ground Control System*). Los sistemas de este tipo incluyen frecuentemente las siguientes funcionalidades:

- Controlar remotamente un UAV.
- Visualizar datos de telemetría.
- Planificar una misión y hacer el seguimiento de la misma.
- Calibrar los componentes del UAV.

Se toma la decisión de utilizar este sistema ya que permite acceder a todas las funcionalidades del APM sin necesidad de hacer ninguna adaptación de código. A efectos de este proyecto, la plataforma provee las funcionalidades necesarias para comunicar el módulo APM con los sistemas en tierra, además de permitir realizar configuraciones básicas y establecer la misión. Su licenciamiento GNU permite disponer del código fuente y realizar algunas modificaciones que permitan soportar el escenario de uso.

5.2.1. Arquitectura

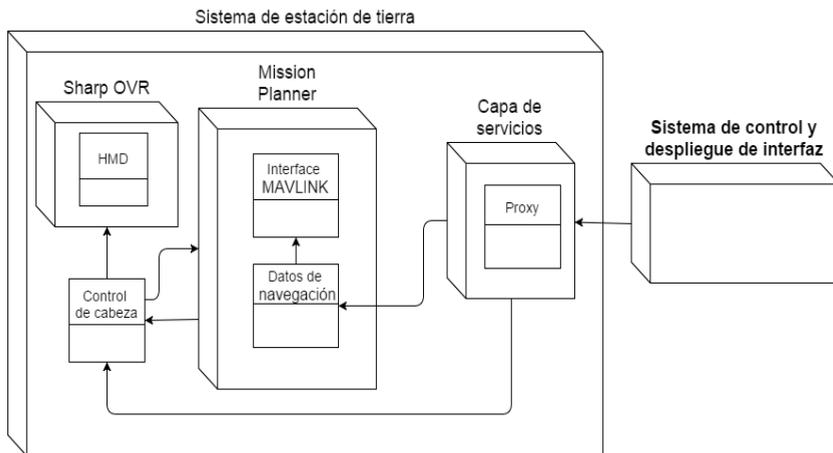


Figura 5.5: Arquitectura del sistema de estación de tierra

Mission Planner es una aplicación desarrollada en el lenguaje de programación C#, que utiliza el *framework* .NET 4.0.

No existe documentación acerca del diseño de la aplicación, por este motivo se toma la decisión de utilizar ingeniería inversa y análisis de código *top-down*.

La arquitectura final del sistema de estación de tierra se puede visualizar en la figura 5.5. Al código original se le añade una componente que implementa el acceso a los datos de navegación y misión, y su correspondiente interfaz. Por otro lado, se agrega la librería para acceder a los datos

de posición de Oculus Rift, y una componente encargada de procesar estos datos y generar los mensajes de control para los servomotores. Estas nuevas componentes son compiladas junto al código original en un mismo archivo ejecutable.

5.2.2. Características y funcionalidades

Como ya se mencionó, Mission Planner es un programa que tiene un conjunto de funcionalidades, relacionadas a las distintas actividades y configuraciones posibles que se pueden tener en el trabajo con UAVs. Para el presente proyecto, se utiliza un conjunto reducido de ellas, principalmente porque no se utiliza el APM como controladora de vuelo, sino como plataforma de comunicación con los sistemas montados en el UAV, y planificador de misión. Las funcionalidades referidas son:

- Configuración de parámetros del UAV.
- Configuración del enlace de telemetría.
- Conexión remota con el UAV.

A estas se incorporan algunos ajustes y se desarrollan nuevas funcionalidades que permiten:

- Controlar el soporte con servomotores con el Oculus Rift.
- Consultar datos de vuelo desde aplicaciones externas.

Comunicaciones

El sistema de estación de tierra es el encargado de la generación de los mensajes que se enviarán al APM destinados a mover los servomotores del soporte, y de recibir los mensajes con datos de posición del UAV. Mission Planner ya implementa la recepción de datos de telemetría y permite acceder a dichos valores.

Para implementar la transmisión de comandos para los servomotores, se invoca a la interfaz de comunicación. Para dar inicio a las comunicaciones con el UAV se debe seleccionar la opción “Conectar” del menú superior. La

conexión es posible si se selecciona el puerto COM en el que está trabajando la antena de telemetría, y el *baudrate* en 57600 bits por segundo.

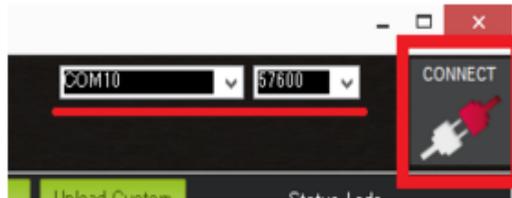


Figura 5.6: Conectar APM en Mission Planner

Interoperabilidad

El programa Mission Planner no dispone de una interfaz de programación que permita acceder a los datos de navegación del UAV, ni a otros datos del sistema. Por dicho motivo se toma la decisión de desarrollar una componente simple encargada de dar acceso a los datos que se consideran relevantes para la navegación y planificación de misión. Se trata de un conjunto de servicios web sincrónicos, provistos por *Windows Communication Foundation*¹. Estos servicios son accesibles para cualquier consumidor mediante la red, siendo configurable a nivel de servidor si la accesibilidad a los mismos es local o mediante Internet. De esta manera, Mission Planner puede estar desplegado en una computadora y el sistema de control y despliegue de interfaz en otra.

Los datos a los que permite acceder el servicio son:

- Estado del UAV.
- Ruta establecida en el planificador de misión.
- Ubicación inicial (punto de comienzo de misión).

¹*Framework* desarrollado por Microsoft para la creación de aplicaciones orientadas a servicios.

Adicionalmente, permite activar el control del soporte con servomotores a través de las señales provenientes del Oculus Rift.

Planificación de misión

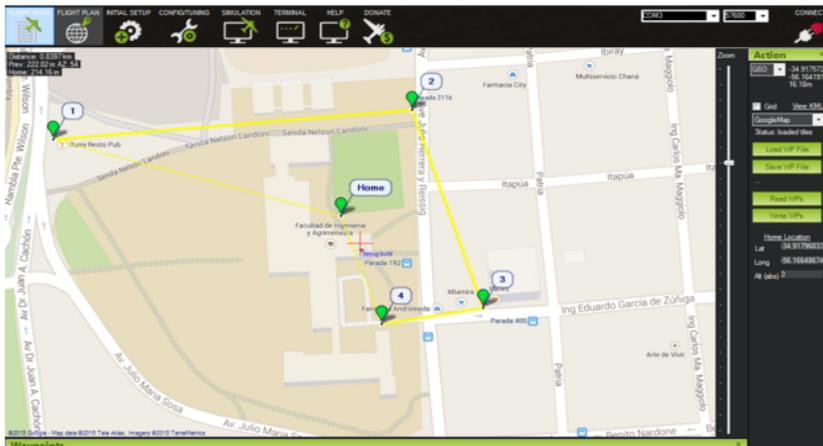


Figura 5.7: Planificador de misión

Esta funcionalidad se utiliza tal cual está implementada en la versión original del Mission Planner. Permite seleccionar de un mapa los puntos que incluirá la ruta del UAV. Originalmente este módulo fue pensado para que dichos puntos se carguen previos al vuelo en el APM, o se modifiquen durante el mismo, con el fin de que el UAV siga esa trayectoria. Esto no aplica al presente proyecto, ya que el APM no es utilizado como controladora de vuelo. En este, los puntos de ruta seleccionados se muestran en la interfaz del sistema de control y despliegue de interfaz descrito en la sección 5.1.

El mapa a visualizar es configurable, pudiendo acceder a mapas de calles o terreno. Para utilizar esta funcionalidad, es preciso tener conexión a internet.

Control de servomotores

El control de servomotores es una de las funcionalidades críticas del sistema. Su tarea es que la plataforma de servomotores montada en el UAV logre reproducir los movimientos de la cabeza del usuario provisto del Oculus Rift. En este prototipo los servomotores permitirán realizar los movimientos conocidos como *yaw* y *pitch*.

El control de servomotores es implementado en este proyecto, utilizando solamente la estructura de mensaje para control de servos que provee MAVLINK. Todas estas tareas se ejecutan en un nuevo hilo de ejecución, para controlar que no existan ningún tipo de bloqueos en la ejecución del programa, manteniendo un flujo de información permanente y rápido desde el Oculus Rift hacia los servomotores.

Obtención de movimientos de la cabeza

En primer lugar, se integró al código original del sistema la biblioteca *sharpOVR*. Esta biblioteca de código abierto se puede descargar mediante un paquete *nuget* [70]. Esta biblioteca posibilita obtener la orientación de la cabeza, representada como una cuaternia. Las cuaternias son una extensión de los números reales utilizada para representar rotaciones en tres dimensiones [76]. En nuestro caso representa la rotación de la cabeza del usuario respecto al centro del cuello.

Función de conversión angular y generación de comandos

Las cuaternias son transformadas en los tres ángulos eulerianos. Estos ángulos son los que deberá girar cada motor para reproducir el movimiento de la cabeza del usuario. APM está preparado para interpretar los comandos MAVLINK del tipo `DO_SET_SERVO`. Este comando toma como parámetros, el número de salida de la placa, a la cual está conectado el motor, y el tiempo de duración del pulso de control expresado en microsegundos. Éste es variable dependiendo del servo conectado. Para poder realizar una correspondencia entre el tiempo de pulso, y el ángulo que generan, se procede a realizar una prueba empírica. Esta prueba es necesaria ya que no existe documentación disponible que asocie el ángulo que se mueven los servos utilizados, con el pulso que se les envía. La prueba consiste en enviar un

mensaje con una duración de pulso conocida, y tomar una fotografía de la posición que adquiere el soporte de servomotores (ver figura 5.8).



Figura 5.8: Fotografía utilizada para la medición de la posición del soporte.

A partir de ésta, se mide el ángulo de giro del motor con respecto a un eje de referencia. Se realiza la prueba variando el ancho de pulso 100 microsegundos, y definiendo el ángulo para cada caso, comenzando desde un límite mecánico, hasta alcanzar el otro límite mecánico del motor. También se trabaja en definir el ancho del pulso para que el soporte quede en posición horizontal(1350 microsegundos).

| Pitch | |
|-------------------------------------|-------------|
| Duración de Pulso (μs) | Ángulo(rad) |
| 900 | -0.624 |
| 1000 | -0.524 |
| 1100 | -0.419 |
| 1200 | -0.300 |
| 1300 | 0.122 |
| 1350 | 0.000 |
| 1400 | 0.105 |
| 1500 | 0.262 |
| 1600 | 0.436 |

| <i>Yaw</i> | |
|-------------------------------------|-------------|
| Duración de Pulso (μs) | Ángulo(rad) |
| 900 | 1.134 |
| 1000 | 0.942 |
| 1100 | 0.785 |
| 1200 | 0.575 |
| 1300 | 0.418 |
| 1400 | 0.226 |
| 1500 | 0.067 |
| 1600 | -0.122 |
| 1700 | -0.296 |
| 1800 | -0.488 |
| 1900 | -0.628 |
| 2000 | -0.820 |
| 2100 | -0.959 |

A partir de estos puntos, se define una función del ángulo de giro en función del comando enviado $F(p) = ap$.

Para poder generar el pulso para cualquier ángulo de giro, se utiliza la función inversa a la anterior $F(ap) = p$.

De esta manera, se interpola una función $F(ap)$ de la que conocemos un número N de pares $(ap, F(ap))$ por los que tendrá que pasar nuestra función polinómica $P(x)$. Esta serie de funciones nuestras van a ser lineales, esto es, con grado 1: de la forma $P(x) = ax+b$.

Definiremos una de estas funciones por cada par de puntos adyacentes, hasta un total de $(N-1)$ funciones, haciéndolas pasar obligatoriamente por los puntos que van a determinarlas, es decir, la función $P(x)$ será el conjunto de segmentos que unen nodos consecutivos; es por ello que nuestra función será continua en dichos puntos, permitiéndonos generar cualquier señal en función del ángulo obtenido, utilizando como imagen la lectura del Oculus Rift. Este procedimiento se repite tanto para el motor correspondiente al giro de *yaw*, como al de *pitch*.

En síntesis, a cada medida obtenida del Oculus Rift se la transforma a ángulos eulerianos, y posteriormente, se le aplica la función definida en el párrafo anterior, obteniendo la duración del pulso deseado. Esos valores se envían como parámetro para cada motor en un mensaje del tipo `DO_SET_SERVO`.

Capítulo 6

Pruebas y resultados

Construido el prototipo final se diseña un conjunto de pruebas que tienen dos grandes objetivos:

- Determinar algunas características de funcionamiento del prototipo, como ser el tiempo total de latencia del sistema, o la máxima distancia de la base a la que puede operar el mismo.
- Evaluar la experiencia de usuario.

Las características operativas del prototipo serán determinadas mediante pruebas de campo planificadas y ejecutadas por el equipo de trabajo del proyecto, den los alrededores del edificio de Facultad de Ingeniería. Las pruebas de experiencia de usuario serán abordadas con dos grupos de trabajo distintos y se presentarán en secciones diferentes. El primer conjunto de pruebas de experiencia fue realizado por el equipo de trabajo de este proyecto. El segundo grupo, que se presenta en la sección 6.3, consiste en un trabajo conjunto con estudiantes de Licenciatura en Psicología, en el marco de una colaboración con distintos miembros del Núcleo Interdisciplinario en Interacción Persona Computadora [77]. El objetivo de esta dinámica de trabajo es enriquecer la evaluación, con aportes de investigadores de diferente formación.

6.1. Pruebas de funcionamiento del prototipo y restricciones operativas

6.1.1. Objetivos

Una vez integrados los componentes escogidos para la construcción del prototipo, es preciso realizar pruebas de campo para verificar el desempeño real de cada uno de ellos. En estas pruebas se espera determinar los siguientes datos de forma precisa: latencia total del sistema de telepresencia, tiempo máximo de vuelo y peso del prototipo, rango operativo, rango de transmisión de sistema de imagen y control.

6.1.2. Desarrollo

Latencia del sistema

Nuevamente es necesario medir la latencia que introducen los dispositivos, al igual que se hizo con el prototipo básico. Es importante remarcar que la latencia de respuesta al movimiento, así como la de despliegue de imagen debe ser apenas perceptible en un sistema de telepresencia. El sistema se diseñó para tener una latencia del orden de los 300 ms, aunque como se consideró anteriormente, sería tolerable mantenerse por debajo de los 500 ms. A continuación se detalla la latencia introducida por cada componente y cómo se llega a cuantificarla.

Cuando la cabeza del usuario está en reposo, el tiempo de latencia total está dado por la suma de los siguientes tiempos:

- Tiempo de adquisición, procesamiento y transmisión de la cámara.
- Tiempo de transmisión del enlace analógico.
- Tiempo de procesamiento de la capturadora de vídeo.
- Tiempo de procesamiento de la imagen por el sistema.

Para medir la latencia de esta parte del sistema, se ejecuta un programa que muestra un cronómetro en la pantalla de la computadora, y otro que muestra la imagen capturada por el sistema de adquisición. Con la cámara

del sistema de adquisición se enfoca el cronómetro, de esta manera, la latencia queda determinada por la diferencia entre los tiempos indicados en la pantalla. Para este dispositivo, el tiempo medido en el reloj es 14.641 s, mientras que el reloj incorporado a la imagen procesada por el sistema es 14.469 s. La latencia de estas componentes es 172 ms. Estos componentes son iguales y están conectados de la misma forma que en el prototipo básico, por lo tanto, es esperable que se repitan los resultados.

Al mover la cabeza, el tiempo que transcurre hasta que la imagen llega al usuario es mayor, ya que se debe considerar el tiempo que insume mover el soporte de servomotores hasta la posición adecuada. Para este caso, al tiempo de latencia con la cabeza en reposo, hay que añadirle:

- Tiempo de adquisición de la señal de posición del Oculus Rift, siendo el promedio teórico en el Oculus Rift DK2 de 20ms [53].
- Tiempo de procesamiento de la señal del Oculus Rift y generación de comandos para la cabeza. Este es el insumido por la ejecución del código de generación de señales de control. El tiempo se obtuvo utilizando un medidor temporal a nivel de aplicación. Este tiempo es despreciable, menor a 1 ms.
- Tiempo de respuesta de los motores y velocidad de movimiento. No existe información del fabricante.

A falta de un valor de referencia y con el fin de tener un valor más realista de la latencia, se procede a realizar una prueba empírica.

Se filma a 120 cuadros por segundo una escena donde inicialmente tanto el Oculus Rift como el soporte con servomotores se encuentran en reposo. Luego se mueve el Oculus Rift, y se mide el tiempo que transcurre desde que éste alcanza la posición final, hasta que el soporte con servomotores alcanza la posición final.

En el vídeo incluido en los adjuntos de este trabajo se puede apreciar que el Oculus alcanza la posición final cuando el cronómetro marca 7.24 s, mientras que el soporte de servomotores lo hace a los 7.38 s. Este experimento permite concluir que existe una latencia de aproximadamente 140 ms en esta componente.

La latencia final del sistema estará comprendida entre el tiempo definido para la cabeza en reposo (172 ms), y la suma de este con el tiempo insumido

por el soporte de servomotores para adquirir la posición correcta (140ms), lo que totaliza 312 ms.

Rango máximo de transmisión de imágenes

Se despliega el prototipo en vuelo, teniendo como base la puerta de la Facultad de Ingeniería, alejándose en línea recta hasta alcanzar una posición donde las imágenes recibidas incomodan al usuario del Oculus Rift. Durante el recorrido se experimentan intermitentemente distintos tipos de interferencia, hasta que se llega a un punto en el cual se hace manifiesta la incomodidad del usuario. Esto ocurre sobre la tribuna Norte del estadio Luis Franzini. La posición del UAV en ese punto es determinada utilizando referencias visuales y datos de GPS transmitidos por el dispositivo. Tomando como referencia estos parámetros, la distancia máxima que permite una adecuada operación del sistema de vídeo es de aproximadamente 200 metros. Esta es menor al rango de referencia que anuncia el fabricante (600 metros en campo abierto [49]). Es importante considerar de todas formas, que los patrones de interferencia generados no impiden a esa distancia observar y comprender la imagen en una pantalla tradicional. Esta prueba nos permite además, observar que los rangos operativos de los sistemas de transmisión para sistemas de telepresencia altamente inmersivos, serán en general inferiores a los anunciados por los fabricantes. Vale acotar que en caso de repetir esta prueba en otros entornos, sin la presencia de edificios, podría arrojar resultados diferentes.



Figura 6.1: Cálculo de distancia

Rango máximo de transmisión de señales de telemetría y control de soporte de servomotores

El sistema se prueba en el mismo vuelo mencionado en la sección anterior. El comportamiento del soporte con servomotores es similar al verificado en las pruebas en tierra. Se verifican solo pequeñas interrupciones temporales en el movimiento del soporte con servomotores. La prueba no continúa a distancias mayores, dado que se considera peligroso operar el dispositivo sin poder visualizar adecuadamente las imágenes transmitidas por el mismo. Se espera que el rango máximo del sistema de transmisión de telemetría y control de cabeza sea superior a los 200 metros definidos para la prueba anterior. De todas formas, y por no existir otra evidencia experimental, se define como rango operativo de este sistema, 200 metros.

