

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Aerospaziale

Tesi di Laurea Magistrale

**Digitalizzazione e analisi dell'addestramento del personale
aeronautico attraverso gli strumenti della realtà virtuale**



Relatore:

Prof. Giorgio Guglieri

Correlatore:

Dott. Stefano Primatesta

Correlatore aziendale Txt e-Solutions:

Ing. Fabrizio Sillano

Candidato:

Giuseppe Brizzi

Dicembre 2020

Indice

SOMMARIO	6
INDICE DELLE FIGURE E DELLE TABELLE	8
1 INTRODUZIONE	12
2 CENNI STORICI.....	20
3 STATO DELL'ARTE DEGLI <i>HARDWARE VR</i>.....	27
3.1 STATO DELL'ARTE: SFIDE TECNOLOGICHE.....	35
3.1.1 <i>Fattore umano</i>	35
3.1.2 <i>Percezione visiva e specifiche tecniche</i>	36
3.1.3 <i>Latenza e display a bassa persistenza</i>	39
3.2 STATO DELL'ARTE DEL TRAINING BASATO SU <i>VR</i>	41
4 SOFTWARE E HARDWARE UTILIZZATI	45
4.1 UNITY	45
4.2 STEAMVR.....	49
4.3 PACELAB WEAVR	50
4.3.1 <i>Creazione di una scena su WEAVR</i>	51
4.3.2 <i>Creazione di una procedura su WEAVR</i>	55
5 AIRBUS A320.....	61
5.1 SISTEMI DEL VELIVOLO AIRBUS A320	64
5.1.1 <i>Front panel</i>	65
5.1.2 <i>Pedestal</i>	71
5.1.3 <i>Overhead Panel</i>	77
6 PROCEDURE: <i>BEFORE START E DE-ICING</i>	80
6.1 <i>BEFORE START PROCEDURE</i> NELL'AMBIENTE <i>VR</i>	81
6.1.1 <i>Introduzione</i>	81
6.1.2 <i>Procedure steps</i>	88
6.2 <i>DE-ICING PROCEDURE</i>	99

7	ANALISI DEL TRAINING IN REALTÀ VIRTUALE	103
7.1	ORGANIZZAZIONE DEL TEST	104
7.2	RISULTATI DEL TEST	107
7.3	QUESTIONARIO <i>VR</i>	112
8	CONCLUSIONI.....	115
	BIBLIOGRAFIA.....	117
	SITOGRAFIA	119
9	RINGRAZIAMENTI.....	121
	APPENDICE A – PRESENTAZIONE TRAINING <i>COMPUTER-BASED</i>	123
	APPENDICE B – QUESTIONARIO TRAINING <i>VR</i>.....	131

Sommario

Questo elaborato di tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria Aerospaziale nasce da una collaborazione fra il Politecnico di Torino e l'azienda Txt e-Solutions. Lo scopo di tale progetto è quello di sviluppare delle procedure di volo operative mediante lo strumento della realtà virtuale, per permettere ad un utilizzatore di immergersi nella cabina di pilotaggio del velivolo A-320 per familiarizzare con gli strumenti ivi presenti e con le procedure, tipicamente effettuate dal personale di volo.

Tale progetto è la continuazione dal lavoro di tesi precedentemente svolto da Frédéric Vianale, nell'elaborato "Analisi di procedure operative per l'addestramento del personale aeronautico in ambiente di realtà virtuale", e da Lorenzo Fava in "Digitalizzazione di procedure operative per l'addestramento del personale aeronautico in ambiente di realtà virtuale", in cui erano state create delle procedure operative, alle quali sono state aggiunte le procedure di *Before Start* e *De-icing*.

In questo elaborato, dopo i capitoli introduttivi riguardo il mondo della realtà virtuale, cenni storici e stato dell'arte, verrà descritta la cabina di pilotaggio dell'A-320, rappresentata nell'ambiente di realtà virtuale.

Il primo obiettivo della tesi è la realizzazione della procedura di *Before Start*, implementata grazie alla piattaforma software di realtà estesa Pacelab WEAVR.

Inoltre, il secondo obiettivo è effettuare il confronto fra una tecnica di training tradizionale "su carta" del personale di volo con il training basato sulla realtà virtuale da noi proposto. In particolare, questo test è incentrato sulla procedura di *Before Start*. Tale confronto è effettuato analizzando i risultati ottenuti da un campione di persone che hanno svolto una delle due modalità di training e, successivamente, hanno effettuato un test conclusivo su simulatore fisico dell'A-320.

Indice delle figure e delle tabelle

Figure

Capitolo 1

FIGURA 1.1: TASSONOMIA DEI SISTEMI DI REALTÀ VIRTUALE.....	15
FIGURA 1.2: AUGMENTED REALITY SYSTEM, ULTRA-VIS.....	17
FIGURA 1.3: ESEMPIO DI SISTEMA HMD	18
FIGURA 1.4: SIMULATORE DI VOLO DEL VELIVOLO A320	19

Capitolo 2

FIGURA 2.1: COPERTINA DEL RACCONTO "PYGMALON'S SPECTACLES", 1935	20
FIGURA 2.2: SENSORAMA 1962	21
FIGURA 2.3: IVAN SUTHERLAND E LA "SWORD OF DAMOCLES" 1968.....	22
FIGURA 2.4: COPERTINA DEL SCIENTIFIC AMERICAN DEL 1987 RAFFIGURANTE IL DATAGLOVE DELLA VPL	23
FIGURA 2.5: THE VIRTUAL ENVIRONMENT WORKSTATION PROJECT, 1989	23
FIGURA 2.6: CAVE, UTENTE IMMERSO NELL'AMBIENTE VIRTUALE	24
FIGURA 2.7: OCULUS RIFT S 2019, ULTIMO MODELLO DELLA COMPAGNIA OCULUS VR.....	26

Capitolo 3

FIGURA 3.1: HTC VIVE PRO, COMPOSTO DA HEAD-MOUNTED DISPLAY, CONTROLLER E BASE STATION PER IL TRACCIAMENTO DEI MOVIMENTI	29
FIGURA 3.2: HEADSET HTC VIVE PRO.....	30
FIGURA 3.3: BASESTATION DEL SISTEMA HTC VIVE PRO.....	30
FIGURA 3.4: CONTROLLER DEL SISTEMA HTC VIVE PRO	31
FIGURA 3.5: SCHEMA FUNZIONAMENTO SISTEMA HTC VIVE PRO	32
FIGURA 3.6: REACTIVE GRIP.....	33
FIGURA 3.7: INFINADECK TAPIS-ROULANT E CONTROLLER	34
FIGURA 3.8: A SINISTRA IMMAGINE SU DISPLAY AD ALTA PERSISTENZA, A DESTRA STESSA IMMAGINE SU DISPLAY A BASSA PERSISTENZA, GENERATI CON SIMULATORI OCULUS	40
FIGURA 3.9: MODELLO VIRTUALE DELL'EDIFICIO DEL DIPARTIMENTO SCIENTIFICO DELL'UNIVERSITÀ DELL'ALABAMA	42
FIGURA 3.10: PUNTO DI VISTA DELL'UTENTE IMMERSO NELLA STAZIONE LUNARE VIRTUALE CREATA DALL'ESA	44

