

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Aerospaziale

Tesi di Laurea Magistrale

**Digitalizzazione di procedure operative per l'addestramento
del personale aeronautico in ambiente di realtà virtuale**



Relatore
Prof. Giorgio Guglieri

Candidato
Lorenzo Fava

Tutor Aziendale
Dott. Michele Sesana

Anno Accademico 2019/2020

Sommario

Il costante sviluppo delle tecnologie informatiche ed elettroniche ha permesso al settore della realtà virtuale di espandersi molto rapidamente in tutti i campi, tra i quali la medicina, l'*automotive* e in particolare quello aerospaziale. I più moderni *software* di grafica computerizzata consentono di sviluppare ambienti tridimensionali rappresentativi, ad esempio, cabine di pilotaggio, interi velivoli e persino stazioni spaziali. All'interno di tali ambienti, l'utente può interagire con gli elementi presenti nella simulazione immersiva per mezzo di specifici dispositivi, come i moderni visori per la realtà virtuale e i telecomandi dedicati, e ad esempio eseguire processi proceduralizzati analoghi a quelli riscontrabili nel campo aeronautico. Il lavoro proposto da tale relazione si pone l'obiettivo di sviluppare un ambiente di realtà virtuale interattivo che rappresenti la cabina di pilotaggio del velivolo Airbus A320, di analizzare e digitalizzare alcune tra le tante procedure operative che i piloti svolgono durante le fasi di servizio. Durante lo sviluppo del progetto, unitamente ad altri *software* per la *computer grafica*, è stato utilizzato *WEAVR*, una piattaforma per la costruzione, *deployment* e utilizzo di realtà virtuale sviluppata da *TXT e-solutions SpA* e commercializzata dalla controllata *PACE GmbH*. Il *tool* permette di sviluppare procedure di addestramento in modo visuale e convertirle in applicativi *software* per la *Virtual Reality*. Le procedure possono essere usufruite tramite visori per la realtà virtuale come l'*HTC Vive Pro* utilizzato nel corso di questo progetto. La simulazione virtuale può essere statica o dinamica, e permette di svolgere attività che altrimenti l'utilizzatore dovrebbe eseguire sulle controparti reali. Questo consente alle aziende del settore, come le compagnie aeree, di operare attività di varia natura, tra cui quella formativa, attraverso simulazioni virtuali che non richiedono l'impiego di velivoli o macchine reali le quali, per essere acquistate e mantenute per la sola attività di addestramento, richiederebbero un enorme investimento risultando comunque improduttive. La realtà virtuale è quindi un elemento di estrema importanza volto ad aumentare l'efficacia della formazione riducendo considerevolmente i costi.

Nei capitoli iniziali al lettore sarà illustrata la storia che ha portato all'evoluzione temporale dei dispositivi per la realtà virtuale, fino a giungere allo stato dell'arte rappresentato dai sistemi odierni. In seguito sarà approfondito il lavoro svolto durante questo progetto con una breve introduzione ai *software* e *hardware* utilizzati. Successivamente sarà trattato il capitolo dedicato al velivolo Airbus A320 e alla descrizione del *flight deck*. L'elaborato termina con il capitolo riguardante le procedure implementate nell'ambiente virtuale, alla presentazione dei risultati raggiunti e i possibili sviluppi futuri.

Indice

1 – INTRODUZIONE	1
2 – CENNI STORICI	9
3 – STATO DELL'ARTE	16
3.1 – TECNICHE DI ADDESTRAMENTO	16
3.1.1 – <i>COMPUTER BASED TRAINING</i>	17
3.1.2 – <i>VIRTUAL TRAINING</i>	19
3.2 – STATO DELL'ARTE – <i>HARDWARE</i>	20
3.2.1 – INTRODUZIONE AI SISTEMI PER LA REALTÀ VIRTUALE	20
3.2.2 – VISORE PER LA REALTÀ VIRTUALE	21
3.2.3 – TELECOMANDI TRACCIABILI	24
3.2.4 – STATO DELL'ARTE E LIMITI FISICI	26
4 – <i>SOFTWARE E HARDWARE UTILIZZATI</i>	34
4.1 – <i>UNITY</i>	34
4.2 – <i>SCENEFUSION</i>	38
4.3 – <i>HTC VIVE PRO</i>	38
4.4 – <i>STEAM VR</i>	41
4.5 – <i>WEAVR</i>	42
5 – <i>AIRBUS</i>	47
5.1 – <i>AIRBUS A320</i>	48
5.1.1 – SISTEMI DI BORDO DEL VELIVOLO AIRBUS A320	49
5.1.2 – <i>FRONT PANEL</i>	51
5.1.3 – <i>PEDESTAL</i>	62
5.1.4 – <i>OVERHEAD PANEL</i>	73
6 – <i>PROCEDURE AERONAUTICHE</i>	75
6.1 – <i>PROCEDURE DI FAMILIARIZZAZIONE E OPERATIVE</i>	77
6.1.1 – PROCEDURA DI FAMILIARIZZAZIONE CON IL <i>FLIGHT DECK</i> <i>A320 COCKPIT INSPECTION</i>	78
6.1.2 – PROCEDURA DI FAMILIARIZZAZIONE CON I SISTEMI DI BORDO <i>COCKPIT TRAINING</i>	86
6.1.3 – PROCEDURA DI <i>AFTER START</i>	92
6.1.4 – PROCEDURA DI <i>AFTER LANDING</i>	100
7 – <i>CONCLUSIONI</i>	105
NOMENCLATURA	109
BIBLIOGRAFIA	112
SITOGRAFIA	114

Indice delle figure

Figura 1 - Definizione di realtà virtuale secondo <i>Zeltzer</i> (1992).	4
Figura 2 - Esempio di applicazione di realtà aumentata.	6
Figura 3 - Esempio di applicazione di realtà mista.	6
Figura 4 - Simulatore di volo <i>full scale</i> del velivolo Airbus A320.	8
Figura 5 - Rappresentazione grafica del <i>Sensorama</i> .	10
Figura 6 - Foto d'epoca del dispositivo <i>Sword of Damocle</i> .	10
Figura 7 - Dispositivo GROPE (1971).	11
Figura 8 - Schema funzionale del laboratorio <i>Videoplace</i> .	11
Figura 9 - Dispositivo <i>EyePhone</i> e <i>Dataglove</i> .	12
Figura 10 - Dispositivo BOOM.	13
Figura 11 - Prima versione dell' <i>headset Oculus Rift</i> .	14
Figura 12 - Esempio di schermata di CBT per il sistema del carrello di atterraggio triciclo di un generico velivolo.	18
Figura 13 - Interfaccia grafica del SAMT sviluppato da <i>The DiSTI Corporation</i> (<i>fair use</i>).	19
Figura 14 - Dispositivo <i>Oculus Rift CV 1</i> , telecomandi e <i>base stations</i> per il rilevamento dei movimenti.	21
Figura 15 - Vista ai raggi X dell' <i>headset HTC Vive Pro</i> per la visualizzazione dei componenti interni.	22
Figura 16 - Sistemazione delle <i>base stations</i> per il tracciamento di <i>headset</i> e <i>controllers</i> .	23
Figura 17 - <i>HP Reverb controllers</i> .	24
Figura 18 - <i>Haptic Gloves</i> dell'azienda <i>Haptx</i> .	25
Figura 19 - Pedana <i>Virtuix Omni</i> per muoversi fisicamente convertendo lo spostamento reale in moto nell'ambiente virtuale.	26
Figura 20 - Vista ingrandita di uno schermo in cui è possibile osservare i tre <i>subpixels</i> costituenti il singolo <i>pixel</i> RGB.	27
Figura 21 - <i>Aspect Ratio</i> su schermi di ugual dimensione.	28
Figura 22 - Rappresentazione grafica dell'unità di misura <i>Pixel Per Inch</i> .	29
Figura 23 - Minimo angolo di risoluzione.	30
Figura 24 - Immagine esplicativa dell'unità di misura <i>Pixels Per Degree</i> .	32

Figura 25 - Interfaccia principale di <i>Unity</i> .	34
Figura 26 - Esempio di gerarchia in <i>Unity</i> .	35
Figura 27 - Componente <i>Transform</i> .	35
Figura 28 - Esempi di componenti di un oggetto.	36
Figura 29 - Cartelle di progetto.	37
Figura 30 - Sistema completo per la realtà virtuale HTC <i>Vive Pro</i> .	39
Figura 31 - <i>Controller</i> per HTC <i>Vive Pro</i> .	40
Figura 32 - <i>Base stations</i> per HTC <i>Vive Pro</i> .	40
Figura 33 - <i>Teleport Point</i> (al centro, di forma circolare) e <i>Teleport Area</i> (delimitata dai segmenti blu).	43
Figura 34 - Esempio di nodo.	44
Figura 35 - Esempio di transizione con una serie di istruzioni assegnata.	45
Figura 36 - Esempio di <i>Hub Node</i> .	45
Figura 37 - Airbus Logo.	47
Figura 38 - Airbus A320.	48
Figura 39 - Cabina di pilotaggio dell'Airbus A320.	50
Figura 40 - <i>Glass Cockpit</i> del velivolo Airbus A320.	51
Figura 41 - EADI: <i>Electronic Attitude Direction Indicator</i> del velivolo Airbus A320.	53
Figura 42 - <i>Multifunctional Display</i> nella configurazione di <i>Navigation Display</i> .	55
Figura 43 - <i>Electronic Centralized Aircraft Monitoring Displays</i> .	56
Figura 44 - <i>Landing Gear Lever</i> (a sinistra) e <i>Landing Gear and Brakes</i> <i>Panel</i> (a destra).	58
Figura 45 - CPDLC <i>Panel</i> .	59
Figura 46 - VOR DME.	60
Figura 47 - <i>Standby attitude indicator</i> .	61
Figura 48 - Leva del carrello e <i>accumulator brakes pressure indicator</i> .	61
Figura 49 - <i>Timer and clock display</i> .	62
Figura 50 - <i>Multipurpose Control Display Unit</i> del velivolo A320.	64
Figura 51 - ECAM <i>Panel</i> e <i>Multipurpose Switching Panel</i> del velivolo A320.	65
Figura 52 - <i>Radio Management Panel</i> .	66
Figura 53 - <i>Audio Control Panel</i> .	67
Figura 54 - <i>Weather Radar Control Panel</i> .	67

Figura 55 - TCAS / ATC <i>Transponder Control Panel</i> . _____	69
Figura 56 - Leva per il controllo degli ipersostentatori dell'Airbus A320. _____	70
Figura 57 - Manette dei propulsori, regolatori per il trim di stabilizzatore e pannello di accensione dei propulsori. _____	72
Figura 58 - <i>Overhead panel</i> completo. _____	74
Figura 59 - Vista frontale del <i>cockpit</i> nella simulazione in realtà virtuale su <i>Unity</i> . _____	77
Figura 60 - Procedura completa <i>A320 Cockpit Inspection</i> . _____	80
Figura 61 - Primo <i>step</i> della procedura. _____	81
Figura 62 - Successione di <i>steps</i> per la comparsa e successiva scomparsa delle <i>billboards</i> . _____	81
Figura 63 - Comparsa della <i>billboard</i> esplicativa. _____	82
Figura 64 - Esempio di <i>tick</i> sul <i>display</i> dell'ECAM. _____	83
Figura 65 - Sottoprocedura di comparsa delle <i>billboards</i> per l'ECAM <i>Switching Panel, Parking Brake Panel e Instrument Light Panel</i> . ____	83
Figura 66 - Sottoprocedura per la comparsa delle <i>billboards</i> per il <i>Landing</i> <i>Gear and Brake Panel</i> . _____	85
Figura 67 - Sottoprocedura per la visualizzazione delle <i>billboards</i> relative ai pannelli di illuminazione. _____	85
Figura 68 - Esempio di comparsa sequenziale delle <i>billboards</i> . _____	86
Figura 69 - Pagina principale. _____	87
Figura 70 - Pagina di <i>Help</i> . _____	87
Figura 71 - Menù dei sistemi. _____	88
Figura 72 - Elenco dei componenti relativi al <i>Navigation System</i> . _____	88
Figura 73 - Procedura di familiarizzazione con i sistemi. _____	90
Figura 74 - <i>Step</i> iniziale. _____	91
Figura 75 - <i>Steps</i> procedurali per l' <i>After Start</i> del velivolo. _____	93
Figura 76 - <i>Billboard</i> di benvenuto all'avvio della procedura di <i>After Start</i> . ____	93
Figura 77 - <i>Steps</i> della procedura di <i>After Start</i> sull'EFB. _____	94
Figura 78 - Vista parziale dello <i>step</i> di <i>reset</i> relativo alla procedura di <i>After Start</i> . _____	95
Figura 79 - Esempio di <i>billboard</i> che mostra all'utente il compito da eseguire. _	97
Figura 80 - <i>Checklist</i> di <i>After Start</i> per il velivolo Airbus A320. _____	99
Figura 81 - <i>Billboard</i> di benvenuto per la procedura di <i>After Landing</i> . _____	101

Figura 82 - *Billboard* che mostra all'utente lo *step* corrente da eseguire. _____ 102

Figura 83 - *Checklist* di *After Landing* per il velivolo Airbus A320. _____ 104

Indice delle tabelle

Tabella 1 - Comparazione dei principali <i>headsets</i> moderni. _____	33
Tabella 2 - <i>Steps</i> procedurali per l' <i>After Start</i> del velivolo. _____	92
Tabella 3 - <i>Steps</i> procedurali per l' <i>After Landing</i> del velivolo. _____	100

1 – Introduzione

Il mondo dell'aviazione ha conosciuto dalla sua nascita una costante evoluzione tecnologica che spesso anticipa quella di altri settori dell'industria e del commercio. In questo ambito si creano le basi per lo sviluppo di tecnologie che trovano successivamente applicazione ad esempio nel campo dell'*automotive*, delle costruzioni e del *design*. Da qui nascono quindi gli stimoli affinché altri settori tecnologici riescano ad accrescere le proprie competenze per offrire a loro volta soluzioni adeguate alla domanda di un settore ad alto progresso tecnologico come quello aerospaziale. Nel corso dei decenni, la crescente complessità tecnologica dei velivoli moderni ha reso indispensabile un continuo sviluppo di modelli matematici e fisici sempre più elaborati per rappresentare adeguatamente il loro comportamento e quello dei relativi sistemi di bordo. Tali modelli sono impiegati per la progettazione dei velivoli tenendo sempre in considerazione altri aspetti non meno importanti, come quello economico e della sicurezza. Ciò ha portato a una crescente integrazione multidisciplinare che ha coinvolto in modo significativo i settori dell'elettronica e dell'informatica.

L'enorme progresso in questi settori ha contribuito ad accrescere le *performance* dei velivoli aeronautici e spaziali di ogni tipologia. La capacità di gestire elevate quantità di dati e calcoli si è rivelata necessaria per perfezionare tutto ciò che concerne il sistema aeromobile, i servizi e le infrastrutture che questo richiede per operare durante il suo ciclo di vita. Per citare alcuni esempi di integrazione multidisciplinare, l'informatica ha permesso lo sviluppo della fluidodinamica computazionale, utilizzata per ottimizzare la geometria dei velivoli aumentandone le prestazioni aerodinamiche, mentre l'elettronica ha consentito la progettazione di sofisticati sistemi sensoristici che consentono una migliore *situation awareness*, ovvero la percezione di elementi ed eventi ambientali in tempo reale, la loro comprensione e le loro possibili evoluzioni temporali.

L'informatica e l'elettronica hanno altresì consentito lo sviluppo delle tecnologie di simulazione, usate in campo aeronautico sin dalla loro nascita, per rendere predicibili il comportamento del velivolo nel suo inviluppo di volo, la sua gestione in termini manutentivi e logistici, e l'interazione uomo-macchina. Con la crescente potenza di calcolo messa a disposizione dai più moderni elaboratori è stato possibile implementare nel corso degli anni *software* in grado di rappresentare sempre più fedelmente il comportamento di sistemi complessi in termini di dinamica del volo. Tali *software* simulano le traiettorie, i consumi e in generale le performance al variare dei parametri caratterizzanti l'aereo, con riferimento particolare a quelli relativi alla disciplina della meccanica del volo. Il campo della simulazione si è esteso negli ultimi anni anche ad ambiti non strettamente legati al volo del velivolo in sé, ma relativi ad altre fasi di vita del mezzo, del suo equipaggio e di tutto il personale che presta servizio per mantenere operativa la macchina. In particolare, si fa riferimento al campo della manutenzione e dell'addestramento del personale, dei piloti, degli assistenti di volo e dei tecnici manutentori. È proprio in questo settore che negli ultimi anni l'azienda TXT *e-solutions*¹ impiega le sue energie per fornire soluzioni in grado di rendere sempre più rapido ed efficace l'addestramento del personale aeronautico come illustrato dal lavoro oggetto di questo elaborato.

A causa dell'elevata complessità di un velivolo e dell'alto numero di componenti e sistemi presenti, si è reso necessario proceduralizzare tutte le operazioni svolte, ovvero scomporre l'intera attività, qualunque essa sia, in singoli *step* che, se eseguiti in una sequenza ben precisa, garantiscono la riuscita dell'operazione diminuendo fortemente il carico di lavoro mentale dell'utilizzatore e il tempo di esecuzione, rendendo quindi più sicura ed economica l'attività svolta. Questi ultimi due aspetti non sono i soli ad aver reso necessaria la proceduralizzazione di tutte le attività svolte in campo aeronautico, infatti è ben noto che molti incidenti aerei sono conseguenza di scarsa pianificazione, assenza di organizzazione sotto forma di procedure e sottovalutazione dei rischi. Con la crescente complessità dei sistemi industriali, per rendersi conto del perché si tenda a proceduralizzare ogni

¹ <https://www.txtgroup.com/it/>

tipologia di intervento sulla macchina, basti pensare che mediamente un'automobile è composta dai diecimila ai trentamila componenti, mentre un velivolo di medie dimensioni dai centomila ai cinquecentomila. Questa evidente complessità rende indispensabile lo sviluppo di sistemi tecnologici in grado di gestire e supportare l'enorme quantità di informazioni e rendere più agevoli ed efficaci le attività ad essi correlate.

Negli ultimi anni la tecnologia informatica e lo sviluppo di hardware sempre più performanti hanno portato all'elaborazione di *software* che riproducono la cosiddetta realtà virtuale, spesso abbreviata con la terminologia inglese VR, ossia *Virtual Reality*. Il termine "realtà virtuale" è utilizzato per descrivere la creazione di un'esperienza simulata parziale o completa del mondo reale, il cui scopo è di immergere sensorialmente l'utente in questo ambiente distaccandolo quasi completamente dalla realtà fisica così da permettergli di concentrarsi esclusivamente sull'ecosistema dentro il quale si trova.

Il termine realtà virtuale è ben noto e può essere definito nei seguenti modi, come riportato da Mazuryk e Gervautz (1999) [1.1] e tradotto di seguito:

- "Grafica a modelli tridimensionali interattiva in tempo reale, combinata con una tecnologia *display* che permette all'utente l'immersione nell'ambiente modellato e la manipolazione diretta dello stesso" come riportato da Fuchs, Bishop et al. (1992) [1.6];
- "L'illusione della partecipazione a un ambiente sintetico piuttosto che l'osservazione dello stesso dall'esterno. La *Virtual Reality* si basa sull'utilizzo di un *display head-tracker* che segue i movimenti del capo in modo tridimensionale e stereoscopico, il tracciamento dei movimenti di braccia e corpo e la riproduzione binaurale dei suoni. La VR è un'esperienza immersiva multisensoriale" (Gigante, 1993) [1.7];
- "Simulazione informatica che fa uso di grafica 3D e di appositi dispositivi che permettono all'utente di interagire con essa" (Jargon, 1995) [1.8];

- “Il termine Realtà Virtuale si riferisce a un ambiente generato da *computer* che sia immersivo, interattivo, multisensoriale, centrato sull’utente e tridimensionale, e nella combinazione delle tecnologie necessarie a costruire questi ambienti”, come espresso da Cruz-Neira (1993) [1.9];
- Come riportato da Von Schweber L. and E. (1995) [1.10] “la realtà virtuale consente di navigare e visualizzare un mondo tridimensionale in tempo reale, a 6 gradi di libertà. Sostanzialmente, la realtà virtuale è un clone della realtà fisica”.

Secondo invece la definizione di Zeltzer (1992) [1.11], dato un ambiente 3D simulato le cui caratteristiche sono descritte da un cubo posto in uno spazio cartesiano tridimensionale che ha sui tre assi, in una scala da 0 a 1, la presenza dell’utente, la possibilità di interazione e l’autonomia di osservazione ed interazione, la realtà virtuale si trova, idealmente, sul vertice opposto rispetto all’origine, come mostrato in Figura 1:

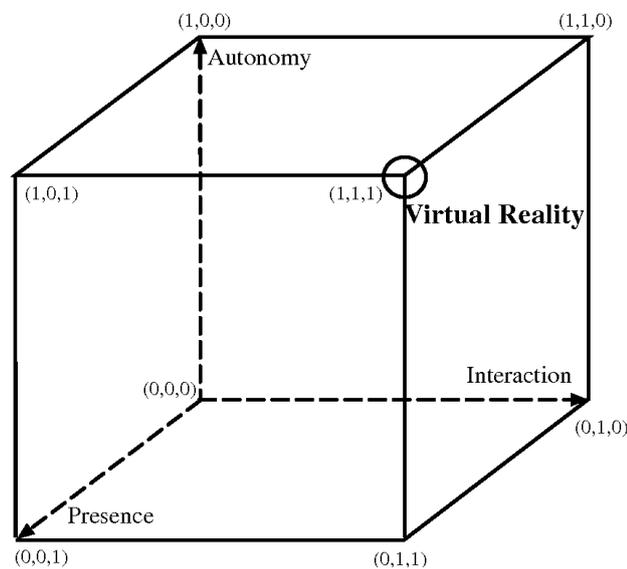


Figura 1 - Definizione di realtà virtuale secondo Zeltzer (1992) [1.11]².

² Immagine tratta da:
<https://www.semanticscholar.org/paper/Virtual-Reality-History-%2C-Applications-%2C-Technology-Mazuryk/6cebef400df6c387852b6c76570f226a86965104/figure/0>
 Ultimo accesso: 10 marzo 2020.

Sviluppare ambienti virtuali consiste nella creazione di spazi simulati tridimensionali all'interno dei quali l'utente può virtualmente muoversi e interagire con altrettante rappresentazioni verosimili di oggetti e persone.

Tale interazione avviene per mezzo di *hardware* elettronico progettato appositamente, come ad esempio il *mouse* o la tastiera di un *computer*.

Per quanto riguarda il campo della realtà virtuale, l'utente è invece sensorialmente immerso nell'ambiente simulato per mezzo di dispositivi dedicati costituiti da visori. Questi visori sono dotati di sistemi ottici stereoscopici che, mostrando per ciascun occhio un'immagine bidimensionale dell'ambiente 3D e combinandole tra loro, rendono effettiva un'esperienza percettiva a tre dimensioni. All'interno di questi spazi virtuali è possibile modellare con *software* dedicati qualsiasi ambientazione e oggetto reale, collocarli a piacimento e renderli interagibili in svariati modi dall'utente, aggiungendo tracce audio o *feedback* sonori e tattili in base all'esperienza che si vuole far percepire all'utilizzatore. I cosiddetti caschetti per la *Virtual Reality*, infatti, possono essere dotati di cuffie che permettono la riproduzione di tracce audio, come ad esempio segnali di avviso e di istruzione. Come sarà presentato nei prossimi capitoli, questi sistemi possono risultare particolarmente complessi al fine di fornire un'esperienza quanto più possibile coinvolgente e vicina alla realtà.

Infine, vi sono altre tecnologie di simulazione che possono comunque essere incluse nel settore innovativo di cui la realtà virtuale fa parte, ossia la realtà aumentata, o *Augmented Reality* (AR) mostrata in Figura 2, e la realtà mista, o *Mixed Reality* (MR) mostrata in Figura 3. Queste ultime due tipologie si differenziano da quella trattata in questo testo poiché l'ambiente fisico reale è osservabile dall'utente e a esso vengono sovrapposti oggetti virtuali bidimensionali e tridimensionali per mezzo di speciali sistemi ottici che proiettano le immagini su schermi, su lenti traslucide o su pareti di ambienti reali, come ad esempio stanze o cabine.

Si arricchisce quindi l'ambiente reale con informazioni presentate tramite etichette grafiche, messaggi di testo e sonori, immagini 2D e oggetti tridimensionali riproducibili anche da dispositivi di largo consumo come i più recenti *smartphones* e *tablets*.



Figura 2 – Esempio di applicazione di realtà aumentata.³
© zapp2photo / stock.adobe.com

La realtà mista permette allo stesso modo di corredare l'ambiente fisico reale con informazioni aggiuntive e con porzioni di ambienti e oggetti simulati. Inoltre si differenzia da quella aumentata poiché consente all'utente di interagire direttamente sia con il mondo reale che con quello simulato, permettendo l'interazione delle due realtà per mezzo di appositi *software* e *hardware*.



Figura 3 - Esempio di applicazione di realtà mista.⁴

³ Immagine tratta da: <https://www.it-production.com/produktionsmanagement/die-neue-sicht-fuer-den-kundenservice/> Ultimo Accesso: 14 febbraio 2020.

⁴ Immagine tratta da: <https://www.microsoft.com/it-it/hololens/apps>
Ultimo Accesso: 14 febbraio 2020.

Per completezza sono infine definiti i concetti di Telepresenza e Cyberspazio, entrambi strettamente legati al concetto di realtà virtuale, come riportato da Mazuryk e Gervautz (1999) [1.1]:

- La Telepresenza è un particolare tipo di realtà virtuale in cui l'ambiente simulato è reale ma remoto. Più precisamente, secondo la definizione di Held e Durlach (1993) [1.12], la Telepresenza fa sì che dalla stazione di controllo l'operatore possa ricevere dal sito di lavoro dati in quantità e qualità tali da poter fornire a sua volta il contributo della sua presenza nel sito di lavoro, se quest'ultimo è opportunamente predisposto;
- Il Cyberspazio è invece associato al *World Wide Web* e non è una simulazione computerizzata del mondo reale, bensì il dominio caratterizzato dall'uso dell'elettronica e dello spettro elettromagnetico per immagazzinare, modificare e scambiare operazioni attraverso le reti informatiche e le loro infrastrutture fisiche⁵ [2.6]. In altre parole, si tratta dell'ambiente *virtuale* in cui circolano le informazioni digitali e in cui interagiscono gli utenti a esse interessati.

Un esempio pratico in cui si può osservare come la realtà simulata venga impiegata è il campo dei simulatori di guida e, in parallelo, quello dei simulatori di volo nel campo aerospaziale.

Questi apparati possono incorporare uno o più tipi di realtà simulata tra quelli in precedenza descritti e, per alcuni usi specifici, sono progettati per dare l'impressione di trovarsi realmente a bordo del velivolo permettendo all'utente di percepire anche le accelerazioni derivate dal moto apparente dell'aeromobile. Un esempio di simulatore di volo *full scale* per l'addestramento dei piloti per il velivolo Airbus A320 è rappresentato in Figura 4 nella pagina seguente.

⁵ <https://en.wikipedia.org/wiki/Cyberspace>

Ultimo accesso: 10 gennaio 2020.



Figura 4 - Simulatore di volo *full scale* del velivolo Airbus A320.⁶

Ve ne sono di diverse tipologie: dai più semplici *computer* in grado di simulare il volo di un velivolo e visualizzarlo su uno o più *monitor*, a sistemi di realtà virtuale interattiva, come quello oggetto di questo elaborato, ai sistemi statici oppure dinamici in scala rappresentanti la cabina di pilotaggio di un velivolo reale. La scelta del tipo di simulatore dipende in larga parte dallo scopo cui è destinato e dalla disponibilità economica dell'acquirente.

⁶ Immagine tratta da:
<https://www.civilaviation.training/pilot/airbus-level-d-a320neo-simulator-denver/>
Ultimo accesso: 15 gennaio 2020

2 – Cenni storici

Fino all'avvento delle tecnologie informatiche, il termine realtà virtuale era inteso come correlato a una realtà differente da quella nota, o comunque alternativa; l'unico modo per intenderlo era legato alle rappresentazioni artistiche come dipinti od opere teatrali.

La prima formulazione del concetto di realtà virtuale intesa come la intendiamo oggi, ossia la possibilità di inserirsi in un ambiente grafico computerizzato e di interagire con esso, risale al 1965 ed è dovuta a Ivan Sutherland (1965): “Fa in modo che quel mondo (virtuale) sulla finestra appaia reale, suoni come reale, sia percepito come reale, e risponda realisticamente alle azioni dello spettatore” [1.2]. Da allora, si può dire che lo sviluppo delle tecnologie di VR va nella direzione che punta alla realizzazione completa del concetto espresso da Sutherland oltre 50 anni fa.