Rango máximo de señal de control del UAV

El alcance especificado por el fabricante para el control remoto es de 1000 metros. Esta distancia nunca fue alcanzada en las pruebas realizadas. Las mismas no recogen evidencias de que existan problemas en distancias inferiores a 1000 metros.

Tiempo máximo de vuelo

El tiempo máximo de vuelo es una variable importante para definir una misión. Esta puede variar según se mantenga el aparato en estado estacionario(fijo sobre un punto), o se desplace en el aire. Para definir el tiempo máximo operativo, se prueba el sistema en estacionario a una distancia de 15 metros de la base, de forma tal de poder tener la lectura de batería del UAV visible. El dispositivo permanece en vuelo durante 15 minutos, luego de los cuales comienza a emitir una luz verde centellando en el indicador de batería, esto indica que el porcentaje de carga de la batería es inferior al 12.5% [78]. En ese momento se da por concluida la prueba. Este tiempo es sustancialmente menor al que define el fabricante (25 minutos) [56]. Se entiende que esto se debe al sobrepeso que carga el aparato.

Peso del aparato

El peso total del aparato es 1342 g, este valor supera los 1300 g definidos por el fabricante como peso máximo. El exceso de peso se debe principalmente a la batería extra que se añadió debido a la quema del fusible descrita en la sección M.2.7. En los vuelos realizados queda en evidencia que este exceso de peso trae como consecuencias una mayor inestabilidad del prototipo, y dificultades de control con respecto al prototipo sin carga. Adicionalmente, el UAV sufre en algunas circunstancias, una pérdida de altura de 2 o 3 metros, que puede estar relacionada con el peso excesivo. Este inconveniente no impide realizar las pruebas propuestas, pero sugiere que un prototipo con fines industriales debería cumplir con las especificaciones del fabricante.

6.1.3. Análisis de resultados

De las medidas obtenidas, se concluye que se logra construir un prototipo con las características necesarias para incorporar la telepresencia y que pueda ser desplegado de forma remota. El radio de operación queda limitado a 200 metros. El tiempo de latencia del sistema, 312 ms, supera por poco los 300 ms que se había propuesto como objetivo. El peso de los componentes colocados sobre el UAV supera levemente el especificado por el fabricante, no obstante lo cual no imposibilita la realización de las pruebas de vuelo.

6.2. Pruebas de experiencia de usuario

Estas pruebas se realizan con el fin de determinar aspectos generales de la experiencia de usuario, así como evaluar la utilidad del prototipo para la ejecución de algunas tareas remotas. Las pruebas a ejecutar son las siguientes:

1. Percepción de objetos y alineación de cámaras.
2. Comparación de la adquisición estereoscópica y monoscópica con el dispositivo.
3. Conteo.

4. Ayudas de navegación.

6.2.1. Percepción de objetos y alineación de cámaras

Objetivos

El objetivo de esta prueba es valorar la experiencia de telepresencia dentro del laboratorio, con el fin de explorar si es posible percibir la profundidad de los objetos, su ubicación espacial, y si las imágenes están correctamente alineadas.

Desarrollo

En la prueba se ubica el sistema de adquisición en la esquina de una sala de 5 x 6 m con gran cantidad de objetos en su interior (escritorios, sillas, cajas, etc). Estos objetos se encuentran a diferentes distancias. De esta manera, cinco usuarios utilizan el Oculus Rift y observan los objetos de la sala. Dentro de los objetos en la sala se selecciona una hoja de papel, y se pide a los usuarios que observen los bordes con atención. Adicionalmente se les pregunta si la imagen “se ve doble”. Los usuarios dicen no poder percibir defectos de continuidad en las líneas de la imagen, algo frecuente en la fase de desarrollo del prototipo, cuando la alineación del sistema de adquisición era deficiente. Los objetos ubicados a menos 0.5 m son percibidos de manera desenfocada. Un problema identificado por los usuarios es la sensación de que la imagen visualizada da “saltos” luego de completar un movimiento con la cabeza.

Análisis de resultados

Los usuarios coinciden en que es posible percibir objetos a distintas distancias y ubicarlos en diferentes planos. El sistema de adquisición permite percibir claramente la profundidad de los objetos, su ubicación espacial y tener una visión útil del medio remoto en distancias comprendidas entre 0.5 m y 5 m. También se concluye en base a los comentarios de los usuarios que el sistema construido tiene una alineación adecuada de sus cámaras. La vibración descrita por los usuarios tiene diversas causas. Por un lado se debe a que los motores utilizados sostienen una plataforma con dos cámaras, los transmisores y sus antenas. Sus pesos sumados le generan al motor

una gran carga a soportar y la consiguiente inercia, exigiendo la mecánica del mismo. La vibración también es causada por problemas de ajuste en el soporte de servomotores. Esto se debe a la incidencia descrita en sección 3 del apéndice M.

6.2.2. Comparación de la adquisición estereoscópica y monoscópica con el dispositivo

Objetivos

El objetivo de esta prueba es verificar si la visión estereoscópica aporta valor a la experiencia de telepresencia. Se analizarán las diferencias entre la visión estereoscópica y la monoscópica. Las pruebas se centran en la exploración de la experiencia subjetiva del usuario del sistema utilizando el dispositivo con las dos configuraciones.

Desarrollo

La prueba consiste en plantear al usuario la ejecución del mismo caso de prueba utilizando dos configuraciones: en la primera las imágenes de ambas cámaras son transmitidas a cada ojo; en la segunda ambos ojos reciben la misma imagen transmitida por una de las cámaras. De esta forma el usuario puede determinar si la experiencia, utilizando la visión estereoscópica, aporta elementos de valor y mejora la inmersión respecto a la ejecución del mismo caso de prueba sin esta característica. Se realizan cuatro pruebas en total. Las dos primeras se ejecutan en el entorno del Laboratorio de Medios de la Facultad de Ingeniería. En esta oportunidad las distancias entre el UAV portador de las cámaras (fijo durante la ejecución de la prueba) y los objetos de la habitación son pequeñas (de entre 0.5 y 6 m). Se busca determinar el valor agregado que brinda la visión estereoscópica sobre la monoscópica para la observación de objetos a corta distancia. La prueba consiste en que el usuario se coloque el Oculus Rift y observe distintos objetos presentes en la habitación durante 2 minutos, primero utilizando la configuración estereoscópica y luego la monoscópica. En la prueba se lo interrogará sobre la ubicación relativa de los objetos, con la pregunta ¿cuál está más próximo? Adicionalmente se le preguntará si la experiencia le permite percibir de forma cualitativa, la profundidad de los objetos. Las restantes

dos pruebas replican a las anteriores en un nuevo entorno con el UAV en vuelo. Se desarrollan en el exterior de la Facultad de Ingeniería, observando el edificio de la facultad desde el ala este a una distancia superior a los 20 metros.

Análisis de resultados

En las pruebas en el laboratorio, los usuarios cometían errores en algunas ocasiones al determinar cuál era el objeto más alejado utilizando la configuración con una sola cámara. Este problema no se presentó utilizando la configuración estereoscópica, es decir, respondían acertadamente cuando se les preguntaba que objeto estaba más próximo. Respecto a la percepción cualitativa de profundidad, los usuarios expresaban que podían percibirla para los objetos dentro del laboratorio, salvo en aquellos casos en que se encontraban a menos de un metro.

En las pruebas en exteriores, no hubo grandes diferencias en cuanto a la definición de la distancia a los objetos. La profundidad no era claramente percibida para los objetos alejados. Se percibió cierta noción de profundidad solamente cuando se observaron algunas paredes en los laterales de los edificios, o cuando un objeto se encontraba muy próximo al UAV. Un ejemplo en que esta situación se puso de manifiesto se dio al observar las copas de los árboles, que se percibían claramente más cerca que los objetos del fondo, o el propio piso. Como resultado de la ejecución de los casos de prueba se considera que la visión estereoscópica aporta un valor agregado a la experiencia realizada en el Laboratorio de Medios. En este entorno se puede percibir claramente la profundidad de los objetos ubicados dentro del campo visual, y realizar una correcta apreciación de la posición relativa de los objetos. En las pruebas en espacios abiertos, a distancias mayores a 20 metros no se observa ninguna ventaja evidente por el uso del sistema de adquisición estereoscópico. No obstante este adquiere valor cuando se trata de percibir objetos cercanos ubicados entre la posición del UAV y el área a explorar. Estos objetos podrían constituir obstáculos para el desplazamiento del UAV, interfiriendo con su capacidad de moverse de manera segura.

6.2.3. Conteo

Objetivos

El objetivo de esta prueba es comparar una actividad de conteo hecha con el sistema de telepresencia y la actividad utilizando la visión directa. Los elementos a comparar son el grado de acierto en el conteo de una cantidad de personas en un espacio definido, y el tiempo que insume completar dicha tarea.

Desarrollo

La prueba consiste en realizar el conteo de las personas dentro de un escenario deportivo a cielo abierto. Para realizar dicha tarea se procede a relevar la cantidad de personas que se encuentran en el perímetro delimitado por una soga, que separa a los participantes del evento deportivo de los espectadores. Se sobrevuela el escenario con el UAV provisto con el sistema desarrollado. Simultáneamente otro individuo realiza el conteo desde un lugar elevado a pocos metros de la ubicación del UAV. De esta manera, se busca que la perspectiva del observador sea similar en ambos casos. Cuando el usuario del sistema y el otro observador están preparados se emite una señal que indica el inicio del conteo. En ese momento se inician dos cronómetros junto con el conteo de las personas presentes en el escenario. Al finalizar cada conteo se registran los tiempos insumidos en la resolución de la tarea, así como el número de personas contabilizadas en cada caso. Se añade que en todos los casos, la cantidad de personas dentro del espacio delimitado era la misma. Se realiza una prueba piloto que se repite tres veces, cada una con 2 personas distintas, y se registran todos los datos en una tabla. En todos los casos, las personas cuentan de forma acertada la cantidad de personas en la región delimitada.

| | | |
|---------------------|---------------------|----------------------|
| Prueba 1 | Tiempo insumido (s) | Cantidad de personas |
| Prototipo | 15.50 | 23 |
| Observación directa | 12.82 | 23 |
| Prueba 2 | Tiempo insumido (s) | Cantidad de personas |
| Prototipo | 15.22 | 20 |
| Observación directa | 12.53 | 20 |

| Prueba 3 | Tiempo insumido (s) | Cantidad de personas |
|---------------------|---------------------|----------------------|
| Prototipo | 10.35 | 12 |
| Observación directa | 7.90 | 12 |

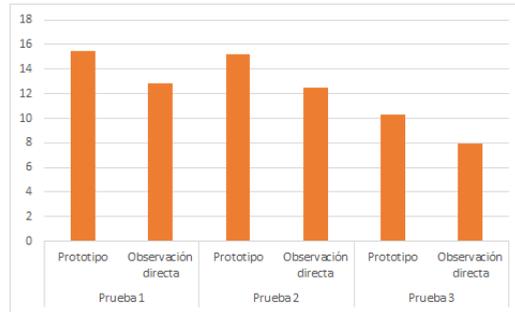


Figura 6.2: Promedio del tiempo insumido en las tres pruebas de conteo según condiciones de observación y cantidad de personas

Análisis de resultados

Para las pruebas realizadas los tiempos insumidos en la realización de la tarea utilizando el prototipo superan entre un 21 % y un 31 % a los obtenidos mediante observación directa. Los participantes cuentan en todos los casos de manera correcta la cantidad de personas que se encuentran en la región delimitada. Los resultados de esta prueba piloto muestran que el conteo realizado mediante observación directa insume un tiempo menor en las tres pruebas realizadas. Se debe tener en cuenta que la presencialidad no siempre es posible en un lugar determinado; la telepresencia amplía esta posibilidad.

6.2.4. Ayudas de navegación

Objetivos

El objetivo de esta prueba es verificar si la utilización del sistema desarrollado, incorporando las ayudas de navegación, determina una disminución del tiempo insumido para alcanzar un destino determinado.

Desarrollo

La prueba consiste en establecer a priori un destino ubicado aproximadamente a 200 metros del lugar de origen. En primera instancia se ejecuta el sistema en modo simple (sin ayudas de navegación) y el UAV vuela hacia el destino prefijado; se toma el tiempo insumido por el UAV en arribar al punto de destino. En una segunda instancia se ejecuta el sistema en modo avanzado (con ayudas de navegación). Se establece en el mapa un punto de ruta en la dirección previamente definida, luego el usuario dirige el UAV hacia el destino siguiendo las ayudas de navegación; nuevamente se toma el tiempo insumido por el UAV en arribar al punto de destino. La prueba se realiza con un solo usuario.

Análisis de resultados

Los tiempos registrados en la realización de esta prueba con los dos enfoques difieren en unos pocos segundos, siendo menor mediante la utilización de las ayudas de navegación (25.3 s y 31.5 s). El sujeto de prueba indica que utilizando este recurso adicional, sabe desde un principio hacia dónde debe dirigirse. Al no contar con este recurso debe dedicar un tiempo adicional de 6.2 segundos a la exploración del lugar con el objetivo de ubicar la posición del UAV y saber hacia dónde dirigirse. Es de suponer que este tiempo de adaptación al entorno percibido sea mayor en caso de que el usuario no conozca de antemano el lugar a explorar. De ser así, la utilización de ayudas de navegación en la exploración de un área desconocida, representaría una disminución del tiempo insumido en el recorrido, teniendo en cuenta que, aunque el usuario se logre ubicar en la escena, no tiene referencias visuales sobre el punto de destino. Las ayudas de navegación construidas parecen ser útiles para el piloto del UAV.

6.3. Pruebas de evaluación de experiencia de usuario de participación interdisciplinaria

Este grupo de pruebas tiene como objetivo determinar algunos aspectos básicos de la experiencia, como ser, percepción del tiempo de latencia, posibles síntomas adversos, y la capacidad de ejecutar tareas remotas utili-

zando el dispositivo. Las pruebas fueron realizadas con hasta 41 sujetos. El diseño experimental así como la ejecución se realizó en colaboración con el Núcleo Interdisciplinario en Interacción Persona Computadora. Ninguno de los miembros del equipo de desarrollo o evaluación fueron contemplados para las muestras de los siguientes experimentos.

6.3.1. Evaluación de aspectos básicos de la experiencia

Objetivos

Esta prueba tiene como objetivos determinar algunos aspectos generales de la experiencia, así como evaluar el desempeño de algunas tareas remotas utilizando el dispositivo de telepresencia. La experiencia está orientada a determinar si el usuario se sintió cómodo utilizando el dispositivo, si considera buena la calidad de imagen, y si tuvo la sensación de estar en otro sitio.



Figura 6.3: Foto de la ubicación del UAV durante la prueba en Ingeniería de Muestra 2015.

Desarrollo

Se realizó un estudio de campo utilizando una metodología de encuesta para la recogida de datos. Se empleó una escala Likert(1 = Totalmente en desacuerdo a 5 = Totalmente de acuerdo) [79]. Se le pidió a los participantes que calificaran distintas afirmaciones subjetivas luego de haber completado determinadas tareas. Las mediciones cuantitativas de la experiencia fueron relevadas a través de un cuestionario, mientras que para las cualitativas, los métodos utilizados fueron la observación y el registro de los comentarios realizados por los participantes.

Tabla 6.1: Información demográfica de los participantes

| | Sexo | | Edad | | Nivel de estudios | |
|----------------------------|-----------|----------|-------|------|-------------------|-----------|
| | Masculino | Femenino | Media | Moda | Secundaria | Terciario |
| Ingeniería de Muestra 2015 | 26 | 15 | 23.41 | 18 | 14 | 27 |
| Vídeo | 5 | 3 | 21.86 | 20 | 0 | 8 |
| Dron en vuelo | 2 | 0 | 22 | N/D | 0 | 2 |
| Total | 33 | 18 | | | 14 | 37 |

Se realiza la prueba sobre un grupo de 41 personas voluntarias sobre el total de usuarios que concurrieron al stand de Telepresencia Aplicada durante el evento Ingeniería de Muestra 2015. La prueba consiste en la utilización del sistema por parte de los usuarios y el llenado de un formulario. Se pide a los usuarios que califiquen distintas afirmaciones subjetivas luego de haber completado las siguientes tareas utilizando el dispositivo:

1. Localizar el número del stand más cercano, impreso en una hoja A4 en la parte superior de los mismos, luego de unos segundos utilizando el sistema. Los valores esperables corresponden a los stands más próximos, y tienen impresos los números 41, 42, 45 y 46
2. Estimar a qué distancia está una viga que se encuentra delante.

3. Reconocer el color del globo colgado sobre el local de exposición.

Los participantes son de diversas franjas etarias, y sexo, como se muestra en la tabla 6.1.

Formulario

Con el objetivo de seleccionar los ítems del formulario utilizado para la encuesta, se realiza una revisión y evaluación bibliográfica en busca de expresiones que puedan ser adaptadas al lenguaje español y permitan evaluar los aspectos deseados [80]. Para la confección de la escala Likert se utiliza como ejemplo el cuestionario de inmersión [81]. Luego de utilizar el sistema se pide a los usuarios que evalúen las siguientes afirmaciones:

- Me sentí cómodo usando este sistema.
- La experiencia mantuvo mi atención.
- Mientras usaba el sistema no estaba al tanto de lo que sucedía a mí alrededor.
- Pude con eficacia completar las tareas utilizando este sistema.
- En general, la calidad de la imagen era buena.
- Tuve la sensación de estar en otro sitio.
- He disfrutado de la experiencia.

Análisis de resultados

A continuación se pueden observar los valores obtenidos para la encuesta con 41 individuos, realizada en Ingeniería de Muestra 2015.

Tabla 6.2: Resultados de Likert

| | Valoración promedio de Usuarios |
|---|---------------------------------|
| Me sentí cómodo usando este sistema | 3.57 |
| La experiencia mantuvo mi atención | 4.29 |
| Mientras usaba el sistema no estaba al tanto de lo que sucedía a mi alrededor | 4.00 |
| Pude completar con eficacia las tareas utilizando este sistema | 3.43 |
| En general, la calidad de la imagen era buena. | 3.00 |
| Tuve la sensación de estar en otro sitio | 3.71 |
| He disfrutado de la experiencia | 4.86 |

En base a los resultados se puede concluir que el dispositivo resulta atractivo para los participantes, los usuarios sin aprendizaje alguno, son capaces de llevar a cabo las tareas solicitadas de manera exitosa en la mayor parte de los casos. Los participantes se mostraron motivados y capaces de concentrarse fácilmente en las tareas. Al indagar respecto a los sentimientos de inmersión, como la atención y la noción de los factores externos a la experiencia de telepresencia, los resultados fueron positivamente concluyentes.