Capitolo 4

FIGURA 4.1: INTERFACCIA INIZIALE DI UNITY	45
FIGURA 4.2: GERARCHIA DI <i>UNITY</i> PER LA GESTIONE DEGLI OGGETTI DELLA SCENA.....	46
FIGURA 4.3: ESEMPIO <i>INSPECTOR</i> DI UN <i>GAMEOBJECT</i> SU <i>UNITY</i>	47
FIGURA 4.4: ESEMPIO COMPONENTE <i>TRANSFORM</i> DI UN <i>GAMEOBJECT</i> SU <i>UNITY</i>	48

FIGURA 4.5: INTERFACCIA DELLE CARTELLE DI UN PROGETTO SU <i>UNITY</i>	49
FIGURA 4.6: <i>TELEPORT POINT</i> (AL CENTRO) E <i>TELEPORT AREA</i> (DELIMITATA DAI SEGMENTI IN AZZURRO).....	52
FIGURA 4.7: SULLA SINISTRA <i>RENDERER</i> DELLE MANI CON CONTROLLER, SULLA DESTRA INTERAZIONE <i>RENDERER</i> MANO CON OGGETTO <i>VR</i>	53
FIGURA 4.8: ESEMPIO DI UNA <i>BILLBOARD</i> ASSOCIATA AD UN OGGETTO DELLA SCENA.....	54
FIGURA 4.9: <i>PROCEDURE EDITOR</i> DI <i>WEAVR</i> , ESEMPIO PRESO DAL PROGETTO DI TESI	56
FIGURA 4.10: ESEMPIO DI UN NODO, UNITÀ BASE DI UNA PROCEDURA	56
FIGURA 4.11: ESEMPIO DI UN GRUPPO DI NODI E TRANSIZIONI CHE FORMANO UNO STEP PROCEDURALE	57
FIGURA 4.12: ESEMPIO DI UN NODO CON AZIONI D'ENTRATA, CONDIZIONI D'USCITA E AZIONI D'USCITA	58
FIGURA 4.13: CONDIZIONE D'USCITA <i>VISUALLY INSPECTED</i>	58
FIGURA 4.14: <i>HUB NODE</i>	59
Capitolo 5	
FIGURA 5.1: AIRBUS A320	62
FIGURA 5.2: DIMENSIONI CARATTERISTICHE AIRBUS A320	63
FIGURA 5.3: CABINA DI PILOTAGGIO AIRBUS A320	64
FIGURA 5.4: <i>FRONT PANEL</i> AIRBUS A320.....	66
FIGURA 5.5: <i>PRIMARY FLIGHT DISPLAY</i> AIRBUS A320	67
FIGURA 5.6: <i>ECAM_E/WD</i> (ENGINE WARNING DISPLAY).....	68
FIGURA 5.7: PANNELLI DEL <i>NAVIGATION CONTROL</i>	69
FIGURA 5.8: <i>STANDBY AIRSPEED INDICATOR</i>	70
FIGURA 5.9: <i>PEDESTAL</i> AIRBUS A320	71
FIGURA 5.10: <i>MCDU</i> AIRBUS A320.....	72
FIGURA 5.11: <i>RADIO MANAGEMENT PANEL</i> AIRBUS A320	73
FIGURA 5.12: <i>TCAS/ATC TRANSPONDER CONTROL PANEL</i> AIRBUS A320.....	74
FIGURA 5.13: <i>THRUST LEVERS</i> ED <i>ENGINE START AND IGNITION PANEL</i>	76
FIGURA 5.14: <i>OVERHEAD PANEL</i> AIRBUS A320	77
Capitolo 6	
FIGURA 6.1: <i>CHECKLIST</i> DELLA PROCEDURA DI <i>BEFORE START</i>	81
FIGURA 6.2: PROGETTO <i>UNITY</i> CONTENENTE TUTTE LE PROCEDURE DIGITALIZZATE IN COLLABORAZIONE CON L'AZIENDA TXT E-SOLUTIONS	82
FIGURA 6.3: SCHERMATA INIZIALE DEL TABLET UTILIZZATO IN REALTÀ VIRTUALE.....	833
FIGURA 6.4: SCHERMATE <i>CHECKLIST</i> DEL TABLET	844
FIGURA 6.5: SCHERMATA <i>HELP</i> DEL TABLET	844
FIGURA 6.6: SCHERMATA <i>PROCEDURES</i> DEL TABLET NELL'AMBIENTE <i>VR</i> SU <i>UNITY</i>	855
FIGURA 6.7: SCHERMATA DEL TABLET CON GLI STEP DELLA <i>BEFORE START PROCEDURE</i>	866
FIGURA 6.8: NODI INIZIALI DEL BLOCCO PROGETTUALE SUL <i>PROCEDURE EDITOR</i>	877
FIGURA 6.9: <i>BILLBOARD</i> DI BENVENUTO	877