Ripercorrendo le tappe che hanno portato alle tecnologie oggi usate in questo campo, come riportato da Mazuryk T., Gervautz M. (1999) [1.1] possiamo trovare:

- *Sensorama*, 1962: si tratta del primo esempio di dispositivo atto alla completa immersione di un utente in un ambiente simulato, che coinvolga tutti i sensi. Realizzato da Morton Heilig, è mostrata una sua rappresentazione in Figura 5 nella pagina seguente. Consiste in una macchina all'interno della quale l'utente inserisce la testa per avere esperienza di visione di immagini stereoscopiche 3D, audio stereofonico, ma anche vento, vibrazioni, odori, sensazioni tattili e *feedback* meccanici. Il suo limite principale è l'impossibilità per l'utente di poter interagire con l'ambiente rappresentato [2.1];

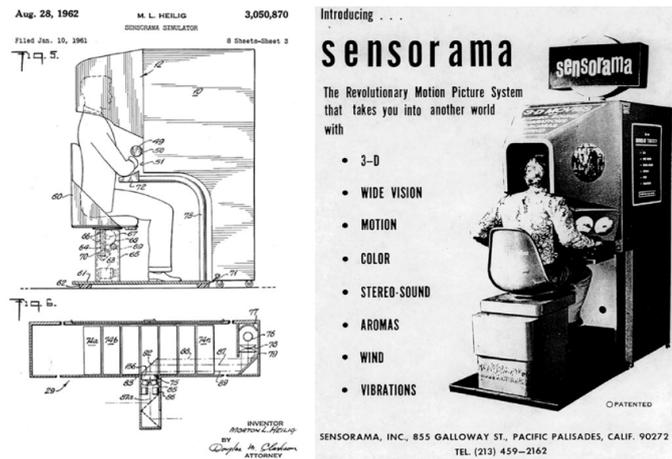


Figura 5 - Rappresentazione grafica del Sensorama.⁷

- *The Ultimate Display*, 1965: come riportato da Sutherland (1965) [2.23], egli esprime per la prima volta in maniera chiara cosa si intende per VR e fornisce le prime idee per realizzarla;
- *The Sword of Damocle's*, 1968: realizzato da Ivan Sutherland, si tratta del primo esempio di *display* montato sulla testa dell'utente per consentirgli l'immersione nell'ambiente simulato, o *Head Mounted Display HMD* [2.2], ed è considerato come il primo *hardware* di realtà virtuale mai realizzato, come si vede in Figura 6;



Figura 6 - Foto d'epoca del dispositivo *Sword of Damocle*.⁸

⁷ Immagine tratta da:
https://www.researchgate.net/figure/Sensorama-the-first-virtual-immersion-system-the-technical-table-and-the-pictures-shown_fig1_321142137
 Ultimo accesso: 28 dicembre 2019

⁸ Immagine tratta da:
<https://www.dcube.co.uk/news/virtual-reality-the-past-present-and-future/>
 Ultimo accesso: 28 dicembre 2019

- GROPE, 1971: è il primo prototipo di sistema per il *feedback* delle forze, realizzato presso l'Università del North Carolina (UNC) da Brooks, Ming, Batter e Kilpatrick (1990) [1.3], e ne viene mostrata una immagine in Figura 7;

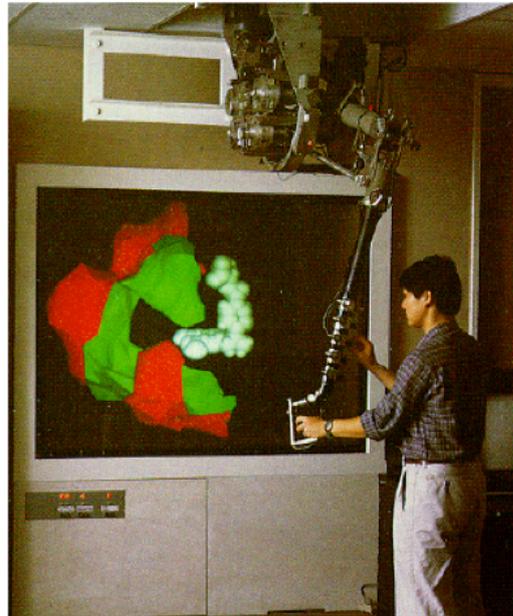


Figura 7 - Dispositivo GROPE (1971).⁹

- VIDEOPLACE, 1975: è un laboratorio di realtà artificiale realizzato da Myron Krueger [2.3]. Uno schema funzionale è mostrato in Figura 8.

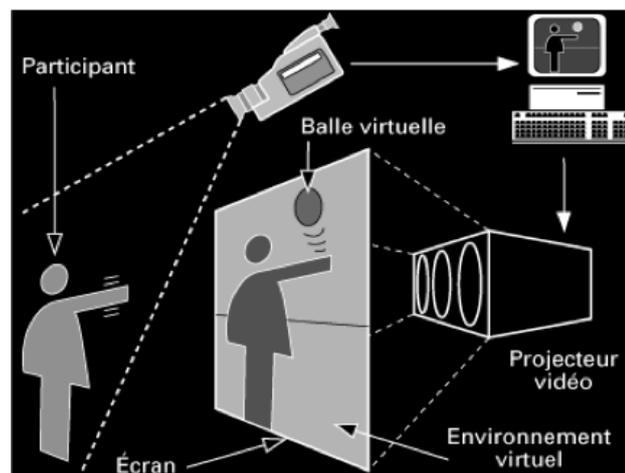


Figura 8 - Schema funzionale del laboratorio Videoplace.¹⁰

⁹ Immagine tratta da: https://www.researchgate.net/figure/GROPE-HI-haptic-display-system-in-use_fig1_220721620

Ultimo accesso: 29 dicembre 2019.

¹⁰ Immagine tratta da: <http://aboutmyronkrueger.weebly.com/videoplace.html>

Ultimo accesso: 29 dicembre 2019.

L'idea consiste nella realizzazione di un ambiente simulato in un ambiente fisico appositamente con cui l'utente può interagire senza l'ingombro di *hardware* apposti. L'utilizzatore è videoripreso da una telecamera che invia le immagini a un *computer*. Quest'ultimo le elabora e le inserisce in un ambiente virtuale, collegato a sua volta a un videoproiettore che invia il risultato finale ad uno schermo che riporta l'utente all'interno dell'ambiente virtuale;

- VCASS, 1982: acronimo di *Virtually Coupled Airborne System Simulator*, consiste nel primo esempio di simulatore di volo in realtà virtuale, realizzato per la *United States Air Force* da Buchroeder, Seeley, Vukobratovich (1981) [1.4]. Consiste in un HMD che consente la visualizzazione di obiettivi e di informazioni sulle traiettorie. È stato impiegato a scopo di addestramento militare;
- *DataGlove* (1985) ed *EyePhone* (1988): si tratta dei primi *hardware* di realtà virtuale disponibili in commercio, realizzati dall'azienda VPL (Figura 9);

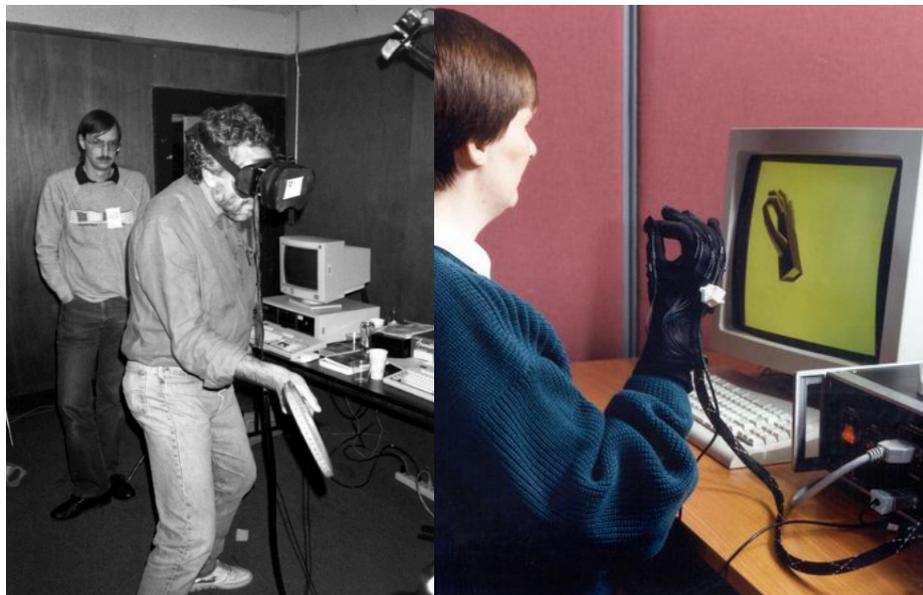


Figura 9 - Dispositivo EyePhone¹¹ e Dataglove¹².

¹¹ Immagine tratta da: <https://microship.com/nolan-bushnell-vpl-eye-telephone-larry-wall-1988/>
Ultimo accesso 30 dicembre 2019.

¹² Immagine tratta da:
<http://www.chilton-computing.org.uk/inf/literature/newsletters/ecn21-40/p034.htm>
Ultimo accesso 30 dicembre 2019.

- VIEW, 1989: acronimo di *Virtual Environment Workstation Project*, era un simulatore in realtà virtuale per l'addestramento degli astronauti, realizzato da Scott Foster, fondatore della *Crystal River Engineering*, a seguito di un contratto con la NASA [2.4];
- BOOM, 1989: commercializzata dalla *Fake Space Lab*, si tratta di una scatola contenente due *display* a tubi catodici all'interno dei quali l'utente può visualizzare l'ambiente virtuale. Spostandosi e orientando la scatola con le braccia, l'utente si muove all'interno di tale ecosistema (Figura 10);

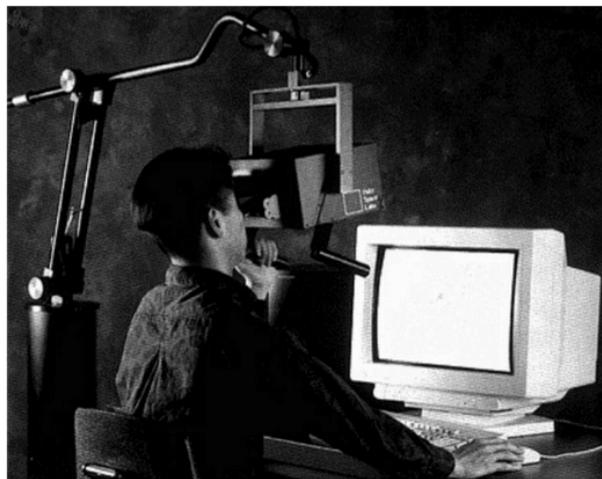


Figura 10 - Dispositivo BOOM¹³.

- UNC *Walkthrough Project*, seconda metà anni '80: si tratta di un progetto dell'Università del North Carolina volto alla realizzazione di *hardware* per la realtà virtuale sempre più performanti. In questo progetto si ebbe lo sviluppo di nuovi HMD, sensori di movimento e di motori grafici più accurati e realistici;
- Realtà Aumentata, primi anni '90: a partire dagli anni '90, si avviò la fase di realizzazione delle tecnologie che consentivano di interagire con la realtà effettiva attraverso l'uso di strumenti, quali interfacce grafiche, realizzati con appositi motori grafici. Nello specifico, la prima definizione di realtà aumentata risale al 1992, come riportato da Bryson

¹³ Immagine tratta da: https://www.researchgate.net/figure/15-Mechanical-tracking-device-BOOM-from-Fake-Space-Labs_fig15_2617390
 Ultimo accesso: 30 dicembre 2019.

(1992): “Una tecnologia che mostra un mondo virtuale che arricchisca, invece di sostituirlo, il mondo reale” [1.5];

- *Computer Simulated Teleoperation*, 1991: altra applicazione di rilievo nel campo aerospaziale, è un sistema VR che consente la manipolazione di un *rover* su suolo marziano dalla Terra. Realizzata da Antonio Medina per la NASA [2.4]. Quest’applicazione è strettamente legata al concetto di telepresenza in precedenza illustrato;
- *Virtual Boy*, 1995: si tratta della prima *console* destinata al *gaming* in VR, realizzata da *Nintendo*. Fu un fallimento commerciale per via della scarsa resa grafica e della mancanza di praticità, ma rappresenta il primo tentativo di estendere le tecnologie VR al grande pubblico a scopo di intrattenimento [2.4];
- *Google Street View*, 2007: si tratta di uno strumento informatico tuttora usato volto all’immersione dell’utente nell’ambiente urbano di gran parte delle città del mondo. Dapprima utilizzabile solo su monitor del *PC*, dal 2015 è possibile usare il supporto *Google Cardboard* per la visualizzazione in VR [2.5];
- *Oculus Rift headset*, 2010: ideato da Palmer Luckey, si tratta di un *headset* che garantisce, per la prima volta, un *Field of View* (FOV) di 90°, collegato al processore di un *PC* per la trasmissione delle immagini (Figura 11).



Figura 11 - Prima versione dell’headset Oculus Rift.¹⁴

¹⁴ Immagine tratta da: <https://multiplayer.it/articoli/107386-piu-reale-del-reale.html>
Ultimo accesso: 30 dicembre 2019.

L'alta qualità garantita da questa soluzione ha portato nell'ultimo decennio ad un rinnovato interesse per le tecnologie VR, che da allora hanno puntato sul miglioramento di questa soluzione per la realizzazione di tecnologie che consentissero all'utente una miglior resa grafica, resa audio e interagibilità con l'ambiente circostante [2.4];

- *Display a bassa persistenza, 2013*: in quell'anno la *Valve Corporation* ha scoperto e condiviso liberamente la svolta dei *display* a bassa persistenza che rendono possibile la visualizzazione senza ritardi e senza sbavature di contenuti VR. Questo tipo di schermi è stato adottato da *Oculus* ed è stato utilizzato in tutti gli *headsets* in seguito sviluppati [2.24, 2.25];
- *SteamSight, 2014*: la *Valve Corporation* ha mostrato il suo prototipo *SteamSight*, il precursore degli *headsets* di largo consumo rilasciati nel 2016. Condivide le caratteristiche principali dei visori attuali, tra cui display con risoluzione 1K separati per ciascun occhio, bassa persistenza, tracciamento posizionale su una vasta area e lenti Fresnel [2.25];
- *HTC Vive e Controllers dedicati, 2015*: HTC e *Valve Corporation* hanno annunciato l'*headset* per la realtà virtuale HTC Vive e i relativi *controllers*. Il set includeva la tecnologia di tracciamento chiamata *Lighthouse*, che utilizzava emettitori luminosi chiamati *base stations*, montate a parete per il tracciamento posizionale, utilizzando la luce infrarossa [2.26].

I più recenti dispositivi per la realtà virtuale a disposizione del consumatore e delle aziende discendono direttamente dagli *headsets* sviluppati a partire dal 2010. La configurazione e le soluzioni tecnologiche adottate non si discostano molto tra loro mentre ciò che maggiormente li differenzia è lo sviluppo che ogni produttore ha dedicato ad una particolare caratteristica. Questi aspetti saranno analizzati nel capitolo successivo dedicato allo stato dell'arte degli *headsets* e delle tecniche di addestramento moderne.

3 – Stato dell’arte

In questo capitolo verrà illustrato come nel tempo si siano evolute le tecniche di formazione, fino ad arrivare all’addestramento per mezzo della realtà virtuale e dei principali esempi commerciali di utilizzo. Successivamente, saranno evidenziate le peculiarità che caratterizzano i visori per la realtà virtuale che in questo momento sono disponibili sul mercato. Infine, sulla base delle caratteristiche in seguito descritte, saranno messi a confronto alcuni *headsets* per far comprendere le principali differenze e gli aspetti su cui i produttori hanno maggiormente impegnato i loro sforzi.

3.1 – Tecniche di addestramento

Nel corso dei decenni sono state sviluppate diverse tecniche di addestramento per il personale aeronautico. Come è noto, anche al di fuori del settore industriale lo sviluppo della tecnologia ha consentito di introdurre dispositivi digitali, come *computer* e *tablet*, nelle classi di ogni livello di istruzione sostituendo in parte i classici metodi di insegnamento. Di seguito, sono elencate le principali tecniche di insegnamento:

- Studio individuale su libri di testo;
- Studio di gruppo su libri di testo;
- Lezione frontale individuale;
- Lezione frontale di gruppo;
- *Computer Based Training* (CBT);
- *Virtual Training* (VT).

I primi quattro metodi elencati sono ben noti e non richiedono ulteriori approfondimenti. Il principale difetto di queste tecniche è di fornire un approccio indiretto con le macchine o con i sistemi sui quali gli operatori dovranno effettuare le attività.

L'unico modo per visualizzare i componenti è attraverso immagini e schemi, e dunque non si ha la possibilità di interagire direttamente con un modello o con la macchina reale. Inoltre, l'apprendimento sui libri di testo o con lezioni frontali risulta più lento rispetto a quello effettuato tramite dispositivi interattivi. Infatti, la prova che conferma la validità di questa nuova tecnica formativa è la sua rapida diffusione in tutti i settori. I dispositivi interattivi sono in grado di concentrare l'attenzione dello studente su specifici argomenti e avviare fasi di test che lo coinvolgono maggiormente. Tale coinvolgimento può avvenire tramite percorsi logici in cui è richiesta la risoluzione di problemi con l'uso particolari metodologie e non semplicemente attraverso quiz a risposta multipla o aperta.

3.1.1 – *Computer Based Training*

A partire dagli anni '90, grazie alla larga diffusione dei *computer* e all'avanzamento dei *software* di *computer grafica*, è stato possibile implementare il cosiddetto CBT, o *Computer Based Training*.

Il CBT¹⁵ è una tecnica di insegnamento con cui è possibile creare percorsi formativi dedicati per classi di studenti con indirizzi di studio specifici [2.20]. Per fare un esempio, una classe di manutentori di uno specifico velivolo può essere addestrata sulle procedure di manutenzione attraverso l'utilizzo del CBT. Alla classe è fornito un numero di *computer* pari al numero degli studenti. Su ognuno di questi elaboratori è possibile accedere al *software* di formazione dedicato che conterrà una serie attività formative interattive, come ad esempio un *database* di procedure. Attraverso la tipologia di procedura scelta, sia essa di familiarizzazione oppure operativa, l'utente potrà visualizzare schede dedicate a ogni sistema con descrizioni dettagliate di ogni componente, cominciando ad apprendere come si dovrà comportare nelle attività da svolgere sul sistema reale. Il CBT consente anche di avviare *video-tutorials* in cui un operatore reale o virtuale mostra all'utente come effettuare l'operazione e dunque fornisce un ricordo visuale dinamico dell'attività da svolgere. Inoltre, con questa recente tecnica di

¹⁵ <https://trainingindustry.com/glossary/computer-based-training-cbt/>
Ultimo Accesso: 10 gennaio 2020.

addestramento è possibile rappresentare i sistemi al di fuori delle condizioni nominali, simulando ad esempio guasti e avarie, consentendo dunque di ampliare il ventaglio di procedure implementabili nell'offerta formativa.

Con il CBT è possibile fornire un servizio di formazione dedicato e disponibile in qualunque parte del mondo purché si disponga di una connessione *Internet* e delle apposite credenziali di autorizzazione.

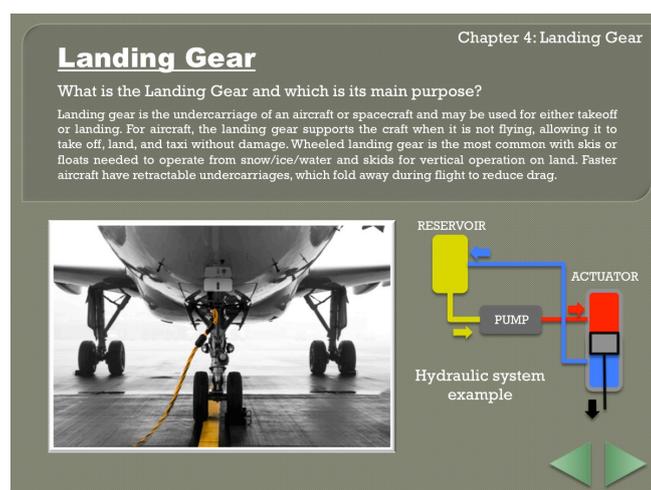


Figura 12 – Esempio di schermata di CBT per il sistema del carrello di atterraggio triciclo di un generico velivolo¹⁶.

Si propone, dunque, come servizio di facile fruizione e confezionato su misura in base alle esigenze del cliente. Riassumendo, secondo Scholz e Thorbeck (2000) [2.21], il CBT presenta i seguenti vantaggi:

- interattiva;
- ipermultimediale¹⁷;
- autoformativa¹⁸;
- personalizzata
- autoregolata¹⁹;
- fruibile a distanza;
- ipertestuale²⁰.

¹⁶ Immagine elaborata personalmente.

¹⁷ “È un termine generico, derivato da ipertesto, che integra una raccolta di informazioni eterogenee, quali grafica, audio, video e testo, connessi tra loro in maniera non sequenziale.” <https://it.wikipedia.org/wiki/Ipermedia> Ultimo accesso: 20 gennaio 2020.

¹⁸ “L’autoformazione è quel processo che vede il soggetto in una posizione attiva rispetto alle conoscenze ed esperienze che sperimenta”. <https://it.wikipedia.org/wiki/Autoformazione> Ultimo accesso: 20 gennaio 2020.

¹⁹ “con riferimento a persone, regolarsi e sapersi regolare da sé, senza essere soggetti a norme e prescrizioni esterne”. Vocabolario Online Treccani. Autore: Treccani. <http://www.treccani.it/vocabolario/autoregolarsi> Ultimo accesso: 20 gennaio 2020.

²⁰ “Insieme strutturato di informazioni, costituito da testi, note, illustrazioni, tabelle ecc., collegate fra loro da rimandi e collegamenti logici”. Dizionario di italiano del Corriere. Autore: Sabatini, Coletti. https://dizionari.corriere.it/dizionario_italiano/I/ipertesto.shtml Ultimo accesso: 20 gennaio 2020.

La mancanza fondamentale che contraddistingue il CBT è che l'utente non può in nessun caso interagire direttamente con il modello del velivolo, sia esso fisico o virtuale, in scala e coerentemente interagibile con le gestualità tipiche di un'attività reale.

Per questo motivo, come ampiamente descritto all'inizio di questo testo, il VT, o *Virtual Training*, inteso come addestramento in realtà virtuale per mezzo di appositi *headsets* e *controllers*, si sta rapidamente diffondendo in tutti i settori industriali ed è per questo motivo che una tecnica così innovativa è oggetto di studi da parte delle aziende di settore come TXT *e-solutions*.

3.1.2 – *Virtual Training*

A differenza del CBT, il *Virtual Training* permette all'utente di visualizzare ed interagire con un modello virtuale rappresentato su un *computer* tramite un classico schermo o con i più innovativi *headsets* per la realtà virtuale. Il VT permette quindi all'utente di esplorare il modello virtuale del velivolo, analizzare i componenti ed interagire con essi attraverso strumenti dedicati.



Figura 13 - Interfaccia grafica del SAMT sviluppato da *The DiSTI Corporation* (fair use)²¹.

²¹ Immagine tratta da: https://en.wikipedia.org/wiki/Virtual_maintenance_training#/media/File:F-18_SAMT_Old.jpg Ultimo accesso 21 Gennaio 2020.

Tali strumenti possono essere semplici *mouse* e tastiera, *controllers* tracciabili per la realtà virtuale, o sistemi complessi, come il *force feedback*, cui si farà cenno nel corso di questo capitolo. Il vantaggio fondamentale della VT è quindi quello di permettere all'utente di interagire dinamicamente con il sistema, ad esempio eseguendo concretamente i passi di una procedura operativa sul componente virtuale.

Sfruttando la realtà virtuale, l'esecuzione di questo tipo di operazioni fornisce all'utente, oltre alle conoscenze basilari del sistema, anche una memoria visiva e gestuale delle attività svolte, consentendo un addestramento più rapido ed efficace. Esempi concreti in cui la VT è impiegata sono i progetti sviluppati dalla *American System Corporation* e *The DiSTI Corporation*. Quest'ultima è nota per aver sviluppato il primo ambiente virtuale tridimensionale per l'addestramento alla manutenzione del velivolo militare F/A-18C *Hornet* per la *U.S. Navy* nel 2006, definito con l'acronimo SAMT, ovvero *Simulated Aircraft Maintenance Training*. Una schermata del *software* SAMT è mostrata in Figura 13.

3.2 – Stato dell'arte – *Hardware*

3.2.1 – Introduzione ai sistemi per la realtà virtuale

I dispositivi moderni non si discostano in maniera significativa da quelli concepiti negli anni '90 del secolo scorso ma, anzi, ne sono una diretta evoluzione. Il forte sviluppo tecnologico portato avanti dalle principali aziende di elettronica ha permesso di integrare in questi sistemi nuovi componenti *hardware* sempre più performanti, con particolare riferimento ai *display* utilizzati per la visualizzazione delle immagini. Al fine di rendere quanto più immersiva possibile l'esperienza di realtà virtuale, i dispositivi moderni possono incorporare più apparati atti a stimolare i sensi dell'essere umano tra i quali, oltre alla vista, l'udito e il tatto. Tuttavia, a causa dell'elevato costo che possono avere sistemi multisensoriali, la maggior parte degli *headsets* sono costituiti da caschetti che incorporano i *display* e i riproduttori sonori per la riproduzione di tracce audio. Infine, per interagire con l'ambiente virtuale vengono forniti uno o più telecomandi *wireless*.

Tenendo in considerazione il fatto che gli ultimi sistemi per la realtà virtuale hanno caratteristiche tecniche e *hardware* simili, in questo capitolo è descritto il generico sistema VR, mentre sarà in seguito dedicato un paragrafo contenente la descrizione dell'apparato utilizzato per lo sviluppo di questo lavoro.



Figura 14 - Dispositivo *Oculus Rift CV 1*, telecomandi e *base stations* per il rilevamento dei movimenti.²²

Un tipico sistema completo per la realtà virtuale è fornito oltre che di caschetto e di telecomandi, di due *base stations*, ovvero due emettitori di luce infrarossa (Figura 14) il cui funzionamento sarà descritto in seguito.

3.2.2 – Visore per la realtà virtuale

L'*headset* per la realtà virtuale è costituito da un visore avente nella parte frontale i componenti dedicati alla riproduzione video, come si vede in Figura 15. In base al tipo di visore si può avere un singolo *display* di forma rettangolare in grado di coprire tutto il campo visivo frontale, o una coppia di *display* separati, uno per occhio. Leggermente più in basso vi sono le due lenti di Fresnel inserite per consentire all'utente la messa a fuoco da una breve distanza. Ai lati del caschetto sono generalmente presenti due cuffie regolabili per la riproduzione dei suoni, altrimenti sostituite da cuffie esterne con *output* audio *standard* da 3,5 millimetri posto direttamente sul visore. Nella scheda elettronica sono alloggiati il *chipset* per la conversione dei dati

²² Immagine tratta da: <https://www.techadvisor.co.uk/review/wearable-tech/oculus-rift-touch-3643626/> Ultimo accesso: 21 gennaio 2020.

e un *set* di accelerometri e giroscopi che permettono di calcolare l'orientamento spaziale dell'*headset* attorno a sei gradi di libertà (6 DOF).

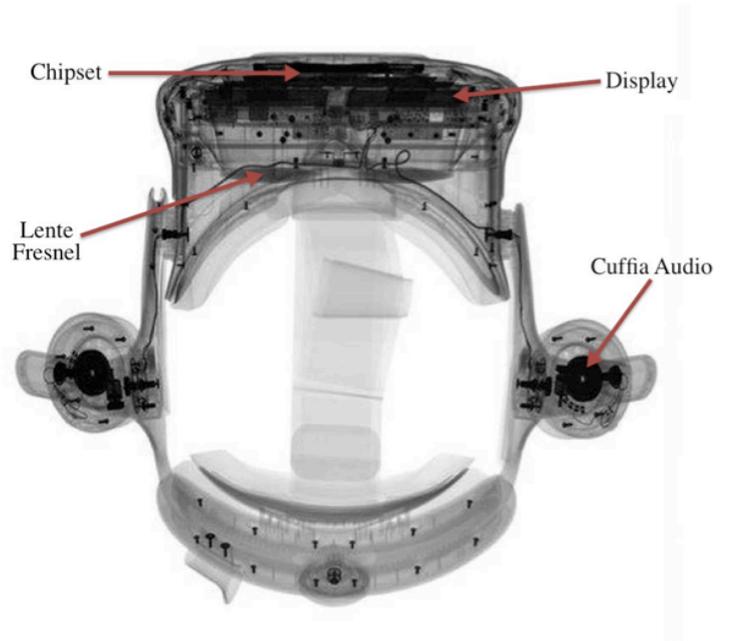


Figura 15 - Vista ai raggi X dell'*headset* HTC Vive Pro per la visualizzazione dei componenti interni.²³

Ciò significa calcolare traslazioni e rotazioni attorno agli assi cardinali in un sistema di riferimento locale individuato sul visore stesso, permettendogli quindi di orientare la visuale nell'ambiente virtuale. Tuttavia, a causa della deriva giroscopica che porta a un errore crescente nella determinazione spaziale della posizione, è necessario dotare il dispositivo di sensori in grado di rilevare la variazione di posizione rispetto a un sistema di riferimento fisso esterno il quale può essere individuato generalmente con due tecniche distinte. Nel primo caso, il sistema di riferimento è individuato dalle cosiddette *base stations*, emettitori di luce infrarossa che devono essere installati sulle pareti della stanza fisica dentro la quale ci si trova. Solitamente le *base stations* sono utilizzate in numero uguale o superiore a due per garantire una copertura ottimale rispetto a ogni posizione dell'utente. Come osservabile in Figura 16, il caschetto è dotato di ricevitori per luce infrarossa così come i *controllers*. I ricevitori permettono al caschetto di individuare la posizione delle *base stations* ottenendo così un sistema di riferimento fisso esterno.

²³ Immagine tratta da: <https://it.wifi-direct.net/articles/guide/htc-vive-pro-teardown.html> e successivamente elaborata. Ultimo accesso: 21 gennaio 2020.

I dati generati dagli accelerometri, dai giroscopi e dai sensori di luce infrarossa combinati tra loro, garantiscono il corretto orientamento spaziale dell'*headset* durante tutto lo svolgimento delle operazioni. Un sistema di questo tipo è definito “a tracciamento esterno”.