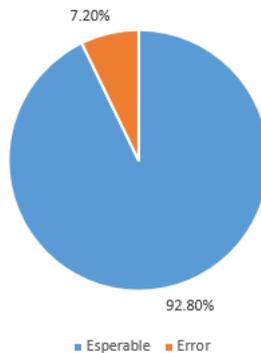


Figura 6.4: Error en detectar stand más cercano

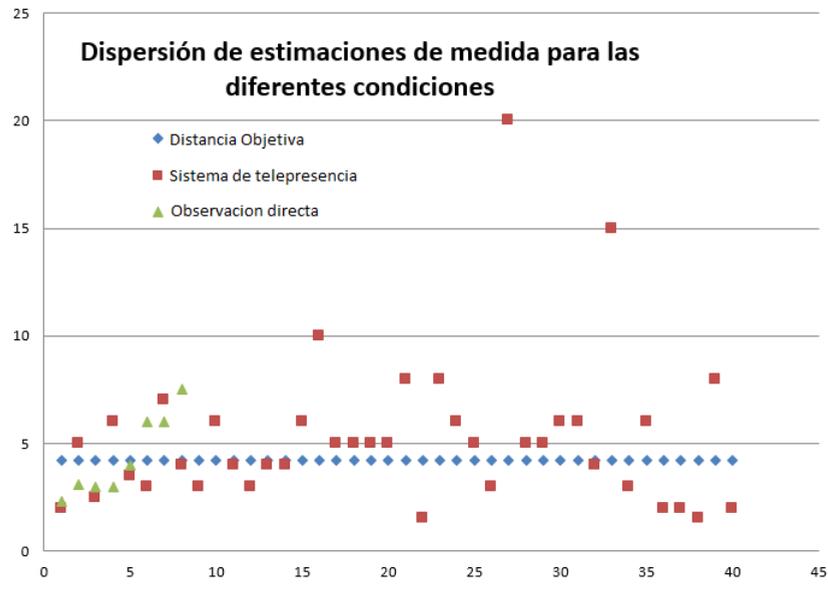


Figura 6.5: Estimación de distancias. Los valores de observación directa son estimaciones de los usuarios hechas a simple vista. Los demás valores representan el estimado a través del sistema de telepresencia.

La mayor parte de los participantes lograron localizar el identificador, un cartel de tamaño A4, del stand más cercano. Los valores obtenidos muestran que los el 92.8% de los usuarios indican que el identificador del stand más cercano está comprendido entre los resultados esperados (41, 42, 45, 46). Solo tres usuarios indicaron números que no correspondían a alguno de esos stands. Se aclara que la muestra de este experimento son 40 personas.

Puede concluirse que el sistema permite a los usuarios ejecutar algunas tareas básicas en lo que respecta a la búsqueda y ubicación de objetos.

Respecto a la estimación de distancia, los resultados obtenidos permiten concluir que este sistema estereoscópico permite apreciarlas de manera aproximada, teniendo un mayor error que la apreciación presencial. Además se observa que la tendencia fue a sobre-estimar la distancia. Es decir, los objetos se percibían un 18% más lejos de lo que realmente estaban.

Tabla 6.3: Estimación de la distancia a la viga (mts)

| | Media | Moda | Desviación Estandar | Distancia objetiva |
|---|-------|------|---------------------|--------------------|
| Observación estereoscópica a través del sistema | 5.15 | 5 | 3.5253 | 4.21 |
| Observación directa | 4.36 | N/D | 1.9484 | 4.21 |

6.3.2. Evaluación de síntomas relacionados al uso del dispositivo de telepresencia

Objetivos

Se desea evaluar el malestar que puede ser generado por el uso del dispositivo, en qué proporción se da, y cuáles son los síntomas asociados.

Desarrollo

Se toma como base el *Simulator Sickness Questionnaire (SSQ)* [82]. Para las pruebas realizadas se estudian los siguientes síntomas:

- Dolor de cabeza
- Ojos cansados
- Visión borrosa
- Nauseas
- Mareo

Análisis de resultados

Luego de utilizar el sistema, de la totalidad de usuarios que fueron tenidos en cuenta para la muestra, solo el 28% registró alguno de los síntomas seleccionados.

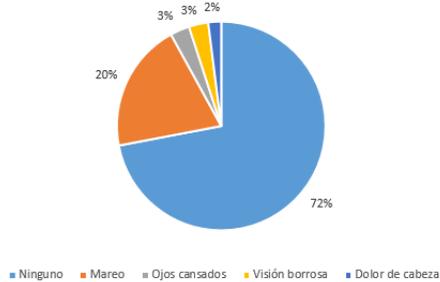


Figura 6.6: Síntomas

Para futuras investigaciones se debería registrar si los malestares no están relacionados con problemas visuales, uso de lentes, etc. De la observación surgen indicios de que estos factores pudieron haber disminuido el rendimiento del participante.

6.3.3. Evaluación de percepción de latencia

Objetivos

El objetivo de esta prueba es evaluar si el usuario es capaz de percibir la latencia introducida por el sistema, y como afecta la experiencia.

Desarrollo

Se consulta a los usuarios si son capaces de percibir alguna demora entre que mueven la cabeza y se actualizan las imágenes desplegadas. Esto busca indagar en las cualidades instrumentales del dispositivo, en relación a la facilidad de uso, el comportamiento del sistema y la eficacia de su funcionamiento [83].

Análisis de resultados

Los resultados de la percepción de los usuarios respecto a la demora en refrescar la imagen luego de un movimiento de la cabeza arrojan los siguientes resultados:

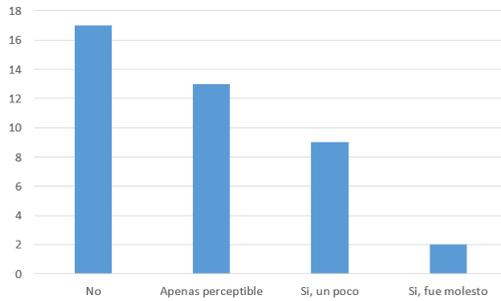


Figura 6.7: Latencia percibida

El 73.2% de los usuarios que probaron el sistema no experimentaron grandes problemas con la latencia. Esta cifra corresponde a los usuarios que no percibieron la latencia, o les resultó apenas perceptible. El 26.8% restante experimentó problemas con las demoras en la actualización de la imagen.

6.3.4. Prueba de conteo de postes

Objetivos

En esta prueba se plantea una tarea a realizar, y se intenta conocer el desempeño de un observador en distintas condiciones. En primer lugar, observando la escena remota en un video, grabado desde el aire con el UAV. Luego utilizando el prototipo en un escenario operativo, es decir, volando y utilizando el sistema de telepresencia.

Desarrollo

En la primera instancia se realiza la prueba sobre un grupo de 8 estudiantes de la Facultad de Ingeniería. Los sujetos deben contar la cantidad de postes que aparecen en un monitor tradicional durante un vídeo de 2 minutos y 30 segundos. Previo al comienzo se le muestra a los usuarios la figura 6.8 para instruirlos sobre qué es lo que deben buscar. El video consta de imágenes grabadas desde el UAV en vuelo, que durante su extensión va

mostrando la zona de los alrededores del edificio de Facultad de Ingeniería, donde se encuentran postes.



Figura 6.8: Postes a contar

Posteriormente se realiza la prueba piloto con dos estudiantes de Facultad de Ingeniería. Se le plantea a los usuarios contabilizar la cantidad de postes que ven utilizando el Oculus Rift mientras un miembro del equipo de desarrollo sobrevuela con el UAV la misma zona donde fue filmado el vídeo desplegado a los usuarios en la prueba anterior. Los integrantes que realizaron esta prueba no son los mismos que realizaron la prueba observando el video.



Figura 6.9: UAV en vuelo durante la prueba

Análisis de resultados

En lo que refiere al conteo de postes a través del video, los resultados obtenidos marcan diferencias entre lo que percibe el usuario y la realidad. Dos de los usuarios lograron contar acertadamente los postes, utilizando vídeo; más de la mitad mostraron diferencias importantes entre el valor indicado y el real. Respecto a la tarea en vuelo, en ambos casos contaron menos postes que los que existían. En el siguiente gráfico se compara el desempeño en cada caso.

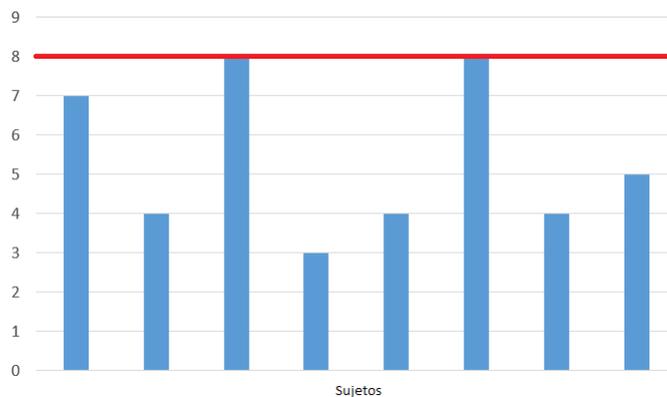


Figura 6.10: Conteo de columnas a través del video, siendo ocho la cantidad real de postes

Esto indica, que a pesar de ser una tarea sencilla, su ejecución remota a través de un medio tecnológico genera ciertas dificultades. El sistema de telepresencia obtuvo un desempeño levemente superior en las pruebas realizadas sobre el video. En promedio se contaron 6,5 postes con este, mientras que a través del video fueron en promedio 5,4. Sin embargo, se reconoce como pequeña la muestra para considerar estos resultados como concluyentes. La complejidad de la operativa dificulta la obtención de muestras más grandes de datos.

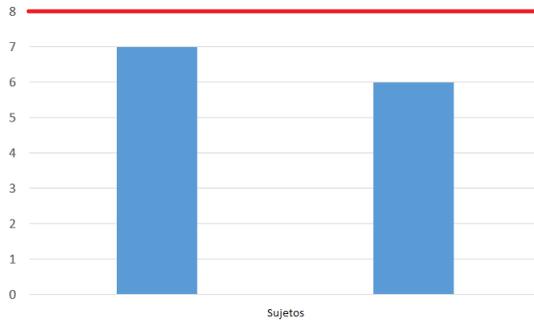


Figura 6.11: Conteo de columnas a través del prototipo, siendo ocho la cantidad real de postes

6.3.5. Control del UAV en simultáneo al uso del sistema de telepresencia

Objetivos

Se busca conocer indicios sobre la utilidad del sistema de telepresencia para operar el UAV a distancia, identificando que actividades son más fáciles o más complejas de realizar.



Figura 6.12: Piloto controlando el UAV mientras utiliza el sistema de telepresencia

Desarrollo

Se realizan 3 vuelos cuyo objetivo es que el piloto utilice el sistema de telepresencia, mientras comanda el UAV. El primer vuelo, el piloto lo inicia utilizando su visión, con el UAV en estado estacionario. Luego se coloca el Oculus Rift para percibir la realidad remota. Este describe la experiencia como inmersiva, y realiza algunos comandos básicos con el aparato, apreciando como se percibe el movimiento a través del dispositivo. Lo primero que se percibe es un movimiento brusco en las imágenes cuando el UAV se inclina hacia adelante o hacia los costados. Cuando la inclinación del UAV es estable, se puede percibir los edificios y demás elementos del paisaje con claridad suficiente para orientarse.

En el segundo vuelo, se pide al piloto que realice una maniobra de aproximación al edificio de facultad, lo suficiente para poder percibir alguna marca sobre la fachada del edificio. Mientras tanto, otro miembro del equipo verifica que el UAV no se acerque peligrosamente a la pared. Esta tarea fue completada con éxito, sin que represente un riesgo para el dispositivo. El piloto relata sentirse cómodo durante la experiencia.



Figura 6.13: Exploración del edificio desde el UAV

Finalmente, se propone realizar un tercer vuelo, con el piloto utilizando el sistema de telepresencia en todo momento. La primer dificultad que se presentó fue la observación del terreno previo al despegue. El movimiento limitado del sistema de adquisición, solo permitía al piloto mirar en una dirección. Esto impide realizar de forma prudente la maniobra de despegue, ya que se desconoce lo que hay detrás del aparato. Una vez informado al piloto, que las condiciones están dadas, por parte de otro miembro del equipo que observa el aparato se procede al despegue y estabilización del aparato. Posteriormente, se recorre el área correspondiente a la cancha de fútbol de Maeso F.C., retornando a la base para realizar el aterrizaje, sin presentar dificultades. El piloto nota en todos estos vuelos, que le es más fácil percibir el entorno remoto a través del Oculus Rift que a través de imágenes proyectadas en la pantalla de la computadora. También manifiesta que en ocasiones de movimientos bruscos le cuesta poder orientarse a través de la imagen.

Análisis de resultados

El sistema de telepresencia puede ser utilizado en vuelo por el piloto, de manera segura, colaborando con la operativa. En algunas circunstancias, se tienen problemas para orientarse a través de la imagen remota, sobre todo cuando existen movimientos bruscos provocados por cambios de inclinación del UAV. La maniobra de despegue se considera más sencilla sin utilizar el Oculus Rift.

6.4. Conclusiones generales

Se logran determinar algunas características básicas del prototipo que permiten dimensionar su funcionamiento y potencial. El rango operativo logrado es de 200 metros, lo cual permite utilizar el dispositivo de telepresencia en una gran variedad de escenarios. A esto hay que adicionar los 15 minutos de autonomía de vuelo, tiempo suficiente para realizar algunas tareas y observaciones a distancia. La masa total del UAV al despegue resulta ser 1342 g, 42 gramos por encima del máximo definido por el fabricante. Esto genera algunos problemas relacionados a la estabilidad en el vuelo, pero permite completar las misiones definidas en estas pruebas. Se logra un

tiempo de latencia en el sistema de 312 ms, lo cual es destacable para un sistema de telepresencia que contiene componentes mecánicos.

En otro enfoque, se logra obtener datos relevantes sobre la experiencia de usuario. La latencia antes mencionada, resulta adecuada para la ejecución de tareas remotas y para proveer de una experiencia inmersiva al usuario. A pesar de que la latencia es percibida por la mayoría de los usuarios, estos parecen adaptarse rápidamente a la misma, sin manifestar malestares físicos ni entorpecer las tareas propuestas. Un fenómeno esperado, pero interesante al mismo tiempo es la percepción de profundidad en espacios reducidos manifestada por los usuarios que utilizan el prototipo gracias a su sistema de adquisición estereoscópico. Este ayuda a los usuarios a percibir la ubicación de los objetos en el espacio. Esta característica se logra con una simple alineación de cámaras, y es esperable que este aspecto de la experiencia pueda ser mejorado experimentando diferentes configuraciones. Otro aspecto a mejorar es la calidad de las imágenes desplegadas. Estas no permiten percibir con nitidez el entorno, los usuarios indican que este es un aspecto mejorable del sistema.

Una vez definidos estos aspectos básicos, es importante estudiar la utilidad del sistema para la ejecución de tareas remotas. Los resultados indican que el dispositivo es apto para realizar tareas básicas de conteo y exploración de un medio remoto. En el caso donde se estudia el tiempo para completar una tarea, se encuentra que la ejecución de la misma de forma remota emplea en promedio un 26% más de tiempo en completarse. Otro resultado interesante es el que arroja la comparación de la ejecución de la tarea utilizando una grabación de video y la exploración del espacio remoto con el sistema de telepresencia. Se logra apreciar una ventaja en el uso del sistema de telepresencia, relativa a la mayor tasa de acierto en la valoración de dicho espacio.

Por último vale destacar la aptitud del sistema para realizar el control del UAV a distancia, mejorando la operativa cuando el UAV se encuentra lejos del piloto.

Capítulo 7

Conclusiones y trabajo a futuro

El objetivo de esta sección es describir las fortalezas de la experiencia construida, y el potencial de sus aplicaciones en un escenario de la industria, así como plantear mejoras importantes a ser consideradas para continuar este trabajo.

7.1. Conclusiones

En el presente documento se expuso un relevamiento del estado del arte en las técnicas involucradas, como telepresencia, realidad virtual, dispositivos para la cabeza, y vehículos aéreos no tripulados. Si bien algunas de estas técnicas están siendo desarrolladas por caminos separados, todas comparten en común un franco avance en lo que refiere al desarrollo tecnológico, y al uso en distintas aplicaciones. La conexión de estas técnicas representa un desafío técnico importante, que deriva en nuevas formas de interacción entre el ser humano y su entorno, a través de un medio tecnológico.

Se presentó un prototipo de telepresencia que utiliza un dispositivo montado en la cabeza para presentar al usuario una realidad distante, logrando que la experiencia sea altamente inmersiva. Los dispositivos de adquisición de imágenes del prototipo están montados sobre un UAV.

Este prototipo, cuenta con las siguientes características:

- Visualización estereoscópica del entorno remoto.
- Despliegue de imágenes de manera natural ante el movimiento de la cabeza.
- Cobertura de todo el campo visual del usuario.
- Componente remota utilizable en vuelo durante 15 minutos en un rango de 200 metros.
- Experiencia visual con latencia de entre 172ms con la cabeza en reposo, y 312ms con la cabeza en movimiento.
- Ayudas visuales básicas para la navegación.

El sistema de telepresencia construido, provee una experiencia de usuario inmersiva, cómoda y que permite centrar la atención del usuario en el entorno remoto.

Si bien el sistema de telepresencia se construyó de manera compacta para ser montado sobre un UAV, también puede ser montado de forma similar en otros dispositivos controlados remotamente, o cualquier estructura fija.

La experiencia de telepresencia sobre un UAV permite buenas condiciones de control del aparato, con algunos indicios de mejora en lo que refiere a la experiencia del piloto. A su vez, permite realizar tareas básicas como identificar objetos y realizar conteos, y hacer una valoración general del escenario remoto por parte del usuario, con un desempeño aceptable en comparación con el desempeño de un observador real.

La latencia de nuestro sistema es variable, oscilando entre 172 y 312 ms dependiendo de los movimientos de la cabeza. Este tiempo de latencia, según se desprende de estudios similares, y de las pruebas con este prototipo, sigue siendo adecuado para ejecutar tareas a distancia. El tiempo de latencia variable no le genera al usuario problemas de adaptación.

Los componentes de realidad aumentada se acoplan adecuadamente a la experiencia de telepresencia desarrollada, constituyendo una ayuda para completar la tarea a realizar.

Basándose en lo señalado anteriormente se puede afirmar que el proyecto cumple con los objetivos establecidos y abre un campo potencial para futuros desarrollos.

7.2. Trabajos a futuro

En este capítulo se describen las posibles mejoras que pueden hacerse al prototipo para generar una experiencia de telepresencia más inmersiva.

7.2.1. Utilización de sistema de adquisición y transmisión de imágenes digital

Durante la realización de las pruebas, tanto con el prototipo básico como con la versión final, los resultados obtenidos muestran que la calidad de las imágenes percibidas por el usuario dista de la ideal, habida cuenta de la experiencia que sería conveniente producir. Esto se debe principalmente a la utilización de un sistema analógico de transmisión de imágenes que tiene una resolución de 720×480 y es susceptible a interferencia. Existen en la actualidad dispositivos de transmisión digital con las especificaciones adecuadas para construir una experiencia de telepresencia, y ser montados sobre un UAV. Estos permiten la transmisión en alta definición con resoluciones de 1920×1080 en un radio de 1 a 2 Km, con baja latencia [84].

Conjuntamente con la utilización de sistemas de transmisión digitales, es preciso utilizar cámaras que capturen imágenes en alta resolución y permitan la transferencia de las mismas en tiempo real al sistema de transmisión.

7.2.2. Movimiento del sistema de adquisición de imágenes

Los movimientos de la cabeza fueron reproducidos en este proyecto con un sencillo soporte de servomotores. Si bien el soporte elegido es un desarrollo industrial diseñado con ese fin, los motores producen cierta vibración al moverse y al frenar, lo cual fue consistentemente reportado por los usuarios en las pruebas. Esto podría evitarse utilizando motores que tengan un mejor rendimiento en lo que respecta a vibración y precisión del movimiento. Existen disponibles soportes que incorporan motores *brushless* que permiten 3 ejes de movimiento, reducen la vibración, y cuentan con sensores y soporte incorporado para la estabilización de la imagen [85].