FIGURA 6.10: FRECCIA DI NAVIGAZIONE CHE GUIDA L'UTENTE PER INDIVIDUARE LE <i>BILLBOARD</i>	888
FIGURA 6.11: <i>OVERHEAD PANEL, INTEGRAL AND CABIN SIGNS LIGHTING CONTROL PANEL</i>	899
FIGURA 6.12: <i>OVERHEAD PANEL, PANNELLO ADIRS</i>	90
FIGURA 6.13: NODO PER IL CONTROLLO DEL CARBURANTE E LA CONDIZIONE D'USCITA <i>VISUALLY INSPECTED</i>	911
FIGURA 6.14: <i>MCDU</i> SUL <i>PEDESTAL</i> DELL'A320	922
FIGURA 6.15: <i>FRONT PANEL</i> E <i>BARO-REFERENCE</i>	933
FIGURA 6.16: SCHERMATA "DOOR" DELL' <i>ECAM</i> DISPLAY	944
FIGURA 6.17: <i>SWITCH</i> DEL <i>BEACON</i> SULL' <i>OVERHEAD PANEL</i>	944
FIGURA 6.18: <i>PEDESTAL</i> DELL'A320 E <i>PARKING BRAKE</i>	955
FIGURA 6.19: <i>BEFORE START PROCEDURE</i> SUL <i>PROCEDURE EDITOR</i> DI <i>WEAVR</i>	966
FIGURA 6.20: NODO INTRODUTTIVO DELLA <i>BEFORE START PROCEDURE</i>	966
FIGURA 6.21: <i>COCKPIT PREPARATION AND GEAR PINS</i>	977
FIGURA 6.22: <i>SIGNS ON</i>	977
FIGURA 6.23: <i>DATA SET</i>	977
FIGURA 6.24: <i>BARO REFERENCE SET</i>	988
FIGURA 6.25: <i>WINDOWS/DOORS CLOSED</i>	988
FIGURA 6.26: <i>BEACON ON</i>	988
FIGURA 6.27: <i>THRUST LEVERS IDLE</i>	988
FIGURA 6.28: <i>PARKING BRAKE AS REQUIRED</i>	999
FIGURA 6.29: <i>FINAL STEPS</i>	999
FIGURA 6.30: <i>CHECKLIST</i> DELLA <i>DE-ICING PROCEDURE</i>	100

Capitolo 7

FIGURA 7.1: <i>OVERHEAD PANEL</i> UTILIZZATO PER L'ESAME SU SIMULATORE FISICO	1066
FIGURA 7.2: PUNTEGGIO ESAME PRIMA ITERAZIONE	1088
FIGURA 7.3: PUNTEGGIO ESAME SECONDA ITERAZIONE	11010
FIGURA 7.4: MEDIA DELLE RISPOSTE AL QUESTIONARIO <i>VR</i>	113

Tabelle

TABELLA 3.1: SPECIFICHE TECNICHE STATO DELL'ARTE <i>HMD</i>	38
TABELLA 7.1: RISULTATI ESAME SU SIMULATORE FISICO, PRIMA ITERAZIONE	107
TABELLA 7.2: RISULTATI ESAME SU SIMULATORE FISICO, PRIMA ITERAZIONE	110

1 Introduzione

Il settore aeronautico è da sempre in rapido sviluppo tecnologico e, nel corso dei decenni, la crescente complessità dei velivoli aerospaziali ha reso necessario uno sviluppo dei modelli matematici e fisici in grado di studiare il loro comportamento e quello dei loro sistemi di bordo. Dunque, tali modelli vengono impiegati nella progettazione e nello sviluppo dei velivoli garantendo un miglioramento delle performance di tutti i velivoli aerospaziali e portando anche dei vantaggi in termini economici.

Lo sviluppo del settore aerospaziale è dovuto anche ad integrazioni multidisciplinari con altri settori quali, per esempio, i settori dell'informatica e dell'elettronica. Per fare un esempio di integrazione multidisciplinare, si può affermare che l'informatica ha permesso lo sviluppo della fluidodinamica computazionale che permette di ottimizzare la geometria del velivolo migliorandone l'aerodinamica. Questo sviluppo informatico ha un impatto anche sui costi di progettazione di un velivolo riducendo il numero di test da effettuare in galleria del vento.

Inoltre, lo sviluppo tecnologico ha permesso un miglioramento delle tecnologie di simulazione che vengono utilizzate, in ambito aerospaziale, per predire il comportamento di un velivolo e dei suoi sistemi. Il campo della simulazione, vista la crescente potenza di calcolo dei software utilizzati in tale settore, permette una sempre maggiore precisione nella previsione della dinamica del volo del velivolo, delle sue traiettorie e dei consumi, in generale, ambiti legati alla disciplina della meccanica del volo. Negli ultimi tempi, il campo della simulazione ha inglobato anche altri ambiti che toccano altre fasi della vita del velivolo, non strettamente il volo in sé. In particolare, si fa riferimento al settore dell'addestramento di piloti, assistenti di volo e tecnici manutentivi. Proprio in questo campo l'azienda TXT e-solutions fornisce delle soluzioni in grado di ottimizzare l'addestramento del personale di volo, come verrà approfondito in seguito in questo elaborato.

In un sistema uomo-macchina complesso come quello di un velivolo, è necessario avere un insieme elaborato di procedure standardizzate. Queste procedure indicano all'operatore umano, nel nostro caso il pilota o il membro del personale di bordo, la maniera in cui un'operazione deve essere svolta, scomponendola in una successione di singoli step. L'intento è quello di garantire una guida al pilota in grado di permettere un'efficiente e sicura maniera di completare l'attività richiesta. In questo modo il carico di lavoro mentale sull'operatore umano viene diminuito e si riducono i tempi e costi dell'operazione. La necessità di utilizzare delle procedure per qualsiasi interazione uomo-macchina deriva, dunque, dalla crescente complessità dei sistemi industriali e l'assenza di tali procedure può comportare dei rischi e condurre ad incidenti.

Un esempio dell'importanza delle procedure è fornito dall'incidente a Sioux City, dove nel 1989 un velivolo United Airlines DC-10 ha subito una totale *failure* del sistema idraulico dovuto a la rottura del fan disk del motore centrale, che ha portato ad una perdita del controllo del velivolo. Il pilota e l'equipaggio di volo, in assenza di una procedura per il controllo del velivolo in questa determinata situazione, hanno fatto ricorso a metodi non standardizzati per cercare di risolvere la situazione, riuscendo a salvare parte delle persone a bordo ma non potendo evitare un atterraggio catastrofico e la morte di 112 passeggeri.

Negli ultimi anni lo sviluppo tecnologico ha portato all'elaborazione di software che riproducono ambienti legati al settore aeronautico utilizzando la cosiddetta realtà virtuale, spesso abbreviata in inglese con la sigla *VR*, che sta per *virtual reality*. I sistemi *VR* sono d'interesse nell'ambito della simulazione di volo e del training del personale di bordo, in quanto permettono di riprodurre delle attività complesse che non sempre sono praticabili comodamente nella realtà a causa di ragioni di sicurezza o costo. Uno dei principali obiettivi della realtà virtuale è quello di fornire un ambiente immersivo che porta l'utente a distaccarsi dalla realtà fisica ed entrare in questo spazio virtuale avendo la percezione di essere fisicamente presente in

esso. Tale percezione viene creata immergendo l'utente in un sistema di immagini, suoni oppure altri stimoli che riproducono tale ambiente.