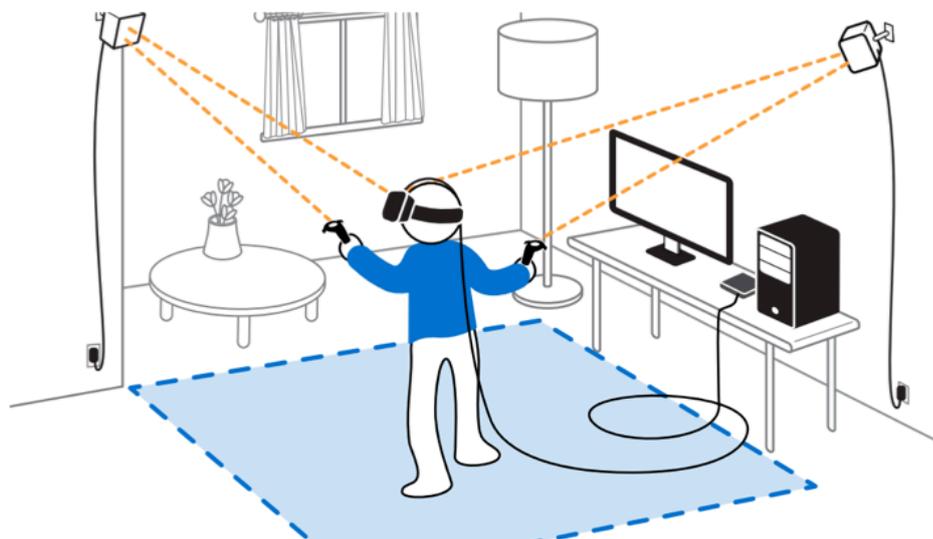


Figura 16 - Sistemazione delle *base stations* per il tracciamento di *headset* e *controllers*.²⁴

Altri apparati per la realtà virtuale, invece, utilizzano delle telecamere poste sul caschetto stesso e tramite algoritmi di riconoscimento delle immagini riescono a identificare il pavimento e le pareti di una stanza, garantendo l'orientamento anche in assenza delle *base stations*. I dispositivi dotati di questo sistema vengono definiti “a tracciamento *Inside-Out*”. Nel caso di questo secondo tipo di soluzione, la posizione dei telecomandi è calcolata sempre grazie alle telecamere poste sul visore, unitamente a emettitori *led* posti sui telecomandi stessi. Tramite algoritmi di localizzazione, le telecamere calcolano la distanza tra i *led* sui *controllers* e, essendo nota la configurazione tridimensionale di questi emettitori sui telecomandi, si riesce a calcolare precisamente il loro orientamento spaziale. Generalmente, tutti i sistemi per la realtà virtuale necessitano di un elaboratore sufficientemente potente tale da poter processare la grande quantità di calcoli grafici richiesti dalle applicazioni che gestiscono ambienti tridimensionali.

²⁴ Immagine tratta da: <https://learnvr.org/3-dimensional-space-and-virtual-reality-understanding-x-y-z-coordinates/>
Ultimo accesso: 22 gennaio 2020

Per questo motivo, gli *headsets* sono dotati di cavi di connessione che ne consentono l'interfaccia fisica e lo scambio di dati con i moderni *computer*, i quali devono essere dotati di schede grafiche di ultima generazione. Esistono, infine, alcuni dispositivi per la realtà virtuale, come ad esempio l'*Oculus Quest*, che integrano al loro interno tutto il necessario per operare senza l'ausilio di un elaboratore dedicato. Questo, però, implica una considerevole riduzione della potenza di calcolo disponibile influenzando negativamente sulla qualità grafica generata dall'*headset* stesso.

3.2.3 – Telecomandi tracciabili

I sistemi completi per la realtà virtuale sono solitamente forniti di due telecomandi che permettono all'utente di interagire con l'ambiente virtuale. Anch'essi, come l'*headset*, sono dotati di accelerometri, giroscopi, sensori infrarossi o emettitori luminosi per garantire il corretto orientamento spaziale e la posizione relativa rispetto al caschetto all'interno dell'ambiente di realtà virtuale. Generalmente sono dotati di un *trigger* sito nella parte posteriore, di pulsanti posti ai lati o sulla parte superiore e di un *touchpad* o altri dispositivi di *input* posti sul dorso del telecomando stesso.

In base all'applicazione in esecuzione, ognuno di questi pulsanti può avere una sua specifica funzione (Figura 17).



Figura 17 - HP Reverb controllers.²⁵

²⁵ Immagine tratta da: <https://www.microsoft.com/en-au/windows/windows-mixed-reality>
Ultimo accesso 23 gennaio 2020.

Gli *headsets* di largo consumo attualmente disponibili possono essere considerati come lo stato dell'arte attuale per quanto riguarda i dispositivi per la riproduzione della realtà virtuale. Tuttavia esistono numerosi progetti per sistemi di realtà virtuale più elaborati che cercano di coinvolgere altri sensi dell'essere umano, come ad esempio il tatto, al fine di rendere più verosimile l'esperienza. Tra i tanti, meritano di essere riportati dispositivi innovativi come gli *Haptic Gloves* dell'azienda *Haptx*²⁶. Questi speciali guanti, mostrati in Figura 18, forniscono un *force feedback* che simula l'esperienza di contatto con un oggetto reale ma che in realtà è solo virtuale.

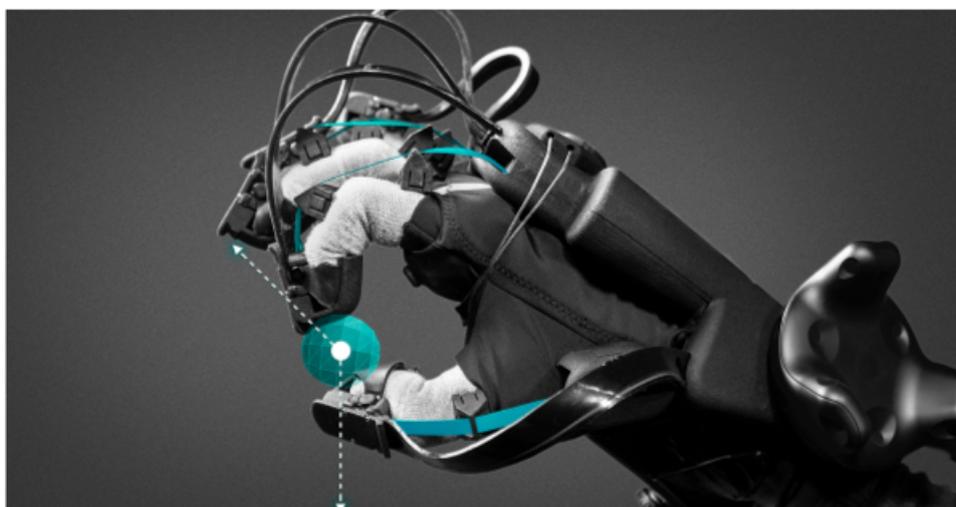


Figura 18 - Haptic Gloves dell'azienda Haptx.²⁷

Un altro esempio di sistema avanzato per la realtà virtuale è rappresentato dalla pedana “*Omni*” dell'azienda *Virtuix*²⁸, mostrata in Figura 19 nella pagina seguente. Tale dispositivo permette fisicamente all'utente di camminare, correre e ruotare su se stesso nell'ambiente virtuale così come farebbe in quello fisico.

Altri dispositivi, come ad esempio il *Leap Motion*²⁹ dell'azienda *Ultraleap*, utilizzano invece un dispositivo che si installa direttamente sull'*headset* utilizzato e tramite un sistema ottico traccia il movimento delle mani e delle dita, traducendo il moto reale in virtuale.

²⁶ <https://haptx.com/>

²⁷ Immagine tratta da: <https://arpost.co/2019/02/19/haptx-vr-technology-in-touch-with-the-virtual-world/> Ultimo accesso: 24 gennaio 2020.

²⁸ <https://www.virtuix.com/>

²⁹ <https://www.ultraleap.com/product/leap-motion-controller/>

Ultimo accesso: 24 gennaio 2020.



Figura 19 - Pedana *Virtuix Omni* per muoversi fisicamente convertendo lo spostamento reale in moto nell'ambiente virtuale.³⁰

3.2.4 – Stato dell'arte e limiti fisici

Uno dei principali difetti degli *headsets* è sempre stata la bassa risoluzione dei *display* integrati in questi dispositivi ottici. Tale risoluzione comporta la visualizzazione da parte dell'occhio umano dei *pixels* che compongono lo schermo, permettendo quindi al cervello la discretizzazione dei contorni degli oggetti e delle curve in tanti piccoli rettangoli e rendendo quindi poco realistica l'esperienza di simulazione. Per spiegare meglio quanto introdotto in questo paragrafo, si forniscono alcune definizioni concernenti il campo dei dispositivi ottici. Verranno dunque definite sia l'unità minima che compone un'immagine, ossia il *pixel*, sia la risoluzione di uno schermo che la densità di *pixels* per pollice lineare e la densità di *pixels* per grado angolare. Queste definizioni ci consentiranno di capire come la tecnologia si sia evoluta nel corso degli anni e quali siano i limiti che questa può raggiungere prima di rendere superflui eventuali ulteriori sviluppi in tal senso. Infine, verranno presentati i dispositivi attualmente disponibili per confrontare, oltre alla qualità visiva, altri aspetti che caratterizzano gli *headsets* moderni.

³⁰ Immagine tratta da: <https://vrgames.io/virtuix-omni-vr-location-based-entertainment-boasts-one-million-plays/> Ultimo accesso: 24 gennaio 2020.

Il Pixel

Il *pixel*, abbreviazione di *picture element*, è il più piccolo elemento manipolabile rappresentante parte di un'immagine su uno schermo. Ogni *pixel* è quindi l'elemento minimo costituente una raffigurazione grafica, è monocromatico e il suo colore è classificato come una combinazione di tre componenti: Rosso, Verde e Blu (RGB); oppure quattro: Ciano, Magenta, Giallo e Nero (CMYK).

Il *pixel* è inoltre distinto tra digitale e fisico: il *pixel* digitale è l'unità minima di un'immagine, mentre il *pixel* fisico è definito convenzionalmente come l'unità minima di uno schermo. Poiché il colore del *pixel* digitale è una combinazione di tre o quattro colori, sarà necessario dotare il *pixel* fisico di tre o quattro *subpixels* (Figura 20), ossia elementi come fotodiodi o *led* che, una volta accesi, emettono luce a una particolare lunghezza d'onda nel campo dei rispettivi colori.

La loro combinazione sarà quindi percepita dall'occhio umano come il colore definitivo desiderato.



Figura 20 - Vista ingrandita di uno schermo in cui è possibile osservare i tre *subpixels* costituenti il singolo *pixel* RGB.³¹

³¹ Immagine tratta da: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Closeup_of_pixels.JPG
Ultimo accesso: 25 gennaio 2020.

Risoluzione e *Aspect Ratio*

In modo analogo a quanto descritto nel paragrafo precedente, anche nel caso della risoluzione possiamo distinguere tra risoluzione di un'immagine e risoluzione di uno schermo. Per risoluzione si intende la quantità di *pixels* che costituiscono l'immagine, o lo schermo, rispetto ad una dimensione caratteristica che è generalmente individuata sulla diagonale. La risoluzione è uno dei principali parametri con il quale si definisce la qualità con cui uno schermo è in grado di rappresentare un'immagine. La distinzione nasce dal fatto che uno schermo avente una certa risoluzione potrà riprodurre immagini aventi una risoluzione massima fino a quella supportata dal *display* stesso. Altrimenti, se sufficientemente moderno, lo schermo sarà dotato di un software di *scaling* che ridurrà la risoluzione dell'immagine fino alla massima riproducibile sul dispositivo. Considerando immagini rettangolari, l'*Aspect Ratio* (AR) definisce invece il rapporto tra il lato orizzontale e quello verticale di un'immagine o di uno schermo. Esso è un parametro importante poiché evidenzia l'effettiva geometria con la quale viene raffigurata un'immagine. Per fare un esempio, i primi *display* per *computer* erano costruiti con un AR di 1:1 o 4:3 (Figura 21), mentre i più recenti schermi possono variare dai 16:9 ai 32:9. Questo permette di visualizzare immagini con un lato orizzontale più grande sfruttando meglio l'ampio campo visivo dell'occhio umano e inserendo un numero maggiore di informazioni nella stessa immagine.

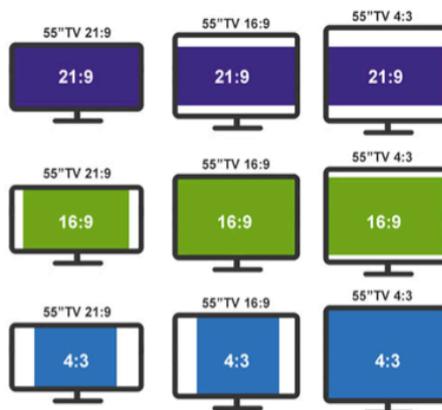


Figura 21- *Aspect Ratio* su schermi di ugual dimensione.³²

³² Immagine tratta da: <https://www.oficinadanet.com.br/tecnologia/19736-o-que-e-o-formato-189-e-qual-a-sua-diferenca-para-169>
Ultimo accesso: 22 dicembre 2019.

Densità di *pixels* per pollice, o PPI, e densità di *pixels* per grado, o PPD

Prendendo come riferimento una qualsiasi immagine digitale, si può immaginare come composta da tanti rettangoli monocromatici definiti come *pixels*. Avvicinando la rappresentazione a un sensore ottico, come ad esempio una telecamera o l'occhio umano, quest'ultimo otterrà una visione sempre più ingrandita dell'immagine e sarà quindi in grado di apprezzare meglio i dettagli che la compongono. Quando l'immagine si troverà a una certa distanza dal sensore, se i *pixels* non saranno sufficientemente piccoli, verranno discretizzati e l'immagine sarà dunque percepita come l'insieme dei *pixels* stessi e non più come un continuo.

Nel mondo dell'elettronica e dell'informatica si è quindi definita un'unità di misura per caratterizzare la qualità di un'immagine rappresentata da un *display*: il PPI (*Pixels Per Inch*), ossia la quantità fisica di *pixels* che sono presenti in una rappresentazione grafica di lato pari a un pollice, all'incirca 2,54 centimetri (Figura 22).

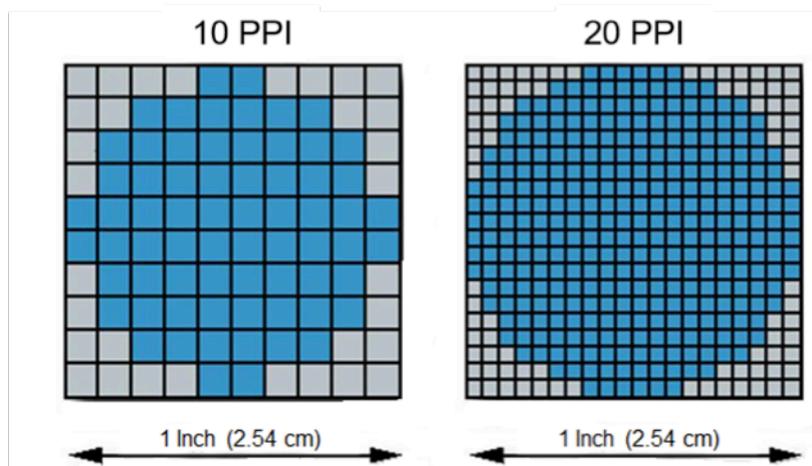


Figura 22 - Rappresentazione grafica dell'unità di misura *Pixel Per Inch*.³³

Affinché l'utilizzatore del sistema di realtà virtuale non si renda conto di avere davanti a sé un *display* ma abbia effettivamente la sensazione di osservare qualcosa di indistinguibile dalla realtà, è necessario dotare gli *headsets* di *display* appositamente progettati, in cui uno dei parametri più

³³ Immagine tratta da: <https://www.scientiamobile.com/what-is-pixel-density/>
Ultimo accesso: 22 dicembre 2019.

importanti è, per l'appunto, la densità di *pixels* per pollice. Per capire quale sia il limite di PPI oltre cui l'occhio umano non è più in grado di discretizzare i *pixels*, e quindi definire i limiti dopo i quali sia superfluo sviluppare ulteriormente la tecnologia, è necessario introdurre alcuni concetti della disciplina dell'optometria [1.13, 1.14].

Si definisce risoluzione ottica la capacità dell'occhio umano o di un sensore ottico di distinguere la minima forma, dettaglio o oggetto facente parte di un'immagine posta a una certa distanza. L'acuità visiva di risoluzione dell'occhio umano è misurabile in gradi o arcominuti (1 grado = 60 arcmin) e come trattato da Deering in "The Limits of Human Vision" [2.27], è possibile misurare un valore minimo di 0,47 arcominuti.

Come è possibile osservare in Figura 23, più un dettaglio dell'immagine si avvicina al sensore, più questo potrà essere piccolo purché sia almeno ampio quanto gli estremi del minimo angolo visivo oppure superiore, indicato con α .

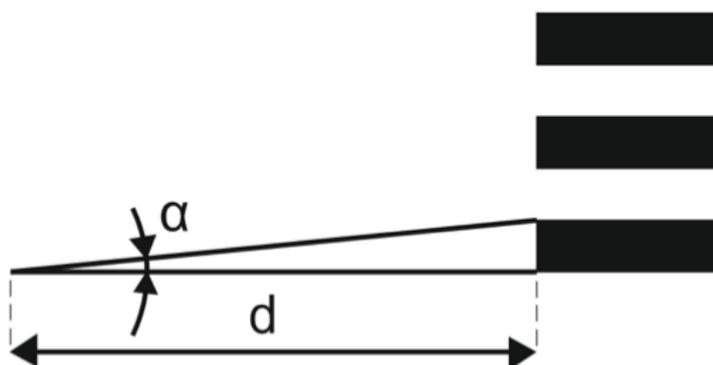


Figura 23 - Minimo angolo di risoluzione.³⁴

Supponendo ora di considerare la massima acuità visiva di risoluzione registrata durante le sperimentazioni, ossia 0,47 arcominuti, si può calcolare quale sia la minima dimensione del *pixel*, o *pds* (*pixel dot size*) di un'immagine, o di uno schermo, posta a una certa distanza d affinché sia possibile per l'occhio distinguere il singolo *pixel* da un altro:

$$pds = 2 \cdot d \cdot \frac{\sin \alpha}{2}$$

³⁴ Immagine elaborata personalmente.

Per fare un esempio concreto, supponiamo di considerare un *display* quadrato di ultima generazione avente dimensioni di 50 pollici sulla diagonale e una risoluzione 4K, ovvero 3840×2160 *pixels* (AR di 16:9). Sarà quindi costituito da 8'294'400 di *pixels*. Con semplici calcoli è possibile stabilire le dimensioni di un *pixel* quadrato costituente il *display*, ovvero la *pixel dot size*, che saranno pari a 0,0317 centimetri di lato.

Tramite la formula inversa della relazione soprariportata è possibile calcolare la distanza minima alla quale i *pixels* risultano indistinguibili. Per questo tipo di *display* è di:

$$d = \frac{pds}{\sin \alpha} = 231.87 \text{ cm}$$

Considerando quindi che in media l'occhio umano riesce a mettere a fuoco un'immagine posta a una distanza minima di 10 centimetri e che la massima acuità visiva di risoluzione è pari a 0,47 arcominuti, è possibile calcolare che la minima dimensione del *pixel* necessaria per risultare indistinguibile da un altro sarà di circa $1,367 \cdot 10^{-3}$ centimetri, corrispondente quindi a circa 1858 PPI. Tuttavia, mantenere la messa a fuoco a una distanza così ravvicinata affatica notevolmente l'occhio umano. Per questo motivo è interposta tra l'occhio e il *display* una lente ottica di Fresnel che apparentemente allontana il display ad una distanza indicativa di circa 25 centimetri, creando un campo visivo che normalmente supera gli 80 gradi.

Affinché a questa distanza i *pixels* non vengano distinti, sarà quindi necessaria una densità pari a 743 PPI, calcolata con una semplice proporzione. Volendo invece considerare la massima risoluzione come parametro limite oltre il quale non è più necessario sviluppare la tecnologia, si può utilizzare come riferimento il singolo *display* dell'*headset* HTC *Vive Pro*, che risulta avere una diagonale di 3,5 pollici con una risoluzione di 1440×1600. Per raggiungere i limiti di indistinguibilità del *pixel*, il *display* dovrebbe avere una risoluzione di 2018×2242 per una risoluzione totale di 4036×2242, ovvero prossima al formato normalmente conosciuto come 4K per questo specifico schermo.

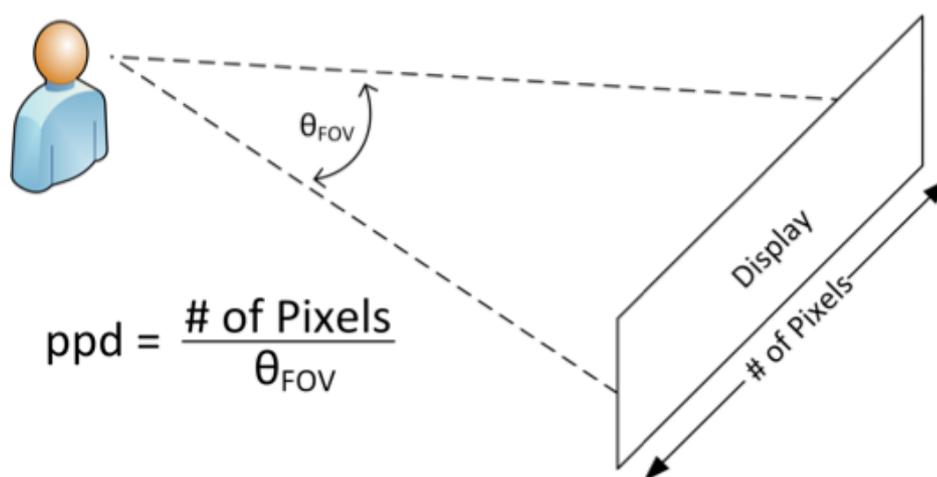


Figura 24 - Immagine esplicativa dell'unità di misura *Pixels Per Degree*.³⁵

In generale, il confronto tra sistemi ottici per la realtà virtuale è effettuato tenendo in considerazione anche l'ampiezza del campo visivo che l'utente sperimenta indossando l'*headset*. Per tale ragione, si può definire un'ulteriore unità di misura denominata *Pixels Per Degree*, o PPD (Figura 24), che determina quanti *pixels* sono contenuti tra due rette divergenti tra loro con un angolo di 1 grado, poste su un piano e intersecanti un display ad una certa distanza focale caratteristica per ogni visore.

Quest'unità di misura, a differenza del PPI, permette di tenere in considerazione la variazione di distanza focale da un dispositivo a un altro. Il PPI non è quindi ideale per confrontare la qualità visiva di sistemi ottici, mentre il PPD fornisce un riferimento assoluto che consente di effettuare un paragone più agevole senza tener conto di ulteriori parametri.

Questa introduzione ha lo scopo di rendere noti al lettore quali siano i limiti fisici di risoluzione e densità di *pixels* oltre il quale risulta superfluo sviluppare la tecnologia grafica degli *headsets*.

Nella pagina successiva sono riportati in Tabella 1 i più recenti sistemi per la realtà virtuale rispetto ai principali parametri di riferimento, al fine di comprendere e paragonare tra loro i livelli tecnologici raggiunti [2.19]:

³⁵ Immagine tratta da: https://e2e.ti.com/blogs_/b/behind_the_wheel/archive/2018/11/09/how-to-design-high-resolution-retinal-limited-displays-in-an-ar-hud
 Ultimo accesso: 24 dicembre 2019.

Specifiche	Oculus Quest	Oculus Rift S	HTC Vive Pro	HP Reverb	PIMAX 8K
FOV [deg]	100°	115°	110°	114°	200°
Display	OLED ³⁶	LCD ³⁷ 5,5”	Dual AMOLED ³⁸ 3,5”	DUAL LCD 2,89”	CLPL ³⁹
Risoluzione	2560x1440	2560x1440	2880x1600	4320x2160	7680x2160
PPI	538	538	615	1057	806
PPD	14.4	11.63	13.09	18.94	22.58
Massa [g]	570	563	563	500	500
DOF	6	6	6	6	6
Tracking	Inside-Out	Inside-Out	External	Inside-Out	External
Sound Sys	No	No	Si	Si	Si

Tabella 1 - Comparazione dei principali *headsets* moderni [2.19].

³⁶ OLED: *Organic Light-Emitting Diode*

³⁷ LCD: *Liquid Crystal Display*

³⁸ AMOLED: *Active Matrix Organic Light Emitting Diode*

³⁹ CLPL: *Customized Low Persistence Liquid Display*

4 – *Software e Hardware* utilizzati

Per la realizzazione del presente progetto è stato fatto ampio uso di *software* informatici adatti a gestire la creazione di una scena in realtà virtuale con la possibilità di interazione tra quest'ultima e l'utente. Nella presente sezione tali *software* sono elencati e descritti.

4.1 – *Unity*

Unity è un noto motore grafico multiplatforma, sviluppato da *Unity Technologies*, è ampiamente usato nell'industria videoludica e in generale per la creazione di ambienti virtuali interattivi. Nel caso del progetto in esame, è stata utilizzata la versione *Unity 2019.2.13f1 Personal* (Figura 25).

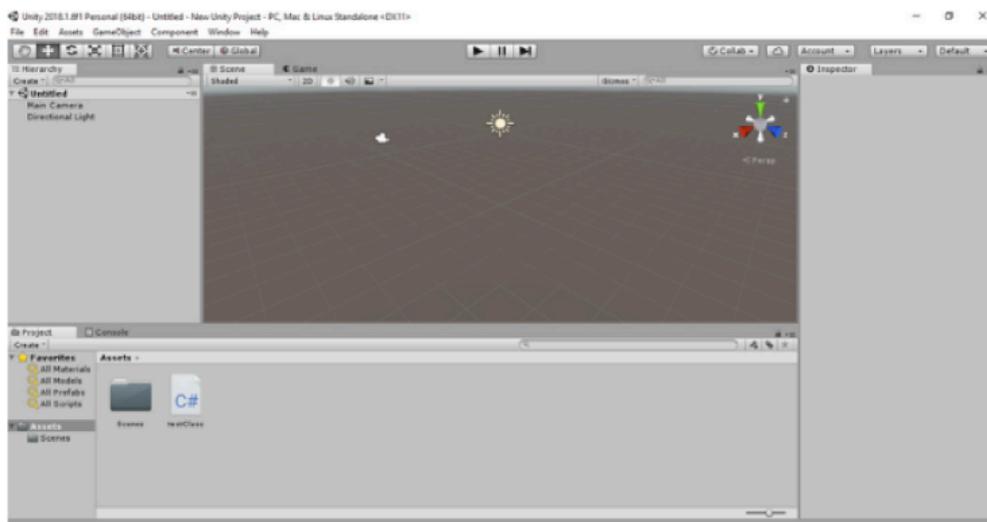


Figura 25 - Interfaccia principale di *Unity*.⁴⁰

Tale programma consente la creazione di scene grafiche partendo da alcuni oggetti base predefiniti come cubi, sfere e cilindri, oppure di importare ambienti grafici progettati con altri programmi al fine di renderli interattivi attraverso gli strumenti propri di *Unity*. La gestione degli oggetti della scena avviene per mezzo di una gerarchia (Figura 26) in cui gli oggetti sono classificati secondo la loro dipendenza da altri oggetti.

⁴⁰ Immagine tratta dal *software Unity*.

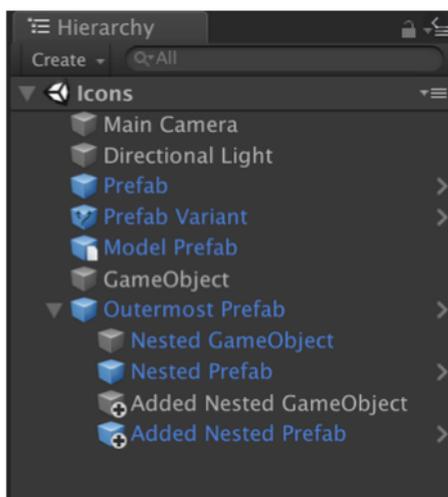


Figura 26 - Esempio di gerarchia in Unity.⁴¹

In tal modo è possibile decidere quali oggetti siano dipendenti da altri per quanto riguarda posizione, rotazione degli assi, grandezza e altri parametri, e gestire un insieme di oggetti tra loro correlati lavorando su quello posizionato più in alto nella gerarchia, denominato “padre”.

Un unico insieme di oggetti correlati tra loro può essere salvato e usato in seguito come *Prefab*, come mostrato in Figura 26. I *prefab* sono gli oggetti con icona e nome rappresentati in blu.

Ogni oggetto presenta poi una serie di componenti che contengono tutte le informazioni che definiscono lo stesso. Per vedere e modificare i componenti assegnati ad un oggetto è necessario accedere all'apposito *Inspector*. Ogni oggetto, anche un *Empty Object* ovvero un oggetto vuoto usato spesso come riferimento “padre” per altri oggetti, contiene di *default* il componente *Transform* (Figura 27), contenente la sua posizione nella scena, l'angolo di rotazione attorno a ognuno dei suoi tre assi e la dimensione dell'oggetto lungo questi ultimi.

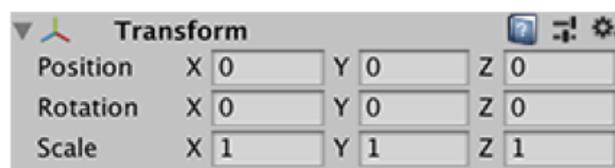


Figura 27 - Componente *Transform*.⁴¹

⁴¹ Immagine tratta dal *software Unity*.

Per modificare queste impostazioni è possibile operare direttamente sull'*Inspector* oppure dalla scena attraverso tre pulsanti presenti sull'interfaccia grafica di *Unity*.