Otra mejora importante sobre la implementación actual es montar sobre el soporte la mínima cantidad de dispositivos posibles, para reducir la exigencia a los motores que lo mueven. En nuestro proyecto, sobre el soporte

quedan montados, además de las 2 cámaras, los 2 transmisores y sus respectivas antenas, debido a que estos componentes se encuentran integrados. Utilizando transmisores independientes de las cámaras, estos y sus antenas no se encontrarían montadas sobre el soporte.

7.2.3. Ayudas de control automatizadas e interfaces de control natural para el UAV

El control del UAV en el prototipo desarrollado es mediante el control remoto original del aparato. Este método de control requiere de cierta pericia del usuario del sistema de telepresencia. El sistema de control remoto no realiza ninguna restricción sobre las acciones del usuario. Es decir, que con un comando inadecuado, el usuario puede estrellar el aparato contra un edificio o el piso, esto implica un riesgo de seguridad. El problema planteado puede mitigarse agregando ayudas de navegación que limiten el vuelo a zonas seguras. Actualmente la mayoría de las controladoras de vuelo permiten la programación de un vuelo automático. Se pueden aprovechar estas funcionalidades y el *hardware* integrado en los UAV, particularmente el GPS para permitir libertad de movimiento al piloto dentro una región acotada del espacio, que se considere segura de antemano, y con adecuada planificación. Con este fin, deberían escogerse controladoras de vuelo *open source* para poder desarrollar con total libertad las funcionalidades. Tal es el caso de la ya mencionada APM, o la Pixhawk [86].

Por otro lado el UAV queda fuera del campo visual cuando el piloto es a su vez el usuario del sistema de telepresencia. Siguiendo la línea de desarrollo del proyecto, se considera interesante la construcción de interfaces de control natural, que permitieran al piloto a través del movimiento de sus manos ejecutar movimientos en el aparato, o pasar al siguiente punto de misión. Esto es viable con dispositivos como el Leap Motion o Kinect [87] [88].

7.2.4. Enriquecimiento de la experiencia con realidad aumentada y procesamiento de imágenes

Las ayudas de navegación básicas implementadas en este proyecto resultaron ser útiles para las tareas de reconocimiento, y la toma de decisiones sobre a dónde dirigir el UAV. Se podrían agregar otros componentes de

realidad aumentada que indiquen datos de vuelo o señalen áreas de interés. Las imágenes serían analizadas y procesadas automáticamente, con el fin de identificar patrones o comportamientos. Por ejemplo, tendría la capacidad de detectar movimientos sospechosos de una persona, grietas en una pared, etc. Esto dispararía diversas respuestas, como alarmas o avisos visuales que informen de la situación, o señalamiento del área problemática directamente sobre la imagen.

7.2.5. Incorporación de sonido

La experiencia puede enriquecerse capturando y transmitiendo información del medio remoto, destinada a otros sentidos, por ejemplo el sonido ambiente del lugar donde se encuentra el sistema de adquisición. Desde una perspectiva teórica, la información auditiva y la visual son procesadas en estrecha interacción, en la práctica, esto podría derivar en una mayor inmersión en la tarea remota [89].

7.2.6. Utilización de UAV con mayor carga útil y autonomía

Para continuar el desarrollo futuro de sistemas de telepresencia, se han mencionado una serie de dispositivos, alguno de los cuales, deben ir montado sobre el UAV. Tal es el caso del sistema de cámaras y el transmisor digital. En general, este tipo de dispositivos son de mayor peso que los utilizados en este proyecto. Es importante advertir que para estos casos será necesario contar con un UAV que posea mayor carga útil para poder realizar el vuelo con estos dispositivos.

Un UAV con mayor autonomía permitiría realizar más pruebas, y vuelos más largos, esto daría lugar a más usos aplicados.

7.2.7. Telepresencia aplicada

Una vez optimizado el prototipo de acuerdo a las mejoras mencionadas en los apartados anteriores, será posible abordar tareas específicas de telepresencia aplicada a la realización de tareas concretas. Sin pretender ser exhaustivos, estas tareas podrían consistir en:

- Vigilancia de depósitos e instalaciones industriales.

- Relevamiento topográfico de accidentes geográficos y áreas productivas.
- Valoración de infraestructura orientada a su mantenimiento.
- Búsqueda y rescate de damnificados en zonas de desastre.

Apéndice A

Documentación técnica de componentes

A.1. UAV



Figura A.1: DJI-Phantom 2 [56]

- Peso: 1000g.

- Precisión de flotado vertical: 0.8m.
- Precisión de flotado horizontal: 2.5m.
- Máxima velocidad angular para el yaw: 200°/s.
- Velocidad máxima ascenso: 6m/s.
- Velocidad máxima descenso: 2m/s.
- Largo diagonal: 350mm.
- Tiempo de vuelo: 25min.
- Peso soportado: 1300g.
- Temperatura operativa: -10°C - 50°C.
- Batería soportada: batería inteligente DJI.
- Tipo de batería: 35 LiPo.
- Capacidad de batería: 5200maH, 11.1V.
- Frecuencia Operativa del control: 2.4GHz ISM.
- Distancia comunicación del control: 1000m.

A.2. Batería externa



Figura A.2: Batería Turnigy 1.0 [60]

- Carga máima: 1000 mAh.

- Configuración: 3S1P/11.1v/ 3 celdas.
- Descarga: 20C.
- Peso: 79g.
- Tamaño: $77 \times 35 \times 17$ mm.

A.3. Módulo regulador de alimentación



Figura A.3: APM Power Module [90]

- Voltaje máximo: 30V.
- Voltaje mínimo: 4.5V.
- Detección Corriente máxima: 90A.
- Salidas de corriente: 5.3V y 2.25A máximo.
- Tamaño: $25 \times 21 \times 9$ cm.
- Peso: 40g.

A.4. Dispositivo de Adquisición Estereoscópico



Figura A.4: Oculus Rift DK2 [1]

- Resolución: 960×1080 por ojo.
- Tasa de refresco: 75Hz, 72Hz, 60Hz.
- Campo visual: 100 %.
- Sensores: giroscopio, magnetómetro, acelerómetro.
- Tasa de actualización de los sensores: 1000 Hz.
- Sensor posicional: sensor infrarrojo CMOS de corta distancia.
- Tasa de actualización del sensor posicional: 60Hz.
- Peso: 0.45Kg.

A.5. Cámara



Figura A.5: Boscam TR1 [49]

- Sensor: 1/3 CMOS 5.0 MP.
- Lente: 2.6mm 130°.
- Exposición: automática.
- Balance de blancos: automático.
- Resolución de video: 1440 × 1080 30FPS.
- Memoria flash: micro SD hasta 32GB.
- Poder de transmisión: 200mw.
- Frecuencia de transmisión: 5645 - 5945MHz.
- Dimensiones: 44 × 37 × 18mm.
- Conector: SMA-RP.
- Voltaje: 5 - 12V.
- Máxima distancia de transmisión: aproximadamente 600 metros en campo abierto.
- Peso: 40g.

A.6. Soporte de 3 ejes



Figura A.6: Fatshark 3-Axis Gimbal [57]

- Tamaño: $68 \times 42 \times 31$ mm.
- Cantidad de motores: 3.
- Tipo de motores: micro servo 9g.
- Peso: 40g.

A.7. Computadora



Figura A.7: MSI GT70 ONC [91]

- Procesador: Intel Core i7-4800MQ.
- Sistema operativo: Windows 8.1.
- Pantalla: 17.3" Full HD (1920x1080, 16:9).
- Tarjeta de video: NVIDIA GeForce GTX 870M 3GB GDDR5.
- Memoria RAM: 8GB DDR3L 1600MHz.
- Disco Duro: 1TB HDD (7200RPM).
- Cantidad de puertos USB: 5.

A.8. Enlace de datos de telemetría



Figura A.8: Kit de telemetría [92]

- Frecuencia: 915MHz 433HZ.
- Conectores de antena: RP-SMA.
- Poder de transmisión: 100mW (20dBm), ajustable entre 1 - 20dBm.
- Sensibilidad: -117dBm.
- Interfaz: TTL UART estandar.
- Protocolo: MAVLINK.
- Corrección de errores: hasta 25 %.

- Rango: 1.6 Km.
- Amplificador: bilateral.
- Comandos: AT y RT.
- Peso: 16.4g.

A.9. Controladora de vuelo



Figura A.9: APM:Copter 2.6 [58]

- Sensores: giroscopio, acelerómetro de 3 ejes, barómetro, magnetómetro, GPS y brújula.
- Código: open source.
- Cantidad de servos que puede controlar: 2.
- Compatible con kit de telemetría: si.
- Peso: 31g.

A.10. Receptor local de imagen



Figura A.10: Receptor inalámbrico AV RC805 [48]

- Canales: 5.8G (5645, 5665, 5705, 5865 , 5885, 5905, 5925, 5945).
- Frecuencia de recepción: 5645-5945MHz.
- Sensibilidad de recepción: -90dBm.
- Voltaje: 5 - 12V.
- Intensidad de la fuente de alimentación: 150mA.
- Dimensiones: 75 × 54 × 15mm.
- Peso: 130g.

A.11. Antenas omnidireccionales



Figura A.11: FPV Clover Leaf Omni-Directional [93]

- Frecuencia operativa: 5.8GHz.
- Tamaño: $8,9 \times 4,6 \times 2,5$ cm.
- Peso: 8.5g.

A.12. Capturadora de video



Figura A.12: StarTech SVID2USB2 [47]

- Formatos de entrada soportados: NTSC, PAL y SECAM.
- Formatos de salida soportados: MPEG, WMV y AVI.

- USB: 2.0.
- Codificación de video: MPEG 1, MPEG 2 y MPEG 4.
- Resolución: 720×480 (NTSC), 720×576 (PAL).
- FPS: 30 en máxima resolución.

Apéndice B

Obtención de recursos

Para la obtención de los recursos necesarios para la construcción de una experiencia de telepresencia lo más completa posible, se postuló a un llamado público para la financiación de proyectos de fin de carrera. Se trata de un programa de financiamiento del Centro de Innovación en Ingeniería, cuyo objetivo es fortalecer las capacidades nacionales en emprendimiento e innovación, a través del financiamiento de proyectos de innovación con foco en solucionar problemas concretos en empresas de tipo industrial u otras, así como en sectores prioritarios para la economía del país.

El proyecto debe contar con el aval de una empresa que manifieste un real interés en sus resultados, en función de su aplicabilidad para alguna de sus áreas de trabajo. La empresa CSI Ingenieros, consultora del área de Ingeniería Civil, se mostró interesada por el proyecto, avalando la presentación al llamado. Finalmente la financiación fue aprobada por un total de U\$S 5029. Esta financiación tiene como contrapartida la elaboración de informes periódicos, y la rendición de cuentas de todos los gastos efectuados en el proyecto.

A continuación se presenta el formulario del llamado.

ESPECIFICACIONES DEL PROYECTO

• Descripción del Problema a solucionar

Describir en un máximo de 1500 palabras, el problema que se pretende solucionar a través del proyecto de innovación presentado. Expresar brevemente el sector de incidencia y las áreas específicas donde se aplicará el proyecto. Asimismo, exponga si existen experiencias previas, la vinculación del proyecto con las mismas y de ser posible, experiencias internacionales en la temática propuesta.

El desarrollo y popularización de sistemas de video ha cambiado la relación entre las personas y el espacio al permitir el control visual de zonas remotas. Si bien esta tecnología ha tenido su principal repercusión en la industria del entretenimiento a través de la televisión (en cualquiera de sus formatos) muchas áreas se han servido de las ventajas introducidas.

Entre los ejemplos citables se encuentran los circuitos cerrados de televisión (CCTV) dedicados al control del espacio en escala media y también aquellos consagrados al monitoreo del territorio de gran escala (imágenes satelitales). En ambos casos se trata de herramientas que se han vuelto imprescindibles para muchas organizaciones estatales y vinculadas con la industria. Se ha vuelto posible contar con una presencia inmediata en los rincones más remotos. Mucho esfuerzo se ha dedicado a mejorar los dispositivos considerando calidad, tamaño, costes, autonomía y resistencia, entre otros.

Los avances tecnológicos por su parte han permitido mejoras sustanciales en la calidad de las imágenes y su velocidad de transmisión.

Actualmente nos encontramos frente a una nueva etapa marcada por un salto cualitativo: la inclusión de la percepción estereoscópica en línea. Es decir el desarrollo de dispositivos que permiten la transmisión en directo de imágenes que pueden ser percibidas de forma tridimensional con extremo realismo.

Este tipo de innovaciones solían ser presentadas asociadas a la industria del entretenimiento. Sin embargo, actualmente se les vislumbra como la vanguardia en Tecnologías de la Información y la Comunicación – más aún desde la compra de la empresa referente en el área Oculus Rift por el gigante Facebook.

En la realidad existen muchas situaciones que requieren de la evaluación remota de algunos factores de un medio determinado, donde es de vital importancia tener un conocimiento detallado del mismo, especialmente aquella que brinda el sentido de la vista, que es en definitiva, la visualización de una situación en particular.

En muchas ocasiones la evaluación se hace de manera presencial, incluso cuando esto es muy costoso o peligroso para las personas que lo hacen. Una

alternativa a esto es brindar información con imágenes, video, u otro tipos de datos que hagan viable la toma de decisiones a distancia. Esta problemática se da en diversas áreas de aplicación, y con diversos fines, comerciales, educativos, humanitarios y militares. Por ejemplo para acceder a una zona de emergencia, como el caso de un incendio, terremoto, inundación, derrumbe, donde exista peligro para la vida humana.

En sectores productivos, la evaluación por parte de expertos de un terreno es de especial importancia, como por ejemplo para evaluar el estado de una plantación, campo, cría de animales, compra de terrenos. Realizar este tipo de evaluaciones tienen algunas dificultades, como el traslado de los expertos desde zonas lejanas, el uso de vuelos para tener una visión adecuada, el acceso a zonas sin caminería, etc. En el caso de que esta presencia remota requiera de gran inmersión en la situación, se puede hablar de Telepresencia y se define como “el sentimiento de estar presente en un lugar donde la persona no está” (Minsky, M. 1980). Este sentimiento de presencia ocurre por ejemplo cuando se utiliza simuladores, cuando la persona realiza una operación en un sistema virtual (Slater, 1994), o cuando se opera un robot a distancia (Rybarczyk & Mestre, 2013). Lograr la telepresencia implica que la persona olvide donde se encuentra físicamente, y se concentre en una tarea olvidando sus preocupaciones y nociones de tiempo, lo cual permite que la persona se involucre más en la misma (Csíkszentmihályi, 1975).

Se sugiere para un conocimiento en profundidad de la problemática la lectura de Avatar modeling: a telepresence study with natural user interface(
http://run.unl.pt/bitstream/10362/10975/1/Coelho_2013.pdf)

Descripción de la solución propuesta

Exponer, en un máximo de 1000 palabras, la solución y los principales aportes a desarrollar en el sector.

Se propone el desarrollo de un dispositivo de telepresencia basado en la tecnología de Oculus Rift. Se trata de una solución tecnológica orientada a atender las necesidades de distintos sectores de la industria. Por tanto estará dotada de una interfaz accesible para el usuario.

Se empleará la tecnología de realidad virtual de última generación Oculus Rift con el objetivo de brindar imágenes desde el terreno en tiempo real y generar una experiencia inmersiva. Este dispositivo logra una inmersión superior a otros valiéndose del tracking del movimiento de la cabeza, para que el software muestre la una imagen de realidad tal cual la percibiría la persona, imitando como funciona la vista humana, presentando imágenes diferentes a cada ojo y bloqueando los estímulos visuales del mundo exterior, sumado a un amplio campo de visualización de 110 grados. (Oculus Rift in Action, 2014).

Actualmente existen desarrollados prototipos capaces de brindar estas experiencias inmersivas. Aun tratándose de proyectos por el momento limitados éstos demuestran la viabilidad de desarrollos versátiles adaptados a distintas aplicaciones.

El producto desarrollado contará con un sistema de adquisición de imágenes estereoscópicas en tiempo real. Dicho sistema fue desarrollado especialmente para el uso en UAV y con soporte para el uso de dispositivos de Realidad Virtual. Éste estará dotado de un mecanismo dedicado a orientar el objetivo a partir de las órdenes del usuario. Gracias al sistema de sensores (acelerómetros) con el que cuenta Oculus Rift el usuario podrá comandar el sistema de cámaras a partir de movimientos de la cabeza. De este modo la visualización emula la experiencia visual en primera persona dando lugar a una interacción natural.

Combinando las posibilidades que provee este dispositivo de realidad virtual se está ante la posibilidad de generar un dispositivo de telepresencia con gran capacidad de aplicación a los diversos ámbitos del problema descrito. Con dicho fin se pretende investigar las distintas alternativas para lograr la adquisición de imágenes y su integración al sistema de telepresencia, considerando especialmente le caso puntual de una cámara estereoscópica con streaming en tiempo real montada sobre un dispositivo UAV (vehículo aéreo no tripulado, o *drone*).

Esta implementación cuenta con algunos antecedentes experimentales que demuestran la viabilidad la implementación con la tecnología actual(ver enlace1). Se aplicarán al sistema medios de interacción naturales que utilicen realidad aumentada sobre las imágenes proyectadas en el Oculus Rift, y captura de movimiento con dispositivos Kinect. De esta manera se pretende volver más intuitivo el uso del sistema, así como la propia manipulación del dispositivo UAV, permitiendo el uso del mismo a cualquier tipo de usuario. Para el desarrollo de la interfaz natural se utilizará un motor gráfico que permita acoplar las imágenes obtenidas con la interfaz visual generada y demás componentes de Realidad Aumentada, y que además tenga el soporte adecuado para Oculus Rift.

Se hará especialmente énfasis en mejorar al máximo la experiencia para lograr inmersión, utilizando dispositivos de transmisión de baja latencia, cámaras de alta definición, y transmisores de video de largo alcance.

Se seleccionará un drone con una Interfaz de programación adecuada para poder enviar instrucciones de control por parte del sistema de navegación a implementar, así como una carga de pago suficiente para cargar con el sistema de adquisición de imágenes.

[enlace1]<http://prostheticknowledge.tumblr.com/post/83838606758/oculus-fpv-another-drone-oculus-rift-project>)

| |
|--|
| |
| |

Descripción del público/área objetivo

Exponer, en un máximo de 1000 palabras, el público/área objetivo de su proyecto.
Ejemplo: si el mercado es una industria, especificar en qué áreas de esa industria y las principales características de los agentes con potencial interés y capacidad para la apropiación del producto o servicio.

El sistema resultante está destinado las industrias que utilicen imágenes o videos de una región, zona, etc, para la venta de sus productos, ya que se logra un valor agregado muy importante con las imágenes tridimensionales. También se ven beneficiadas directamente todas las áreas de consultoría que requieren la evaluación presencial de expertos en tareas de campo, ya que este sistema permitiría hacerlo a distancia.

Es en esta área que se encuentra la empresa que ha manifestado su "alto interés" y apoyo a este proyecto. Esta entiende especialmente útil al sistema a implementar para el Relevamiento en las siguientes circunstancias:

- observaciones relativas a estado de infraestructura existente (puentes, caminos, rutas, edificios),
- desmantelamiento de Residuos Electrónicos
- de emergencia en situaciones extremas vinculadas a eventos extremos de precipitación, vientos, oleaje.