L'utilizzo del termine realtà virtuale è coniato negli anni Sessanta e ad oggi è molto conosciuto. Tale termine può essere definito in vari modi, in seguito ne troviamo alcuni:

- Secondo il “*online Oxford dictionary*” la realtà virtuale è una simulazione, generata al computer, di un'immagine o di un'ambiente tridimensionale che può interagire ed essere controllata da una persona che utilizza uno speciale equipaggiamento elettronico, come un casco con uno schermo interno o dei guanti forniti di sensori [2.1].
- Un sistema informatico chiuso che è composto da un ambiente virtuale, un ambiente fisico e anche da un software ed un hardware che permettono interfaccia fra uomo e computer [1.1].
- Settore informatico che ha l'obiettivo di creare un ambiente virtuale che permette ad un utente di immergersi in esso con la capacità di interagire con tale ambiente. Viene utilizzato un equipaggiamento specifico per simulare l'ambiente e per stimolare l'utente con dei *feedback* per rendere l'esperienza il più reale possibile [1.2].
- L'illusione della partecipazione ad 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, sul tracciamento dei movimenti di braccia e corpo, e sulla riproduzione binaurale dei suoni. La VR è un'esperienza immersiva multisensoriale [1.3].

Nell'ambito della realtà virtuale un termine che viene spesso utilizzato è “immersione”, tale concetto è inteso come essere completamente coinvolto in un ambiente. In altre parole, l'immersione è uno stato in cui l'utente si sente attratto e coinvolto in uno spazio virtuale fino a perdere consapevolezza di

quello che è il mondo reale in cui effettivamente si trova. Nella realtà virtuale, l'immersione spaziale è la percezione di essere fisicamente presente in un ambiente non fisico. I sistemi di realtà virtuale possono raggiungere diversi gradi di immersione, possono averne uno parziale o completo. Definiremo i sistemi *VR* in grado di fornire un'immersione completa come *fully immersive*, anche se è opportuno sottolineare che raggiungere un tale livello di immersione in un'esperienza di realtà virtuale è ancora un obiettivo da raggiungere per i ricercatori in tale settore [1.4].

Sebbene il concetto di immersione sembri essere cruciale per la realtà virtuale, la *VR* può anche essere non-immersiva quando colloca l'utente in un ambiente 3D che può essere direttamente manipolato dall'utente stesso, però lo fa utilizzando delle convenzionali postazioni grafiche dotate di un monitor, tastiera e mouse.

Nell'immagine seguente è presentata una tassonomia dei sistemi di realtà virtuale presa dalla pubblicazione di A. Muhanna "*Virtual reality and the CAVE: taxonomy, interaction challenges and research directions*" [1.1].

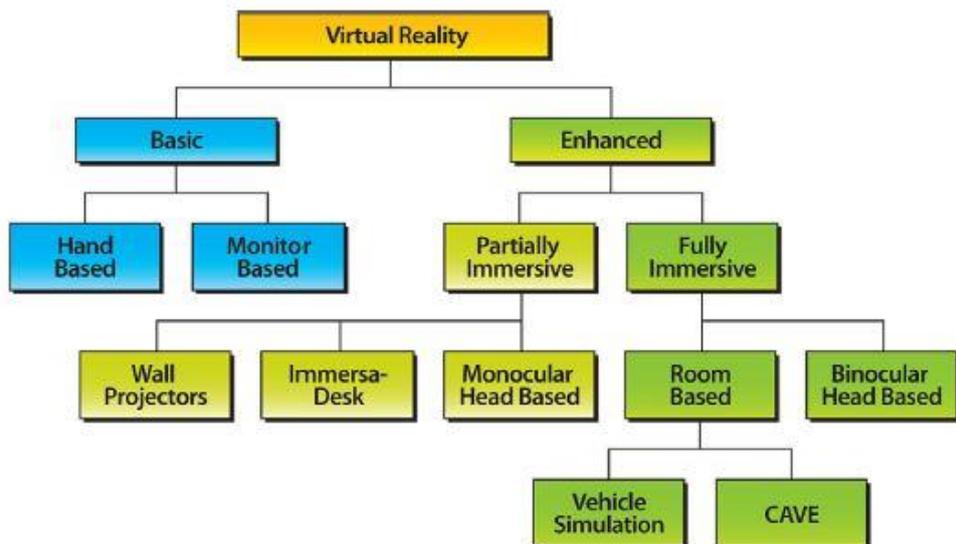


Figura 1.1: Tassonomia dei sistemi di realtà virtuale

Tale classificazione è basata su due fattori. Il primo è il tipo di tecnologia utilizzata per costruire il sistema di realtà virtuale. In particolare, consideriamo la necessità di avere degli hardware che forniscono input o output indispensabili per poter provare l'esperienza del sistema di realtà virtuale.

Il secondo fattore su cui è basata tale classificazione è il livello di immersione fornito dal sistema *VR*. Come discusso in precedenza, la realtà virtuale non deve essere obbligatoriamente di tipo *fully immersive*, ma i sistemi *VR* possono fornire diversi gradi di immersione.

Si osserva, nella tassonomia prima proposta, che il più basso grado di immersione viene provato nei sistemi *basic*, per poi avere un grado di immersione crescente passando per i sistemi *partially immersive*, fino a raggiungere il più alto grado di immersione nei *fully immersive*.

I sistemi *VR basic* non necessitano di dispositivi di input o output particolari per mostrare un ambiente di realtà virtuale. Infatti, sono detti *screen-based* e dotati di una grafica tridimensionale. Tale classe di sistemi è suddividibile in due sottosistemi, *hand based* e *monitor based*.

I sistemi *hand based* si basano su un equipaggiamento che può essere tenuto in mano, come uno smartphone, per fornire un'esperienza di realtà virtuale. Quelli *monitor based* sono basati su dei monitor di computer che trasmettono delle grafiche tridimensionali.

I sistemi di realtà virtuale *enhanced* necessitano di dispositivi più potenti e complessi per creare un'esperienza di realtà virtuale di quelli utilizzati nei sistemi *basic*. Basandosi sul fattore del grado di immersione creata da questi dispositivi *VR*, possono essere suddivisi in due sottosistemi, *partially immersive* o *fully immersive*.

Fra i *partially immersive* ci sono i sistemi detti *wall projectors* dove l'utente non deve utilizzare dei particolari occhiali, in quanto tali sistemi non proiettano immagini tridimensionali. Dunque, nei *wall projectors* si utilizzano dei guanti per dare all'utente la possibilità di interagire con l'ambiente di realtà virtuale. Negli *Immersa-desk*, invece, l'utente deve

utilizzare degli occhiali che gli forniscono la percezione di osservare un'immagine tridimensionale.