Oltre al *Transform*, esistono molti altri componenti assegnabili ad un oggetto utili ad aggiungere altre caratteristiche. Per esempio, è possibile cambiare il colore di un oggetto attraverso il componente *Mesh Renderer*, inserire un comportamento fisico attraverso il componente *Rigidbody*, un *Material* che permetta all'oggetto di interagire in un certo modo con altre superfici o inserire un *Collider* di varie forme (sferico, ovoidale, cilindrico o cubico) per permettere a *Unity* di gestire un'interazione tra due o più oggetti. A ogni oggetto è inoltre possibile assegnare uno o più *scripts*, ossia un file di testo scritto in C# o in altri linguaggi informatici, creato dall'utente per assegnargli un comportamento personalizzato o per gestire alcuni eventi all'occorrenza. In questo modo è possibile permettere al *player* di interagire con la scena attraverso la tastiera o il mouse e di attivare alcuni eventi al verificarsi di certe condizioni (Figura 28).

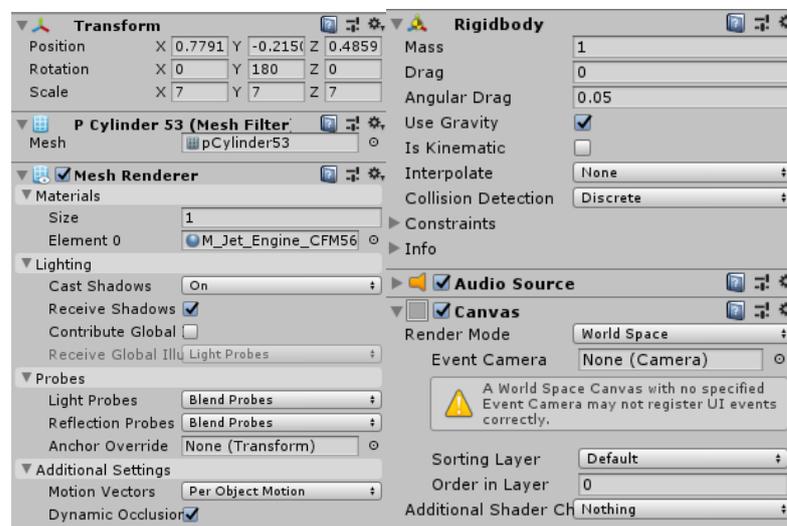


Figura 28 - Esempi di componenti di un oggetto.⁴²

Un progetto Unity consiste in un insieme di cartelle aventi i *files* che contengono e gestiscono le informazioni che l'utente inserisce attraverso l'interfaccia grafica (Figura 29). Tra le cartelle di progetto è presente la cartella *Scenes* che contiene i dati relativi alle scene presenti nel progetto.

⁴² Immagine tratta dal *software Unity*.

Oltre alle cartelle di base presenti in ogni progetto, è possibile creare altre cartelle per conservare i *files* personalizzati creati durante lo sviluppo.

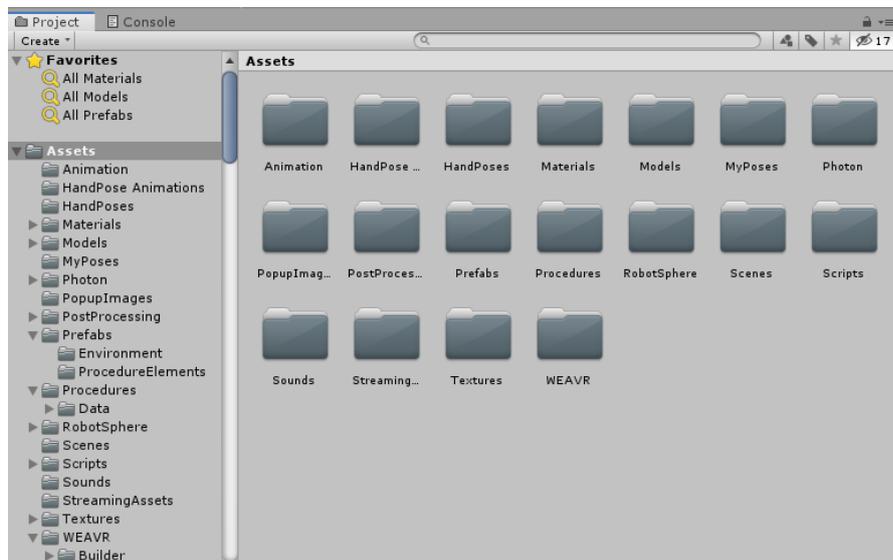


Figura 29 - Cartelle di progetto.⁴³

Una volta preparata la scena con tutti i suoi oggetti e i rispettivi comportamenti, è possibile entrare in modalità *Play*, in cui sarà permesso all'utente di interagire con la scena compatibilmente con gli oggetti presenti e i comportamenti ad essi assegnati.

Con *Unity* è quindi possibile sfruttare delle scene create in ambienti più adatti alla progettazione grafica vera e propria per costruire una scena con cui l'utente può interagire. Questo processo è alla base del lavoro svolto per il progetto in esame. Attraverso un *plug-in* descritto in seguito, è infatti possibile rendere compatibile l'ambiente interattivo sviluppato in *Unity* con la realtà virtuale, consentendo quindi all'utente di interagire con la scena in *Virtual Reality*.

⁴³ Immagine tratta dal *software Unity*.

4.2 – SceneFusion

*SceneFusion*⁴⁴ è un *plug-in* di *Unity*. Si può attivare scaricando il pacchetto e importandolo nel progetto di *Unity* sul quale si sta lavorando.

Questo *tool* permette la condivisione della scena su più dispositivi attraverso una connessione *Internet*, in modo da permettere a più persone di agire indipendentemente sulla stessa scena anche in remoto.

In caso un utente selezioni un oggetto per modificarlo, il *tool* blocca l'accesso dell'altro utente a tale oggetto e a tutti i suoi figli, in modo da evitare conflitti all'interno della scena. La condivisione avviene attraverso la creazione di un profilo sul portale *Unity* e la successiva partecipazione ad un progetto condiviso con altri profili. Questo permette a chi ha aggiunto il pacchetto *SceneFusion* nel proprio progetto, di inserire le proprie credenziali e di poter così creare o raggiungere una connessione con altri profili che abbiano partecipato al progetto stesso.

E' da sottolineare come il pacchetto *SceneFusion* consenta esclusivamente la condivisione della scena, mentre per quanto riguarda i *tool* che permettono l'accesso alla scena di *Unity* in VR è necessario lavorare in modo separato.

4.3 – HTC Vive Pro

HTC Vive Pro è la strumentazione *hardware* usata per questo progetto, e permette all'utente, definito come *Player*, di accedere alla realtà virtuale e di interagire con essa. E' realizzata dalle aziende HTC e *Valve Corporation* ed è formata dalle seguenti componenti:

- un visore, detto *headset*, che permette all'utente di immergersi nella realtà virtuale e di visualizzare tutto l'ambiente VR. E' costituito da due display AMOLED da 3.5 pollici in diagonale, ha una risoluzione di 1440×1600 pixels per occhio e consente un campo visivo di 110 gradi di ampiezza. E' dotato di cuffie e microfono ed è collegato a un *computer* tramite una connessione *USB*, alla scheda grafica tramite una *DisplayPort*TM e alla presa di corrente tramite un alimentatore dedicato.

⁴⁴ <https://www.kinematicsoup.com/scene-fusion/>

Per una buona qualità video è necessaria una scheda grafica performante, nel nostro caso è stata utilizzata una *Nvidia GTX 1080 Ti*. E' inoltre dotato di un sistema di sensori che consentono al *software SteamVR*, che sarà illustrato in seguito, di seguirne i movimenti in base alla posizione relativa con le *base stations*, il cui scopo è di permettere all'utente di muoversi nell'ambiente simulato in modo coerente con quanto fatto in quello reale. Tali sensori sono lo *SteamVR Tracking*, un *G-Sensor*, un giroscopio, un sensore di prossimità e un sensore IPD, o *Interpupillary Distance Sensor*, che misura la distanza tra il centro delle lenti di Fresnel di cui l'*headset* è dotato e ne permette la regolazione. Nella parte frontale sono inoltre presenti due sensori ottici che permettono all'utente di osservare l'ambiente fisico in cui si trova realmente anche indossando il visore.

In Figura 30 è mostrato il sistema completo;



Figura 30 – Sistema completo per la realtà virtuale HTC Vive Pro.⁴⁵

- due *controllers*, uno per mano, che consentono al *Player* di interagire con l'ambiente simulato e di svolgere azioni come afferrare un oggetto o teletrasportarsi all'interno della scena. Questi *controllers* sono dotati di un *touchpad*, generalmente usato dall'utente per teletrasportarsi da un punto all'altro dell'ambiente virtuale o per girare su se stesso senza dover ruotare la testa, due pulsanti usati per accedere ed effettuare operazioni sul menù di *SteamVR*, un *trigger* posteriore usato per attivare determinate interazioni con gli oggetti dell'ambiente e due tasti laterali che consentono all'evenienza di svolgere particolari azioni.

⁴⁵ Immagine tratta da: <https://store.hp.com/ItalyStore/Merch/Product.aspx?id=4QU87AA&opt=ABB&sel=ACC> Ultimo accesso: 28 gennaio 2020.

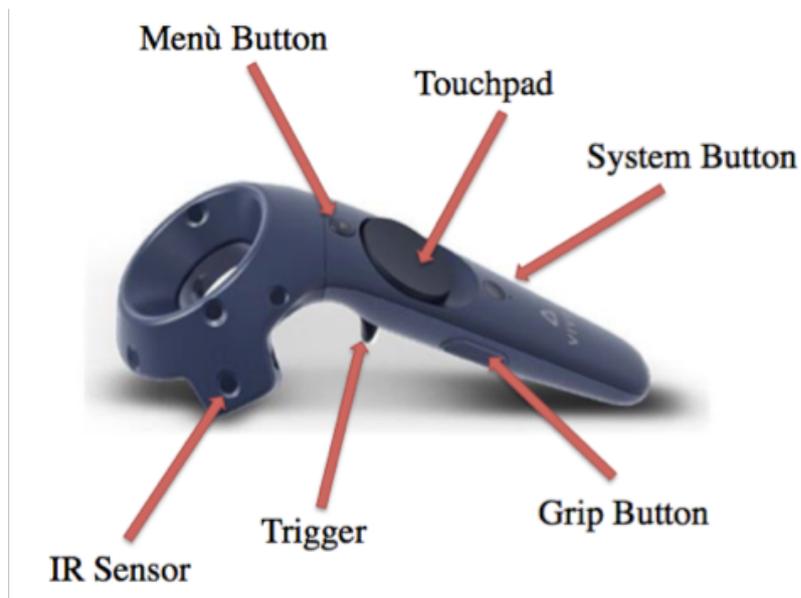


Figura 31 - Controller per HTC Vive Pro.⁴⁶

Sono dotati anch'essi dei sensori *SteamVR Tracking* per la captazione della luce infrarossa (Figura 31);

- due *base stations* (Figura 32), che permettono al *software SteamVR* di seguire i movimenti dell'*headset* e dei *controllers*, e quindi all'utente di muoversi nell'ambiente simulato in maniera coerente con quanto impostato su *SteamVR* al momento dell'installazione.



Figura 32 - Base stations per HTC Vive Pro.⁴⁷

⁴⁶ Immagine tratta da: <https://www.vive.com/us/accessory/> e successivamente elaborata. Ultimo accesso: 28 gennaio 2020.

⁴⁷ Immagine tratta da: <https://www.valvesoftware.com/it/index/base-stations> Ultimo accesso: 28 gennaio 2020.

4.4 – STEAM VR

SteamVR è il *software* che permette la gestione dell'*hardware* illustrato nel precedente paragrafo, per una corretta fruizione dell'ambiente simulato in realtà virtuale. Al momento dell'installazione, è necessario posizionare le *base stations* all'interno della stanza, una di fronte all'altra, ad una distanza reciproca massima di 5 metri, e di impostare i confini della stanza tramite l'uso dei telecomandi. Il *software* permetterà innanzitutto di capire se la stanza sia abbastanza grande da consentire un utilizzo sicuro della realtà virtuale e, in seguito, di tracciare i confini della stanza in modo da renderli visibili nella realtà virtuale per evitare di urtare involontariamente le pareti. Inoltre, quest'operazione consente di riprodurre l'ambiente creato, ad esempio su *Unity*, in VR in modo coerente, mantenendo cioè correttamente la posizione reciproca degli oggetti, dei *controllers* e del visore, e quindi del *Player*, rispetto all'ambiente. Una volta definite correttamente tutte le impostazioni iniziali, *SteamVR* consente all'utente, attraverso opportuni menù, di svolgere determinate operazioni. Per esempio, è possibile per l'utilizzatore osservare tramite il visore quanto avviene sul *monitor* del *PC* a cui è collegato ed eventualmente agirvi direttamente, osservare la stanza attraverso il visore grazie a due telecamere posizionate sul visore stesso, modificare alcune impostazioni audio e video, accedere a contenuti di *Valve* quali demo, giochi in VR e molto altro. Va inoltre aggiunto che tale *software* è compatibile con la maggior parte dei principali visori usati per la realtà virtuale presenti sul mercato.

4.5 – WEAVR

WEAVR è una piattaforma per la costruzione, *deployment* e utilizzo di VR sviluppata da TXT *e-solutions* SpA e commercializzata dalla controllata PACE GmbH. Durante il lavoro di tesi è stato utilizzato il modulo *WEAVR Editor*, il quale è un *plug-in* di *Unity*, che permette di sviluppare applicativi VR utilizzando un *editor* visuale senza sviluppo di codice. Il *tool* permette quindi di creare la procedura di *training* visualmente collegando la scena di *Unity* e creando quindi un'applicazione VR. La procedura può essere usata tramite il visore HTC *Vive Pro* in precedenza descritto.

Attraverso tale *plug-in*, sarà quindi possibile interagire in prima persona con l'ambiente *Unity* in modalità *Play*. Come *SceneFusion*, anche WEAVR si presenta come un pacchetto da aggiungere alle cartelle del progetto *Unity*. Una volta terminato il trasferimento del pacchetto, occorre attivare in *Player Settings* il supporto alla realtà virtuale che importa pacchetti di codice relativi all'esecuzione della scena in realtà virtuale. Inoltre, è necessario impostare il *.net 4.X* in *API Compatibility Level* per accedere alle librerie di *software* più recenti presenti in *Unity*, le quali consentono una corretta gestione del pacchetto. Queste operazioni generano il *GameObject* WEAVR all'interno della scena, al momento ancora vuoto, con un figlio denominato *IDBookkeeper*. È a questo punto attivo il pulsante WEAVR nella barra dei menù. Cliccandovi sopra è possibile accedere a *Manage Extensions* per selezionare le estensioni da attivare nel progetto *Unity*. Nel caso in esame è stata attivata solo l'estensione *Virtual Reality*. Questa operazione attiva le funzionalità di *SteamVR* tra cui vi è il *Setup* della stanza impostato dall'utente nella modalità *Play* di *Unity*. Infine, per terminare l'installazione del pacchetto occorre cliccare su WEAVR → *Setup* per impostare nella scena gli oggetti che creano il collegamento tra l'*hardware* e l'ambiente, e che permettono di usare tutte le funzionalità del pacchetto WEAVR.

Tale pacchetto prevede, innanzitutto, una serie di oggetti e di *Prefabs* che consentono all'utente, come anticipato, di interagire con la realtà virtuale. Per ogni *controller* e per l'*headset* è presente un oggetto che segue i movimenti effettuati dall'utente e gli permette quindi di posizionarsi a piacimento nella scena.

In particolare, in corrispondenza dell'*headset* è presente una telecamera virtuale che, spostandosi coerentemente con il movimento del visore, permette all'utente di esplorare la scena come normalmente farebbe nella realtà. Sono inoltre presenti *Prefabs* chiamati *Teleport Point* e *Teleport Area* che permettono di inserire nella scena rispettivamente un punto e una superficie delimitata all'interno della quale è consentito all'utente di teletrasportarsi. In questo modo, per raggiungere un dato punto non è necessario spostarsi fisicamente ma è sufficiente puntare il *controller* verso la destinazione e premere il *touchpad* (Figura 33).

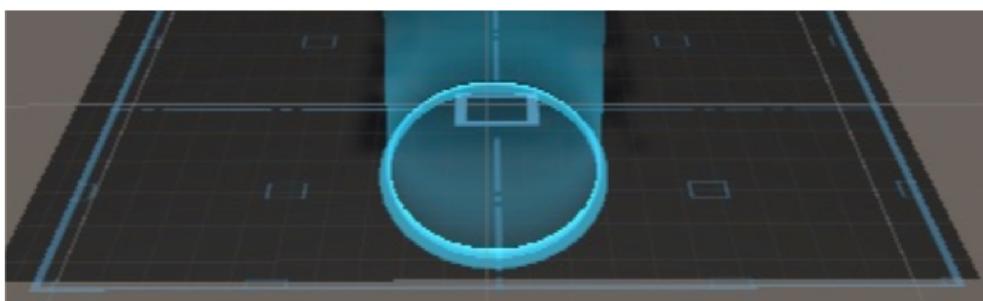


Figura 33 - *Teleport Point* (al centro, di forma circolare) e *Teleport Area* (delimitata dai segmenti blu).⁴⁸

Ad ogni oggetto è anche possibile assegnare una serie di *scripts* preimpostati presenti nel pacchetto WEAVR che gli conferiscono precisi comportamenti. Alcuni degli *scripts* più usati sono *Grabbable*, che permette all'utente di afferrare l'oggetto tenendo premuto il *trigger* del *controller*, *Executable*, che permette di attivare azioni al *click* dell'oggetto e *Hinge Door*, che conferisce ad un oggetto la possibilità di essere aperto e chiuso come una porta a cerniere.

Infine, il pacchetto WEAVR contiene il cosiddetto *Procedure Editor*, uno strumento che consente la creazione e la gestione di procedure da effettuare all'interno della scena *Unity* per scopi simulativi.

Tale *Procedure Editor* consiste in un ambiente di lavoro dove è possibile inserire dei blocchi, denominati *Nodes*, all'interno dei quali è possibile inserire azioni e condizioni che permettono di creare un flusso in cui l'utente, in modalità *Play*, andrà ad agire per simulare le procedure volute.

⁴⁸ Immagine tratta dal *software Unity*.

Per ogni blocco semplice, detto semplicemente *Node*, è possibile inserire:

- le *Enter Actions*, ovvero delle azioni da svolgere appena il flusso della procedura accede al dato blocco;
- le *Exit Conditions*, ovvero la o le condizioni al verificarsi delle quali la procedura esce dal blocco. Nel caso in cui le *Exit Conditions* fossero più di una, sarebbe possibile dire al programma se uscire dal blocco al verificarsi di tutte le condizioni oppure solo per una loro parte;
- le *Exit Actions*, ovvero le azioni da effettuare al verificarsi dell'uscita dal nodo.

In Figura 34 è rappresentato, a titolo d'esempio, un nodo.

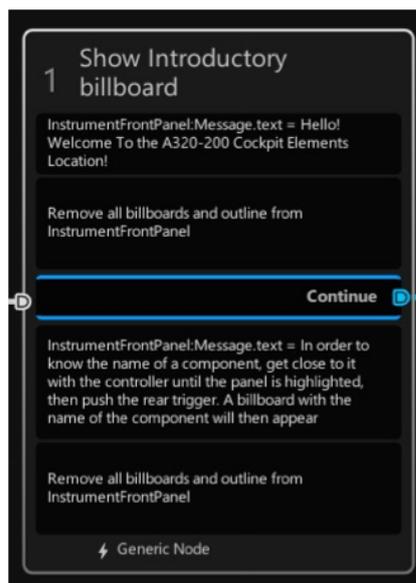


Figura 34 - Esempio di nodo.⁴⁹

I nodi saranno collegati tra di loro attraverso delle connessioni, denominate *Transitions* o rami, che gestiscono il flusso logico da seguire all'interno della procedura. Ogni *Transition* si attiva nel momento in cui il blocco da cui esce avrà verificato le *Exit Conditions*. Ogni nodo semplice può ricevere in ingresso più *Transitions* ma deve averne una sola in uscita.

⁴⁹ Immagine tratta dal *Procedure Editor* di Unity.

Nel caso in cui più *Transitions* entrino nello stesso nodo, quest'ultimo sarà attivato quando una o più delle connessioni in ingresso saranno attive. E' possibile assegnare a una *Transition* una o più azioni che verranno svolte nell'ordine impostato quando il flusso attraverserà la transizione stessa (Figura 35).

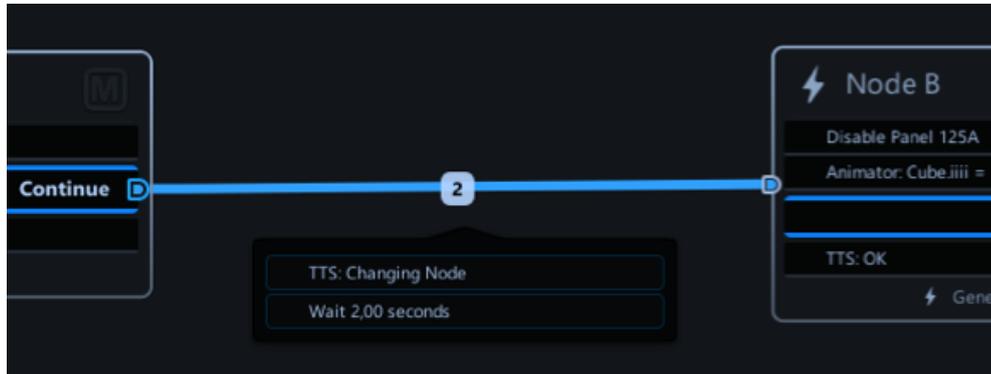


Figura 35 - Esempio di transizione con una serie di istruzioni assegnata.⁵⁰

E' inoltre possibile inserire degli *Hub Nodes*, ovvero dei nodi non contenenti azioni, descritti da un numero n di rami di ingresso e un numero m di rami in uscita. La procedura entrerà nell'*Hub Node* solo quando tutti i rami d'ingresso saranno attivi e attiverà immediatamente tutti i rami in uscita.

Gli *Hub Nodes* sono utili nel caso in cui si voglia gestire la procedura attraverso logiche più complesse rispetto al semplice accesso a blocchi sequenziali, ad esempio per accedere contemporaneamente a più blocchi in parallelo (Figura 36).

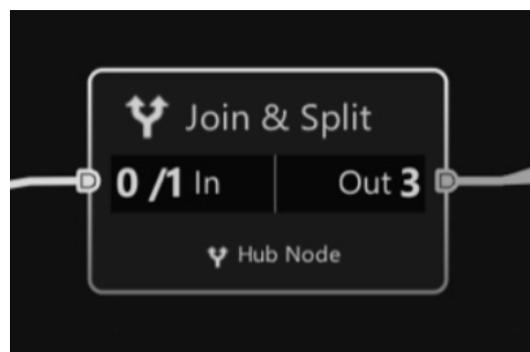


Figura 36 - Esempio di Hub Node.⁵⁰

⁵⁰ Immagine tratta dal *Procedure Editor* di Unity.

Questo paragrafo conclude il capitolo dedicato all'*hardware* e ai *software* utilizzati per lo svolgimento del progetto. Nel prossimo capitolo sarà descritto il velivolo Airbus A320 e le principali componenti del ponte di volo che sono state implementate nell'ambiente virtuale di *Unity*.

Tale approfondimento è utile per comprendere quale sia l'ecosistema dentro al quale l'utente si troverà ad operare e con il quale dovrà familiarizzare.

5 – AIRBUS

La Airbus è una azienda multinazionale fondata in Francia nel 1970 e produce velivoli ad ala fissa e rotante per il settore civile e militare. È la seconda industria manifatturiera di aerei del mondo, seconda solo alla statunitense Boeing. Si divide principalmente in tre divisioni: *Commercial Aircraft, Defence and Space e Helicopters*.



Figura 37 - Airbus Logo.⁵¹

La progettazione e la realizzazione dei velivoli avviene principalmente in Europa, distribuita per la maggior parte in Francia ma con importanti stabilimenti in Gran Bretagna, Germania e Spagna. Altri componenti vengono realizzati anche negli Stati Uniti e in Cina. Per quanto riguarda il settore civile, l'azienda ha progettato una vasta gamma di velivoli per il trasporto di passeggeri e di merci identificati generalmente dall'acronimo A3xx, dove le "x" vengono sostituite dal numero del modello. Il primo velivolo prodotto dalla Airbus fu l'A300 nel 1972 e da allora sono stati prodotti diversi modelli adatti a coprire tutte le rotte sul globo terrestre.

Fra questi vi è anche il famoso Airbus A380, l'aereo da trasporto passeggeri più grande al mondo, in grado di ospitare fino a 853 passeggeri con la configurazione a singola classe e un peso massimo al decollo di 575 tonnellate. Nonostante l'enorme sforzo economico e tecnologico per lo sviluppo di questo modello, le compagnie aeree non hanno ritenuto economicamente vantaggioso acquistare e mantenere velivoli di queste dimensioni e di tali portate, puntando maggiormente su velivoli dalla taglia

⁵¹ Immagine tratta da: <https://futuresky-safety.eu/immagine9/>
Ultimo accesso: 30 gennaio 2020

più contenuta e in grado di trasportare un numero inferiore di viaggiatori mantenendo comunque basso il costo per il passeggero.

Si confermano quindi vantaggiosi per le compagnie aeree i ben noti modelli dell'azienda Airbus: l'A300, A318, A319, A320 e A321, velivoli per il trasporto a corto e medio raggio, e i velivoli A310, A330, A340, A350 per quello a medio e lungo raggio, ampiamente utilizzati da molte compagnie aeree in tutto il mondo. Questi velivoli possono trasportare da 107 a 412 passeggeri, necessitano di soli due piloti e fino a dieci membri del personale di servizio [2.7].

5.1 – AIRBUS A320

Nel corso di questo elaborato sono analizzate le procedure progettate specificatamente per uno dei velivoli più comuni in servizio in tutto il mondo, l'Airbus A320. Progettato negli anni '80, l'A320 è uno dei più venduti di casa Airbus con più di 9200 esemplari costruiti e un costo per unità di circa 100 milioni di dollari. Il velivolo è caratterizzato da una lunghezza di 37,57 metri, un'apertura alare di 34,10 metri, un diametro della fusoliera di 3,95 metri, un peso a vuoto di circa 62 tonnellate e un massimo di 164 passeggeri o 34900 kilogrammi di carico.



Figura 38 - Airbus A320.⁵²

⁵² Immagine tratta da: <https://www.aimaltitude.com/aim-altitude-selected-as-airbus-a320-sfe-galley-supplier/> Ultimo accesso: 30 gennaio 2020.

È generalmente dotato di due motori turbofan CFM-56, che possono erogare fino a 120 kN di spinta ciascuno e unitamente alle 29 tonnellate di combustibile imbarcabile gli consentono di volare per un massimo di 5700 chilometri ad una velocità massima pari a 0,82 Mach, circa 1010 km/h [2.7]. Le medie dimensioni e l'alta automazione fanno dell'Airbus A320 un velivolo estremamente versatile, in grado di atterrare nella maggior parte degli aeroporti nel mondo, rendendolo interessante per le compagnie aeree. Essendo un mezzo di largo utilizzo, nasce l'esigenza per le compagnie di addestrare il personale all'utilizzo di questa macchina. Il costo piuttosto elevato dei velivoli rende economicamente dispendioso addestrare piloti, assistenti di volo e personale di manutenzione sul velivolo reale, poiché questo significherebbe tenere in stato non operativo più di un aereo da destinare all'attività di formazione. Per ridurre la spesa si ricorre dunque all'addestramento in simulatori fisici e, più recentemente, in ambienti virtuali che riproducono nella loro totalità l'intero velivolo e i sistemi dell'Airbus A320.

Per comprendere meglio il contenuto delle procedure implementate nel corso di questo elaborato, sarà ora presentata una panoramica dei principali sistemi che compongono il velivolo.

5.1.1 – Sistemi di bordo del velivolo Airbus A320

Come nella maggior parte delle macchine da trasporto, la gestione dei sistemi di bordo e la regolazione del funzionamento avviene in uno specifico luogo denominato cabina di pilotaggio, chiamata in gergo tecnico *cockpit* o *flight deck*. All'interno della cabina di pilotaggio, i piloti possono gestire in modo diretto e indiretto i vari apparati che compongono l'aereo.

Per chiarezza, si definisce la differenza tra questi due tipi di gestione: nel controllo diretto, l'intervento del pilota su un comando aziona direttamente l'apparato comandato; nel caso, invece, di gestione indiretta si intende quel tipo di comando che una volta avviato, oltre a comandare direttamente un determinato apparato, può far riconfigurare automaticamente altri sistemi

correlati ad esso e, in alcuni casi, può far sì che i sistemi vengano gestiti automaticamente durante le fasi di volo, senza l'intervento dei piloti.

I velivoli moderni sono diventati piuttosto complessi rispetto ai loro predecessori e sono composti da un certo numero di sistemi principali che possiamo elencare come:

- struttura;
- sistema elettrico;
- sistema idraulico;
- sistema avionico;
- sistema propulsivo;
- sistema pneumatico.

Tutti questi sistemi interagiscono tra loro durante tutte le fasi di missione e possono essere gestiti dai piloti in modo manuale o automatico.

Ogni sistema si suddivide in molti altri sottosistemi che a loro volta interagiscono tra loro per garantire il corretto funzionamento del velivolo. Per controllare tutti questi sottosistemi sono necessari centinaia di interruttori, manopole, *display* e in generale servono diversi tipi di dispositivi di *input* e *output*. A causa dell'elevato numero di dispositivi per il controllo, è necessario rendere più semplice ed intuitiva possibile la disposizione di questi ultimi all'interno della cabina di pilotaggio.