Los usos tampoco se detienen allí, análogamente podría ser el caso de las evaluaciones que hacen los ingenieros agrónomos de un cultivo, la visualización en detalle le permitirá determinar el estado general del mismo, así como detectar plagas, u otras situaciones problemáticas o de diagnóstico, como los restos dejados en el terreno por un cultivo anterior. La integración de un receptor de GPS permite además tomar medidas de distancias y superficies. La creciente incidencia de abigeato, puede ser monitoreada con estos medios así como el estado general de la ganado, pudiendo observar lesiones, o alguna condición de los mismos.

En seguridad nuestro país recientemente se comenzó a utilizar una brigada de drones con fines de vigilancia, el llamado grupo colibrí (ver enlace2), este proyecto puede aportar nuevas formas de interacción y una experiencia más inmersiva que permita una mejor evaluación de la situaciones en las que se opere.

Se buscará que la implementación sea utilizable por usuarios no expertos en el sistema, y sin conocimiento de la operación de los vehículos UAV, por ende el perfil de los usuarios a los que estará destinado es amplio.

[enlace2]<http://www.quorumdigital.info/noticias/11-sociedad/6280-presentaron-a-colibri-primera-unidad-de-drones-de-la-policia-uruguay>

Sección no obligatoria: De ser posible, desarrollar los usos alternativos de la innovación propuesta, sea en el mismo sector de actividad o en otros.

Si bien se han mencionado en forma general en otras secciones, se hace énfasis en la posibilidad de utilizar los prototipos generados, en diversas áreas de aplicación.

PLAN DE TRABAJO

Describa brevemente el plan de trabajo a seguir para el desarrollo del proyecto, los resultados esperados y los indicadores de cumplimiento:

| Actividad | Descripción | Hito (Si/No) | Resultado Esperado | Indicador de cumplimiento | Valores de seguimiento (mínimos) |
|--|---|--------------|---|---|----------------------------------|
| Estudio del estado del arte | Estudio del conocimiento acumulado en el área de la telepresencia | No | Adquirir conocimientos generales en el área | Conocimiento técnico general adquirido en todas las áreas de interés | 1 |
| Análisis técnico de la integración de los dispositivos | Analizar en detalle las restricciones de integración, considerando inclusive medios de transmisión, interoperabilidad, tiempos de latencia, capacidades del dron. | Si | Selección de los dispositivos a integrar. | | 1 |
| Integración de subsistemas | Integración del subsistema de imágenes con el sistema de procesamiento | Si | Consolidar un sistema integrado con baja latencia | Prototipo funcional que permita la visualización de imágenes transmitidas en vivo desde la cámara | 1 |
| Evaluación de Compra de UAV | Elección de UAV que soporte las restricciones planteadas por el subsistema de imagen construido | Si | Modelo del UAV a adquirir | Existencia de un Dron que cumpla las restricciones planteadas | 1 |
| Integración del sistema con el dron | Instalar el subsistema de | Si | Consolidar un sistema | Prototipo funcional con subsistemas distribuidos | 1 |

| | | | | | |
|---|---|----|--|---|---|
| | imagenes sobre el drone | | integrado con baja latencia | | |
| Pruebas de Integración de Sistema | Integrar todas las componentes del sistema construidas y realización de pruebas básicas | SI | Construcción del primer prototipo completo | Sistema permite adquirir imagenes en vuelo y presentarlas en tiempo real. | 1 |
| Desarrollo de funcionalidades avanzadas | Implementación de funciones específicas al área de aplicación seleccionada | SI | Construcción final del sistema, con las funcionalidades avanzadas. | Sistema ofrece prototipo de solución a problema real. | 1 |

PRESUPUESTO

Describe brevemente el presupuesto, considerando lo establecido previamente:

PRESUPUESTO GENERAL DEL PROYECTO

| RUBROS | APORTE DEL CII | APORTE DE LA EMPRESA | COSTO TOTAL USD |
|------------------------------------|-------------------|----------------------|-------------------|
| 01 - Adecuación Edilicia | \$0.00 | \$0.00 | \$0.00 |
| 02 - Equipamiento | \$0.00 | \$0.00 | \$0.00 |
| 03 - Actualización de instrumental | \$0.00 | \$0.00 | \$0.00 |
| 04 - Servicios y seguros | \$0.00 | \$0.00 | \$0.00 |
| 05 - Personal Incremental | \$0.00 | \$0.00 | \$0.00 |
| 06 - Consultores | \$0.00 | \$3,500.00 | \$3,500.00 |
| 07 - Promoción y Difusión | \$0.00 | \$0.00 | \$0.00 |
| 08 - Materiales e Insumos | \$5,020.95 | \$0.00 | \$5,020.95 |
| 09 - Otros costos | \$0.00 | \$0.00 | \$0.00 |
| TOTAL USD | \$5,020.95 | \$3,500.00 | \$8,520.95 |

CRONOGRAMA DE EJECUCIÓN FINANCIERA

| RUBROS | Mes de cumplimiento Hito ... | Junio | Julio | Agosto | Setiembre | Octubre | Diciembre | Enero | Febrero | Marzo | Abril | Mayo |
|--------|-------------------------------|-------|-------|--------|-----------|---------|-----------|-------|---------|-------|-------|------|
| 01 | Adecuación Edilicia | 0 | 0 | | | | | | 0 | | | |
| 02 | Equipamiento | 0 | 0 | | | | | | | | | |
| 03 | Actualización de instrumental | 0 | 0 | | | | | | | | | |
| 04 | Servicios y seguros | 0 | 0 | | | | | | | | | |
| 05 | Personal Incremental | 0 | 0 | | | | | | | | | |
| 06 | Consultores | 0 | 0 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 0 | 0 |
| 07 | Promoción y Difusión | 0 | 0 | | | | | | | | | |
| 08 | Materiales e Insumos | 0 | 0 | 1600 | 4000 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 09 | Otros costos | 0 | 0 | | | | | | | | | |

| | | | | | | | | | | | | | | |
|------------------|--|------------|------------|-------------|-------------|------------|------------|------------|--|--|--|--|--|--|
| TOTAL USD | | 500 | 500 | 2100 | 4500 | 500 | 500 | 500 | | | | | | |
|------------------|--|------------|------------|-------------|-------------|------------|------------|------------|--|--|--|--|--|--|

Nota: Incluye los costos pagados por la empresa.

CRONOGRAMA DE EJECUCIÓN DE ACTIVIDADES

Especificar el **Cronograma de Ejecución de Actividades** con la secuencia cronológica de las actividades, señalando el tiempo estimado de cada una de ellas y los resultados parciales esperados.

| N° | Actividad | Resultado esperado asociado | Junio | Julio | Agosto | Setiembre | Octubre | Noviembre | Diciembre | Enero | Febrero | Marzo | Abril | Mayo | Observaciones |
|----|--|---|-------|-------|--------|-----------|---------|-----------|-----------|-------|---------|-------|-------|------|---------------|
| 1 | Estudio del estado del arte | Estudio del conocimiento acumulado en el área de la telepresencia | 30 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 2 | Análisis técnico de la integración de los dispositivos | Analizar en detalle las restricciones de integración, considerando inclusive medios de transmisión, interoperabilidad, tiempos de latencia, capacidades del dron. | 10 | 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 3 | Integración de subsistemas | Consolidar un sistema integrado con baja latencia | 0 | 0 | 15 | | 20 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 4 | Evaluación de | Modelo del UAV a adquirir | 0 | 10 | 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |

| | Compra de UAV | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|--|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|--|
| 5 | Integración del sistema con el drone | Consolidar un sistema integrado con baja latencia | 0 | 0 | 0 | 0 | | 30 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 6 | Pruebas de Integración del Sistema | Construcción del primer prototipo completo | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 30 | 30 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 7 | Desarrollo de funcionalidades avanzadas | Construcción final del sistema, con las funcionalidades avanzadas. | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | |

Observaciones: Los valores corresponden a los días que se pretenden dedicar a cada actividad. Cada día equivale a 6 horas hombre de esfuerzo.

DOCUMENTOS ADJUNTOS

| |
|--|
| 1.- <i>Curriculum vitae</i> * de los involucrados en el proyecto. |
| 2.- Escolaridad actualizada*. |
| 3.- Carta aval de participación firmada por el Tutor seleccionado. |
| 4.- Carta aval de la empresa u organización participante en el proyecto. |
| 5.- Otros Documentos Adjuntos. |

Nota para el usuario: (*) Estos documentos deben adjuntarse en formato PDF al formulario. De no ser adjuntados, la presentación será descalificada por problemas de formulación y no se procederá a la evaluación de la Solicitud. En caso de tratarse de CVUy podrá incluirse el link a la versión pública del documento (sin ser necesario adjuntar la versión PDF al formulario).

Apéndice C

Manual de despliegue de instalación

C.1. Configuración de ambiente

1. Instalar el “Oculus runtime” para Windows versión 0.4.3.
2. Descargar e instalar los controladores de la capturadora de video. Disponibles en las siguiente direcciones:
http://www.empiatech.com/IC_drivers/201209/WDM092712_ImageUAC.rar
http://www.empiatech.com/IC_drivers/201209/WDM092712_ImageEMPAudio.rar
3. Descargar e instalar los controladores del kit de telemetría. Disponibles en la siguiente dirección: https://www.silabs.com/Support%20Documents/Software/CP210x_VCP_Windows.zip.
4. Descargar e instalar GrabBee. Disponible en la siguiente dirección: <http://grabbee.software.informer.com/download/?cab0b3b>

C.2. Configuración

1. Configurar el Oculus Rift para trabajar en el modo pantalla extendida, para lograr esto se debe abrir la asistente de configuración y

seleccionar el modo de despliegue.

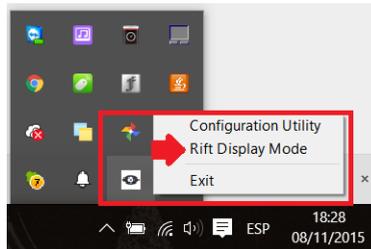


Figura C.1: Seleccionar Rift Display Mode

2. Una vez abierto se selecciona el modo escritorio extendido.

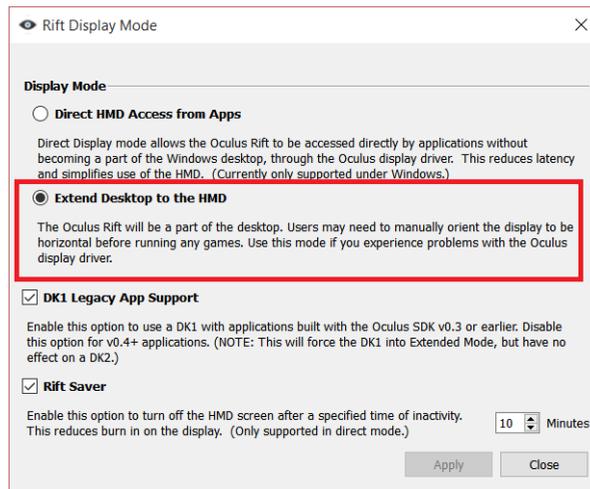


Figura C.2: Seleccionar Expand Desktop to the HMD

3. Configurar la pantalla extendida del Oculus Rift como principal.



Figura C.3: Abrir el panel de configuración

4. Configurar el GrabBee para utilizar NTSC-M.

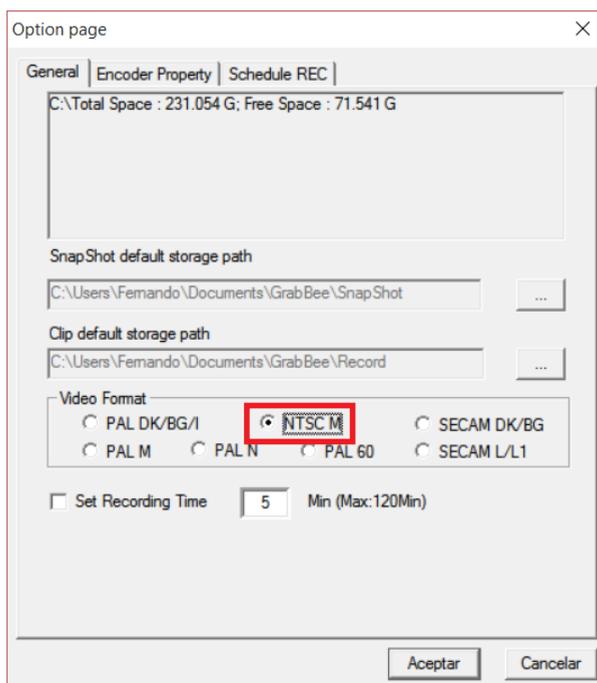


Figura C.4: Panel de configuración GraBee

Apéndice D

Manual de usuario

D.1. Periféricos

1. Conectar ambas capturadoras a los puertos usb.
2. Encender ambos receptores luego de conectarlos a una fuente de energía de 11 V.
3. Seleccionar para cada uno de los receptores el canal correspondiente (aquel en el que está transmitiendo la cámara que le envía imágenes al mismo) presionando el único botón hasta que el LED indicador despliegue el número deseado.
4. Conectar y encender el Oculus Rift.
5. Encender el interruptor principal en el UAV.

D.2. Sistema de estación de tierra

1. Iniciar el Sistema de Estación de Tierra en una computadora.
2. Cambiar de pestaña a "Flight plan".



Figura D.1: Seleccionar Flight Plan

3. Seleccionar los puntos de ruta haciendo doble click en el lugar del mapa donde se quieren agregar.
4. Elegir el puerto COM correspondiente al kit de telemetría.
5. Seleccionar 57600 en el selector de tasas de transferencia.
6. Presionar el boton "CONNECT".

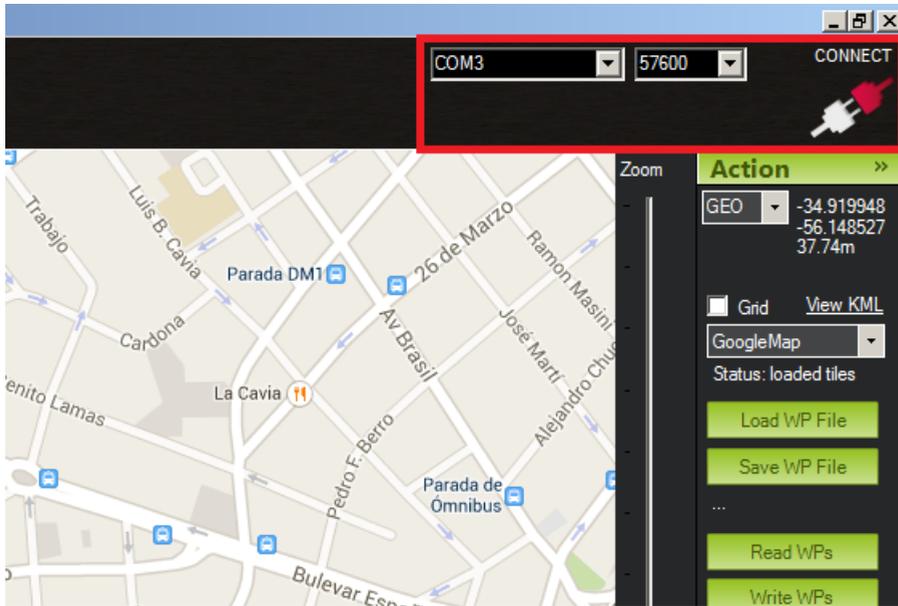


Figura D.2: Selección de puerto, tasa de transferencia y el opción conectar

D.3. Sistema de control y despliegue de interfaz

1. Iniciar el Sistema de control y despliegue de interfaz en la computadora.
2. Configurar el Sistema de control y despliegue de interfaz para que nuestro consumidor de servicios web apunte a la dirección donde están desplegados los servicios web del Sistema de Estación de Tierra (ip y puerto).
3. Presionar la tecla “s” para iniciar la simulación del movimiento de la cabeza.

D.4. Encendido del modo grabación de las cámaras

1. Encendido del modo grabación de las cámaras.
2. Insertar una tarjeta sd en la ranura de la parte superior de la cámara.
3. Luego de encendido el interruptor del UAV, cambiar el interruptor al modo grabación.
4. Luego de finalizado el vuelo, y antes de apagar el interruptor principal del UAV, cambiar el interruptor al modo transmisión.
5. Esperar 20 segundos luego de accionado el interruptor para desconectar el UAV.

Importante: No respetar los pasos correctamente genera la pérdida del video.

Apéndice E

Origen y evolución del Oculus Rift

El Oculus Rift ha pasado por varias versiones de prototipado desde que comenzó su desarrollo, dos de las cuales se vendieron al público como kits de desarrollo (DK1 en 2012 y DK2 en 2014). El objetivo fue brindar a los interesados la oportunidad de desarrollar contenidos que estén listos a la hora del lanzamiento oficial [94].

Motivado por las rudimentarias prestaciones exhibidas por los dispositivos de realidad virtual preexistentes, Palmer Luckey, el fundador de Oculus, desarrolla la idea de crear un HMD mejor que los ofrecidos por el mercado, y a un precio accesible al público. John Carmack, un programador de juegos estadounidense, estaba haciendo sus propias investigaciones cuando se encontró con el trabajo de Luckey. Luego de desarrollar un prototipo inicial, Carmack estuvo de acuerdo con el camino que había seguido Luckey, y a fines de 2011, en la Electronic Entertainment Expo, la compañía Id Software anunció que la próxima actualización de Doom 3 sería compatible con HMDs [95]. Durante la exposición, Carmack presentó un HMD muy rudimentario basado en el prototipo de Oculus Rift desarrollado por Luckey, en el cual se ejecutaba el *software* desarrollado por el mismo Carmack. La unidad contaba con una IMU (Unidad de medida inercial) de alta velocidad y una pantalla LCD de 5,6 pulgadas, visible mediante dos lentes, posicionados sobre los ojos para proveer de una perspectiva estereoscópica de 90° horizontales y 110° verticales [96].



Figura E.1: Primer prototipo de Oculus Rift

El principal objetivo de la primera fase de desarrollo del Oculus Rift fue el de producir un dispositivo que llegará a manos de los desarrolladores para comenzar la integración del mismo con distintos tipos de juegos. Este primer prototipo fue bautizado *Development Kit 1* (DK1) [97].

El DK1 contaba con una pantalla de 7 pulgadas, con latencia y desenfoque por movimiento (*motion blur*) reducidos respecto al prototipo original. Los píxeles también pasaron a ser menos perceptibles, la pantalla LCD era más luminosa y la profundidad de color era de 24 bits por píxel. La pantalla de 7 pulgadas logró que la visión estereoscópica no tuviera una superposición de 100 %, con el ojo izquierdo cubriendo un área extra hacia la izquierda y el derecho hacia la derecha. El campo de visión superaba los 90° horizontales, el doble que los presentados por los dispositivos similares de otras compañías. Contaba con una resolución de 1280 × 800 (16:10), dejando 640 × 800 para cada ojo (4:5). Sin embargo, como el dispositivo no tenía una superposición del 100 % entre los ojos, la resolución horizontal combinada era efectivamente mayor a 640. La imagen se muestra para cada ojo en el panel como una imagen con distorsión de barril (similar a la producida por un objetivo “ojo de pescado”), la cual es corregida por un

efecto creado por los lentes del dispositivo, generando una imagen esférica para cada ojo.