Un'altra classe di sistemi di realtà virtuali è quella definita come *head based*, ovvero basata su un equipaggiamento posto sul capo dell'utente che fornisce dei *feedback* visivi e sonori. Il sistema detto *monocular head based* si colloca in questo gruppo, ed è considerato come un sistema *partially-immersive*, oppure come un sistema di realtà aumentata, dall'inglese *augmented reality*. Le tecnologie di *augmented reality* combinano gli oggetti del mondo reale con quelli della realtà virtuale. Dunque, nei sistemi *monocular head based* l'utente è in grado di osservare questa combinazione di oggetti reali e virtuali attraverso uno schermo trasparente oppure osservando la realtà con un occhio e gli oggetti virtuali con un altro. Prendiamo come esempio un dispositivo militare di *augmented reality*, osservabile nella figura 1.2, chiamato ULTRA-Vis. Tale sistema ha la caratteristica di “aumentare” la realtà del soldato con delle informazioni trasmesse tramite immagini, etichette grafiche. Tali grafiche riguardano punti di interesse strategico, *waypoints* di navigazione e altre informazioni di carattere militare e saranno visibili dal soldato nel mondo reale che lo circonda [1.5].



Figura 1.2: Augmented reality system, ULTRA-Vis

I sistemi definiti come *fully immersive* forniscono all'utente delle immagini tridimensionali con un ampio campo visivo. Un esempio di un sistema *head-based fully immersive* è l'*head mounted display*, detto anche *HMD*. In questo sistema binoculare sono trasmesse due immagini virtuali, una per occhio, in modo tale da fornire un largo campo visivo e la percezione della terza dimensione. Inoltre, il sistema *HMD* può tracciare la posizione della testa dell'utente in modo da fornire feedback interattivi all'utente stesso.



Figura 1.3: Esempio di sistema HMD

L'ultimo gruppo da analizzare in questa tassonomia dei sistemi di realtà virtuale è quello detto *room-based* in cui, quindi, l'esperienza di realtà virtuale viene fornita all'utente in una stanza. Fra questi, i simulatori di volo che sono progettati per dare la percezione di essere effettivamente a bordo del velivolo, facendo provare all'utente le accelerazioni derivate dal moto apparente dell'aeromobile. Infine, un altro esempio è il sistema di realtà virtuale chiamato *CAVE* (*Cave automatic virtual environments*) in cui l'utente si trova in una stanza dove tutte le pareti, compreso il pavimento, sono degli schermi che proiettano immagini. Tali immagini vengono percepite come tridimensionali dall'utente, il quale indossa degli occhiali 3D.



Figura 1.4: Simulatore di volo del velivolo A320

Un'altra possibile classificazione dei sistemi di realtà virtuale è proposta nella pubblicazione “*Overview of virtual reality technologies*”, in cui vengono definiti tre sistemi: *non immersive*, *semi immersive* e *fully immersive* [1.2].

- *Non immersive systems* includono i semplici desktop, non sono molto sofisticati e non richiedono performance elevate, nella precedente tassonomia coincidono con i sistemi *basic*;
- *Fully immersive systems* sono i più sofisticati e con grafiche di alta qualità, forniscono all'utente un'esperienza il più vicino possibile alla realtà eliminando tutti gli stimoli non correlati con l'ambiente virtuale creato;
- *Semi immersive systems* sono a metà fra i due sistemi appena descritti e utilizzano software performanti, campi visivi ampliati, *feedback* tattili e altre tecnologie di realtà virtuale per fornire un'esperienza il più possibile immersiva.

2 Cenni storici

Nel 1935 in un racconto fantascientifico dal titolo “Pygmalion's Spectacles” lo scrittore americano Stanley Weinbaum presenta un modello immaginario di un sistema *VR*. Nella storia il protagonista incontra un professore che ha inventato degli occhiali in grado di permettere a chi li indossa di vedere un film caratterizzato da odori, sapori ed esperienze tattili. L'utente ha anche la possibilità di interagire con i personaggi e con l'ambiente del film. Questo è uno dei primi esempi, anche se fittizio, dell'espressione di quello che è oggi il concetto di *virtual reality* [2.2].

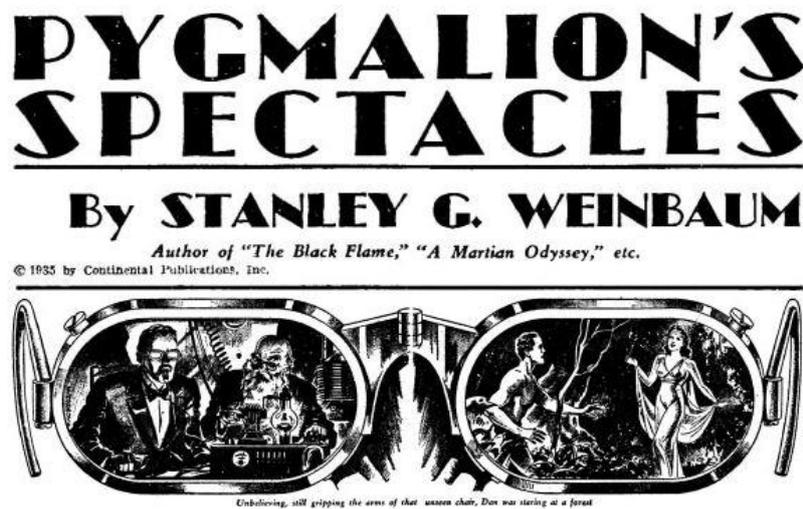


Figura 2.1: Copertina del racconto "Pygmalon's Spectacles", 1935

La prima definizione di realtà virtuale nell'accezione utilizzata al giorno d'oggi, ovvero di un ambiente grafico computerizzato col quale è possibile interagire, viene data da Ivan Sutherland nel 1965: “Fa in modo che quel mondo (virtuale) sulla finestra appaia reale, suoni reale, sia percepito come reale e che risponda realisticamente alle azioni di chi la osserva” [1.6]. Nonostante sia passato molto tempo da questa definizione di Sutherland, ancora oggi essa rispecchia ciò che si vuole ottenere da un sistema di realtà virtuale.

Nel prossimo paragrafo sono elencati i vari passaggi storici che hanno portato alle tecnologie di *virtual reality* usate al giorno d'oggi [1.7]:

- *Sensorama*, 1962: progettato da Morton Helig negli anni Cinquanta, con un prototipo meccanico disponibile nel 1962, è uno dei primi esempi di realtà virtuale e consiste in uno schermo sul quale viene proiettata un video di una corsa in moto attraverso le strade di Brooklyn. Utilizza immagini tridimensionali, sistemi audio, stimoli tattili e olfattivi, vento e vibrazioni per permettere un'esperienza immersiva all'utente. Tale progetto però non comprendeva la possibilità di interagire con l'ambiente virtuale.