Vengono quindi individuate tre zone principali raggiungibili dalla posizione seduta dei piloti: *il front panel, il pedestal e l'overhead panel*, visibili in Figura 39.

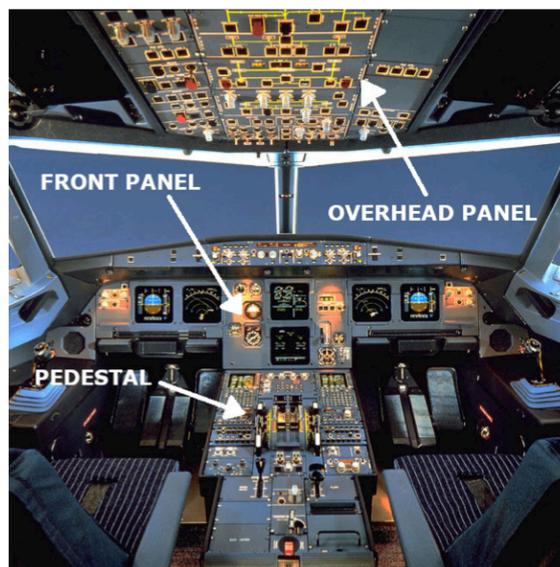


Figura 39 - Cabina di pilotaggio dell'Airbus A320.⁵³

⁵³ Immagine tratta da: <http://i.imgur.com/06dB3Kb.jpg> e personalmente elaborata. Ultimo accesso 30 gennaio 2020.

5.1.2 – *Front Panel*

Il cosiddetto *front panel* è quella parte del *cockpit* posto davanti ai piloti e ospita la maggior parte dei dispositivi di *output*, ossia quelli in grado di fornire informazioni visive e sonore. È così disposto per essere facilmente monitorabile dall'equipaggio durante l'attività di volo, infatti si trova appena al di sotto del *windshield*, o parabrezza, e mostra tutti i parametri relativi al velivolo in *real-time*.



Figura 40 - *Glass Cockpit* del velivolo Airbus A320.⁵⁴

Nel *front panel* si individuano diversi *display* che nel linguaggio tecnico vengono definiti nel loro insieme con il nome di *glass cockpit*. Questa definizione è piuttosto recente e fa diretto riferimento al largo utilizzo di pannelli a cristalli liquidi che mostrano ai piloti le informazioni necessarie a condurre e monitorare il mezzo. Infatti, fino a pochi decenni fa, la strumentazione a bordo mostrava le informazioni per mezzo di sistemi meccanici con lancette e quadranti incisi. L'introduzione di pannelli a cristalli liquidi ha permesso di semplificare notevolmente il *layout* degli strumenti e la lettura delle informazioni, riducendo la probabilità di guasti agli strumenti stessi.

⁵⁴ Immagine tratta da: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:A319.A320.A321.jpg>
Ultimo accesso: 30 gennaio 2020.

Oltre a rendere più pulito e ordinato il *front panel*, i *display* LCD consentono di navigare all'interno dei programmi di gestione dei vari sistemi di bordo in modo tale da consentire il monitoraggio di centinaia di parametri. Ogni *display* sul *front panel* ha la sua specifica funzione e, come mostrato in Figura 40, si evidenziano da sinistra a destra il *Primary Flight Display (PFD)*, il *Navigation Display (ND)*, al centro l'*ECAM Upper Display* e l'*ECAM System Display*. Il *Primary Flight Display* e il *Navigation Display* si ripetono in modo speculare per la postazione del primo ufficiale, posta sul lato destro. Il *PFD* e il *ND* fanno parte del cosiddetto *EFIS* o *Electronic Flight Instrument System*. Questo sistema ha lo scopo di gestire le informazioni relative al volo e di mostrarle ai piloti attraverso pannelli e spie luminose.

EFIS – Electronic Flight Instrument System

L'*EFIS* o *Electronic Flight Instrument System* è il sistema di strumenti elettronici di cui sono dotati tutti i velivoli moderni e che nella sua parte visibile definisce il cosiddetto *Glass Cockpit*, ossia l'insieme degli schermi a tubo catodico o a cristalli liquidi sui quali vengono mostrati tutti i parametri relativi ai sistemi di bordo e a quelli di volo⁵⁵ [2.8].

Questo sistema è solitamente composto dai *computer* di bordo, dai *display* e dai pannelli di *input* per l'inserimento di dati, e permette la gestione dei sistemi e la parziale riconfigurazione dell'interfaccia grafica.

L'introduzione di questo sistema ha permesso di semplificare la visualizzazione della strumentazione di bordo, riducendo il carico di lavoro del pilota e la complessità nella gestione dei sistemi di bordo.

Primary Flight Display e Electronic Attitude Direction Indicator

Come definito dalla *Federal Aviation Authority*, l'ente certificatore aeronautico degli Stati Uniti d'America, in "*Chapter 02: Electronic Flight*

⁵⁵ https://www.skybrary.aero/index.php/Electronic_Flight_Instrument_System
Ultimo accesso: 2 febbraio 2020.

Instrument” [2.28], il *Primary Flight Display*⁵⁶ è il pannello fisico preposto a mostrare i principali parametri di volo del velivolo, in particolare quelli fondamentali per orientare e localizzare il mezzo nello spazio su uno strumento elettronico definito EADI o *Electronic Attitude Direction Instrument* (Figura 41).

Sono infatti mostrati l’indicatore d’assetto al centro del *display*, la quota in piedi (1 *ft* = 0,3048 m) sulla destra, l’indicatore di velocità verticale VSI (*Vertical Speed Indicator*) sull’estrema destra, la velocità indicata IAS (*Indicated Air Speed*) in nodi (1 *knot* = 1,852 km/h) sulla sinistra, la bussola magnetica o *compass* nella parte inferiore e, infine, altre indicazioni evidenziate da acronimi di diversi colori.

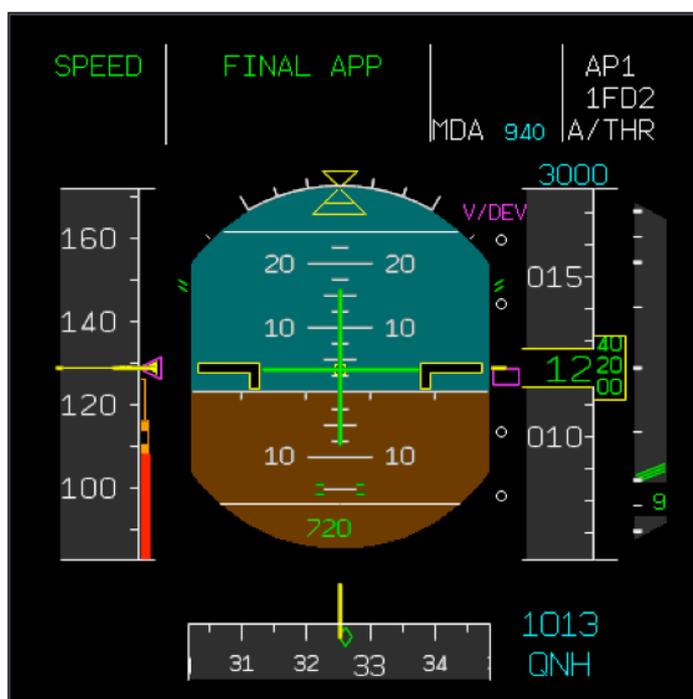


Figura 41 - EADI: *Electronic Attitude Direction Indicator* del velivolo Airbus A320.⁵⁷

Lo strumento può essere descritto più precisamente con il seguente estratto tradotto e riportato da *Skybrary*⁵⁸: “Il *display* di volo primario (PFD) è uno

⁵⁶ [https://www.skybrary.aero/index.php/Primary_Flight_Display_\(PFD\)](https://www.skybrary.aero/index.php/Primary_Flight_Display_(PFD))
Ultimo accesso: 2 febbraio 2020.

⁵⁷ Immagine tratta da: <https://aviation.stackexchange.com/questions/19229/how-would-the-airbus-a320-pfd-respond-to-failure-of-all-pitot-and-aoa-sensors>
Ultimo accesso: 2 febbraio 2020.

⁵⁸ [https://www.skybrary.aero/index.php/Primary_Flight_Display_\(PFD\)](https://www.skybrary.aero/index.php/Primary_Flight_Display_(PFD))
Ultimo accesso: 2 febbraio 2020.

strumento che integra e raffigura, su un singolo *display*, tutte le informazioni che sono storicamente mostrate da un numero di singoli strumenti elettromeccanici. Il PFD si è evoluto da una combinazione di indicatore d'assetto e *flight director*, presentata elettronicamente su uno schermo a tubo catodico, a un *electronic attitude direction indicator* (EADI) su uno schermo a cristalli liquidi o a *led* che, in base al produttore, aggiunge ulteriori informazioni come direzione, altitudine e velocità. Il moderno PFD mostra tutte le informazioni necessarie al pilota per determinare i parametri di volo di base tra cui altitudine, assetto, velocità, velocità di salita e direzione della prua per citarne alcune, e in più lo stato di ingaggio del pilota automatico e dell' *auto-throttle*, le modalità del *flight director* e lo stato di avvicinamento. In base alla fase di volo e alle selezioni del pilota, il *flight director* fornirà la guida laterale appropriata per mantenere la prua, la rotta o l'avvicinamento selezionato, la prua di mancato avvicinamento e la guida verticale per salita e discesa, il livellamento, l'avvicinamento e il mancato avvicinamento. Ciò riduce notevolmente il carico di lavoro del pilota durante il volo manuale e facilita il monitoraggio del volo con il pilota automatico attivato poiché tutte le informazioni richieste sono visualizzate su un singolo strumento" [2.8]. Per completezza, si definisce *Flight Director* quel sistema automatico che sovrappone alla rappresentazione grafica dell'indicatore di assetto del velivolo sul PFD un indicatore che mostra al pilota l'assetto che il velivolo dovrebbe mantenere per raggiungere una particolare destinazione. Questo in accordo con i dati inseriti dai piloti nel *Flight Management and Guidance System* prima del decollo.

Multifunctional Display

Il *Multifunctional Display*, abbreviato MFD, è il pannello LCD preposto a mostrare le informazioni di navigazione, le condizioni meteorologiche e altre informazioni relative al piano di volo, ossia l'insieme dei *waypoints* e delle rotte che il velivolo dovrà percorrere per giungere a destinazione insieme a tutte le radioassistenze presenti nelle determinate circostanze. Questo *display* è anche noto con il nome di *Navigation Display* in quanto, generalmente, viene utilizzato per mostrare i dati di navigazione.

monitoraggio in *real-time* di tutti gli impianti e, tramite appositi pannelli di comando dotati di tastiere e manopole, permette la navigazione tra i vari sistemi mostrati in schermate dedicate [2.8].



Figura 43 - Electronic Centralized Aircraft Monitoring Displays.⁶¹

Generalmente, data l'enorme mole di informazioni che vengono prodotte e gestite da tutti i sensori installati sull'aereo, vengono disposti verticalmente due schermi al centro del pannello frontale: quello posto nella parte superiore è definito come *ECAM Upper Display* e viene utilizzato generalmente per mostrare le informazioni relative ai propulsori del velivolo; quello posizionato nella parte inferiore è definito come *System Display* ed è utilizzato per monitorare tutti gli altri impianti di bordo.

Navigation Controls

L'ultima parte di rilievo presente nel pannello frontale contiene tutti i controlli di navigazione posti nella parte superiore di quest'ultimo. In questa zona del *cockpit* possiamo trovare diversi pannelli che si suddividono in:

- Sistema di controllo dell'autopilota FCU (*Flight Control Unit*);

⁶¹ Immagine tratta da: <https://www.quora.com/Why-are-there-two-types-of-display-layouts-in-the-A320s-ECAM-monitor>
Ultimo accesso: 3 febbraio 2020.

- Pannelli di controllo del sistema EFIS (*EFIS Control Panels*);
- Luci di allarme (*Master Warning and Caution Lights*).

Attraverso l'utilizzo della *Flight Control Unit*, il pilota può impostare i dati di volo utilizzati dal sistema dell'autopilota. Unitamente ai dati inseriti prima della partenza e durante il volo nel *Flight Management and Guidance System* tramite il cosiddetto *MCDU*, o *Multipurpose Control Display Unit*, il sistema è in grado di condurre automaticamente il velivolo attraverso tutte le fasi del volo, eccetto il decollo, con un intervento minimo da parte del pilota. Questo sistema, presente ormai sugli aerei di tutto il mondo, permette di ridurre fortemente il carico di lavoro dei piloti aumentando considerevolmente la sicurezza e diminuendo, di conseguenza, la probabilità di occorrenza dell'errore umano. Sono inoltre presenti due pannelli, uno per pilota, relativi alla regolazione delle modalità di visualizzazione e impostazione dei display *PFD* e *MFD*. Infine, si notano i pannelli contenenti le spie di allarme che possono essere suddivise come:

- *Master Warning*;
- *Master Caution*.

Il segnale di *Master Warning* si illumina seguito da un messaggio sonoro nel momento in cui il velivolo si trova in una situazione di forte pericolo imminente e può essere disattivato premendolo. Il segnale di *Master Caution* si illumina seguito anch'esso da un messaggio sonoro nel caso in cui un certo sistema o un determinato parametro richieda immediata attenzione da parte dell'equipaggio in quanto, se ignorato, può pregiudicare in maniera significativa la prosecuzione del volo. Come per il *Master Warning*, può essere disattivato premendolo. Un esempio di potenziale accensione del *Master Warning* è l'avvicinamento alla pista durante la fase di atterraggio senza aver estratto il carrello, mentre un esempio di accensione di *Master Caution* è una bassa pressione di afflusso del combustibile a uno dei due propulsori, indicazione di un possibile malfunzionamento dell'impianto del combustibile.

Landing Gear Control Panel

Il pannello di controllo del sistema di rullaggio e atterraggio del velivolo consente di manovrare il carrello triciclo di cui è dotato il mezzo ed è in grado, inoltre, di controllare l'impianto automatico di frenata.



**Figura 44 - Landing Gear Lever (a sinistra)⁶²
Landing Gear and Brakes Panel (a destra).⁶³**

CPDLC – Controller/Pilot DataLink Communication System

Il CPDLC⁶⁴ è un sistema di comunicazione testuale introdotto in Europa sui velivoli moderni a partire dal 2009 per alleggerire il carico di lavoro dei piloti. Esso riduce le comunicazioni vocali e demanda parte della trasmissione dei dati al *computer* di bordo del velivolo che li invia in messaggi testuali con un particolare formato direttamente ai richiedenti e, in particolare, ai controllori del traffico aereo.

⁶² Immagine tratta da:

<https://www.quora.com/Do-Airbus-aircraft-have-an-off-position-for-their-landing-gear>
Ultimo accesso: 4 febbraio 2020.

⁶³ Immagine tratta da:

<https://www.opencockpits.com/catalog/a320-panel-gear-brakes-p-623.html?language=en>
Ultimo accesso: 4 febbraio 2020.

⁶⁴ [https://www.skybrary.aero/index.php/Controller_Pilot_Data_Link_Communications_\(CPDLC\)](https://www.skybrary.aero/index.php/Controller_Pilot_Data_Link_Communications_(CPDLC))
Ultimo accesso: 5 febbraio 2020



Figura 45 - CPDLC Panel.⁶⁵

A bordo del velivolo A320 sono presenti due pannelli, ciascuno per pilota, dedicati alle comunicazioni in *DataLink* [2.8, 2.9]. Sono posti ai lati dei display dell'ECAM in modo tale da poter essere facilmente raggiunti dai piloti. È inoltre possibile stampare in versione cartacea i messaggi ricevuti tramite un'apposita stampante posta nella parte inferiore del *pedestal*.

Strumenti di *backup*

Per ragioni di sicurezza, ogni velivolo moderno è dotato di strumentazione di riserva che permette di svolgere le operazioni di volo anche in caso di guasto degli strumenti principali, ossia di quelli facenti parte del *Glass Cockpit*. Questi dispositivi sono tipicamente meccanici per evitare che possano subire avarie causate da eventuali guasti all'impianto elettrico, ma il loro funzionamento è equivalente a quello della loro controparte elettronica.

⁶⁵ Immagine tratta da: https://en.wikipedia.org/wiki/Controller-pilot_data_link_communications#/media/File:A330_DCDU.jpg
Ultimo accesso: 5 febbraio 2020.

In particolare, possiamo individuare sulla versione dell'Airbus A320-200 i seguenti dispositivi:

- **VORDME – DDRMI**

Il **VORDME** (*VHF Omnidirectional Radiofrequency and Distance Measuring Equipment e Digital Distance Radio Measuring Indicator*) è lo strumento che permette al pilota di capire su quale radiale si trova il velivolo rispetto a una stazione VOR, la quale emette un segnale direzionale in radiofrequenza per ogni grado dei trecentosessanta nei quattro quadranti.



Figura 46 - VOR DME.⁶⁶

Il DME o *Distance Measurement Equipment* è, invece, uno strumento che permette ai piloti di monitorare la distanza alla quale si trova il velivolo dalla stazione emittente sfruttando sempre l'utilizzo delle frequenze radio [2.8, 2.10];

- ***Standby Attitude Indicator***

Lo *standby attitude indicator* è lo strumento meccanico preposto ad indicare in *real-time* l'assetto del velivolo, ossia l'orientamento spaziale del velivolo anche nel caso in cui lo strumento elettronico equivalente mostrato sui *display* subisca una avaria o un guasto [2.11];

⁶⁶ Immagine tratta da: <https://www.a320simulator.be/portfolio/digital-distance-radio-magnetic-indicator-ddrmi/> Ultimo accesso: 5 febbraio 2020.



Figura 47- Standby attitude indicator.⁶⁷

- *Accumulator and brakes pressure indicator*

Questo strumento fornisce l'indicazione di una corretta o non corretta pressione all'interno dell'impianto frenante e dell'accumulatore idraulico;

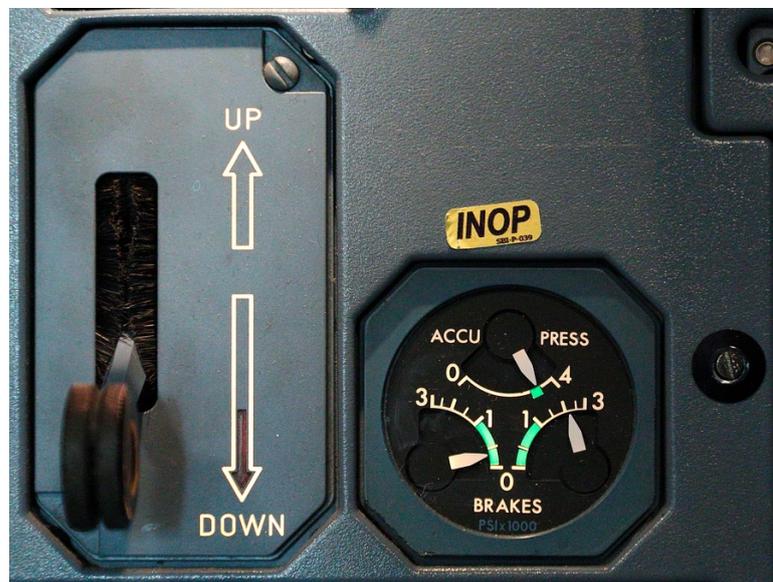


Figura 48 - Leva del carrello e accumulator brakes pressure indicator.⁶⁸

⁶⁷ Immagine tratta da: <https://www.a320simulator.be/portfolio/integrated-standby-instrument-system/#jp-carousel-891>

Ultimo accesso: 6 febbraio 2020.

⁶⁸ Immagine tratta da: <https://lx-photos.livejournal.com/198506.html>

Ultimo accesso: 20 marzo 2020.

- ***Timer and clock panel***

Questo pannello è utilizzato per cronometrare le fasi di volo qualora ai piloti sia richiesto di calcolare le distanze percorse sulla base della sola indicazione della velocità del velivolo. E' inoltre mostrata l'ora esatta UTC (*Universal Time Coordinates*).



5.1.3 – Pedestal

Il *pedestal* è quella parte del *flight deck* che comprende tutta la strumentazione posizionata tra i due piloti nella parte bassa della cabina di pilotaggio. In questa parte sono presenti i comandi relativi a quasi tutti i sistemi di bordo del velivolo ed è quindi necessario uno studio approfondito per comprenderne appieno le funzionalità. Di seguito sarà presentato un elenco dei pannelli presenti nel *pedestal* seguito da una breve descrizione per ognuno di essi:

- MCDU (*Multipurpose Control Display Unit*);
- ECAM *Control Panel*;
- *Multipurpose Switching Panel*;
- RMP (*Radio Management Panel*);
- ACP (*Audio Control Panel*);

⁶⁹ Immagine tratta da: <https://www.opencockpits.com/catalog/a320-chronometer-pi-652.html?image=2>

Ultimo accesso: 5 febbraio 2020

- *Weather Radar Panel;*
- *Main Flood and Integral Lighting Panel;*
- *Multipurpose Switching Panel;*
- *TCAS/ATC Transponder Control Panel;*
- *Engine Control Levers;*
- *Pitch Trim Wheels;*
- *Engine Start and Ignition Panel;*
- *Flaps Lever;*
- *Spoilers Lever;*
- *Rudder Trim Control Panel;*
- *Parking Brake Lever;*
- *Emergency Gravity Gear Extension Handle;*
- *Cockpit Door Control Panel;*
- *Printer.*

Multipurpose Control Display Unit

La *Multipurpose Control Display Unit*⁷⁰ è l'interfaccia tra il pilota e il *Flight Management Guidance System* o FMGS, ovvero l'insieme dei *software* e degli *hardware* che gestiscono il sistema di navigazione del velivolo e che distribuiscono le informazioni a tutte le utenze che le richiedono. Attraverso l'MCDU il pilota può navigare tra le varie schermate relative all'impostazione del cosiddetto piano di volo, ossia un elenco delle fasi che il velivolo dovrà seguire per portare a compimento con successo il volo. All'interno del FMG *Computer* è memorizzato un database contenente i dati di navigazione, come ad esempio aeroporti, stazioni radio, rotte di partenza e di avvicinamento, aerovie e *waypoints*. Infine, è inoltre presente un *database* delle *performance* che permette di impostare la modalità di volo che andrà a influenzare i consumi e la durata del viaggio.

⁷⁰ https://it.wikipedia.org/wiki/Flight_Management_System
 Ultimo accesso: 6 febbraio 2020.

Il FMG *Computer* è collegato, per ogni lato, al MCDU, al *Radio Management Panel* e all' *EFIS Control Panel* [2.29].



Figura 50 - Multipurpose Control Display Unit del velivolo A320.⁷¹

Dopo aver inserito il piano di volo e i parametri prestazionali, il FMGS genera i profili di salita, crociera e discesa, fornendo i dati necessari ai piloti e al pilota automatico per effettuare il volo come programmato. Nel *pedestal* sono disponibili due MCDU, ognuna per pilota, in modo che i parametri di navigazione possano essere indipendentemente modificati dai membri dell'equipaggio di cabina.

ECAM Control Panel e Multipurpose Switching Panel

Come descritto precedentemente, l'*Electronic Centralized Aircraft Monitoring System*⁷² è quel sistema che permette di monitorare tutti i sistemi di bordo del velivolo attraverso *display* dedicati disposti sul pannello frontale. Per poter navigare tra le varie schermate di monitoraggio dei sistemi, un apposito pannello di controllo è posto nella parte anteriore del *pedestal*. In particolare è possibile monitorare:

- sistema propulsivo ENG (*engines system*);

⁷¹ Immagine tratta da: https://it.wikipedia.org/wiki/Flight_Management_System#/media/File:CP_MCDU.jpg Ultimo accesso: 6 febbraio 2020.

⁷² [https://www.skybrary.aero/index.php/Electronic_Centralized_Aircraft_Monitor_\(ECAM\)](https://www.skybrary.aero/index.php/Electronic_Centralized_Aircraft_Monitor_(ECAM)) Ultimo accesso: 6 febbraio 2020.

- sistema pneumatico BLEED (*bleed system*);
- sistema di pressurizzazione PRESS (*pressurization system*);
- sistema elettrico ELEC (*electrical system*);
- sistema idraulico HYD (*hydraulic system*);
- sistema del carburante FUEL (*fuel system*);
- sistema per la produzione ausiliaria di energia APU (*APU system*);
- sistema di condizionamento COND (*air conditioning system*);
- sistema frenante e ruote WHEEL (*wheels system*);
- sistemi di controllo del volo F/CTL (*flight controls system*);
- sistema di accesso al velivolo DOOR;
- stato generale del sistema STS.

L'ECAM è un sistema estremamente importante. L'effetto di un qualsiasi comando impartito a un sistema si ripercuote sugli altri ed è quindi necessario avere a disposizione uno strumento che permetta di tenere sotto controllo rapidamente lo stato di funzionamento del velivolo durante il volo e nelle fasi a terra.



Figura 51 – ECAM Panel e Multipurpose Switching Panel del velivolo A320.⁷³

⁷³ Immagine tratta da: <http://symulatory.com/shop/airbus-a320/modules-plugplay-2/a320-ecam>
Ultimo accesso: 6 febbraio 2020.

Il *Multipurpose Switching Panel* è invece un pannello dotato di selettori rotativi che permette di impostare determinate modalità di funzionamento dell'ECAM e dell'EFIS, relativamente agli strumenti da cui vengono prelevati i dati utilizzati per una successiva elaborazione e messa a video delle informazioni di volo.

Radio Management Panel e Audio Control Panel

Il *Radio Management Panel* è quel pannello che permette ai piloti di impostare le radiofrequenze necessarie alla navigazione e alla comunicazione (Figura 52). Tramite appositi tasti è possibile cambiare tipologia di radiotrasmettitore sul quale resta memorizzata l'ultima frequenza impostata, consentendo quindi di gestire contemporaneamente più dispositivi radiotrasmettenti. Va ricordato, infatti, che su aeromobili di grandi dimensioni sono integrati più apparati per la trasmissione in radiofrequenza, questo per garantire un certo livello di ridondanza e, come precedentemente detto, il funzionamento di più dispositivi diversi tra loro allo stesso tempo.



Figura 52 - Radio Management Panel.⁷⁴

Infine l'*Audio Control Panel* consente di selezionare l'apparato radio da utilizzare in quel momento per le comunicazioni e la navigazione, di regolare

⁷⁴ Immagine tratta da: <https://www.skalarki-electronics.eu/onlineshop/product/75-a320-radio-panel-p-p.html> Ultimo accesso: 6 febbraio 2020.

il volume e di avviare conversazioni interne al velivolo, per esempio tra i piloti e gli assistenti di volo (Figura 53).



Figura 53 - Audio Control Panel.⁷⁵

Weather Radar Panel

I velivoli moderni come l'Airbus A320 sono dotati di un *radar* meteorologico⁷⁶ che permette di identificare le perturbazioni e le turbolenze che si formano lungo la rotta del velivolo in un raggio superiore a 100 miglia nautiche [2.30].



Figura 54 - Weather Radar Control Panel.⁷⁷

⁷⁵ Immagine tratta da: <https://www.skalarki-electronics.eu/onlineshop/product/76-a320-audio-panel-p-p.html> Ultimo accesso: 6 febbraio 2020.

⁷⁶ <https://safetyfirst.airbus.com/optimum-use-of-weather-radar/> Ultimo accesso: 6 febbraio 2020

⁷⁷ Immagine tratta da: <https://www.skalarki-electronics.eu/onlineshop/product/243-wx-radar-panel-p-p-v2.html> Ultimo accesso: 6 febbraio 2020.

La parabola del *radar* meteorologico è posta nel cosiddetto *radome* dell'aereo, ossia la calotta anteriore del velivolo, e tramite l'emissione di microonde tra i 300 MHz e 300 GHz che vengono riflesse dalle masse di acqua che formano le nuvole, permette di identificare le perturbazioni. I *radar* sfruttano anche la tecnologia *doppler* per misurare la velocità relativa tra le gocce di pioggia e il velivolo, calcolando quindi l'eventuale presenza di turbolenze persistenti. Grazie a questo dispositivo, i piloti possono decidere se proseguire attraverso la perturbazione o aggirarla. Lo *switching panel* del *weather radar* permette di manovrare la parabola e regolare l'ampiezza del fascio di microonde. Questo consente di aumentare la sensibilità e l'accuratezza delle misurazioni effettuate. Le informazioni meteorologiche vengono mostrate sul MFD in sovrapposizione a quelle di navigazione in modo tale da fornire ai piloti la situazione meteorologica in tempo reale.

TCAS/ATC Transponder Control Panel

Il *Traffic Collision Avoidance System*⁷⁸ è un sistema automatico di allarme che avvisa i piloti quando un altro velivolo, dotato dello stesso sistema, ha un'elevata probabilità di entrare in collisione con l'aereo stesso. Questo sistema di allerta fu reso obbligatorio per i velivoli con *Maximum Take Off Mass* oltre i 5700 kg o con più di 19 passeggeri a bordo in seguito a più collisioni fatali verificatesi negli anni '90. Il sistema TCAS si basa sul *radar* secondario di sorveglianza, o *Secondary Surveillance Radar (SSR)*, di cui è dotato il cosiddetto *Transponder*, ossia un'apparecchiatura ricetrasmittente che permette di scambiare informazioni tra velivoli e stazioni a terra, in modo indipendente, per fornire ai piloti e agli operatori al suolo la situazione di traffico in tempo reale. Generalmente, può essere impostata una sensibilità di rilevazione, ad esempio quando il velivolo definito come *intruder* si trova ad una quota compresa tra ± 300 piedi (circa ± 100 metri) rispetto alla quota di volo del velivolo che interroga. Quando un aereo entra all'interno del perimetro prestabilito, viene emesso un segnale

⁷⁸ https://en.wikipedia.org/wiki/Traffic_collision_avoidance_system
Ultimo accesso: 7 febbraio 2020

sonoro di allerta seguito da un'indicazione pratica da compiere per evitare la collisione, ad esempio “*climb*” (salire) o “*descent*” (discendere) [2.31].