Figura E.2: Oculus Rift DK1

Los prototipos iniciales utilizaban un rastreador de cabeza con sensores cuya frecuencia de refresco era de 125Hz. Un firmware especial pedido por Carmack aumentaba la tasa de refresco a 250Hz; la baja latencia de rastreo es vital para aumentar el realismo. Además incluía un “Rastreador de Realidad Adyacente” que tiene una tasa de refresco de 1000Hz; este permitiría llegar a niveles de latencia muy inferiores a cualquier otro [98]. Utilizaba una combinación de giroscopios, acelerómetros y magnetómetros en 3 ejes, que posibilitaban un rastreo absoluto de la cabeza (relativo a la tierra) [99] [100].

En Junio de 2013, un prototipo del Oculus Rift que utilizaba una pantalla LCD de 1080p fue presentado en la Electronic Entertainment Expo. La baja resolución era la principal crítica para el DK1. Además el efecto de puerta de pantalla (las líneas finas que separan los píxeles de la imagen desplegada en la pantalla se hacen visibles en la misma), tan notable en el DK1 se redujo significativamente en este nuevo prototipo [101].



Figura E.3: Oculus Rift HD

En Enero de 2014, un nuevo prototipo bautizado *Crystal Cove* fue revelado en la *Consumer Electronics Show*. El mismo utilizaba una pantalla OLED de baja persistencia, así como un nuevo sistema de rastreo posicional, que utilizaba una cámara externa para identificar emisores infrarrojos ubicados en el dispositivo. Esto permitía detectar acciones como inclinarse o agacharse, que era un reclamo para aliviar las dificultades experimentadas por los usuarios cuando un *software* no respondía a estas acciones [102].



Figura E.4: Oculus Rift Crystal Cove

En marzo de 2014 en la *Games Developer Conference*, fue anunciado el siguiente prototipo conocido como *Development Kit 2* (DK2) [103]. Este

constituyó un pequeño avance respecto al prototipo Crystal Cove, con varias mejoras respecto al DK1, mayor resolución (960 * 1080 para cada ojo), pantalla OLED de baja persistencia y mayor tasa de refresco de pantalla (75Hz) [104]. Un desmontaje del DK2 reveló que este incorporaba la pantalla del Samsung Galaxy Note 3 modificada, incluyendo el panel frontal del mismo dispositivo [105].



Figura E.5: Oculus Rift DK2

El 25 de Marzo de 2014 la compañía Facebook anunció la compra de Oculus Rift por la suma de 2.000 millones de dolares. El CEO de la compañía Mark Zuckerberg reveló la razones por las cuales se efectuó la compra: “La misión de Oculus es habilitar a experimentar lo imposible. Su tecnología abre la posibilidad a tipos de experiencias completamente nuevas. Los juegos inmersivos serán los primeros, y Oculus ya tiene grandes planes que no van a cambiar y nosotros esperamos acelerar” [106].

En Septiembre de 2014, durante la conferencia Oculus Connect, se presentó una actualización del dispositivo que iba a ser conocida como “Crescent Bay”. Esta presentaba una mayor resolución que el DK2, menor peso, audio incorporado y un rastreador de 360° gracias a la presencia de LEDs en la parte trasera del HMD.

Oculus también patentó la biblioteca RealSpace3d, la cual se espera provea al dispositivo de *Head Related Transfer Function* (HRTF) y algoritmos de reverberación [107]. Fue públicamente anunciado que este sería el primer prototipo en utilizar dos pantallas en lugar de una [108].



Figura E.6: Oculus Crescent Bay

En Mayo de 2015 Oculus anunció que la versión para consumidores comenzaría a comercializarse en el primer cuatrimestre de 2016 [109]. Esta es una versión mejorada de Crescent Bay, con una mayor precisión en el rastreo posicional, para soportar la experiencia del usuario tanto sentado como parado, así como también un muy refinado diseño y una ergonomía mejorada para un ajuste más natural [109].



Figura E.7: Oculus Rift versión final

En Junio de 2015, Oculus reveló que debido a las rápidas innovaciones en la industria de la realidad virtual, se prevé que el sucesor del Oculus Rift salga en producción alrededor de 2 años luego de su lanzamiento, y que ya se está trabajando en el mismo [110] [111].

Apéndice F

Síntomas adversos relacionados al uso del Oculus Rift

Existen dos trastornos habitualmente asociados al desfase entre lo que perciben diferentes sentidos .

El *motion sickness*, es causado por una confusión en la percepción del individuo, mientras el cuerpo siente que se está moviendo, el cerebro no. El oído interno envía al cerebro información coherente con un estado de movimiento, mientras que el sistema de percepción visual informa que todo está quieto. La teoría científica más aceptada para interpretar el *motion sickness* es que ante estos síntomas, el cuerpo asume que está envenenado y alucinando, a lo cual responde vomitando para eliminar la supuesta toxina responsable [112].

El *simulation sickness* es opuesta al *motion sickness*: los ojos ven movimiento, pero el oído interno no lo detecta. Pese a ser opuesto al *motion sickness*, los efectos secundarios suelen ser los mismos [112].

Los usuarios del DK1 solían experimentar síntomas como mareos, náuseas, sudoración y vómitos. Todo parecía indicar que lo que estaban experimentando era *motion sickness*, sin embargo lo que realmente estaban experimentando era *simulation sickness*, qué es exactamente lo opuesto.

Para solucionar este problema, Oculus toma la decisión de cambiar la

pantalla utilizada, para evitar que los ojos perciban movimiento errático [112].

El DK1 utilizaba una pantalla con tecnología LCD para el despliegue. Estas pantallas brindan ciertas ventajas, ya que son luminosas, no producen distorsión geométrica y consumen poca electricidad. Sin embargo, no son aptas para la realidad virtual por una sencilla razón: los tiempos de respuesta en movimiento son lentos [112].

Para resolver este problema se pasó a utilizar una pantalla OLED de baja persistencia para el DK2. Por más que éstas no fuera tan brillante como la LCD, no experimentaban los problemas previamente mencionados [112].

Apéndice G

Usos de los UAV

Un UAV puede desplazarse rápidamente sobre un terreno irregular o accidentado y superar cualquier tipo de obstáculo, ofreciendo imágenes y otro tipo de información recogida por los diferentes sensores, desde lugares donde otros vehículos no podrían llegar.

Un sistema con múltiples UAV es más robusto aún. Permite la cooperación entre drones, ayudándose entre sí con el objetivo de cubrir grandes áreas en exteriores, crear redes de sensores móviles, entre otros ejemplos. Estos enjambres de UAV pueden desplegarse para realizar tareas de búsqueda ante cualquier tipo de desastre natural, como terremotos o ataques terroristas, ayudando a localizar a personas que puedan necesitar ayuda [113].

Más allá del uso militar con el que son comúnmente asociados, existen en la actualidad una enorme cantidad de otras aplicaciones para este tipo de dispositivos. Entre ellas podemos encontrar las siguientes:

- Entrega de paquetes: los UAV pueden ser utilizados con el fin de movilizar paquetes de un lugar al otro con el objetivo de disminuir los tiempos de entrega y llegar a lugares de difícil acceso por los medios tradicionales, ya sea por costos o por falta de infraestructura. También representan un ahorro en lo referido a los recursos humanos necesarios para realizar estas tareas. Amazon reveló que están en el proceso de testeo de UAV que puedan realizar entregas de pedidos apenas media hora luego de realizada la compra [114].

- Caza de huracanes: los UAV pueden acercarse al ojo de una tormenta sin poner en riesgo la vida humana ni la integridad física de las personas. La NASA, la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica y la corporación Northrop Grumman se unieron por un período de tres años con el objetivo de utilizar UAV de largo alcance para monitorear la evolución de las tormentas [114].
- Búsqueda de personas desaparecidas: uno o más UAV pueden utilizarse con el fin de buscar personas desaparecidas en lugares abiertos o de difícil acceso (zonas montañosas, nevadas, con niveles elevados de radiación, etc). El reducido tamaño de los mismos permite tenerlos siempre disponibles en los lugares donde sean necesarios, reduciendo considerablemente el tiempo de búsqueda. A esto hay que agregar el bajo costo de un UAV en comparación con un helicóptero, sin exponer a riesgos innecesarios vidas humanas, y con un considerable ahorro de combustible, entre otras ventajas.
- Prevención y control de incendios: en el campo forestal, los UAV permiten la supervisión constante, en horas de alto riesgo, de un área boscosa, en busca de puntos activos o conatos de incendio. El vehículo no tripulado puede supervisar una amplia zona desde el aire, sin poner en riesgo vidas humanas y reduciendo los costos.
- Seguridad: los UAV también son utilizados para monitorear áreas inseguras para la población. Las imágenes transmitidas en tiempo real pueden contribuir a optimizar el lapso de respuesta de las autoridades. En Uruguay el Ministerio del Interior utiliza UAV como parte de su operativo de seguridad ciudadana [115].
- Agricultura y ganadería: se utilizan también en el sector agropecuario para controlar y monitorear el estado de los cultivos mediante la toma de imágenes, controlar la eficiencia de regadíos, tomar datos acerca del estado y ubicación del ganado, etc.
- Fotografía, vídeo: se pueden utilizar los UAV para realizar fotografías y vídeos publicitarios destinados a la venta de inmuebles, registro de eventos multitudinarios, etc. También resultan idóneos para relevamiento topográfico y trabajos de cartografía aérea. La utilización de

los mismos por sobre otros medios tradicionales brinda las siguientes ventajas [116].

- Reducción de costos frente a alternativas pilotadas.
- Mayor estabilidad (que permite mejores fotografías), sin renunciar al dinamismo y posibilidad de vuelo a bajas velocidades y cerca del suelo u obstáculos.
- Automatización del proceso cuando el objetivo es fotografiar un área más grande.
- Obtención de mapa 3d del terreno.
- Reducción del tiempo de trabajo y de los recursos humanos necesarios.

Además de los usos mencionados los UAV también son utilizados para otras actividades como ser: control del medio ambiente, inspección de obras, análisis de comportamiento de multitudes, exploración de áreas de difícil acceso, estudio del tráfico, etc [113].

Apéndice H

ArduCopter

H.1. Componentes necesarios

A continuación se describen los componentes necesarios para el funcionamiento adecuado del sistema:

- Placa Pixhawk, APM2 o PX4 cargada con la última versión del *firmware* disponible.
- Programa Mission Planner ejecutando en una computadora, el cual brinda una interfaz amigable para la configuración y control del UAV.
- UAV versátil que se adapte a los requerimientos del usuario.

Además de esto existen otras opciones que brindan funcionalidades adicionales, un ejemplo es el kit de telemetría, mediante el cual es posible intercambiar información entre el UAV y la computadora donde está ejecutando el Mission Planner de forma remota [55].

H.2. Características

A continuación se describen las principales características del sistema [36]:

- Dispositivo basado en la plataforma Arduino, versión MEGA 5260, que incorpora a este sensores y salidas específicas para cumplir la función de controladora de vuelo en un vehículo UAV.
- Cuenta con un sistema de balanceado automático y control de altitud de gran calidad, que hacen al UAV muy fácil de manejar. El usuario solo debe mover las palancas en la dirección deseada, y el sistema de piloto automático se encarga del resto.
- No son necesarios conocimientos de programación para la utilización del sistema, simplemente se debe proceder a instalar una aplicación de escritorio, realizar la configuración del UAV, e indicar la misión que se quiere realizar.
- Permite establecer hasta 127 puntos de ruta simplemente seleccionando la ubicación de los mismos en el mapa provisto por el Mission Planner utilizando la placa APM2. El UAV volará por sí mismo hacia ellos sin límites de distancia.
- Posibilita enviar un mensaje de control específico al UAV con el fin de que mantenga su posición actual.
- Permite enviar un comando para indicarle al UAV que vuelva a la posición de despegue automáticamente, sin importar donde se encuentre el mismo.
- Control automático de despegue y aterrizaje. Con presionar un botón, el UAV toma vuelo por sí solo, realiza la misión especificada, y vuelve a su posición original sin necesidad que el usuario realice ninguna acción en el medio.

Apéndice I

Configuración del kit de telemetría

El kit de telemetría puede ser configurado a través del módulo de configuración del Mission Planner para mejorar la performance de algunos casos de uso. Esto se logra seteando los parámetros del enlace. Para este caso, es prioritario reducir la latencia en la transmisión de los datos que contienen las instrucciones para el movimiento de la cabeza. Este escenario es similar al que ocurre cuando se utiliza Mission Planner para enviar comandos de control al UAV en tiempo real. Con este fin se utiliza la guía de configuración avanzada del módulo [117], que sugiere las siguientes configuraciones para trabajar en modo de Baja Latencia:

- Se debe configurar el parámetro MAVLINK al valor 2 *Low Latency*.
- Se debe configurar el parámetro MAX_WINDOW a 33. Esto asegura que se pueden enviar paquetes cada 33 milisegundos. La configuración de valores bajos, reduce el ancho de banda.

Adicionalmente se configura en “falso” la opción de estabilización, en el menú “Flight Data”, para los motores 10 y 11. Esta opción se suele habilitar cuando se busca estabilizar la imagen adquirida, ante movimientos del UAV. Esta opción no es compatible con realizar el control remoto del servo, por lo cual se deshabilita.

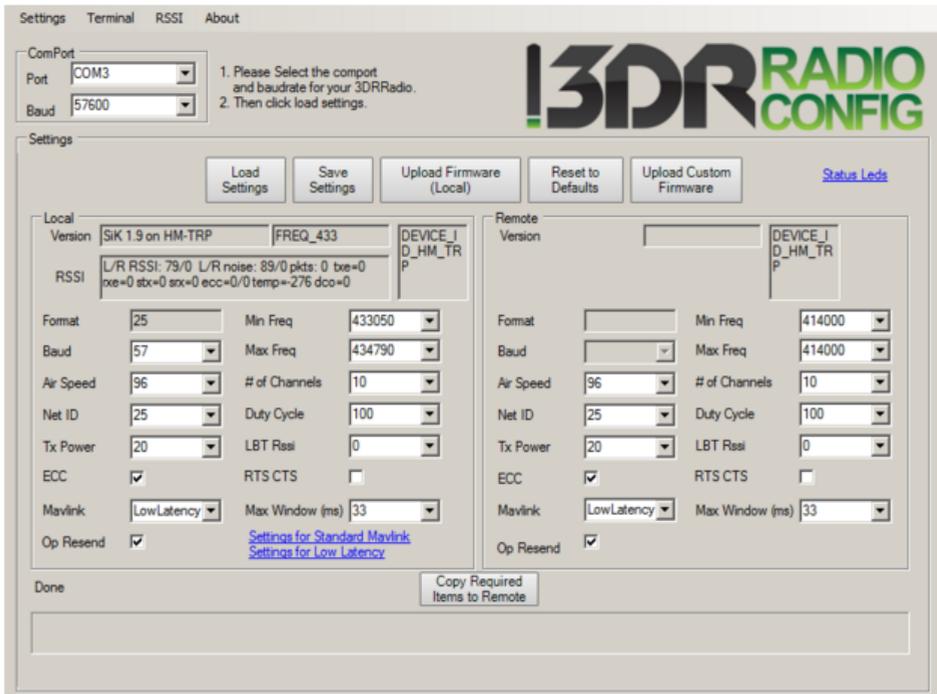


Figura I.1: Configuración del kit de telemetría

Apéndice J

Navegación aérea

Existen algunos conceptos propios de la navegación aérea que es preciso esbozar para una mejor comprensión de la dinámica del UAV en vuelo.

Tal es el caso de los ángulos de navegación, que son un tipo de ángulos de Euler, y constituyen un conjunto de tres coordenadas angulares que sirven para especificar la orientación de un sistema de referencia de ejes ortogonales, normalmente móvil, respecto a otro sistema de referencia de ejes ortogonales normalmente fijos [118].

Dado un sistema de tres ejes fijos en un vehículo aéreo, llamados eje de guiñada (*yaw* en inglés), de cabeceo (*pitch*) y de alabeo (*roll*), existen tres rotaciones principales, normalmente llamadas igual que el eje sobre el que se producen, que permiten alcanzar el sistema del aeroplano desde el sistema de referencia. Tienen que venir dadas en ese orden y ser realizadas en ese orden, ya que el resultado final depende del orden en que se apliquen.

- Cabeceo: es una inclinación del morro del vehículo, o rotación respecto al eje ala-ala.
- Alabeo: rotación respecto de un eje morro-cola del vehículo.
- Guiñada: rotación alrededor del eje vertical perpendicular al avión.

Son tres rotaciones intrínsecas, es decir, relativas al sistema móvil. Se usan en el ambiente aeronáutico para describir maniobras.

Los ángulos de navegación, llamados deriva (normalmente representado por la letra ψ), inclinación (normalmente θ) y alabeo (ϕ), corresponden a los valores de estas tres rotaciones principales [119].

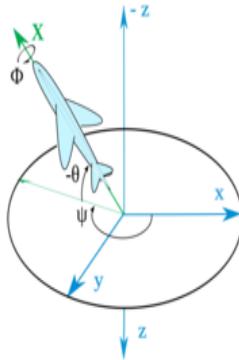


Figura J.1: Ángulos de navegación

Apéndice K

Implementación de Mission Planner

La implementación del sistema se basa en la construcción de vistas de la biblioteca gráfica Windows Forms. Estas se ocupan de desplegar datos, realizar operaciones básicas, crear paquetes para la comunicación de datos e invocar métodos de la biblioteca encargada de la comunicación. Las vistas invocan todo tipo de clases, sin distinguir si estas pertenecen a un grupo particular o si son interfaces.

En síntesis, se puede identificar un código carente de estructuras claramente definidas, o patrones de diseño tradicionales. Las clases de la aplicación, representan casi en su totalidad objetos de sistema, salvo algunas excepciones que representan objetos de la realidad. Apenas se identifican algunos grupos de clases que podrían indicar una descomposición modular.

Por todo lo expuesto, no es posible describir la arquitectura de este sistema remitiendo a alguna de las conocidas (SOA, en tres capas, etc).

Se identifican dos grupos de clases claramente útiles para la implementación. En primer lugar las que se encargan de la comunicación con el UAV, creando las estructuras necesarias, accediendo a los puertos seriales, y formando los paquetes MAVLINK. El otro grupo destacable, son las clases que manejan datos globales de la aplicación.

Apéndice L

Problemas en el desarrollo del prototipo básico

Durante el desarrollo del prototipo surgieron problemas de distinta índole, sumados a la dificultad para obtener los componentes necesarios en el mercado local. Nos encontramos con los siguientes problemas:

- Cálculo de ángulos: este problema fue encontrado durante el desarrollo del programa ArduCabeza. El programa recibe datos referentes a los ángulos correspondientes al giro de la cabeza del usuario en relación a los tres ejes de coordenadas. Estos datos son retornados por la API del Oculus Rift como un arreglo de cuatro valores (x, y, z, w) , conocido como cuaternia, que consiste en una extensión de los números reales utilizada para representar rotaciones en tres dimensiones [76]. En nuestro caso representa la rotación de la cabeza del usuario respecto al centro del cuello. Este valor debe ser transformado de forma de indicarle a cada uno de los motores AX-12 cuánto deben moverse y en qué dirección. Para lograr este cometido deben obtenerse los ángulos eulerianos de giro, los cuales serán enviados a los motores. Las operaciones para realizar las transformaciones no son triviales.

A la fecha de la presentación (14/11/2014) este problema no había sido resuelto por completo.