Figura 2.2: Sensorama 1962

- *The ultimate display*, 1965: proposta fatta da Ivan Sutherland di un mondo artificiale che comprende grafiche interattive, *feedback*, suoni, odori e anche sapori.
- *The sword of Damocles*, 1968: creata da Ivan Sutherland è uno dei più famosi *Head-mounted Display (HMD)* ed era in grado di tracciare la posizione della testa e degli occhi dell'utente in modo tale da aggiornare l'immagine stereoscopica in accordo con la posizione ed i movimenti dell'utilizzatore. Tale sistema doveva essere fissato al

soffitto, come è possibile vedere nella figura 2.3, essendo molto ingombrante.

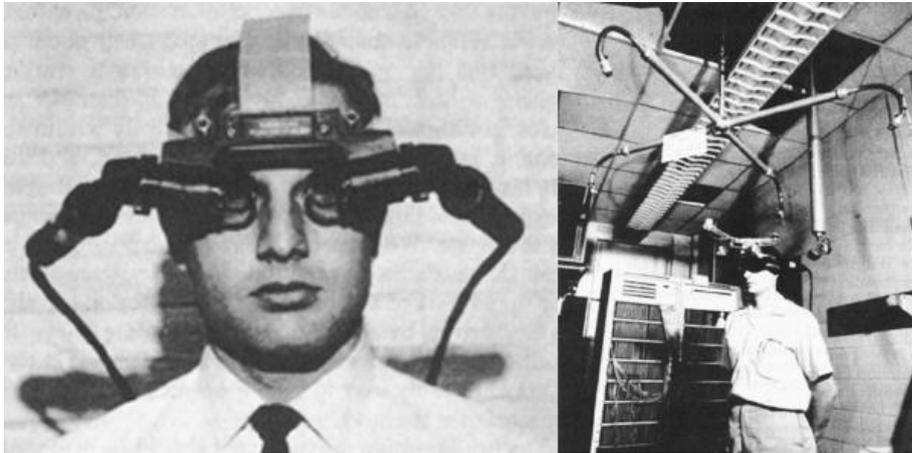


Figura 2.3: Ivan Sutherland e la “Sword of Damocles” 1968

- *GROPE*, 1971: primo prototipo di sistema con *feedback* delle forze, realizzato dall’Università del Nord Carolina (UNC).
- *VIDEOPPLACE*, 1975: creato da Myron Krueger è un ambiente di realtà artificiale in cui la silhouette dell’utente viene proiettata su uno schermo, grazie a delle videocamere. I partecipanti sono dunque in grado di interagire fra di loro grazie a questa tecnica di processamento delle immagini che determina la loro posizione sullo schermo 2D.
- *Sayre Glove*, 1977: è stato il primo *wired glove*, dispositivo tipico fra i sistemi di realtà virtuale che, indossato come un guanto, permette all’utente di interagire con l’ambiente virtuale. Creato da Tom DeFanti e Daniel J. Sandin, questo primo *wired glove* basava il suo funzionamento su fibre ottiche.
- *VCASS*, 1982: ideato da Thomas Furness è l’acronimo di *Visually Coupled Airbone Systems Simulator*. Si parla dunque di un sofisticato simulatore di volo in cui il pilota indossa un *HMD*, *Head-mounted display*, che arricchisce la realtà con delle grafiche che raffigurano gli obiettivi di missione o le traiettorie ottimali da seguire.

- *DataGlove* (1985) e *EyePhone* (1987): sono i primi dispositivi di realtà virtuale disponibili sul commercio prodotti dall'azienda VPL.

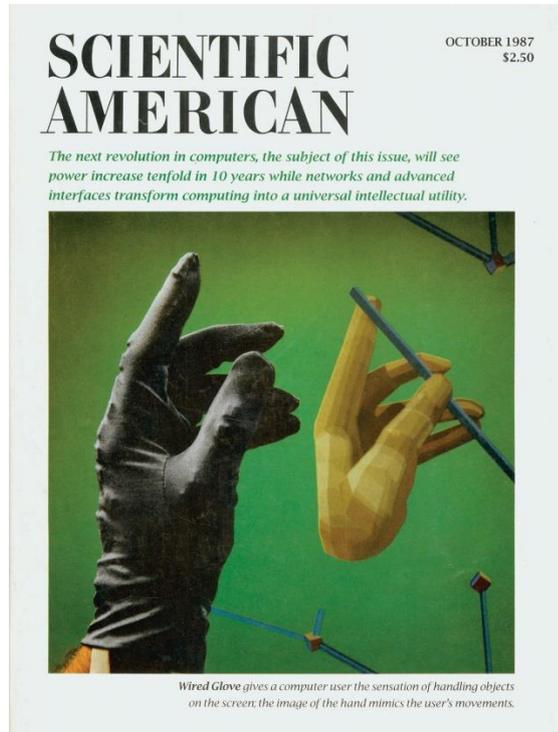


Figura 2.4: Copertina del Scientific American del 1987 raffigurante il DataGlove della VPL

- *VIEV*, 1989: Scott Foster riceve un contratto dalla NASA per progettare il *Virtual Environment Workstation Project*, un simulatore VR per il training degli astronauti.



Figura 2.5: The Virtual Environment Workstation Project, 1989

- *BOOM*, 1989: si tratta di una piccola scatola contenente due monitor a tubi catodici che possono essere osservati dall'utente. Egli può muoversi nell'ambiente virtuale grazie al braccio meccanico che misura la posizione e l'orientamento della scatola. Progettato dalla *Fake space Labs* ed è l'acronimo di *Binocular Omni-Orientation Monitor*.
- *Virtual Wind Tunnel*, 1990: progettato dalla NASA, permette di osservare e studiare i campi di flusso utilizzando tecnologie di realtà virtuale quali il *BOOM* e il *DataGlove*.
- *Computer Simulated Teleoperation*, 1991: uno scienziato della NASA, Antonio Medina, progetta un sistema *VR* per pilotare un rover su Marte dalla Terra, in ipotetiche condizioni di real-time nonostante il ritardo nella trasmissione dei segnali fra i due pianeti.
- *CAVE*, 1992: inventata da un gruppo di ricercatori dell'Università dell'Illinois. Si tratta di un sistema di visualizzazione *VR* che, invece di utilizzare un *head-mounted display (HMD)*, proietta le immagini stereoscopiche su delle pareti con l'utilizzatore che indossa degli occhiali 3D. Questo approccio garantisce una migliore qualità delle immagini e un più ampio campo visivo rispetto agli *HMD*.