Figura 55 - TCAS / ATC Transponder Control Panel.⁷⁹

Il *Transponder* invece è un apparato che permette di impostare un codice a quattro cifre che viene inviato al *radar* secondario del velivolo il quale lo trasmette a sua volta alla stazione di terra ricevente (Figura 55). Il codice viene quindi associato alla traccia *radar* identificata dalle stazioni *radar* di terra consentendo così di associare ad ogni aeromobile un codice e una traccia rendendo chiara ed intuitiva la situazione di traffico per il controllore a terra. Il *Transponder* può essere inoltre utilizzato per comunicare immediatamente situazioni di emergenza o di pericolo con appositi codici, come ad esempio il codice 7600 che identifica una avaria radio a bordo, il 7700 per un'emergenza generica a bordo o il 7500 per azioni illegali a bordo, come ad esempio un tentato dirottamento.

Flaps and spoilers levers

La maggior parte dei velivoli da trasporto passeggeri sono dotati di dispositivi aerodinamici in grado di far cambiare le prestazioni aerodinamiche durante il volo e, facendo riferimento a questo aspetto, si individuano i cosiddetti *Flaps*, o ipersostentatori, e gli *Spoilers*, o diruttori. I primi vengono generalmente estesi quando il velivolo si trova a basse velocità relative all'aria, ad esempio durante la fase di decollo e salita, oppure in avvicinamento ed atterraggio. La loro estrazione comporta una variazione nel profilo aerodinamico dell'ala facendone aumentare

⁷⁹ Immagine tratta da: <https://www.gableseng.com/gei/product/a320-atc-tcas-keypad/>
Ultimo accesso: 7 febbraio 2020

l'inarcamento e dunque il coefficiente di portanza, consentendo al velivolo di sostentarsi a velocità più basse rispetto alla configurazione a *flaps* retratti. Il vantaggio nell'estrazione dei *flaps* è dunque evidente, anche se ciò comporta l'aumento della resistenza aerodinamica la quale è bilanciata generalmente con un aumento della spinta propulsiva. L'azionamento dei *flaps* è controllabile dai piloti tramite la movimentazione di una leva in cabina definita come *Flaps Lever* e posta in un apposito pannello nella parte posteriore destra del *pedestal*. Sul velivolo Airbus A320 sono disponibili quattro configurazioni di estrazione, ognuna delle quali dedicata a una specifica fase di volo. Per procedere con l'azionamento, il pilota dovrà impugnare la leva, sollevare il blocco di posizione vincolato alla leva stessa e portarla nella posizione voluta. A seguito di ciò, il *computer* di bordo valuterà se le condizioni di volo sono sicure per effettuare l'estrazione senza danni alle superfici mobili, ad esempio una velocità di volo troppo elevata potrebbe danneggiare i *flaps* estesi e, dunque, procedere con l'estensione, la quale verrà visualizzata con una rappresentazione grafica su uno dei due display dell'ECAM.



Figura 56 - Leva per il controllo degli ipersostentatori dell'Airbus A320.⁸⁰

I velivoli di grosse dimensioni come l'Airbus A320 possiedono delle superfici mobili, chiamate diruttori, o *spoilers* che vengono estese nel caso in cui si voglia ridurre la velocità del velivolo. Queste parti mobili sono generalmente poste sulla parte superiore delle semiali e, una volta estratte,

⁸⁰ Immagine tratta da: <https://www.opencockpits.com/catalog/a320-panel-flaps-p-642.html?language=en>
Ultimo accesso: 10 febbraio 2020.

disturbano il flusso d'aria creando una maggior resistenza aerodinamica riducendo quindi la velocità dell'intero velivolo. L'azionamento di questi dispositivi è attuato per mezzo di martinetti idraulici. Il pilota può manovrare gli aerofreni tramite la movimentazione di una leva posta nella parte posteriore sinistra del *pedestal*. Sono disponibili quattro configurazioni: *Retracted*, *Armed*, $\frac{1}{2}$ e *Full*. La posizione retratta è attiva quando la leva si trova nella parte superiore del pannello in posizione di blocco, dunque la posizione non è modificabile semplicemente muovendola. Per impostare la leva nella posizione di armamento è necessario tirarla verso l'alto e in questa configurazione il *computer* di bordo è in grado di gestire automaticamente l'estensione dei diruttori in base alla situazione. Partendo dalla posizione di disarmo, i piloti possono muovere la leva nella posizione $\frac{1}{2}$ e *Full* per estendere parzialmente o completamente i diruttori. Come per i *Flaps*, lo stato di funzionamento e la posizione degli *spoilers* è visualizzabile sui *display* dell'ECAM.

Throttle levers, engines panel and stabilizer trim wheels

Nella parte centrale del *pedestal* sono presenti i comandi relativi ai due motori di cui è dotato il velivolo. Le due manette consentono di regolare la spinta generata dai motori, monitorabile nella relativa pagina dell'ECAM. I velivoli da trasporto come l'A320 sono generalmente progettati per minimizzare i consumi e massimizzare le prestazioni in ogni fase di volo e, per questo motivo, le manette sono manovrabili in posizioni dedicate ad ognuna delle principali fasi di volo (Figura 57). Le posizioni caratteristiche sono definite come: REV, *idle*, CL, FLX e TOGA. La posizione REV rappresenta la configurazione dei propulsori durante la fase di frenata in seguito all'atterraggio o ad un decollo abortito. Per attivare questa modalità è necessario portare le leve nella posizione limite inferiore e successivamente sollevare le due levette posteriori posizionate su quelle principali. In questa modalità, una parte del getto in uscita dai propulsori viene deviato verso la prua del velivolo contribuendo all'azione frenante. La posizione *idle* rappresenta la condizione nella quale i motori funzionano al numero di giri più basso producendo una minima quantità di spinta. La posizione CL identifica la modalità *CLIMB*, ovvero salita, *FLEX* è utilizzata

durante la crociera mentre TOGA (*Take-Off / Go Around*) è la modalità utilizzata per il decollo, fase in cui è richiesta la massima spinta. Sulle manette sono inoltre presenti due pulsanti rossi che disattivano la modalità dell'autopilota *Autothrottle*, la quale regola automaticamente la spinta dei propulsori durante le varie fasi del volo secondo i parametri impostati nella *Flight Control Unit* e nell'*FMGS*.



Figura 57 - Manette dei propulsori, regolatori per il trim di stabilizzatore e pannello di accensione dei propulsori.⁸¹

Lateralmente alle manette, sono disposti i regolatori per il trim dello stabilizzatore, ossia il sistema che permette di mantenere il velivolo in una condizione di volo livellato senza che il pilota debba intervenire sulla *cloche*. Infine, nella parte centrale del *pedestal* si individua il pannello principale di accensione dei propulsori. Gli elementi principali di questo pannello sono i due interruttori degli *starters*, che per essere azionati devono essere sollevati leggermente e portati nella posizione ON.

⁸¹ Immagine tratta da: <https://www.fsc.it/Product.aspx?lang=ENG&ID=7a9713e6-e1ea-48a3-a330-476fe060c642&CODE=146292>
Ultimo accesso: 10 febbraio 2020.

5.1.4 – Overhead Panel

L'*Overhead Panel* è posto nella parte superiore del *cockpit* e contiene i pannelli relativi a tutti gli altri sistemi di bordo direttamente controllabili dai piloti. I sistemi più importanti sono collocati sufficientemente vicino ai piloti in modo tale da poter essere raggiunti semplicemente allungando il braccio. Nell'*Overhead Panel* sono presenti i pannelli relativi a:

- *ADIRS Control Panel;*
- *Flight Control Computer Panel;*
- *Emergency Evacuation Panel;*
- *Emergency Electrical Control Panel;*
- *EGPWS Control Panel;*
- *Recorder Panel;*
- *Oxygen Panel;*
- *Calls Panel;*
- *Windshield Wipers Control Panel;*
- *Exterior Lighting Control Panel;*
- *Auxiliary Power Unit Controls;*
- *Integral and cabin lighting switches;*
- *Anti-ice and cabin pressurization control panel;*
- *Air Conditioning Control Panel;*
- *Electrical Control Panel;*
- *Fuel and Hydraulical Control Panel;*
- *Engine and APU Fire Panel;*
- *Cockpit Door Controls;*
- *Audio Control Panel;*
- *Radio Management Panel;*
- *Cargo Heat Control Panel;*

- *Cargo Smoke Control Panel;*
- *Ventilation Control Panel;*
- *Engine Manual Start Controls.*

Nell'*Overhead Panel* sono contenuti circa due decine di pannelli e più di centocinquanta controlli dedicati che possono essere macroscopicamente descritti nella lista elencata in precedenza. Non sono presenti comandi che necessitano di azionamenti particolari, ma per lo più interruttori, bottoni e selettori rotativi. Grazie a questo sistema, i piloti possono gestire tutti i restanti sistemi del velivolo.



Figura 58 - Overhead panel completo.⁸²

Dalla descrizione della cabina di pilotaggio fatta in questo capitolo, si può notare come il *cockpit* contenga un numero estremamente alto di comandi. E' chiaro quindi che un addestramento in ambiente virtuale all'interno del *flight deck* dell'A320 possa velocizzare notevolmente il processo di formazione dei piloti.

⁸² Immagine tratta da: <http://simulatory.com/shop/airbus-a320/modules-plugplay-2/a320-overhead-module> Ultimo accesso: 10 febbraio 2020.

6 – Procedure Aeronautiche

Nel mondo dell'aviazione, data l'elevata complessità dei sistemi aeronautici, si è reso necessario proceduralizzare la maggior parte delle operazioni che devono essere eseguite dal personale aeronautico per mantenere operativi i velivoli e tutti i servizi a essi dedicati. Come ampiamente anticipato nei capitoli precedenti, vengono ora trattate nel dettaglio una selezione di procedure aeronautiche che i piloti e studenti del velivolo Airbus A320 possono eseguire nell'ambiente di realtà virtuale per acquisire familiarità con l'aereo. Essendo il progetto nel suo complesso in una fase iniziale, si è deciso di implementare inizialmente due procedure dedicate alla familiarizzazione con il ponte di volo, cioè focalizzarsi sull'apprendimento di quelle che sono le posizioni e le funzioni di tutti i principali pannelli presenti in cabina. In seguito, in base all'effettivo stato di sviluppo grafico del progetto, sono state selezionate due procedure che i piloti del velivolo compiono quando l'aeromobile si trova al suolo: le procedure di *After Start* e *After Landing*. Dato l'elevato numero di comandi presenti in cabina, la loro distribuzione non consente un'agevole interazione con uno solo dei due membri dell'equipaggio presenti nel *flight deck*. Per questo motivo, i compiti da svolgere durante le procedure sono generalmente suddivisi tra Comandante e Primo Ufficiale. Tuttavia, essendo il progetto nel suo complesso in una fase iniziale, non è possibile attivare la modalità *Multiplayer* che consentirebbe a due utenti di agire contemporaneamente in cabina, come farebbero entrambe i piloti. Per ovviare a questo problema si è deciso di analizzare le procedure disponibili e selezionare quelle eseguibili da un solo membro dell'equipaggio, nel nostro caso il Comandante. Va ricordato che le *Standard Operating Procedures*, o SOPs, sono procedure elaborate dalle singole compagnie aeree e da enti di formazione a cui è demandato il compito di addestrare il personale sui velivoli, dunque non sono universali ma si basano sulle indicazioni fornite dal costruttore dell'aeromobile, in questo caso Airbus, e da quelle emanate dall'ICAO, o

*International Civil Aviation Organization*⁸³. Secondo queste ultime, come riportato dal documento redatto da Airbus (2017) presso il *Flight Operations Safety Awareness Seminar* [2.32], l'adozione delle SOPs porta i seguenti vantaggi nella gestione dei sistemi aeronautici:

- definiscono la filosofia operativa della compagnia;
- assicurano la standardizzazione delle attività tra i membri dell'equipaggio;
- definiscono “cosa fare” e “quando fare”;
- definiscono la condivisione del carico di lavoro, ossia “chi fa cosa”;
- promuovono il controllo incrociato delle operazioni e la ridondanza nei controlli;
- promuovono il corretto utilizzo di tutte le funzionalità del velivolo;
- aumentano la sicurezza riducendo la possibilità di errore umano.

Nel corso di questo progetto è stata condotta una ricerca nel *World Wide Web* con lo scopo di individuare materiale relativo alle procedure stesse da svolgere a bordo dell'A320. Il compito fondamentale della figura dell'ingegnere aerospaziale è quindi quello di saper leggere, comprendere e valutare le procedure individuate in rete, che sono comunque reperite da fonti autorevoli come ad esempio le compagnie aeree, e di saperle tradurre in procedure virtuali. In particolare, al fine di redigere le procedure operative implementate nel corso di questo progetto, sono state studiate le procedure redatte da Airbus attraverso i documenti dedicati alle *Standard Operating Procedures* per l'A320, le SOP [1.18, 2.22] e i *videotutorials* messi a disposizione degli utenti dalle compagnie aeree ed enti di formazione, come ad esempio la *BAA Training*⁸⁴.

⁸³ <https://www.icao.int/>

⁸⁴ <http://www.baatraining.com>

6.1 – Procedure di familiarizzazione e operative

Le procedure sono tutte svolte all'interno della scena del *cockpit* dell'A320 allo stato di sviluppo attuale, mostrato in Figura 59.

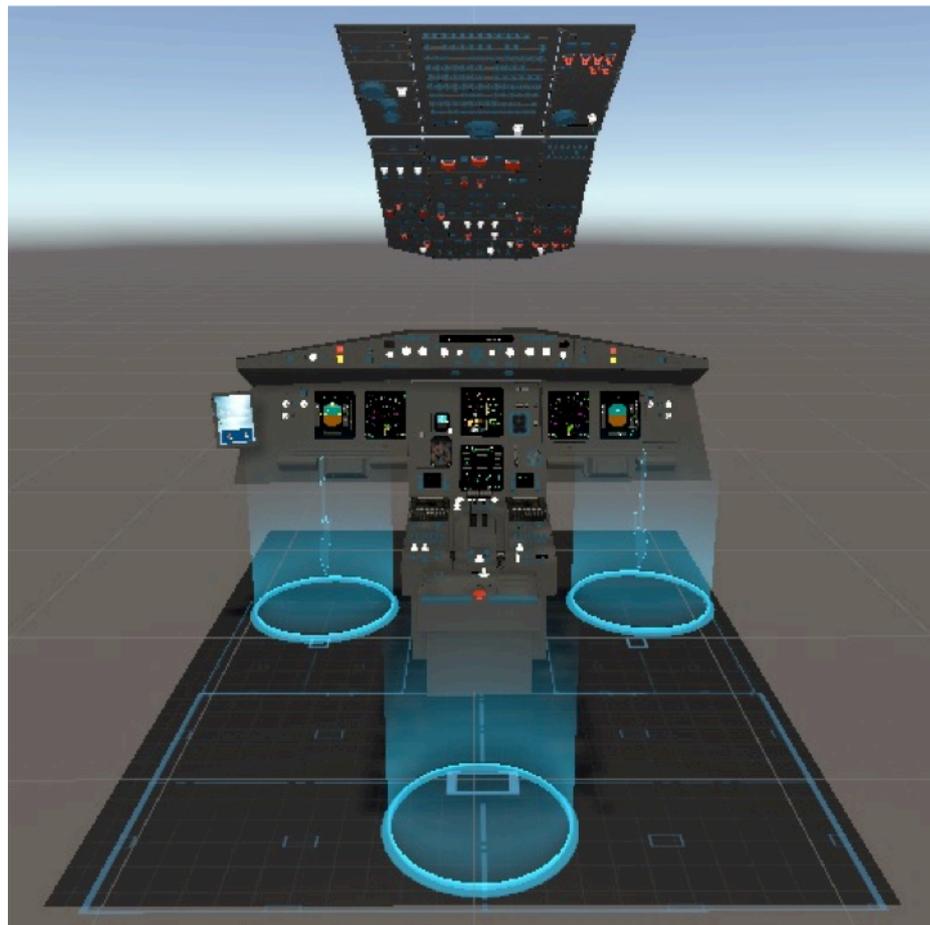


Figura 59 - Vista frontale del *cockpit* nella simulazione in realtà virtuale su *Unity*.⁸⁵

La scena contiene il vero e proprio *cockpit* simulato dell'Airbus A320, con *pedestal*, *front panel*, *overhead panel*, *rear panel* e una *electronic flight bag* o EFB, il cui scopo verrà descritto in seguito. Infine, vi sono tre *teleport points* che l'utente può usare per spostarsi più agevolmente all'interno della scena. Prendendo come riferimento la Figura 59, il *teleport point* più a sinistra corrisponde alla posizione del comandante, il *teleport point* più a destra a quella del primo ufficiale mentre quello centrale corrisponde con il punto di partenza di alcune procedure e serve come riferimento per poter

⁸⁵ Immagine tratta dal *software Unity*.

osservare il *cockpit* nel suo insieme, oltre ad essere comodo per la lettura di alcune *billboards* contenenti informazioni di carattere generale.

Ad ogni modo, tutta la zona circondata da contorni blu presente sulla scena è una *Teleport Area*, in cui l'utente si può liberamente teletrasportare. Il teletrasporto è attivato dal *touchpad* centrale: si preme per attivare un raggio, lo si punta nella zona che si vuole raggiungere e si rilascia il *touchpad*.

6.1.1 – Procedura di familiarizzazione con il *Flight Deck* *A320 Cockpit Inspection*

Con questa procedura, denominata *A320 Cockpit Inspection*, si permette all'utente inesperto, ad esempio uno studente di una scuola di volo alle prime armi o uno studente universitario, di osservare i componenti del *cockpit* dell'A320 in un ambiente virtuale e di conoscere il nome dei principali pannelli. A tale scopo si consente allo studente di cliccare con il *trigger* del telecomando su un pannello in modo da far comparire una *billboard* con il nome del componente selezionato o dei componenti, nel caso in cui il pannello contenga più elementi funzionalmente separati. Per consentire un raggruppamento dei vari componenti per funzioni, si è scelto di indicare con il colore rosso quelli la cui funzione è ascrivibile al sistema propulsivo, con il colore giallo i componenti che riguardano il sistema di telecomunicazioni, con il verde i componenti relativi ai comandi di volo, con il colore viola i componenti con funzioni utili per la navigazione, mentre col colore blu i componenti con funzioni generiche o miste.

Di seguito un elenco dei componenti associati ad ogni colore:

Giallo – comunicazione:

- *Radio Management Panel* (RMP), CM1 (postazione del comandante) e CM2 (postazione del primo ufficiale);
- *Audio Control Panel* (ACP), CM1 e CM2;
- Pannello dell' *Air Traffic Control* (ATC) e del TCAS;
- *Controller-Pilot DataLink Communication* (CPDLC), CM1 e CM2;

- *Calls and Recorder Panel;*
- *Emergency Locator Transmitter (ELT);*
- *ACP Overhead;*
- *Speaker.*

Rosso – propulsione:

- *Throttle Lever Engine n°1;*
- *Throttle Lever Engine n°2;*
- *Engine Start and Ignition Panel;*
- *Engine Fire Panel;*
- *Full Authority Digital Engine Control (FADEC) Panel;*
- *Manual Engine Start Panel;*
- *Fuel Control System Panel.*

Viola – navigazione:

- *EFIS Navigation Display, CM1 e CM2;*
- *VOR DME DDRMI Panel;*
- *Terrain On Navigation Display;*
- *MCDU, CM1 e CM2;*
- *Flight Control Unit (FCU);*
- *Data Loading Selector Panel;*
- *Attitude/Heading Knob;*
- *Air Data Selector Knob;*
- *ADIRS Panel;*
- *Weather Radar Panel.*

Verde – comandi di volo:

- *EFIS Primary Flight Display (PFD), CM1 e CM2;*
- *Standby Attitude Indicator;*
- *Spoilers Lever;*
- *Flaps Lever;*
- *Rudder Trim Knob;*
- *Rudder Trim Reset Button;*
- *Flight Control Computer (FCC), CM1 e CM2.*

Quando l'utente avvicina sufficientemente il *controller* ad un pannello, questo si evidenzia del colore corrispondente e, a seguito del *click* con il *trigger*, la *billboard* presenterà contorni dello stesso colore.

In questo modo per l'utente è possibile avere un'idea iniziale dei principali sistemi con i quali è possibile interagire all'interno del *flight deck* e delle funzionalità attivabili. Inoltre, attraverso tale procedura di familiarizzazione, ha inizio il processo cognitivo di memorizzazione della posizione e del nome dei pannelli. E' ora spiegata nel dettaglio la struttura della procedura, illustrata nell'insieme in Figura 60.

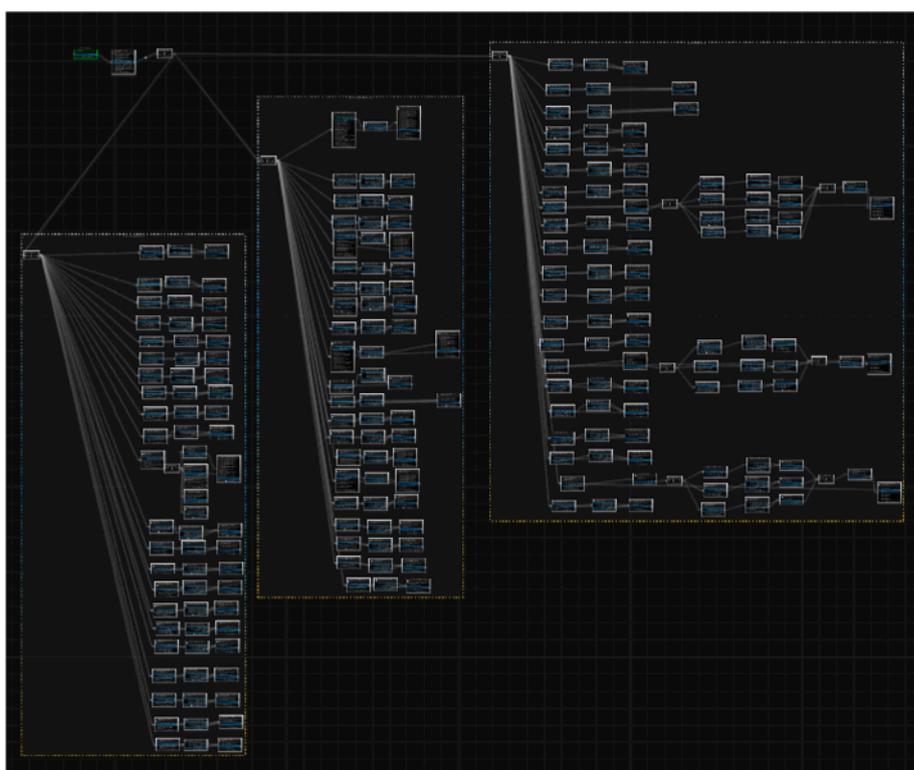


Figura 60 - Procedura completa A320 Cockpit Inspection.⁸⁶

Il primo *step*, mostrato in Figura 61, contiene le istruzioni necessarie per far comparire in successione due *billboards* introduttive, la prima contenente un messaggio di benvenuto e la seconda contenente le istruzioni che l'utente deve seguire per conoscere il nome di un componente o di un pannello. Il punto di partenza della procedura, da cui l'utente leggerà le *billboards*, è il *teleport point* centrale di Figura 59.

⁸⁶ Immagine tratta dal *Procedure Editor* di Unity.

Dopo la scomparsa di queste prime *billboards*, l'utente può teletrasportarsi nella postazione del comandante o del primo ufficiale e iniziare a ispezionare il *flight deck*.

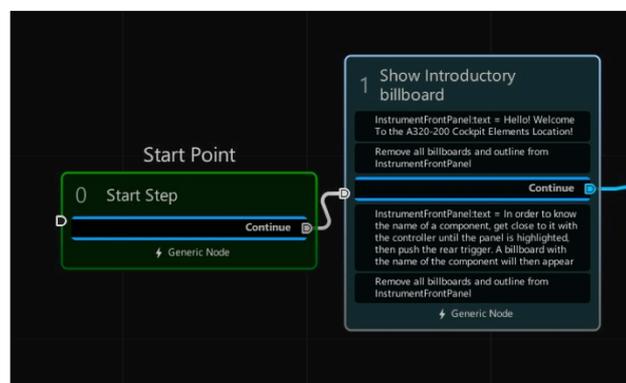


Figura 61 - Primo step della procedura.^{87 88}

Le *billboards* sono però impostate per comparire in una certa posizione e con un orientamento adatto alla lettura dalla posizione del comandante per cui, se la procedura sarà svolta dalla posizione del primo ufficiale, la lettura delle *billboards* con il nome dei pannelli non sarà agevole.

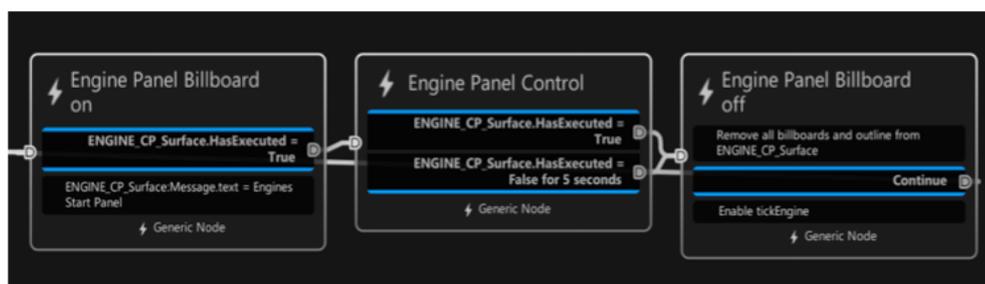


Figura 62 - Successione di steps per la comparsa e successiva scomparsa delle *billboards*.⁸⁸

In seguito la procedura entra in un *hub node* e si snoda in tre rami paralleli, ognuno dei quali confluisce a sua volta in un altro *hub node*, uno per il *pedestal*, uno per il *front panel* e uno per l'*overhead panel*.

Da ognuno di questi *hub node* partono tanti collegamenti definiti come *transitions*, uno per ogni pannello della rispettiva parte del *flight deck*. Per la maggior parte dei componenti, da ogni ramo parte una successione di tre *steps* simile a quella illustrata in Figura 62.

⁸⁷ Lo *start step* indica a *Unity* in maniera univoca il punto di partenza della procedura.

⁸⁸ Immagine tratta dal *Procedure Editor* di *Unity*.

Il primo *step* contiene le istruzioni che permettono di far comparire la *billboard* a seguito del *click* dell'utente su un pannello. Per verificare che l'utente abbia cliccato sul pannello, è stato posto per la superficie di ogni pannello un componente *executable*, e la condizione di uscita dallo *step* è che il pannello sia stato eseguito, quindi cliccato. Il risultato è esemplificato in Figura 63, mostrata nella pagina seguente. Il secondo *step* contiene un costrutto *if* che permette di passare allo *step* successivo in caso di secondo *click* sul medesimo pannello oppure in caso di attesa pari a cinque secondi. Sono state implementate concretamente due condizioni di uscita: la prima è verificata dall'esecuzione di un pannello mentre l'altra, al contrario, è verificata quando il pannello non è stato eseguito entro 5 secondi.



Figura 63 - Comparsa della *billboard* esplicativa.⁸⁹

Infine, il terzo *step* contiene le istruzioni necessarie a far scomparire la *billboard* e far comparire una spunta, ossia uno *sprite* 2D presente nel pacchetto WEAVR e modificato con GIMP, sul pannello appena selezionato, come quello illustrato in Figura 64 nella pagina seguente. Questa successione di *steps* consente all'utente di far apparire la *billboard* a seguito di un *click* e di farla scomparire in caso di secondo *click*, o in ogni caso dopo 5 secondi, per poi applicare una spunta per ricordare all'utilizzatore che quel pannello, o componente, è già stato selezionato. Il terzo *step* è poi collegato in retroazione al primo per permettere all'utente di far eventualmente ricomparire la *billboard* con un altro *click*.

⁸⁹ Immagine tratta dal software Unity.



Figura 64 - Esempio di *tick* sul *display* dell'ECAM.⁹⁰

Avendo disposto queste sottoprocedure di tre *steps* in parallelo, una per ogni componente, esse saranno tutte attive contemporaneamente.

Ciò permetterà all'utente di svolgerle indipendentemente l'una dall'altra, nell'ordine voluto e anche di eseguirne una senza terminarne un'altra.

Per alcuni componenti, ad esempio pannelli in cui sono presenti numerosi *switches* e bottoni, sono state inserite alcune varianti a questo tipo di sottoprocedura per permettere all'utente di vivere un'esperienza migliore.

Un esempio può essere fatto considerando lo *Switching Panel* posto al di sotto dell'ECAM, il *Parking Brake Panel* e l'*Instrument Light Panel*.

La procedura di comparsa delle *billboards* è illustrata in Figura 65:



Figura 65 - Sottoprocedura di comparsa delle *billboards* per l'ECAM *Switching Panel*, *Parking Brake Panel* e *Instrument Light Panel*.⁹¹

Lo scopo di questa sotto procedura è di far spostare a una distanza ravvicinata dall'utente il pannello selezionato, in modo da poter

⁹⁰ Immagine tratta dal *software Unity*.

⁹¹ Immagine tratta dal *Procedure Editor* di *Unity*.

comodamente cliccare sui vari componenti del pannello al fine di vederne la funzione, dato che la posizione del pannello stesso e la grandezza dei suoi componenti può rendere difficile la loro osservazione.