- Baterías: uno de los primeros problemas enfrentados fue la pronta

descarga de las baterías. Luego de aproximadamente dos horas se deben volver a cargar. Esto es particularmente importante si se tiene en cuenta que las mismas deben alimentar dispositivos que en un futuro se encontrarán sobre un dron, por lo que no es práctico recargarlas con una frecuencia elevada. Por este motivo se tomó la decisión de sustituir las primeras baterías por unas de mayor durabilidad.

Un segundo problema que enfrentamos fue el fallo de baterías por la mala utilización de las mismas. Este tipo de baterías requieren del control de voltaje al ser utilizadas por un período prolongado de tiempo, ya que si se utilizan cuando entrega menos de 2.5 V en alguna de sus celdas, se ha observado que luego no se pueden recargar la batería con su carga máxima.

El último problema relacionado a las baterías fue resolver la adecuada sinergia entre baterías y dispositivos, de forma de lograr la mayor calidad de imagen posible y así mejorar la experiencia del usuario final. Ejemplo: conectar un transformador de voltaje variable a las cámaras o a los receptores genera “ruido” en la imagen transmitida, por dicho motivo se optó por utilizar baterías LiPo para alimentar estos dispositivos [120].

- Refrigeración: las cámaras por las que se optó experimentan mayores incrementos de temperatura que los esperados de acuerdo a las especificaciones del fabricante. A los pocos minutos de estar conectadas (pocos minutos) el aumento de temperatura fue tal que ocasionó que una de las cámaras sufriera un desperfecto resultando inutilizable. Para controlar el aumento de temperatura se optó por colocar un ventilador próximo a la cámara. La implementación continuó replicando la imagen de la cámara que funcionaba correctamente en la visión de cada ojo.

Apéndice M

Incidencias generales relevantes

M.1. Desarrollo del prototipo de evaluación

M.1.1. Problemas con la interfaz USB

Durante el desarrollo del prototipo básico el equipo se encontró con una gran dificultad: al mantener el mismo operativo por un período de tiempo mayor a 20 minutos, los motores AX-12 se detenían.

La interfaz USB que utiliza la placa Arduino (encargada de controlar los motores) se satura, esto se debe a que la tasa de envío de datos de la computadora a la placa supera la capacidad de procesamiento de la misma, sobrecargando su buffer. Para solucionar este problema se intentó desconectar la placa de la fuente de alimentación y volver a conectarla, así como deshabilitar el dispositivo por medio del “Administrador de dispositivos” de Windows. Estas medidas no fueron efectivas para resolver el problema, la placa aún no respondía. La alternativa que dio resultado fue reiniciar la computadora y volver a ejecutar la aplicación, con el consiguiente retraso en el desarrollo del prototipo básico.

M.2. Desarrollo del prototipo final

M.2.1. Dificultades con la documentación técnica de componentes utilizados

Gran parte de los componentes con los que se tuvo que trabajar (cámaras, kit de telemetría, etc) contaban con muy escasa documentación técnica en la web. Esto determinó un enlentecimiento en el proceso de selección de los componentes más apropiados y la consecuente extensión del tiempo, a priori planificado, para la concreción de la tarea.

M.2.2. Rotura de cámara

Durante las primeras pruebas realizadas con las cámaras, no se tuvo en cuenta que las mismas fueron diseñadas para ser utilizadas en ambientes abiertos, con buena ventilación. Al ignorar esta información, se realizaron pruebas con las mismas en entornos no aptos para su buen funcionamiento; tal es el caso del Laboratorio de Medios. Como consecuencia, se produjo un incremento de la temperatura que determinó que una de las dos sufriera un desperfecto y dejase de funcionar. Debido a que las mismas están compuestas por circuitos integrados, fue imposible su reparación, siendo necesario el reemplazo de la cámara dañada. Por este motivo se debió tener especial cuidado con la utilización de las cámaras por lapsos prolongados en el ambiente del laboratorio. Para los ensayos de laboratorio se optó por interrumpir el uso de las cámaras luego de estar activas por 5 minutos, para permitir que la temperatura se redujera a valores que no comprometieran la integridad de los circuitos.

M.2.3. Dificultades con el desarrollo y configuración para Oculus Rift

A la hora de desarrollar aplicaciones utilizando el Oculus Rift, se encontraron varias dificultades.

Una de las más importantes fue lidiar con los defectos que presentaban las herramientas de desarrollo utilizadas (Unity, SharpOVR) -muchas de ellas por encontrarse aún en fase beta-, dificultando su integración con la interfaz provista por el dispositivo. Otro aspecto relevante a tener en cuen-

ta, es la dificultad que conlleva configurar el dispositivo para comenzar a trabajar.

La integración del Oculus con Unity generó varios problemas. El programa se volvía inestable al activar las funcionalidades asociadas al dispositivo, provocando que el mismo se interrumpiera repentinamente durante el proceso de desarrollo, sin motivo aparente. Otro problema se genera al observar la sección de vista previa de Unity, en la cual no se despliegan las imágenes correspondientes. Resulta necesario generar un archivo ejecutable cada vez que se realiza algún cambio en el código, con el tiempo adicional que esto conlleva.

M.2.4. Limitación del movimiento de las cámaras debido al tren de aterrizaje

El tren de aterrizaje del DJI Phantom 2 no permite el adecuado movimiento de las cámaras Boscam TR1 incorporadas al mismo, se producen colisiones entre ellas y las patas del UAV. Por este motivo las patas originales son sustituidas por unas más largas. Esta nueva configuración brinda mayor espacio y permite evitar las colisiones mencionadas. El diseño de las nuevas patas es tal que se amplía significativamente el campo visual de las cámaras.

M.2.5. Interferencia en la transmisión de imágenes

En las primeras pruebas realizadas con el sistema de transmisión de imágenes se podía notar que la calidad de las imágenes recibidas no era buena, presentando un alto grado de interferencia. Esta interferencia se veía incrementada a medida que aumentaba la distancia entre transmisor y receptor. Cuando la distancia entre los mismos era superior a 20 metros la imagen se perdía, lo único que se podía visualizar era ruido.

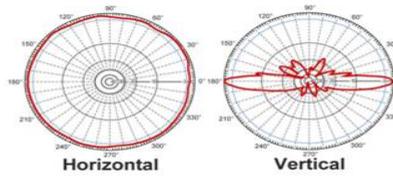


Figura M.1: Patrón de radiación de antena omnidireccional

Para solucionar este problema fue necesario sustituir las antenas omnidireccionales que se estaban utilizando. Para establecer una buena conexión utilizando las mismas es necesario que se mantengan paralelas, algo inviable, ya que el dron está en constante movimiento. La señal se comporta como se observa en la figura, la emisión de las antenas omnidireccionales suele ser uniforme en el plano horizontal con respecto a la misma, pero presenta un carácter anisotrópico con respecto a otros planos [65].

El tipo de antena que resulta más eficiente para el caso a resolver es la de polarización circular con forma de hoja de trébol. Por la forma en que transmiten la señal, permiten más versatilidad en la posición de ambas antenas, sin tener la necesidad de corregir constantemente la posición de la antena del receptor cada vez que el dron realiza un movimiento. A continuación se muestra la disposición de la señal para este tipo de antenas [121].

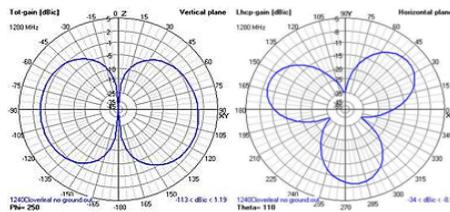


Figura M.2: Patrón de radiación de antena de polarización circular

Luego de corregir los problemas previamente mencionados, la imagen

todavía no había alcanzado la nitidez deseada. Luego de varias pruebas de campo con distintas configuraciones se notó, que no en todos los canales se transmitía la imagen de la misma manera. En la ciudad donde se realizan las pruebas, hay muchos elementos que pueden generar interferencia (postes de luz, vigas de metal, etc). Haciendo un recorrido por todos los canales disponibles se llegó a la conclusión de que aquellos que presentan menos interferencia son el 6 y el 8. Estos fueron los utilizados de aquí en adelante.

M.2.6. Señal de transmisión de datos de telemetría deficiente

Se ejecutó una prueba básica de medición de intensidad de señal con la herramienta 3DR Radio Config con el kit de telemetría, situando la radio de tierra a 1 metro de la radio de aire. Se determinó que la misma fluctuaba entre 120 y 130 RSSI, muy por debajo de 190, que es el valor definido por el fabricante para las condiciones descritas [117]. Para solucionar este problema se cambió el kit de telemetría por otro que ante la misma prueba logró valores entre 190 y 200 RSSI.

M.2.7. Quema de fusible en placa principal del UAV

El Phantom 2 cuenta con una salida auxiliar de energía de 11.1 V, esta se utiliza para suministrar energía a los accesorios adosados al UAV. Esta salida cuenta con 4 cables sin ningún tipo de conector. Un defecto en el aislamiento de las conexiones, generó un cortocircuito, que tuvo como consecuencia la interrupción del suministro de energía a los mismos por parte de la fuente. Gracias a un buen diseño de la placa principal, solo resultó dañada esta salida auxiliar, sin afectar el funcionamiento del resto de la controladora de vuelo.

Para restablecer el suministro energético fue necesario integrar una batería adicional al UAV.

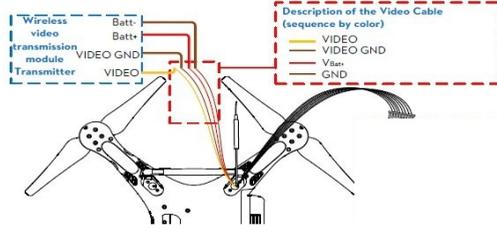


Figura M.3: Salida auxiliar del DJI - Phantom 2

M.3. Accidente con el UAV

Se realizaron varias pruebas del sistema con el prototipo desarrollado, en una de ellas se el piloto perdió el control del mismo y este terminó impactando contra el suelo. A continuación se detalla el incidente.

M.3.1. Descripción del accidente

Estando a una distancia de aproximadamente 50 metros se pierde el control del dispositivo, que primero se alabea hacia la derecha y recorre aproximadamente 20 metros sin responder a los comandos enviados. Posterior a esto el UAV se estabiliza y vuelve a responder parcialmente a los comandos. Pese a esto, entra en una bajada vertical, sin alabeo ni guiñada detectables, hasta que se estrella finalmente contra el piso.

De las observaciones del video generado desde el control de tierra se puede observar un cambio en los indicadores LED del UAV. No se puede apreciar claramente el patrón indicado debido a la distancia a la que se encontraba y la baja resolución del video.

Al momento de la pérdida de control, el dispositivo se encontraba volando a una altura aproximada de 15 metros del suelo, y en una zona con fuerte circulación de aire.

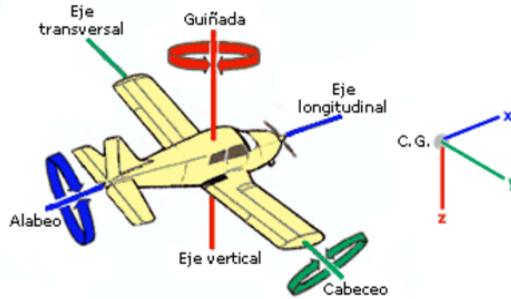


Figura M.4: Rotaciones Aéreas

| Normal status | LED flight indicators | Notes |
|--|-----------------------|--|
| Power On Self-Test | ●●●●● | ---- |
| Warming Up | ●●●●● | Aircraft cannot take off. |
| Ready to Fly | ●●●●● | Slow blinking green. |
| Ready to Fly (non-GPS) | ●●●●● | Slow blinking yellow. |
| Abnormal status | LED flight indicators | |
| Remote Controller Signal Lost | ●●●●● | Fast blinking yellow. Refer to «Fail-safe Function». |
| 1 st Level Low Battery Capacity Warning | ●●●●● | Slow blinking red. |
| 2 nd Level Low Battery Capacity Warning | ●●●●● | Fast blinking red. |
| Not Stationary or Sensor Bias is too big | ●●● | Keep aircraft stationary or perform IMU calibration. |
| Error* | ■■■■■ | Cannot fly. |
| Compass Needs Calibration | ●●●●● | Refer to «Calibrating the Compass». |

Figura M.5: Señales de control del DJI Phantom 2

El piloto relata que pierde el control del aparato, que deja de responder a sus comandos, hasta que se da cuenta que el control del alabeo está invertido. Por estar aproximándose rápidamente a una pared, el piloto envía un comando de alabeo considerando esa “inversión” y logra con éxito que el aparato no se estrelle con la misma. Sin embargo, al intentar controlar la bajada este cree que el control vertical también estaba invertido, enviando

un comando de bajada para intentar que suba, lo cual no surte el efecto deseado, hasta que finalmente impacta contra el suelo.

M.3.2. Conclusiones

Debido al cambio en el patrón de luces indicadoras, queda claro que el UAV sufrió algún tipo de incidencia con sus sistemas de control. Dicha situación volvió al UAV incontrolable por algunos segundos, en los cuales mantuvo la altura pero no la posición. Esta situación se revierte cuando se observa nuevamente el patrón normal de luces, y el piloto manifiesta retomar parcialmente el control del aparato. La desorientación causada por el comportamiento anterior hace que el piloto envíe los comandos inadecuados, hasta que finalmente se estrella contra el suelo.

M.3.3. Consecuencias

El aparato no sufrió desperfectos significativos, a excepción de la rotura del tren de aterrizaje. El servomotor del soporte para la cabeza correspondiente al cabeceo quedó funcionando de manera deficiente, por lo que debió ser reemplazado. El motor de reemplazo no calza perfectamente en el soporte de servomotores, por lo cual se produce vibración al final al momento de detenerse el motor, luego de un movimiento de la cabeza del usuario provisto del Oculus Rift. No obstante, la persistencia de este problema no implica obstáculos a la operatividad del dispositivo.

Bibliografía

- [1] J. Steuer, “Defining Virtual Reality: Dimensions Determining Telepresence,” *Journal of Communication*, vol. 42, no. 4, pp. 73–93, Dec. 1992.
- [2] B. Reeves, “Being there: Television as symbolic versus natural experience,” Unpublished manuscript, Institute for Communication Research, Stanford University, Stanford, CA, 1991.
- [3] “Oculus.” <https://www.oculus.com/en-us/>. [Último acceso: 07-Nov-2015].
- [4] S. Theis, T. Alexander, M. ph Mayer, and M. Wille, “Considering Ergonomic Aspects of Head-Mounted Displays for Applications in Industrial Manufacturing,” in *Digital Human Modeling and Applications in Health, Safety, Ergonomics, and Risk Management. Human Body Modeling and Ergonomics*, V. G. Duffy, Ed. Springer Berlin Heidelberg, 2013, pp. 282–291.
- [5] P. C. Grigore Burdea, “Tecnologías de la realidad virtual / G. Burdea, P. Coiffet ; tr. por Patrick Ducher.”
- [6] R. A. Earnshaw, M. A. Gigante, H. Jones, and International Conference on Virtual Reality Systems, *Virtual reality systems*. London; San Diego: Academic Press, 1993.
- [7] T. M. M. Coelho, “Avatar modeling: a telepresence study with natural user interface,” 2013.

- [8] J. Takatalo, “Presence and flow in virtual environments: An explorative study,” Master’s thesis, University of Helsinki, 2002.
- [9] M. Csikszentmihalyi, *Beyond Boredom and Anxiety: Experiencing Flow in Work and Play*, 25th Anniversary edition. San Francisco: Jossey-Bass, 2000.
- [10] NORMAN, Donald A. *Cognitive engineering. User centered system design: New perspectives on human-computer interaction*, 1986, vol. 3161.
- [11] Discovery Eye Foundation, “20 Facts About the Amazing Eye,” *Discovery Eye Blog*. <https://discoveryeye.org/blog/20-facts-about-the-amazing-eye> [Último acceso: 06-Nov-2015].
- [12] F. Biocca and M. R. Levy, *Communication in the Age of Virtual Reality*. L. Erlbaum Associates, 1995.
- [13] D. A. Bowman, E. Kruijff, J. J. LaViola Jr, and I. Poupyrev, *3D User Interfaces: Theory and Practice*, 1 edition. Addison-Wesley Professional, 2004.
- [14] S. Davis, K. Nesbitt, and E. Nalivaiko, “Comparing the onset of cybersickness using the Oculus Rift and two virtual roller coasters,” *Proceedings of the 11th Australasian Conference on Interactive Entertainment (IE 2015)*, vol. 27, p. 30, 2015.
- [15] W. S. Kim, A. Liu, K. Matsunaga, and L. Stark, “A helmet mounted display for telerobotics,” in *Comcon Spring ’88. Thirty-Third IEEE Computer Society International Conference, Digest of Papers*, 1988, pp. 543–547.
- [16] I. E. Sutherland, “A Head-mounted Three Dimensional Display,” in *Proceedings of the December 9-11, 1968, Fall Joint Computer Conference, Part I*, New York, NY, USA, 1968, pp. 757–764.
- [17] “Actualización 11: Online Pre-Orders Live! • Oculus Rift: Step Into the Game,” *Kickstarter*. <https://www.kickstarter.com/projects/1523379957/oculus-rift-step-into-the-game/posts/316239> [Último acceso: 06-Nov-2015].

- [18] W. Shanklin, “Extended interview: The Oculus Rift, in its creators’ own words.” <http://www.gizmag.com/oculus-rift-interview/38002/> [Último acceso: 06-Nov-2015].
- [19] “Powering the Rift.” <https://www.oculus.com/blog/powering-the-rift> [Último acceso: 06-Nov-2015].
- [20] “The Oculus Rift, Oculus Touch, and VR Games at E3.” <https://www.oculus.com/blog/the-oculus-rift-oculus-touch-and-vr-games-at-e3> [Último acceso: 06-Nov-2015].
- [21] B. A. Davis, K. Bryla, and P. A. Benton, *Oculus Rift in Action*, Edición: 1. Manning Publications, 2015.
- [22] P. James, “A Preview of Oculus’ Newly Licensed Audio Tech Reveals Stunning 3D Sound (download),” *Road to VR*, 08-Sep-2014. <http://www.roadtovr.com/oculus-rift-dk2-realsense-3d-audio-preview-download/> [Último acceso: 07-Nov-2015].
- [23] “The Rift’s Recommended Spec, PC SDK 0.6 Released, and Mobile VR Jam Voting.” <https://www.oculus.com/blog/the-rifts-recommended-spec-pc-sdk-0-6-released-and-mobile-vr-jam-voting> [Último acceso: 06-Nov-2015].
- [24] Sony, “Project Morpheus | PlayStation,” *Playstation*. <https://www.playstation.com/en-us/explore/project-morpheus/> [Último acceso: 07-Nov-2015].
- [25] “HTC Vive,” *HTC Vive*. <http://htcvr.com> [Último acceso: 06-Nov-2015].
- [26] “Developer Center — Home | Oculus.” <https://developer.oculus.com/> [Último acceso: 06-Nov-2015].
- [27] A. Lian, “Unity 5.1 is here! – Unity Blog,” *Unity Technologies Blog*, 09-Jun-2015. <http://blogs.unity3d.com/2015/06/09/unity-5-1-is-here/> [Último acceso: 07-Nov-2015].