Figura 2.6: CAVE, Utente immerso nell'ambiente virtuale

- *Realtà aumentata*, inizi anni '90: una tecnologia che, prendendo la definizione data nel trattato *Knowledge-based augmented reality*, “presenta un mondo virtuale che arricchisce, invece di rimpiazzare il mondo reale” [1.8]. Questo è ottenuto attraverso un *HMD* che sovrappone degli oggetti tridimensionali virtuali agli oggetti reali. Questa tecnologia è stata precedentemente usata per arricchire la visuale dei piloti con informazioni di volo aggiuntive (*VCASS*).
- *Virtual Boy*, 1995: si tratta della prima console portatile che proiettava grafiche tridimensionali. Lanciata dalla Nintendo trasmetteva immagini 3D monocromatiche, fu però un fallimento commerciale a causa della mancanza di software di supporto e ad un uso poco confortevole.
- *Virtual Vietnam*, 1997: i ricercatori della *Georgia Tech* e della *Emory University* usarono un sistema *VR* per ricreare lo scenario di guerra del Vietnam al fine di aiutare i veterani che soffrivano di *PTSD* (*Post-traumatic stress disorder*), ovvero di disturbi post-traumatici da stress.
- *Google street view*, 2007: si tratta di una funzionalità di *Google Maps* che permette agli utenti di navigare attraverso una visuale panoramica a livello stradale di 360 gradi orizzontalmente e 290 gradi verticalmente su varie città del mondo, quindi permettendo di immergersi nell'ambiente urbano [2.3]. Dal 2015, mediante il supporto per smartphone *Google Cardboard* è possibile la visualizzazione delle mappe in realtà virtuale, tale supporto è caratterizzato dall'essere a basso costo e facilmente costruibile [2.4].
- *Oculus Rift*, 2010: ideato da Palmer Luckey, un imprenditore diciottenne, consiste nel primo prototipo in grado di consentire un campo visivo di 90 gradi. Dalla combinazione delle immagini stereoscopiche 3D e un largo campo visivo permette di vivere un'esperienza che, inerendosi a ciò che riguarda il cervello, “non è

dissimile dalla vita reale” [2.5]. L’acquisto della compagnia *Oculus VR* da parte di Facebook è stato un momento importante per la storia della realtà virtuale, settore che, dopo tale evento, acquistò slancio negli anni a venire.



Figura 2.7: Oculus Rift S 2019, ultimo modello della compagnia Oculus VR

- *HTC Vive e Controllers, 2015:* HTC e Valve rilasciano l’auricolare di realtà virtuale HTC Vive e i controllers. Tale piattaforma per realtà virtuale è caratterizzata dal sistema di tracciamento dei movimenti chiamato “*Lighthouse*”, in cui i sensori sull’*head-mounted display* e sui controller leggono la posizione di due stazioni fisse situate all’interno dell’area di gioco. Questo permette delle esperienze *VR* in cui l’utente non deve necessariamente restare nella stessa posizione stazionaria ma può muoversi liberamente nell’area di gioco [2.6].

Il settore della realtà virtuale è dunque fortemente in sviluppo con un conseguente aumento dei campi di utilizzo di queste tecnologie. Permettere un’esperienza di gioco immersiva, aiutare persone con disturbi psicologici e l’insegnamento di nuove competenze sono alcuni degli ambiti in cui si utilizzano al giorno d’oggi sistemi *VR*. Dunque, il mondo della realtà virtuale ha numerose applicazioni e, con la possibilità di essere utilizzato mediante dispositivi *smartphone*, diventerà sempre più accessibile.

3 Stato dell'arte degli *hardware VR*

Come si può comprendere dal capitolo precedente, i dispositivi *VR* hanno avuto uno sviluppo continuo nel corso degli anni e lo stato dell'arte al giorno d'oggi è fortemente legato a quelle che erano le tecnologie disponibili negli anni passati. Lo sviluppo tecnologico, portato avanti dalle principali aziende nel settore, ha permesso la nascita di hardware sempre più performanti e la possibilità di offrire agli utenti esperienze in realtà virtuale sempre più immersive e realistiche.

In questo capitolo si andrà a proporre un approfondimento su quelle che sono le tecnologie *VR* disponibili al giorno d'oggi classificando, dunque, i dispositivi hardware disponibili. Nel mercato attuale in ambito *VR* si sta provando a proporre dei dispositivi mirati alle necessità dell'utilizzatore finale. Tali necessità, per motivi economici e spaziali, non rendono accessibile il mercato di dispositivi che prevedono grandi installazioni come, per esempio, il sistema chiamato *CAVE*, precedentemente descritto. Per questa ragione, il capitolo si concentrerà su dispositivi che forniscono una stimolazione attiva dei sensi dell'utilizzatore e che sono più facilmente accessibili al grande pubblico.

È possibile separare i dispositivi hardware *VR* seguendo un approccio tradizionale che li distingue in dispositivi di input e output. Anche se, nella maggior parte dei casi, si andrà a descrivere dei dispositivi ibridi come, per esempio, gli *head-mounted display* che forniscono come output la raffigurazione dell'ambiente *VR* e che ricevono anche dei dati di input utilizzando la loro funzionalità di tracciamento [1.9].

Per quanto riguarda i dispositivi output, è opportuno sottolineare che tali apparecchi possono coinvolgere e stimolare più campi sensoriali dell'essere umano fra i quali, oltre alla vista, udito, tatto e olfatto. Tuttavia, a causa dell'elevato costo economico degli apparati multisensoriali, la maggior parte

degli *headset* è costituita da un *HMD* che incorpora un display e dispositivi sonori per fornire degli stimoli audio all'utente.

Tali *visual display* possono essere di tipo *mobile* e *wired*. Fra i *mobile*, è possibile citare i dispositivi definiti come "*simple casing*", ovvero apparecchi che basano il loro funzionamento su uno smartphone e proiettano filmati o panorami a 360° in cui l'utente può immergersi avendo un punto di vista fisso o, in alternativa, con la possibilità di effettuare delle passeggiate interattive nell'ambiente *VR*. Un esempio di tali tecnologie è il *Google Cardboard*, descritto nel capitolo precedente di questo elaborato, che utilizza uno smartphone per permettere all'utente di immergersi negli scenari urbani di *Google street view*.

Gli *HMD* di tipo *wired* sono, come già accennato in precedenza, i dispositivi sul quale il mondo della realtà virtuale si sta attualmente concentrando maggiormente. Le caratteristiche di questi display dipendono da fattori di qualità quali la risoluzione, il *field of view* (FOV), ovvero l'ampiezza del campo visivo, e altri parametri che verranno approfonditi in seguito.