Ciò è svolto nel seguente modo: quando l'utente clicca sul pannello, lo stesso viene eliminato dalla scena di *Unity*, mentre viene attivato un oggetto "copia" dello stesso pannello.

In corrispondenza dell'oggetto eliminato compare una *billboard* con il nome del pannello mentre alla copia è assegnata un'animazione che la porta in una posizione comoda per essere osservata dall'utente. A questo punto, l'utilizzatore può cliccare sui componenti del pannello per vederne il nome. Quando l'utente avrà cliccato su tutti i componenti del pannello, lo stesso subirà un'animazione di ritorno che lo riporterà alla posizione iniziale.

La *billboard* con il nome del pannello sarà a questo punto disattivata, mentre la copia del pannello stesso sarà disattivata e il pannello originale riattivato. Sarà così possibile effettuare nuovamente la sottoprocedura dall'inizio. Per quanto riguarda invece il *Landing Gear Brake Panel*, la sottoprocedura è simile ma non prevede il *click* sui componenti del pannello per far comparire le rispettive *billboards*. Infatti in questo caso, dopo l'animazione che porta la copia del pannello vicino all'utente, le *billboards* con i nomi dei componenti compariranno tutte insieme in modo sequenziale, così da permettere all'utente di leggere il nome dei componenti stessi.

Questa visualizzazione è preferita rispetto a quella precedentemente illustrata a causa delle piccole dimensioni dei componenti del pannello stesso, difficili da puntare con precisione. Dopo che l'utente avrà letto il nome dei componenti, con un *click* potrà disattivare le *billboards* e far partire l'animazione che riporterà il pannello nella sua posizione originale. Nella pagina successiva, in Figura 66, viene mostrata un'immagine della sottoprocedura.

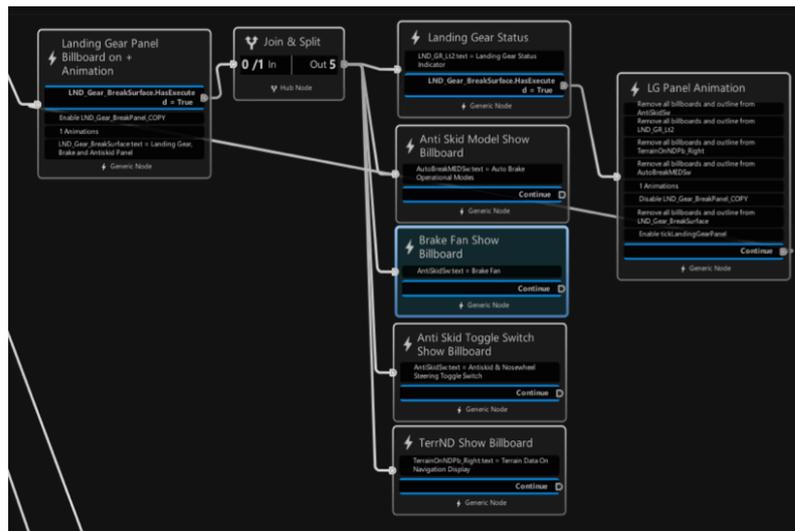


Figura 66 - Sottoprocedura per la comparsa delle *billboards* per il *Landing Gear and Brake Panel*.⁹²

Infine, per quanto riguarda alcuni pannelli relativi all'*Overhead Panel*, più precisamente i pannelli del blocco in basso a sinistra: *Lights Panel*, *Fuel and Hydraulic Panel* e *Ambient Panel*, le *billboards* compaiono automaticamente dopo il *click* dell'utente sul pannello, una dopo l'altra ad intervalli di due secondi senza alcuna animazione dello stesso (Figura 68). Quando tutte le *billboards* saranno comparse, l'utente potrà rimuoverle dalla scena con un altro *click* sul pannello.

In Figura 67 è illustrata la sottoprocedura per questi pannelli.

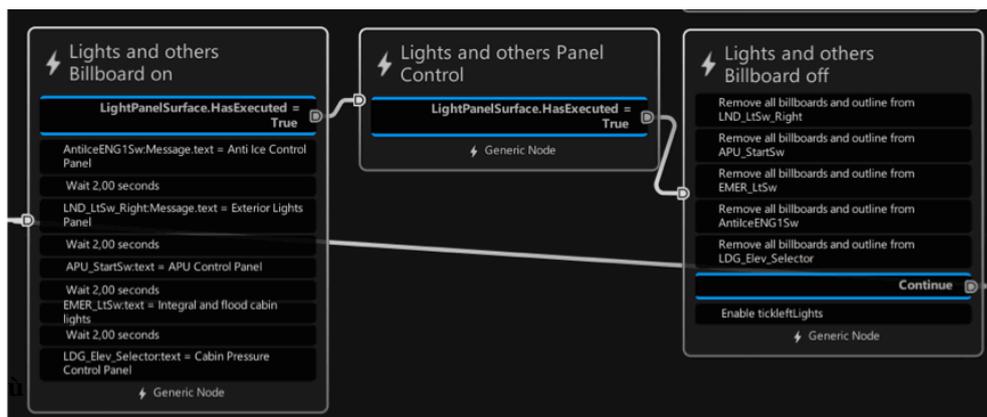


Figura 67 - Sottoprocedura per la visualizzazione delle *billboards* relative ai pannelli di illuminazione.⁹²

⁹² Immagine tratta dal *Procedure Editor* di Unity.

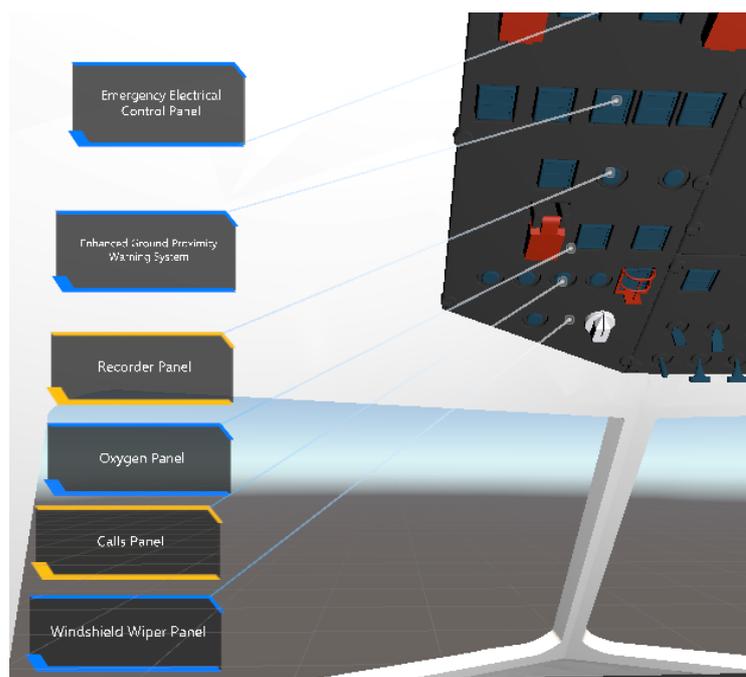


Figura 68 - Esempio di comparsa sequenziale delle *billboards*.⁹³

6.1.2 – Procedura di familiarizzazione con i sistemi di bordo – *Cockpit Training*

Con questa procedura, denominata *Cockpit Training*, si intende far compiere all'utente una prima fase di addestramento che consiste nell'individuare, per ogni sistema, i pannelli contenenti i rispettivi componenti. Per tale procedura l'utente può avvalersi di un *tablet* presente nella scena di *Unity* che raffigura una pagina iniziale, una pagina contenente informazioni sulla procedura, una con l'elenco dei quattro sistemi e per ogni sistema una pagina che contiene i suoi componenti. In ognuna di queste sono poi presenti dei pulsanti, cliccando i quali si accede ad un'altra specifica pagina. Di seguito l'elenco delle pagine presenti nel *tablet*:

- Pagina principale (Figura 69). La pagina principale contiene solo due pulsanti: uno per accedere alla pagina di *Help* e uno per accedere al menù dei sistemi.

⁹³ Immagine tratta dal software *Unity*.



Figura 69 - Pagina principale.⁹⁴

- Pagina di *Help* (Figura 70): questa pagina contiene alcune informazioni relative a ciò che si può fare con il dispositivo e sulla procedura in esecuzione. Queste informazioni possono tornare utili all'utente in ogni momento. A fondo pagina è presente un pulsante che permette di ritornare alla schermata principale.

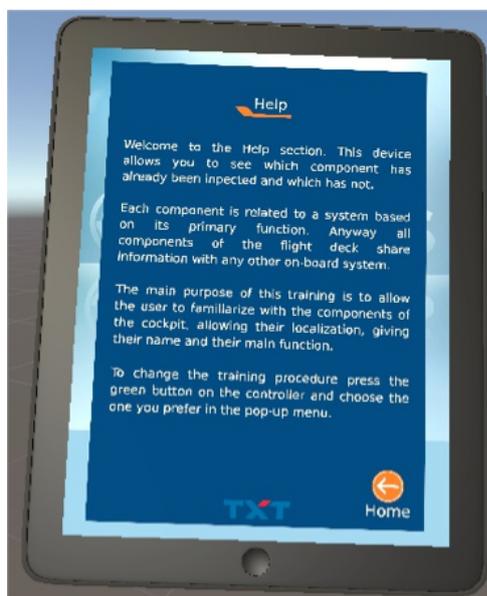


Figura 70 - Pagina di *Help*.⁹⁴

⁹⁴ Immagine tratta dal software *Unity*.

- Menù dei sistemi (Figura 71): questa pagina contiene l'elenco dei sistemi, individuati dai relativi pulsanti che permettono di accedere all'elenco dei componenti di ogni sistema. Contiene inoltre la funzione che permette di tornare alla pagina iniziale definita come *Home*.

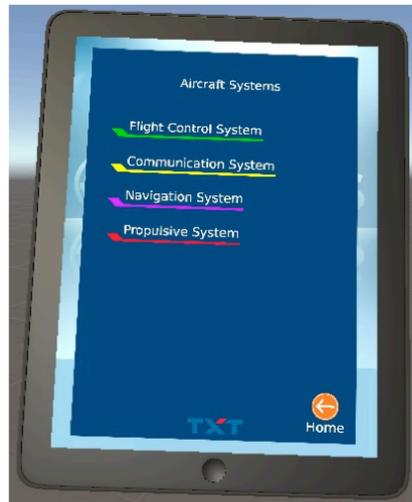


Figura 71 - Menù dei sistemi.⁹⁵

- Elenco dei componenti di ogni sistema (Figura 72): dopo aver cliccato ad esempio sul pulsante *Navigation System*, comparirà la seguente schermata, contenente l'elenco di tutti i componenti del sistema di navigazione presenti nel *cockpit*, oltre che il pulsante per tornare alla pagina iniziale. Lo stesso discorso vale ovviamente anche per tutti gli altri sistemi.

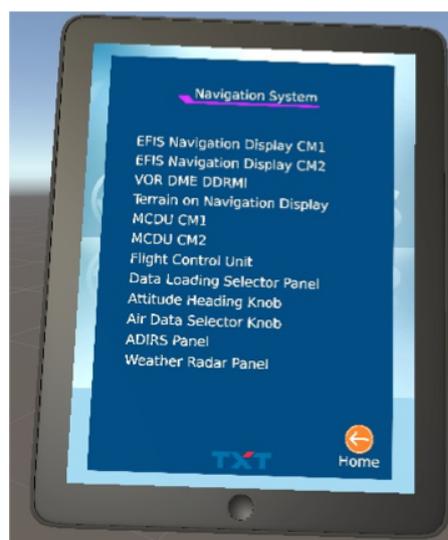


Figura 72 - Elenco dei componenti relativi al *Navigation System*.⁹⁵

⁹⁵ Immagine tratta dal *software Unity*.

Le pagine sono degli *sprite* 2D realizzati con il *software* di grafica GIMP e posti sul *tablet*. Per consentire la navigazione da una pagina all'altra, in corrispondenza di ogni pulsante è stato posto un oggetto Unity 3D "cubo" all'interno del *tablet* stesso e quindi invisibile all'utente. A ognuno di questi cubi è stato aggiunto un componente *executable*. Nella lista degli eventi da attivare a seguito delle esecuzioni di ognuno di questi cubi, sono state inserite due istruzioni, una per la scomparsa (*untoggle*) della pagina visualizzata e una per la comparsa (*toggle*) della pagina a cui il pulsante rimanda. L'*untoggle* di una pagina implica quindi la disattivazione dei suoi pulsanti in quanto gerarchicamente figli della stessa. Il funzionamento del *tablet* non è quindi dipendente dalla procedura, bensì direttamente da Unity. Ogni volta che l'utente seleziona un pannello con il *trigger*, la *billboard* appare con le stesse modalità illustrate per la procedura di familiarizzazione con il *cockpit*, ma solo se il pannello contiene elementi riconducibili a uno dei quattro sistemi. Sul *tablet*, nelle pagine relative ai sistemi e in corrispondenza degli elementi cliccati, appare una spunta (*tick*) che permette all'utente di controllare, durante lo svolgimento della procedura e per ogni sistema, quali componenti siano già stati selezionati e quali siano invece ancora da ispezionare. Il *tick* è inserito nella scena come figlio della pagina, per cui anche in questo caso la disattivazione di una pagina attraverso il pulsante implica la disattivazione del *tick* stesso. Quando per un sistema tutti i componenti sono stati ispezionati, l'utente sarà avvertito tramite una notifica e nella pagina contenente l'elenco dei sistemi compare, a fianco del relativo sistema, una spunta. La procedura termina quando l'utente ha completato l'ispezione di ogni sistema. In questo modo, l'allievo che osserva sul *tablet* quali siano i componenti mancanti è incentivato a ricordare, e dunque aiutato a memorizzare, la posizione di tali oggetti all'interno del *cockpit*. Inoltre, la visualizzazione dei componenti come parti di un sistema permette all'utente di inquadrare meglio lo scopo di ogni pannello o componente.

Si descrive ora la struttura della procedura, illustrata nel suo insieme in Figura 73 nella pagina seguente.

La procedura è composta da quattro macrogruppi, i quali contengono gruppi di tre o più nodi necessari alla comparsa delle *billboards*. La suddivisione in macrogruppi consente di separare visualmente le funzioni dei pannelli nel *flight deck*. Questo permette di operare eventuali modifiche mantenendo una struttura grafica ordinata e di facile comprensione anche per chi visualizza per la prima volta il progetto.

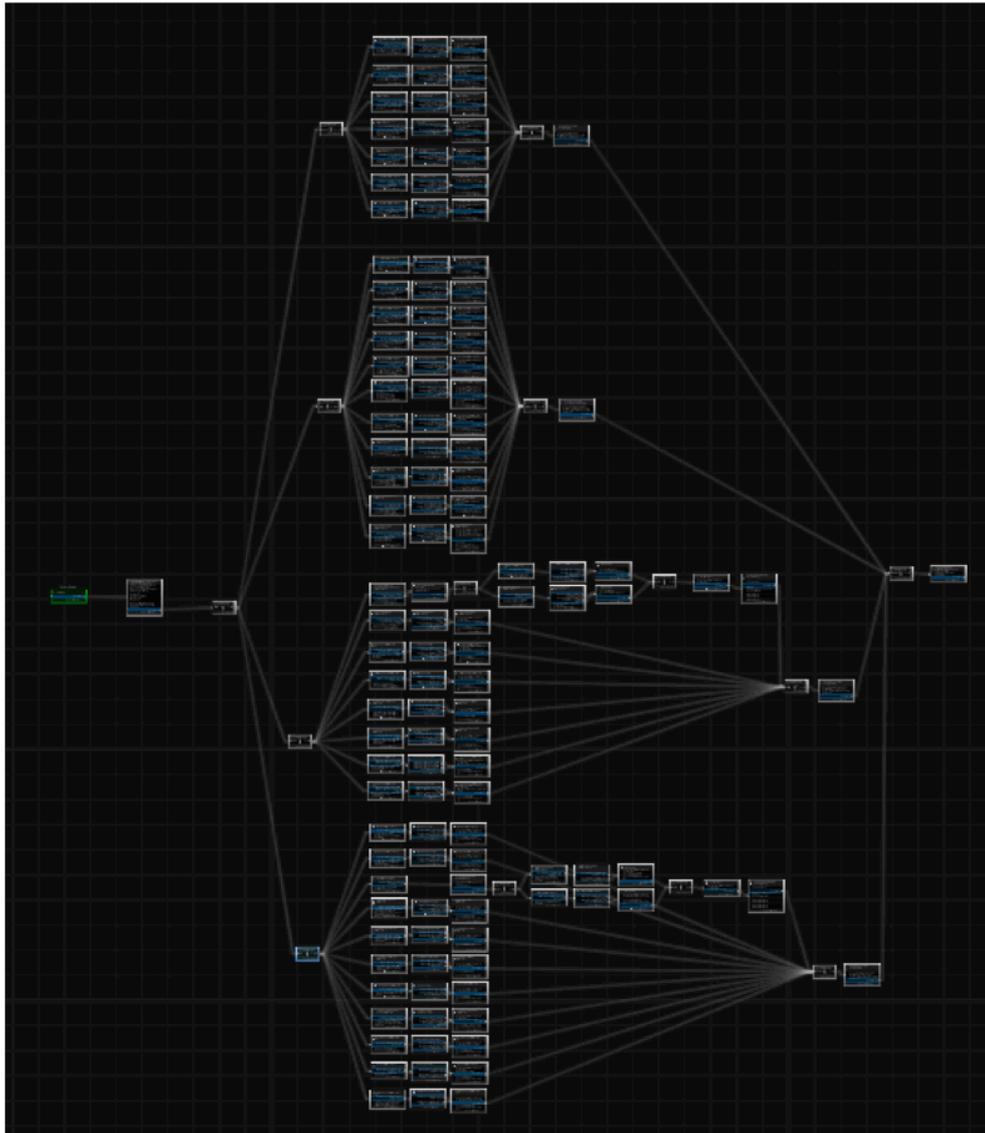


Figura 73 - Procedura di familiarizzazione con i sistemi.⁹⁶

Lo *step* iniziale, mostrato in Figura 74, contiene le istruzioni relative alla comparsa di una *billboards* il cui scopo è di fornire all'utente le informazioni necessarie allo svolgimento della procedura.

⁹⁶ Immagine tratta dal *Procedure Editor* di Unity.

Da questo *step*, attraverso un *hub node*, si diramano altri quattro *hub nodes*, uno per ogni sistema.

Da ognuno di questi partono le sottoprocedure descritte nel paragrafo precedente per la comparsa e la scomparsa delle *billboards* relative al componente cliccato, con l'aggiunta, in questo caso, dell'istruzione per la comparsa del *tick* a fianco del nome del componente nel *tablet*. Sono così presenti quattro gruppi di sottoprocedure, uno per ogni sistema, attivi tutti contemporaneamente.



Figura 74 - Step iniziale.⁹⁷

Quando l'utente ha terminato l'ispezione di tutti gli elementi di un sistema, la cui condizione è verificata attraverso un *hub node*, compare una notifica e una spunta a fianco del nome del sistema nel relativo menù. Infine, con un ulteriore *hub node*, si verifica quando l'utente ha ispezionato tutti i sistemi, per fornire un messaggio di fine procedura.

⁹⁷ Immagine tratta dal *Procedure Editor* di Unity.

6.1.3 – Procedura di *After Start*

La prima procedura operativa implementata nel corso di questo progetto è definita come *After Start*, o Post Accensione per il velivolo Airbus A320. Dopo aver eseguito l'avviamento dei propulsori, i piloti devono svolgere alcuni compiti per preparare il velivolo al successivo rullaggio e decollo. Sulla base dei documenti reperiti [1.18, 2.22], è stato possibile modulare la procedura da svolgersi in modalità *Single Player* nella posizione del Comandante. La procedura è eseguita nel seguente ordine:

STEP	SET TO
Engine Mode Selector	Normal
APU Bleed	OFF
Engine Anti-Ice	As Required
Wing Anti-Ice	As Required
APU Master Switch	OFF
Ground Spoilers	Arm
Flaps	Take Off Pos.
Rudder Trim	Zero
Pitch Trim Handwheel	Set
Status Reminder	Check ND
Ground Crew	Announcement
N/W Steer Disc Memo	Check
Checklist	Check

Tabella 2 - Steps procedurali per l'*After Start* del velivolo.

In Tabella 2 sono presentati i passi da effettuare per portare a compimento la procedura di *After Start* del velivolo. Gli *steps* vanno eseguiti dall'alto verso il basso e fanno diretto riferimento ai componenti del *flight deck* presentati nel Capitolo 5. L'implementazione della procedura è rappresentata così come configurata sul *Procedure Editor* in *Unity* (Figura 75) nella pagina seguente.

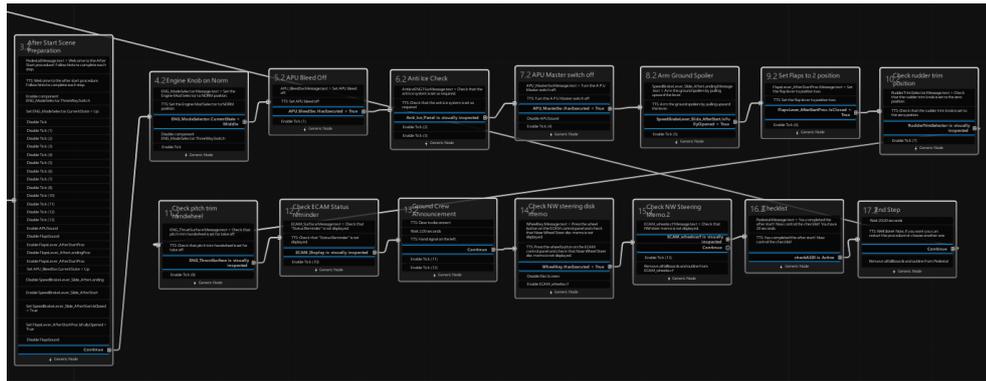


Figura 75 - Steps procedurali per l'After Start del velivolo.⁹⁸

Tramite le *transitions* visibili in Figura 75 è possibile ripercorrere visualmente la sequenza di passi da eseguire. Per avviare la procedura è necessario afferrare l'EFB presente in cabina e accedere alla pagina delle procedure. Una volta visualizzata la pagina è sufficiente premere il tasto *Play* relativo alla procedura di *After Start*. A questo punto, attraverso il componente *executable* di *Unity* sarà avviata la procedura selezionata. Un'apposita *billboard* di presentazione apparirà a fianco del *tablet* e un messaggio vocale annuncerà l'inizio della procedura selezionata, come mostrato in Figura 76.



Figura 76 - Billboard di benvenuto all'avvio della procedura di After Start.⁹⁹

⁹⁸ Immagine tratta dal *Procedure Editor* di *Unity*.

⁹⁹ Immagine tratta dal *software Unity*.

A questo punto, per ognuno degli *steps* di Tabella 2, apparirà in sequenza una *billboard* seguita da un messaggio vocale che guiderà l'utente nell'esecuzione del comando. La *billboard* indicherà visivamente la posizione del componente con cui interagire e scomparirà in seguito all'esecuzione del comando o al trascorrere di cinque secondi. Ogni attuazione di un comando, come un interruttore, una leva o un tasto sarà accompagnata da un suono simile a quello che l'utente sentirebbe se si trovasse nella cabina reale e, oltre a ciò, l'attuazione di sistemi come *Flaps*, *Auxiliary Power Unit* o altri, saranno seguiti dai rispettivi suoni reali, la cui traccia audio è assegnata al relativo oggetto di *Unity* ed avviata all'esecuzione del componente *executable*.



Figura 77 – Steps della procedura di *After Start* sull'EFB.¹⁰⁰

Nel caso in cui, durante un passo della procedura, l'utente perda l'orientamento o eventualmente non abbia più riferimenti visivi sul passo da effettuare, può utilizzare il *tablet* per riacquisire la consapevolezza relativa allo *step* a cui si trova. Sarà sufficiente navigare nella schermata delle procedure e selezionare quella che si sta effettuando. Sul *tablet* sarà mostrata la pagina relativa alla procedura corrente con l'elenco complessivo degli *steps* (Figura 77). A fianco di ognuno di questi sarà presente una spunta che indicherà quelli già eseguiti e sarà quindi facilmente

¹⁰⁰ Immagine tratta dal *software Unity*.

individuabile quello da compiere. Una volta portati a compimento tutti gli *steps*, l'utente dovrà controllare la *checklist* di bordo relativa alla procedura di *After Start*. Le *checklists* sono elenchi generalmente cartacei o digitali presenti su tutti i velivoli, e sono necessarie alla verifica del completamento delle parti fondamentali della procedura svolta. Questi elenchi sono obbligatoriamente utilizzati dal personale aeronautico per garantire che i passi fondamentali di tutte le procedure che vengono effettuate siano stati effettivamente eseguiti. L'utente dovrà quindi accedere tramite l'EFB alla pagina relativa alle *Checklists* e avrà venti secondi per effettuare il controllo. Al termine dei venti secondi una *billboard* seguita da un messaggio vocale annuncerà il termine della procedura. A questo punto l'utente potrà scegliere di avviare nuovamente la procedura o selezionarne una nuova semplicemente premendo il tasto *Play* relativo a quella scelta. All'inizio di ogni procedura è presente un nodo contenente le azioni di *reset* per la procedura scelta, visibile parzialmente in Figura 78.

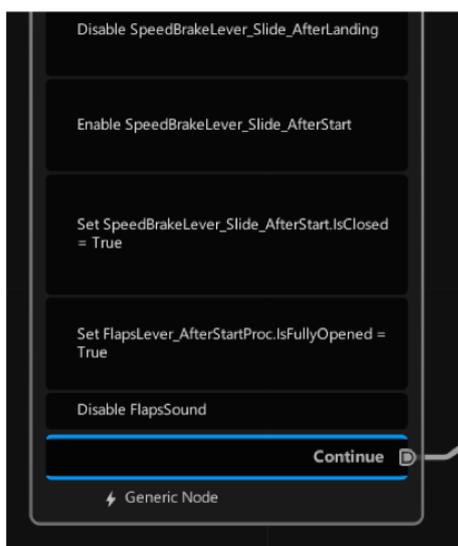


Figura 78 – Vista parziale dello step di *reset* relativo alla procedura di *After Start*.¹⁰¹

Queste azioni impostano i componenti della scena di *Unity* nella configurazione necessaria al corretto svolgimento della procedura selezionata. In questo modo è possibile creare una macro-procedura contenente tutte le altre in parallelo.

¹⁰¹ Immagine tratta dal *Procedure Editor* di *Unity*.

Questo consente all'utente di permanere per più tempo nell'ambiente di realtà virtuale ed eseguire più volte diverse procedure senza dover necessariamente rimuovere l'*headset* e riportarsi alla postazione del *computer* per eseguire il riavvio manuale. Questa soluzione non è unica ma, nonostante la sua complessità, è stata scelta per rendere più agevole per l'utente l'esperienza di apprendimento in realtà virtuale. È possibile, infatti, creare procedure singole avviabili indipendentemente tramite un menù dedicato, consultabile premendo il *Menù Button* sul *controller* dell'*HTC Vive Pro*.

Saranno ora brevemente analizzati i singoli *steps* eseguiti in cabina di pilotaggio al fine di comprenderne il senso:

- ***Engine Mode Selector to Normal***: il selettore per i modi di funzionamento dei propulsori è configurabile su tre posizioni, ossia CRANK, NORM e IGN/START. In seguito all'accensione dei motori, il selettore si trova nella posizione IGN/START la quale regola il funzionamento di entrambe gli *igniters* per motore. Impostandolo sulla modalità NORM, l'iniezione di carburante viene regolata per operare nelle condizioni nominali che il velivolo incontrerà durante tutte le fasi del volo, individuate dal *computer* di bordo tramite le modalità di selezione delle manette che regolano la spinta;
- ***APU Bleed OFF***: in seguito all'accensione dei propulsori, l'aria compressa che alimenta l'impianto pneumatico del velivolo è prelevata dai motori stessi. Di conseguenza, non si rende più necessario il prelievo dell'aria compressa dalla *Auxiliary Power Unit* di cui è dotato il velivolo, ossia un piccolo generatore di gas posto in coda utilizzato per produrre energia elettrica e pneumatica nelle fasi che non riguardano il volo del velivolo ed eventualmente in situazioni di emergenza. Impostando *APU Bleed OFF*, vengono chiuse le valvole che collegano l'impianto pneumatico alla *APU* e automaticamente aperte quelle che uniscono il suddetto impianto a quello propulsivo;

- **Engine Anti-Ice & Wing Anti-Ice As Required:** (Figura 79) questi due interruttori vengono attivati solo nel caso in cui le condizioni atmosferiche esterne al velivolo possono indurre la formazione di ghiaccio sulle superfici alari e all'interno dei propulsori.



Figura 79 – Esempio di *billboard* che mostra all'utente il compito da eseguire.¹⁰²

La formazione di ghiaccio può pregiudicare le prestazioni aerodinamiche del velivolo e le prestazioni propulsive dei motori rendendo pericolose le attività di volo;

- **APU Master Switch OFF:** a questo punto i propulsori principali alimentano tutti i sistemi di bordo del velivolo. È quindi ora possibile spegnere la *APU*;
- **Ground Spoilers set to ARM:** come anticipato nel Capitolo 5 dedicato alla descrizione dei sistemi dell'A320, il pilota imposta la leva che controlla gli *spoilers* nella posizione *ARM*. Questa impostazione permette al sistema di controllo automatico di bordo di azionare gli *spoilers*, qualora il sistema rilevi necessario farlo, senza che i piloti debbano controllarli direttamente. Questa funzionalità è inserita nel

¹⁰² Immagine tratta dal *software Unity*.

sistema di controllo per aumentare la sicurezza durante le fasi critiche della missione, come ad esempio il decollo o l'atterraggio.