- [28] “Virtual Reality technology is evolving rapidly and becoming more powerful and immersive by the day. Even if you’re starting with a simple project to learn VR or AR, build your team, your assets and your workflow around a technology that can deliver on your creative vision - now and in the future.” <https://www.unrealengine.com/vr-page> [Último acceso: 07-Nov-2015].
- [29] J. Feltham, “CryENGINE Gets Oculus Support,” VRFocus. <http://vrfocus.com/archives/17544/cryengine-gets-oculus-support/> [Último acceso: 06-Nov-2015].
- [30] M. Billinghurst, A. Clark, and G. Lee, *A Survey of Augmented Reality*. Now Publishers, 2015.
- [31] G. Caruso and U. Cugini, “Augmented Reality Video See-through HMD Oriented to Product Design Assessment,” in *Virtual and Mixed Reality*, R. Shumaker, Ed. Springer Berlin Heidelberg, 2009, pp. 532–541.
- [32] C. 328 ICAO, “Unmanned Aircraft Systems.” [Último acceso: 06-Nov-2015] http://www.icao.int/Meetings/UAS/Documents/Circular%20328_en.pdf
- [33] A. Lyle, “Air Force officials announce remotely piloted aircraft pilot training...” archive.is. <http://archive.is/Mfp8> [Último acceso: 06-Nov-2015].
- [34] “Policía usará drones en vigilancia.” <http://www.elpais.com.uy/informacion/policia-usara-drones-vigilancia.html> [Último acceso: 23-Nov-2015].
- [35] “Qué puede hacer y qué no un drone en Uruguay.” <http://www.elpais.com.uy/informacion/drones-normativa-volar-uruguay-dinacia.html>. [Último acceso: 06-Nov-2015].
- [36] “Introducing Copter | Copter.” <http://copter.ardupilot.com/wiki/introduction/> [Último acceso: 06-Nov-2015].
- [37] “OpenPilot CopterControl Platform - OpenPilot.org - The Next Generation Open Source UAV Autopilot.” <https://www.openpilot.org>.

- org/products/openpilot-coptercontrol-platform/ [Último acceso: 06-Nov-2015].
- [38] A. Fabio, “Droning On: Choosing a Flight Controller,” Hackaday. <http://hackaday.com/2014/06/06/droning-on-flight-controller-round-up/> [Último acceso: 06-Nov-2015].
- [39] “DJI Developer.” <https://developer.dji.com/mobile-sdk/documentation/> [Último acceso: 06-Nov-2015].
- [40] “MAVLink Micro Air Vehicle Communication Protocol - QGround-Control GCS.” <http://qgroundcontrol.org/mavlink/start> [Último acceso: 06-Nov-2015].
- [41] “Matsemann/oculus-fpv,” GitHub. <https://github.com/Matsemann/oculus-fpv> [Último acceso: 06-Nov-2015].
- [42] C. Ortega Solé, “IMPLEMENTACIÓN DE UN TUNNEL IN THE SKY PARA MICRO UAV,” May 2013.
- [43] M. Slater, V. Linakis, M. Usoh, R. Kooper, and G. Street, “Immersion, presence, and performance in virtual environments: An experiment with tri-dimensional chess,” ACM virtual reality software and technology (VRST), pp. 163–172, 1996.
- [44] E. M. Kolasinski, “Simulator Sickness in Virtual Environments.,” May 1995.
- [45] M. Anvari, T. Broderick, H. Stein, T. Chapman, M. Ghodoussi, D. W. Birch, C. Mckinley, P. Trudeau, S. Dutta, and C. H. Goldsmith, “The impact of latency on surgical precision and task completion during robotic-assisted remote telepresence surgery” Computer Aided Surgery, vol. 10, no. 2, pp. 93–99, Jan. 2005.
- [46] “Variation and extrema of human interpupillary distance.” <http://www.cl.cam.ac.uk/~nad10/pubs/EI5291A-05.pdf> [Último acceso: 07-Nov-2015].
- [47] “Adaptador Conversor Capturadora de Audio y Vídeo RCA Compuesto S-Video a USB - Convertidor,” StarTech.com España.

- <http://www.startech.com/AV/Converters/Video/USB-S-Video-and-Composite-Video-Capture-Device-Cable-with-Audio~SVID2USB2> [Último acceso: 06-Nov-2015].
- [48] Boscam. “RC805.” <http://www.boscam.cn/ProductDetails.aspx?id=32> [Último acceso: 06-Nov-2015].
- [49] “Boscam TR1 FPV All-In-One Camera and 5.8 GHz Transmitter with Video recorder,” HobbyKing Store. http://hobbyking.com/hobbyking/store/uh_viewitem.asp?idproduct=56990 [Último acceso: 06-Nov-2015].
- [50] “Dynamixel AX-12A Robot Actuator from Robotis” <http://www.trossenrobotics.com/dynamixel-ax-12-robot-actuator.aspx> [Último acceso: 06-Nov-2015].
- [51] “Arduino - ArduinoBoardMega2560” <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardMega2560> [Último acceso: 06-Nov-2015].
- [52] M. Garin, “Understanding Your Depth Perception,” EyeHealthWeb.com. <http://www.eyehhealthweb.com/depth-perception/> [Último acceso: 06-Nov-2015].
- [53] “VRWiki - Oculus Rift Development Kit 2.” <https://vrwiki.wikispaces.com/Oculus+Rift+Development+Kit+2> [Último acceso: 06-Nov-2015].
- [54] J. A. Smith and J. Jivraj, “Analysis of Robotis Dynamixel AX-12+ Actuator Latencies,” Nov. 2010.
- [55] “Copter | UAV Multirrotor.” <http://copter.ardupilot.com/> [Último acceso: 06-Nov-2015].
- [56] “Phantom 2 - Specs | DJI,” CreateDJI. <http://www.dji.com/product/phantom-2/spec> [Último acceso: 06-Nov-2015].
- [57] Amazon. “Fatshark 3-Axis Pan Tilt And Roll Camera Mount System.” <http://www.amazon.com/gp/product/B00M36WGD8> [Último acceso: 06-Nov-2015].

- [58] “common-APM 2.5 and 2.6 Overview | Copter.” <http://copter.ardupilot.com/wiki/common-apm25-and-26-overview/> [Último acceso: 06-Nov-2015].
- [59] “common-3DR Power Module | Copter.” <http://copter.ardupilot.com/wiki/common-3dr-power-module/> [Último acceso: 07-Nov-2015].
- [60] “Turnigy 1000mAh 3S 20C Lipo Pack,” HobbyKing Store. http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/uh_viewitem.asp?idproduct=9163 [Último acceso: 06-Nov-2015].
- [61] Dan Crawford, DJI Phantom Test Flight High Payload. <https://www.youtube.com/watch?v=BmiEIsndCrA>. [Último acceso: 06-Nov-2015].
- [62] “Phantom 2 max payload? | DJI Phantom Forum.” <http://www.phantompilots.com/threads/phantom-2-max-payload.24919/> [Último acceso: 06-Nov-2015].
- [63] “Developer Center — Documentation and SDKs | Oculus.” https://developer.oculus.com/documentation/intro-vr/latest/concepts/bp_app_imaging/ [Último acceso: 06-Nov-2015].
- [64] National Television System Committee, Report and Reports of Panel No. 11, 11-A, 12-19: with Some supplementary references cited in the Reports, and the Petition for adoption of transmission standards for color television before the Federal Communications Commission. 1953.
- [65] J. Monsalve, “Antenas una explicación de su funcionamiento (II),” [diarioelectronicohoy.com. http://www.diarioelectronicohoy.com/antenas-una-explicacion-de-su-funcionamiento-ii/](http://www.diarioelectronicohoy.com/antenas-una-explicacion-de-su-funcionamiento-ii/) [Último acceso: 06-Nov-2015].
- [66] avayan, “Understanding PWM | EBLDC.COM,” 29-Aug-2009. <http://ebldc.com/?p=48> [Último acceso: 06-Nov-2015].

- [67] “3DR Radio Telemetry - Geeetech Wiki.” http://www.geeetech.com/wiki/index.php/3DR_Radio_Telemetry [Último acceso: 06-Nov-2015].
- [68] “Developers — Build The Future | Oculus.” https://developer.oculus.com/downloads/pc/0.6.0.1-beta/Oculus_SDK_for_Windows/ [Último acceso: 06-Nov-2015].
- [69] “Developer Center — Downloads | Oculus.” <https://developer.oculus.com/downloads/> [Último acceso: 06-Nov-2015].
- [70] “SharpOVR.” <https://nuget.org/packages/SharpOVR/> [Último acceso: 06-Nov-2015].
- [71] “Developers — Build The Future | Oculus.” https://developer.oculus.com/downloads/mobile/0.8.0.0/Unity_4.x_Legacy_Integration/ [Último acceso: 06-Nov-2015].
- [72] “Unity - Manual: Unity Manual.” <http://docs.unity3d.com/Manual/index.html> [Último acceso: 07-Nov-2015].
- [73] “NGA: DoD World Geodetic System 1984.” http://earth-info.nga.mil/GandG/publications/tr8350.2/tr8350_2.html [Último acceso: 06-Nov-2015].
- [74] “Distancia geodésica entre dos puntos,” May-2009. <http://noseii.site50.net/distancia-geodesica-entre-dos-puntos/> [Último acceso: 06-Nov-2015].
- [75] “Mission Planner | Estación de Tierra.” <http://planner.ardupilot.com/> [Último acceso: 06-Nov-2015].
- [76] K. Kunze and H. Schaeben, “The Bingham Distribution of Quaternions and Its Spherical Radon Transform in Texture Analysis,” *Mathematical Geology*, vol. 36, no. 8, pp. 917–943, Nov. 2004.
- [77] NICHI. <http://nichi.edu.uy/> [Último acceso: 06-Nov-2015].

- [78] “Phantom 2 Vision+ Preparing the Battery - DJI Wiki.” http://wiki.dji.com/en/index.php/Phantom_2_Vision%2B_Preparing_the_Battery [Último acceso: 06-Nov-2015].
- [79] R. Likert, “A technique for the measurement of attitudes,” *Archives of Psychology*, vol. 22 140, p. 55, 1932.
- [80] J. Brooke, “SUS-A quick and dirty usability scale,” *Usability evaluation in industry*, vol. 189, no. 194, pp. 4-7, 1996.
- [81] C. Jennett, A. L. Cox, P. Cairns, S. Dhoparee, A. Epps, T. Tijs, and A. Walton, “Measuring and defining the experience of immersion in games,” *International Journal of Human-Computer Studies*, vol. 66, no. 9, pp. 641–661, Sep. 2008.
- [82] R. S. Kennedy, N. E. Lane, K. S. Berbaum, and M. G. Lilienthal, “Simulator Sickness Questionnaire: An Enhanced Method for Quantifying Simulator Sickness,” *The International Journal of Aviation Psychology*, vol. 3, no. 3, pp. 203–220, Jul. 1993.
- [83] E. L.-C. Law, P. van Schaik, and V. Roto, “Attitudes towards user experience (UX) measurement,” *International Journal of Human-Computer Studies*, vol. 72, no. 6, pp. 526–541, Jun. 2014.
- [84] “Zero Latency Wireless Video | Connex by Amimon.” <http://connex.amimon.com/ZeroLatency> [Último acceso: 07-Nov-2015].
- [85] “G-3D for Gopro.” <http://www.walkera.com/En/Products/GimbalsCamera/G-3DforGopro/>. [Último acceso: 06-Nov-2015].
- [86] “common-Pixhawk Overview | Copter.” <http://copter.ardupilot.com/wiki/common-pixhawk-overview/>. [Último acceso: 06-Nov-2015].
- [87] “Leap Motion | Mac and PC Motion Controller for Games, Design, Virtual Reality and More.” <https://www.leapmotion.com/> [Último acceso: 07-Nov-2015].

- [88] “Kinect - Windows app development.” <https://dev.windows.com/en-us/kinect> [Último acceso: 07-Nov-2015].
- [89] F. Ruotolo, L. Maffei, M. Di Gabriele, T. Iachini, M. Masullo, G. Ruggiero, and V. P. Senese, “Immersive virtual reality and environmental noise assessment: An innovative audio-visual approach,” *Environmental Impact Assessment Review*, vol. 41, pp. 10–20, Jul. 2013.
- [90] “Arduflyer/APM/Fixhawk/Pixhawk/Mini Arduflyer Power Module XT60 Kit.” <http://rctimer.com/product-1125.html> [Último acceso: 06-Nov-2015].
- [91] MSI. “Notebook - The best gaming notebook provider.” http://www.msi.com/product/notebook/GT70_0NC.html#hero-overview [Último acceso: 06-Nov-2015].
- [92] “915Mhz Radio Telemetry Kit.” <http://rctimer.com/product-817.html>. [Último acceso: 06-Nov-2015].
- [93] FPV Clover Leaf Omni-Directional Circular Polarized 5.8 GHz Video/Audio Antenna. <http://www.amazon.com/gp/product/B00IEXBARC> [Último acceso: 06-Nov-2015].
- [94] J. Feltham, “Iribe: Over 100,000 Oculus Rift DK2s Shipped,” VRFocus. <http://vrfocus.com/archives/11676/iribe-100000-oculus-rift-dk2s-shipped/> [Último acceso: 06-Nov-2015].
- [95] IGN Reacts -John Carmack Makes Virtual Reality Actually Cool - E3 2012 - IGN Video. <http://www.ign.com/videos/2012/06/06/ign-reacts-john-carmack-makes-virtual-reality-actually-cool-with-new-head-tracking-device-e3-2012> [Último acceso: 06-Nov-2015].
- [96] W. Oli, “John Carmack and the Virtual Reality Dream,” Eurogamer.net, 06-Jul-2012. <http://www.eurogamer.net/articles/2012-06-07-john-carmack-and-the-virtual-reality-dream> [Último acceso: 07-Nov-2015].

- [97] G. Kumparak, "A Brief History Of Oculus," TechCrunch. <http://social.techcrunch.com/2014/03/26/a-brief-history-of-oculus/> [Último acceso: 06-Nov-2015].
- [98] "Update on Developer Kit Technology, Shipping Details." <https://www.oculus.com/blog/update-on-developer-kit-technology-shipping-details> [Último acceso: 06-Nov-2015].
- [99] "Oculus Rift: Step Into the Game," Kickstarter. <https://www.kickstarter.com/projects/1523379957/oculus-rift-step-into-the-game> [Último acceso: 06-Nov-2015].
- [100] B. Lang, "Road to VR - Virtual Reality News," Road to VR, 06-Nov-2015. <http://www.roadtovr.com/> [Último acceso: 07-Nov-2015].
- [101] M. Clark, "E3 2013: New 1080p Oculus Rift with Unreal Engine 4," IGN, 11-Jun-2013. <http://www.ign.com/articles/2013/06/11/hands-on-new-1080p-oculus-rift-with-unreal-engine-4> [Último acceso: 07-Nov-2015].
- [102] S. Hollister, "Oculus reveals Crystal Cove prototype virtual reality headset with intriguing OLED display," The Verge. <http://www.theverge.com/2014/1/7/5284918/oculus-rift-crystal-cove> [Último acceso: 06-Nov-2015].
- [103] "Announcing the Oculus Rift Development Kit 2 (DK2)." <https://www.oculus.com/blog/announcing-the-oculus-rift-development-kit-2-dk2> [Último acceso: 06-Nov-2015].
- [104] B. Lang, "GDC 2014: Oculus Rift Developer Kit 2 (DK2) Release Date and Pre-order," Road to VR, 19-May-2014. <http://www.roadtovr.com/oculus-rift-developer-kit-2-dk2-pre-order-release-date-specs-gdc-2014/> [Último acceso: 07-Nov-2015].
- [105] C. Welch, "New Oculus Rift dev kit uses the front of a Galaxy Note 3 as its screen," The Verge. <http://www.theverge.com/2014/>

- 7/31/5956589/new-oculus-dev-kit-uses-front-of-galaxy-note-3-for-display [Último acceso: 06-Nov-2015].
- [106] C. Welch, “Facebook buying Oculus VR for 2 billion,” The Verge. <http://www.theverge.com/2014/3/25/5547456/facebook-buying-oculus-for-2-billion> [Último acceso: 06-Nov-2015].
- [107] E. Mailberg, “Oculus Unveils New Crescent Bay Rift Model With Integrated Audio, 360 Tracking,” GameSpot, 20-Sep-2014. <http://www.gamespot.com/articles/oculus-unveils-new-crescent-bay-rift-model-with-in/1100-6422451/> [Último acceso: 07-Nov-2015].
- [108] D. Bohn, “The Oculus Crescent Bay is a two-screen VR headset,” The Verge. <http://www.theverge.com/2015/3/13/8212205/oculus-crescent-bay-two-screen-vr-headset-palmer-luckey> [Último acceso: 06-Nov-2015].
- [109] “First Look at the Rift, Shipping Q1 2016.” <https://www.oculus.com/blog/first-look-at-the-rift-shipping-q1-2016> [Último acceso: 06-Nov-2015].
- [110] M. Futter, “Oculus CEO More Fully Explains Pricing, Talks Rift Life Cycle,” [www.GameInformer.com](http://www.gameinformer.com), 22-Jun-2015. <http://www.gameinformer.com/b/news/archive/2015/06/22/oculus-brendan-iribe-on-the-rift-s-price-and-expected-life-cycle.aspx> [Último acceso: 07-Nov-2015].
- [111] W. Mason, “Oculus Already Working on the Second Consumer Version of the Rift, Says Palmer Luckey,” UploadVR. <http://uploadvr.com/oculus-rift-cv2-palmer/> [Último acceso: 06-Nov-2015].
- [112] L. Orsini, “How Oculus Rift Intends To Solve ‘Simulator Sickness,’” ReadWrite. <http://readwrite.com/2014/03/28/oculus-rift-motion-simulator-simulation-sickness> [Último acceso: 06-Nov-2015].

- [113] “Aplicaciones y usos :: inteligencia DYNAMICS.” http://www.iuavs.com/pages/aplicaciones_y_usos [Último acceso: 06-Nov-2015].
- [114] B. Handwerk, “5 Surprising Drone Uses (Besides Amazon Delivery),” National Geographic News, Dec-2013. <http://news.nationalgeographic.com/news/2013/12/131202-drone-uav-uas-amazon-octocopter-bezos-science-aircraft-unmanned-robot/> [Último acceso: 06-Nov-2015].
- [115] “Todo sobre los drones del Ministerio del Interior | PRO Universitarios.” <http://pro-universitarios.com/featured/todo-sobre-ldrone-del-ministerio-del-interior/> [Último acceso: 06-Nov-2015].
- [116] “BetterView” <http://www.better.vu> [Último acceso: 06-Nov-2015].
- [117] “common-3DR Radio — Advanced Configuration | Copter.” <http://copter.ardupilot.com/wiki/common-3dr-radio-advanced-configuration-and-technical-information> [Último acceso: 06-Nov-2015].
- [118] J. Diebel, “Representing Attitude: Euler Angles, Unit Quaternions, and Rotation Vectors,” Matrix, vol. 58, 2006.
- [119] “Aircraft Rotations” <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/rotations.html> [Último acceso: 06-Nov-2015].
- [120] “Baterias LiPo | Erle Robotics: Erle-copter” <https://erlerobotics.gitbooks.io/erle-robotics-erle-copter/content/es/safety/lipo.html> [Último acceso: 06-Nov-2015].
- [121] “FPV Antenna Selection | Video Aerial Systems, LLC.” <http://videoaerialsystems.com/how-to-choose-an-antenna/> [Último acceso: 06-Nov-2015].