Ad esempio, qualora un decollo venga abortito, il pilota porterà al minimo la manetta, azionerà i *Reverser* dei propulsori e premerà i freni.

Il sistema di controllo automatico rileverà una situazione non nominale e la identificherà come un mancato decollo azionando automaticamente gli *spoilers* e aumentando la forza frenante complessiva;

- ***Flaps set to Take Off Position:*** al fine di consentire un decollo a una velocità inferiore, il pilota dovrà azionare gli ipersostentatori muovendo la relativa leva nella posizione 1. Per fare ciò dovrà impugnare la leva, sollevare il tasto di blocco e ruotarla nella posizione dedicata;

- ***Rudder Trim set to Zero:*** analogamente a quanto fatto con il selettore per i propulsori, anche in questo caso il pilota dovrà impostare il *trim* del timone di coda in posizione nulla. Il trim è il sistema di gestione che consente al velivolo di mantenere l'equilibrio in volo ad una certa velocità annullando gli sforzi di barra, rendendo quindi più comodo e meno faticoso il controllo del velivolo da parte dei piloti. Impostando il selettore su *Zero*, viene annullato l'angolo di trim residuo portando il timone in posizione neutra;

- ***Pitch Trim Handwheel:*** a differenza di quanto fatto per il *trim* del timone, i piloti dovranno impostare il trim dello stabilizzatore nella posizione di decollo. Questo consentirà di attenuare la forza che i piloti dovranno imporre sul *side-stick* durante la manovra di decollo e salita. Il valore a cui deve essere impostato è calcolato dall'FMC sulla base dei dati inseriti nella MCDU prima della partenza, con particolare riferimento alla posizione del baricentro del velivolo;

- ***Status Reminder – Check:*** a questo punto il pilota dovrà controllare nella pagina *Status* dell'ECAM che non ci siano problemi concernenti lo stato di funzionamento dei sistemi di bordo del velivolo. Nel caso di malfunzionamenti saranno riportati messaggi di errore in modo tale da rendere noti ai piloti possibili guasti, avarie o errate configurazioni;

- **Ground Crew Announcement:** una volta eseguiti tutti gli *steps* antecedenti a questo, i piloti dovranno comunicare al personale di servizio a terra di essere pronti per la disconnessione delle utenze esterne dal velivolo comunicando tramite l'interfono la frase “*Clear to disconnect*” all'operatore di terra;
- **N/W Steer Disc Memo – Check:** analogamente a quanto fatto con lo *Status Reminder*, il pilota dovrà ora controllare che il personale di terra abbia disconnesso le attrezzature di supporto dalle prese di servizio poste sulla gamba anteriore del carrello di atterraggio. Per fare ciò il personale di terra dovrà disinserire il perno di blocco che impedisce alla ruota anteriore del velivolo di sterzare. Questo disattiva il segnale di *N/W Steer Disc*, mostrato nella pagina *Status* dell'ECAM, e consente ai piloti di manovrare il velivolo a terra;
- **Checklist – Check:** come ultimo passo, i piloti dovranno controllare sulle *checklist* di bordo che i passi fondamentali della procedura di *After Start* siano stati eseguiti correttamente (Figura 80).

AFTER START	
ANTI ICE.....	AS RQRD
ECAM STATUS.....	CHECKED
PITCH TRIM.....	_____% SET
RUDDER TRIM.....	ZERO

Figura 80 – Checklist di After Start per il velivolo Airbus A320.¹⁰³

¹⁰³ Immagine tratta da: <https://studylib.es/doc/8797684/airbus-a319-20-vezy-checklist> e personalmente elaborata. Ultimo accesso: 20 febbraio 2020.

6.1.4 – Procedura di *After Landing*

La seconda procedura implementata è quella definita come *After Landing*, o Post Atterraggio, ed è l'insieme dei compiti che i piloti devono eseguire durante la fase di rullaggio, in seguito all'atterraggio del velivolo. Durante questa fase, uno dei due piloti manovra il velivolo e lo conduce verso il *gate* aeroportuale assegnato, l'altro esegue i compiti della procedura in questione. Come per la procedura di *After Start*, anche questa può essere eseguita da entrambi i membri dell'equipaggio, mentre nel nostro caso è stata rimodulata in modo tale da poter essere eseguita dall'utente posto nella posizione del comandante. In Tabella 3 è presentata la procedura nell'ordine di esecuzione, dall'alto verso il basso:

STEP	SET TO
Ground Spoilers	Disarm
Exterior Lights	Set
Weather Radar	OFF
PWS	OFF
Engine Mode Selector	Norm
Flaps	Retract
TCAS	Standby
ATC	As Required
APU	Start
Anti-Ice	As Required
Brake Temperature	Check
Checklist	Check

Tabella 3 - Steps procedurali per l'*After Landing* del velivolo.

Analogamente a quanto visto per la procedura di *After Start*, l'utente potrà avviare la procedura servendosi dell'EFB presente in cabina. Una volta premuto il tasto *Play* apparirà una *billboard* seguita da un messaggio vocale che annuncerà l'inizio della procedura. Anche in questo caso ogni *step* è guidato tramite l'utilizzo di *billboards* esplicative e messaggi vocali. Al termine di tutti gli *steps*, l'utente dovrà nuovamente verificare il compimento dei passi fondamentali tramite la *checklist* dedicata, visualizzabile nell'apposita pagina sul *tablet*.

Avviando la procedura, si presenterà dinanzi all'utente una *billboard* di benvenuto, come mostrato in Figura 81.



Figura 81 – Billboard di benvenuto per la procedura di *After Landing*.¹⁰⁴

Come fatto in precedenza, saranno ora brevemente analizzati i singoli *step* eseguiti in cabina di pilotaggio:

- ***Ground Spoiler set to Disarm***: una volta completata la manovra di atterraggio e avviato il rullaggio lungo le *taxiways* dell'aeroporto, non sarà più necessario che il sistema automatico di controllo gestisca gli *spoilers*. Per il pilota sarà sufficiente spingere verso il basso la leva dedicata nella posizione di *spoilers* retratti;
- ***Exterior Lights Set***: (Figura 82) nel secondo *step* il pilota dovrà impostare le luci esterne del velivolo. Solitamente, saranno spente le luci di atterraggio, o *Landing Lights*, e accese le *Taxi Lights*. Quest'ultime sono generalmente meno luminose rispetto a quelle di atterraggio ed emettono un fascio luminoso quasi parallelo al terreno in modo tale da illuminare nel modo migliore l'asfalto dinanzi al velivolo;

¹⁰⁴ Immagine tratta dal *software* Unity.

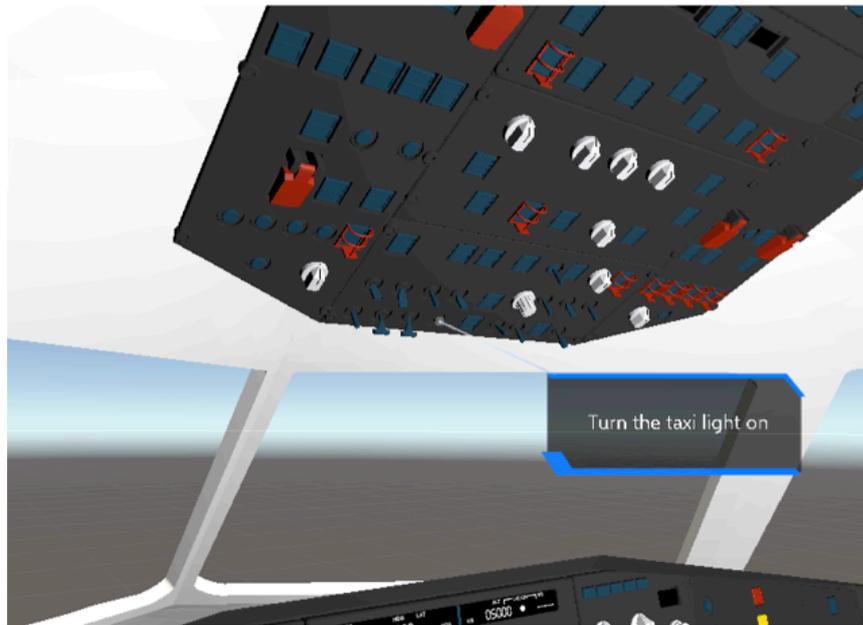


Figura 82 – *Billboards* che mostra all'utente lo *step* corrente da eseguire.¹⁰⁵

- ***Radar and Predictive Windshear System set to OFF***: una volta giunti al suolo, i piloti non avranno più la necessità di conoscere la situazione meteorologica circostante al velivolo. Per questo motivo potranno disattivare il *radar* meteorologico e il sistema di predizione del *windshear* impostando su OFF i due *switches* nell'apposito pannello. Il *windshear* è un fenomeno meteorologico che consiste nella variazione istantanea e incontrollata dell'intensità e della direzione del vento. Questo fenomeno è estremamente pericoloso, specialmente durante le fasi di decollo e atterraggio, ed è causa di numerosi incidenti anche con gravi conseguenze sulla vita dei passeggeri. Generalmente è associato a perturbazioni di carattere temporalesco ma si sono registrati casi di *windshear* anche in condizioni meteorologiche non critiche;
- ***Engine Mode Selector set to NORM***: in questo caso il pilota dovrà semplicemente verificare che il selettore per la modalità di funzionamento dei propulsori sia impostato su NORM;

¹⁰⁵ Immagine tratta dal *software* Unity.

- ***Flaps – Retract***: una volta eseguita la manovra di atterraggio, non è più necessario mantenere gli ipersostentatori nella posizione estesa. Il pilota dovrà dunque provvedere alla loro ritrazione sbloccando la leva dei *flaps* e portandola nella posizione *Retract*;
- ***TCAS – Standby***: il sistema anti-collisione può essere disattivato in quanto è necessario mantenerlo in funzione solamente durante il volo. Il pilota dovrà dunque posizionare l'apposito selettore nella posizione di *Standby*;
- ***ATC – As Required***: a questo punto, se richiesto dal tipo di volo o infrastruttura aeroportuale, il pilota dovrà prendere contatto con l'*Air Traffic Control*, generalmente la *Tower* o il *Ground Control*, al fine di ottenere le autorizzazioni necessarie per muoversi lungo le *taxiways* dell'aeroporto per giungere infine al *gate* di arrivo;
- ***APU Start***: in previsione dello spegnimento dei propulsori una volta giunto al *gate* di sbarco, il pilota avrà la necessità di avviare l'*APU* per garantire l'approvvigionamento di energia a tutti i sistemi di bordo del velivolo;
- ***Anti-Ice As Required***: in base alle condizioni atmosferiche esterne, il pilota potrà decidere se attivare il sistema di *Anti-Ice* al fine di prevenire la formazione di ghiaccio sulle superfici esterne;
- ***Brake Temperature – Check***: in seguito alla manovra di atterraggio, il sistema frenante è stato utilizzato per rallentare l'avanzamento del velivolo. Tramite il sistema di freni a disco posti assialmente alle ruote del carrello principale, l'energia cinetica viene convertita in energia termica. Ciò induce un elevato e repentino aumento della temperatura dei dischi che può portare alla nascita di incendi proprio nella zona dei dischi frenanti. Per questo motivo il pilota dovrà controllare la temperatura dell'impianto frenante attraverso la pagina dedicata *Wheels* del sistema ECAM;

- **Checklist – Check:** (Figura 83) una volta terminata la procedura, il pilota dovrà controllare che i passi fondamentali siano stati eseguiti. Per questo motivo, accedendo alla pagina delle *checklist* sull'apposito *tablet*, potrà leggere passo dopo passo la *checklist* dedicata e verificare il corretto completamento della procedura.

AFTER LANDING	
FLAPS.....	RETRACTED
SPOILERS.....	DISARMED
APU.....	AS RQRD
RADAR.....	OFF/STBY
PREDICTIVE WINDSHEAR SYSTEM	OFF

Figura 83 – Checklist di *After Landing* per il velivolo Airbus A320.¹⁰⁶

¹⁰⁶ Immagine tratta da: <http://jardesign.org/forum/viewtopic.php?id=2305> e personalmente elaborata. Ultimo accesso: 21 febbraio 2020.

7 – Conclusioni

In questo paragrafo sono presentate le riflessioni e le considerazioni emerse a conclusione di questo elaborato e nate dall'esperienza maturata nello sviluppo di questo progetto .

Durante lo sviluppo dell'ambiente virtuale e la relativa implementazione delle procedure, si è reso evidente come la figura dell'ingegnere aerospaziale sia necessaria per mettere in comunicazione il mondo dell'informatica e quello aerospaziale. La conoscenza, sia essa di base o avanzata, di velivoli come l'Airbus A320 e i sistemi a essi correlati sono disciplina specialistica ed è quindi facile constatare che l'analisi di manuali tecnici contenenti termini prettamente aeronautici sia di difficile comprensione per persone esterne al settore. Di fondamentale importanza è il lavoro svolto dal *team* di sviluppatori informatici dell'azienda *TXT e-solutions* che hanno sviluppato il *plugin* WEAVR per *Unity*, *software* che consente l'implementazione di procedure in ambiente virtuale.

Questo *tool* permette viceversa ad addetti del settore aeronautico di entrare facilmente in contatto con il mondo dell'informatica, richiedendo una conoscenza limitata della programmazione e degli algoritmi complessi che gestiscono i *software*. L'utilizzo di strumenti innovativi come gli *headsets* per la realtà virtuale e i *software* a essi correlati hanno altresì richiesto lo studio degli applicativi dedicati proprio allo sviluppo degli ambienti di realtà virtuale. Questo ha reso evidente come l'avanzare della tecnologia porti allo sviluppo di progetti multidisciplinari che richiedono agli sviluppatori di sistemi di questo tipo una conoscenza trasversale dei campi coinvolti.

Nel caso specifico di questo progetto, si è reso necessario apprendere l'utilizzo di *software* come *Unity 3D*, *Blender* e *GIMP*.

Tali programmi hanno permesso di modificare l'ambiente grafico tridimensionale al fine di ottenere la corretta configurazione della scena virtuale e di inserire elementi aggiuntivi che contribuiscono a rendere più

verosimili le esperienze di realtà virtuale. La conoscenza delle discipline concernenti il settore ingegneristico, nello specifico quello aerospaziale, ha permesso di intraprendere senza difficoltà la ricerca di materiale tecnico-scientifico relativo alle procedure aeronautiche e al velivolo Airbus A320, di saper analizzare tale materiale e, quindi, di estrapolarne le informazioni essenziali da inserire all'interno del progetto. Le fasi di *test* successive all'implementazione delle procedure hanno consentito di valutare l'apprendimento di tali sequenze di operazioni sugli sviluppatori stessi. Si ricorda che gli sviluppatori non avevano conoscenze pregresse specifiche relative alle operazioni da svolgere a bordo del velivolo oggetto di questo lavoro. In seguito alle continue prove per verificare la correttezza nell'esecuzione delle procedure stesse, si è notato come il ripetuto compimento delle medesime operazioni conduca inizialmente ad un apprendimento qualitativo delle nozioni trasmesse da ogni passo di queste procedure. In un secondo momento si nota come vi sia un'esecuzione meccanica delle stesse operazioni, indice del fatto che il cervello umano registri ed esegua in modo automatico un'operazione quando questa viene eseguita fisicamente per un numero elevato di volte. L'interazione diretta con i componenti virtuali presenti in cabina consente, inoltre, di attivare quella parte della memoria dedicata alla memorizzazione visiva delle operazioni, fornendo all'utente ricordi visuali e gestuali dell'esperienza vissuta nel momento in cui si trova ad eseguire il medesimo compito sulla macchina fisica. Il punto di forza di questa nuova tecnica di addestramento è proprio quello di dotare l'utente di una familiarità con l'oggetto fisico prima che svolga l'attività sulla macchina reale, fornendo quindi un'esperienza pregressa che contribuisce ad accorciare i tempi di formazione.

All'interno del laboratorio di simulazione del volo del Politecnico di Torino è inoltre presente un simulatore parziale in scala 1:1 del *flight deck* dell'A320, dotato di *Front Panel* e *Pedestal*. È stato dunque possibile fare più valutazioni sulla fase di apprendimento. In seguito allo svolgimento ripetuto delle procedure di familiarizzazione, *After Start* e *After Landing* in ambiente di realtà virtuale, è stato possibile replicare sul simulatore fisico parte delle stesse procedure.

Si è notato come, anche in questo caso, sia immediata la localizzazione dei componenti che devono essere eseguiti passo dopo passo durante le procedure stesse. È chiaro dunque come questa nuova tecnica di addestramento sia più efficace ed economicamente sostenibile rispetto a tecniche come la semplice lettura di manuali tecnici, le lezioni frontali o il più semplice *Computer Based Training*, o CBT, il quale consiste nell'esecuzione delle procedure su un *computer* attraverso l'interazione con la scena tramite strumenti come la tastiera e il *mouse*. Infatti, queste ultime tecniche appena citate non forniscono alcun tipo di ricordo gestuale e offrono una limitata quantità di ricordi visuali, spesso riconducibili a semplici immagini bidimensionali. Ecco quindi come si spiega la continua evoluzione che porta alla ricerca di tecniche di addestramento sempre più avanzate, immersive e che coinvolgano in numero sempre maggiore i sensi umani.

Un altro aspetto da non sottovalutare è la possibilità di svolgere queste operazioni a distanza e senza la necessità di inviare personale in loco. Le prospettive future che portano allo sviluppo di questo settore conducono ad immaginare un sistema formativo globale in cui le classi di studenti sono fornite dell'*hardware* necessario, come computer e *headsets*, e attraverso una connessione ad *Internet*, l'insegnante possa erogare il servizio formativo in tempo reale a decine o centinaia di utenti localizzati in giro per il mondo. Questo consente di unire quindi l'efficacia di questo strumento tecnologico a un risparmio di denaro derivato innanzitutto dal mancato acquisto di componenti reali come velivoli, motori o sistemi di bordo, all'assenza di costi di spedizione e al risparmio di combustibili per il trasporto di persone e merci. Infine, un ulteriore aspetto di fondamentale importanza nel settore aeronautico è la sicurezza. Grazie all'addestramento in realtà virtuale, anche l'utente inesperto può interagire con apparecchiature complesse, come velivoli o parti di esse, le quali possono essere configurate nei loro vari stati di funzionamento, e con un qualsiasi evento, anche di guasto critico, che può essere simulato senza reali conseguenze.

Con questo elaborato nasce al Politecnico di Torino il progetto per la simulazione virtuale delle procedure aeronautiche sul velivolo A320. Nell'ottica di dotare l'ateneo di un laboratorio di simulazione completo, si prevede la prosecuzione del lavoro da parte dell'azienda TXT *e-solutions* in collaborazione con gli studenti del Politecnico. Si prevede anche una parallela implementazione del simulatore fisico che consisterà nella dotazione dei componenti mancanti, in particolare dell'*Ovehead Panel*, il quale consente la gestione di numerosi sistemi di bordo del velivolo. Il completamento del laboratorio di simulazione del volo, unitamente all'omonimo corso di studi, permetterà agli studenti di valutare le diverse tipologie di modalità formative comparandone l'efficacia e la velocità di apprendimento. Consentirà inoltre di approfondire le tematiche trattate a lezione sperimentando in maniera diretta le attività che piloti, manutentori e, in generale, il personale aeronautico svolge durante le fasi di servizio.

NOMENCLATURA

ACP	=	<i>Audio Control Panel</i>
ADIRS	=	<i>Air Data Inertial Reference System</i>
AMOLED	=	<i>Active Matrix Organic Light Emitting Diode</i>
APU	=	<i>Auxiliary Power Unit</i>
AR	=	<i>Augmented Reality</i>
AR	=	<i>Aspect Ratio</i>
ATC	=	<i>Air Traffic Control</i>
BOOM	=	<i>Binocular Omni-Orientation Monitor</i>
CBT	=	<i>Computer Based Training</i>
CLPL	=	<i>Customized Low Persistence Liquid</i>
CPDLC	=	<i>Controller-Pilot Datalink Communication</i>
CMYK	=	<i>Ciano Magenta Yellow Black</i>
DDRMI	=	<i>Digital Distance Radio Magnetic Indicator</i>
DME	=	<i>Distance Measuring Equipment</i>
DOF	=	<i>Degrees Of Liberty</i>
GHz	=	<i>GigaHertz</i>
EADI	=	<i>Electronic Attitude Direction Indicator</i>
ECAM	=	<i>Electronic Centralized Aircraft Monitor</i>
EFIS	=	<i>Electronic Flight Instrument System</i>
EGPWS	=	<i>Electronic Ground Proximity Warning System</i>
FAA	=	<i>Federal Aviation Authority</i>
FADEC	=	<i>Full Authority Digital Engine Control</i>
FCC	=	<i>Flight Control Computer</i>
FCU	=	<i>Flight Control Unit</i>
FD	=	<i>Flight Director</i>
FMGC	=	<i>Flight Management Guidance Computer</i>
FMGS	=	<i>Flight Management Guidance System</i>

FOV	=	<i>Field Of View</i>
FT	=	<i>Feet</i>
HMD	=	<i>Head Mounted Display</i>
IAS	=	<i>Indicated Airspeed</i>
ICAO	=	<i>International Civil Aviation Organization</i>
LED	=	<i>Light Emitting Diode</i>
MCDU	=	<i>Multifunctional Control Display Unit</i>
MFD	=	<i>Multifunctional Display</i>
MHz	=	<i>MegaHertz</i>
MR	=	<i>Mixed Reality</i>
ND	=	<i>Navigation Display</i>
OLED	=	<i>Organic Light Emitting Diode</i>
PC	=	<i>Personal Computer</i>
PFD	=	<i>Primary Flight Display</i>
PPD	=	<i>Pixel Per Degree</i>
PPI	=	<i>Pixel Per Inch</i>
PIXEL	=	<i>Picture Element</i>
PWS	=	<i>Predictive Windshear System</i>
RADAR	=	<i>Radio Detection And Ranging</i>
RGB	=	<i>Red Green Black</i>
RMP	=	<i>Radio Management Panel</i>
SAMT	=	<i>Simulated Aircraft Maintenance Training</i>
SOP	=	<i>Standard Operating Procedure</i>
TCAS	=	<i>Traffic Collision Avoidance System</i>
TOGA	=	<i>Take Off / Go Around</i>
UTC	=	<i>Universal Time Coordinates</i>
VCASS	=	<i>Virtual Coupled Airborne System Simulator</i>
VHF	=	<i>Very High Frequency</i>
VIEW	=	<i>Virtual Environment Workstation Project</i>
VOR	=	<i>VHF Omnidirectional Range</i>
VR	=	<i>Virtual Reality</i>

VSI = *Vertical Speed Indicator*

VT = *Virtual Training*

BIBLIOGRAFIA

- [1.1] Mazuryk T., Gervautz M.: *Virtual Reality: History, Applications, Technology and Future*, Institute of Computer Graphics, Vienna University of Technology, Austria (1999).
- [1.2] Sutherland Ivan E.: *The Ultimate Display*, Information Processing Techniques Office, ARPA, OSD (1965).
- [1.3] Brooks F.P. Jr., Ming Ouh-Young, Batter J.J., Kilpatrick P.J.: *Project GROPE – Haptic Displays for Scientific Visualization*, Department of Computer Science, University of North Carolina at Chapel Hill, NC 27599-3175 (1990).
- [1.4] Buchroeder R.A., Seeley G.W., Vukobratovich D.: *Design of a Catadioptric VCASS Helmet- Mounted Display*, Arizona University Tucson Optical Sciences Center (1981).
- [1.5] Bryson S. et al.: *Knowledge-Base Augmented Reality*, Communications of the ACM, Vol. 26, No. 7 (1993).
- [1.6] Fuchs H., Bishop G. et al.: *Research Directions in Virtual Environments*, NFS Invitational Workshop, Univ. North Carolina (1992).
- [1.7] Gigante M.: *Virtual Reality: Definitions, History and Applications. Virtual Reality Systems*, Academic-Press, (1993).
- [1.8] Jargon: *Jargon Dictionary* (1995).
- [1.9] Cruz-Neira C.: *Virtual Reality Overview*, SIGGRAPH'93 Course, No.23 (1993).
- [1.10] Von Schweber L. and E.: *Virtually Here*, PC Magazin (1995).
- [1.11] Zeltzer D.: *Autonomy, Interaction, Presence*, Presence, Vol. 1, No. 1 (1992).

- [1.12] Held R., Durlach N.: Telepresence, Presence, Vol. 1, No. 1 (1993).
- [1.13] Rossetti A.: *Manuale di optometria e contattologia* (2003).
- [1.14] Catalano F.: *Elementi di ottica generale* (2001).
- [1.15] Holladay J.T.: *Proper Method for Calculating Average Visual Acuity*, Journal of Refractive Surgery (1997).
- [1.16] US Department of Defence and Department of Transportation: Federal Radionavigation Systems (1991).
- [1.17] Collinson, R. P. G. Chapter 2.6: Head Down Displays. *Introduction to Avionics Systems*. Springer. pp. 76–77. (2002).
- [1.18] Del Fiacco R.: *INSTRUCTOR CORNER: MANUAL OF STANDARDS AND OPERATION OF AIRBUS A320*. 10.13140/2.1.1516.7683. (2014).

SITOGRAFIA

- [2.1] <https://en.wikipedia.org/wiki/Sensorama>
Ultimo accesso: 19 dicembre 2019.
- [2.2] https://en.wikipedia.org/wiki/The_Sword_of_Damocles
Ultimo accesso: 19 dicembre 2019.
- [2.3] <https://aboutmyronkrueger.weebly.com/videoplace.html>
Ultimo accesso: 21 dicembre 2019.
- [2.4] <https://virtualspeech.com/blog/history-of-vr>
Ultimo accesso: 24 dicembre 2019.
- [2.5] https://en.wikipedia.org/wiki/Google_Street_View
Ultimo accesso: 21 dicembre 2019.
- [2.6] <https://en.wikipedia.org/wiki/Cyberspace>
Ultimo accesso: 10 gennaio 2020.
- [2.7] <https://www.airbus.com>
Ultimo accesso: 2 febbraio 2020.
- [2.8] <https://www.skybrary.aero/>
Ultimo accesso: 10 febbraio 2020.
- [2.9] <https://www.eurocontrol.int/function/datalink>
Ultimo accesso: 12 febbraio 2020.
- [2.10] <https://www.navcen.uscg.gov/>
Ultimo accesso: 12 febbraio 2020.
- [2.11] <https://www.faa.gov>
Ultimo accesso: 12 febbraio 2020.
- [2.12] <https://www.vive.com/us/>
Ultimo accesso: 25 gennaio 2020.
- [2.13] <https://www8.hp.com/>
Ultimo accesso: 25 gennaio 2020.
- [2.14] <https://www.pimax.com/>
Ultimo accesso: 25 gennaio 2020.
- [2.15] <https://haptx.com/>
Ultimo accesso: 27 gennaio 2020.

- [2.16] <https://www.oculus.com/>
Ultimo accesso: 25 gennaio 2020.
- [2.17] <https://www.virtuix.com/>
Ultimo accesso: 26 gennaio 2020.
- [2.18] <https://michaelbach.de/fract/>
Ultimo accesso: 28 dicembre 2019.
- [2.19] <https://www.threesixtycameras.com/vr-headset-comparison-table/>
Ultimo accesso: 30 dicembre 2019.
- [2.20] <https://trainingindustry.com/glossary/computer-based-training-cbt/>
Ultimo accesso: 10 gennaio 2020.
- [2.21] Scholz D., Thorbeck J.: COMPUTER BASED TRAINING IN AIRCRAFT DESIGN EDUCATION (2000)
URL: <https://www.fzt.haw-hamburg.de/pers/Scholz/paper/ICA0173Presentation.pdf>
Ultimo accesso: 24 dicembre 2019
- [2.22] <https://www.yemenia-ops.com> > A320SOP (2011)
Ultimo accesso: 5 marzo 2020
- [2.23] Sutherland I.: The Ultimate Display Ivan E. Sutherland Information Processing Techniques Office, ARPA, OSD Proceedings of IFIP Congress, S. 506-508,
URL: <http://worrydream.com/refs/Sutherland%20-%20The%20Ultimate%20Display.pdf>,
Ultimo accesso: 23 dicembre 2019
- [2.24] https://it.wikipedia.org/wiki/Realtà_virtuale
Ultimo accesso: 20 gennaio 2020
- [2.25] https://it.qwe.wiki/wiki/Virtual_reality
Ultimo accesso: 20 gennaio 2020
- [2.26] <https://developers.google.com/vr/discover/fundamentals>
Ultimo accesso: 21 gennaio 2020
- [2.27] Deering MF.: “The Limits of Human Vision”
URL: <https://www.swift.ac.uk/about/files/vision.pdf>
Ultimo accesso: 26 dicembre 2019.
- [2.28] Federal Aviation Authority: Chapter 02: Electronic Flight Instrument
URL: https://www.faa.gov/regulations_policies/handbooks_manuals/aviation/advanced_avionics_handbook/media/aah_ch02.pdf
Ultimo accesso: 2 febbraio 2020

- [2.29] https://it.wikipedia.org/wiki/Flight_Management_System
Ultimo accesso: 11 febbraio 2020
- [2.30] <https://safetyfirst.airbus.com/optimum-use-of-weather-radar/>
Ultimo accesso: 4 febbraio 2020
- [2.31] https://en.wikipedia.org/wiki/Traffic_collision_avoidance_system
Ultimo accesso: 6 febbraio 2020
- [2.32] Airbus Flight Operations Support and Training Standards: Flight Operations Safety Awareness Seminar (FOSAS) (2017)
URL: https://www.icao.int/ESAF/Documents/meetings/2017/AFI%20FOSAS%202017/Day%201%20Docs/Day_1_3_SOP.pdf
Ultimo accesso 14 febbraio 2020.