Generalmente gli *HMD* sono supportati da un sistema di tracciamento a sei gradi di libertà e sono connessi ad un potente computer. Per descrivere meglio questo tipo di apparecchi è opportuno utilizzare come esempio l'attrezzatura utilizzata per questo lavoro di tesi, ovvero l'*HTC Vive Pro*. Tale sistema permette, grazie al tracciamento dei movimenti dell'utente, un'esperienza di realtà virtuale caratterizzata da una libertà di movimento per tutto l'ambiente di gioco e non limita l'utente a rimanere seduto come altri *HMD*. Verrà approfondito il tipo di funzionamento e gli accorgimenti tecnologici necessari al fine di garantire un'esperienza *VR* il più immersiva possibile. Tale sistema, che troviamo in figura 3.1, è composto, oltre che dal *HMD*, da due telecomandi e da due base stations, emettitori a luce infrarossa.



Figura 3.1: HTC Vive Pro, composto da head-mounted display, controller e base station per il tracciamento dei movimenti

Il visore, detto anche *headset*, è lo strumento che permette agli utilizzatori di immergersi nell'ambiente di realtà virtuale visualizzando l'ambiente *VR*. Le informazioni specifiche riguardo a tale visore sono riportate dal sito della VIVE [2.6]. Tale *headset* è composto da uno schermo Dual AMOLED 3.5" diagonale con una risoluzione di 1440 x 1600 pixel per occhio, che combinati portano ad una risoluzione di 2880 x 1600 pixel, con un *field-of-view* di 110 gradi. È dotato di due microfoni con funzionalità antirumore e delle cuffie ad alta impedenza che migliorano il grado di immersione percepito dall'utente andando a riprodurre un audio tridimensionale. Il visore viene connesso al computer mediante una connessione USB e alla scheda grafica mediante HDMI.

Inoltre, tale *headset* è dotato di sensori per il tracciamento dei movimenti dell'utilizzatore con lo scopo di permettergli un movimento coerente nello spazio dedicato all'esperienza. Tali sensori sono uno *SteamVR tracking*, un *G-sensor*, un giroscopio, un sensore di prossimità e un *IPD*, e permettono un tracciamento con sei gradi di libertà dei movimenti, ovvero, permettono di visualizzare le traslazioni e le rotazioni in un sistema di riferimento locale, garantendo la giusta orientazione della visuale nell'ambiente virtuale.



Figura 3.2: Headset HTC Vive Pro

Tuttavia, a causa di un errore crescente nella determinazione della posizione dovuto alle caratteristiche intrinseche del giroscopio, è necessario un sistema di riferimento fisso esterno grazie al quale l'*headset*, mediante l'uso di sensori che svolgono tale funzione, può azzerare l'errore in questione. Tale sistema di riferimento esterno è costituito dalle *basestation*.



Figura 3.3: Basestation del sistema HTC Vive Pro

Come già affermato in precedenza, tali *basestation* permettono il tracciamento dei movimenti del visore e dei controller garantendo la possibilità all'utilizzatore del sistema *VR* di camminare liberamente nell'area di gioco, ricoprendo un'area di 5 x 5 metri per ogni *basestation*, arrivando dunque ad un'area di gioco totale massima di 10 x 10 metri. Si osservi che la distanza fra le due *basestation* per garantire il loro corretto funzionamento deve essere di almeno 5 metri, in caso contrario non sarà più possibile tracciare il visore ed i controller.

L'interfaccia fra utilizzatore ed ambiente *VR* è data dai due controller che consentono di effettuare azioni come afferrare un oggetto, selezionare e attivare un pulsante, ma anche di teletrasportarsi da un punto all'altro dell'ambiente. I controller sono dei dispositivi wireless ricaricabili dotati di 24 sensori per il loro tracciamento, un *trackpad* multifunzionale che è utilizzato per la funzione di teletrasporto nell'ambiente virtuale, due pulsanti per effettuare delle azioni nel menù di *SteamVR*, di un *trigger* posteriore che serve per premere pulsanti ed afferrare gli oggetti, dunque, per interagire con l'ambiente virtuale ed, infine, di due pulsanti laterali che consentono, all'evenienza, di svolgere specifiche azioni.



Figura 3.4: Controller del sistema *HTC Vive Pro*

Nella figura 3.5 viene proposto uno schema esplicativo di quello che è il funzionamento del sistema *HTC Vive Pro*. Si osservi come le due *basestation* ricoprono l'intera area di gioco grazie al loro angolo di copertura di 120 gradi. Inoltre, è opportuno notare che l'area di gioco minima va dai 1.5 ai 2 metri, che il campo visivo delle *basestation* non deve essere coperto da nessun oggetto e che è preferibile coprire le finestre ed altre fonti di luce solare diretta. Se non dovesse essere possibile ricreare un ambiente con queste caratteristiche, l'utilizzatore potrà comunque sfruttare la modalità "*Standing only*" utilizzando il *trackpad* per muoversi nell'ambiente virtuale, limitando, però, la sua libertà di movimento[2.7].

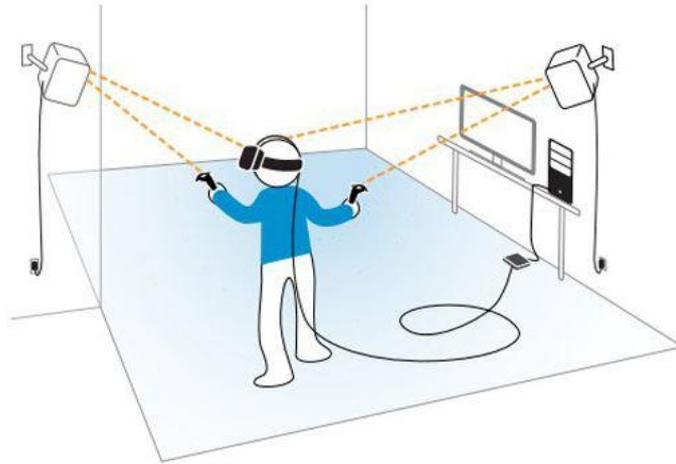


Figura 3.5: Schema funzionamento sistema HTC Vive Pro

L'esempio apportato dell'*HTC Vive Pro* svolge bene il suo compito di riassumere quello che è lo stato dell'arte per i sistemi di realtà virtuale basati su un *head-mounted display*. Infatti, la concorrenza a tale sistema basa i suoi prodotti su tecnologie e funzionamenti simili. Esempi di dispositivi concorrenziali sono l'*Oculus Rift S*, il *Pimax 8K*, l'*HP Reverb G2* e il *Varjo XR-3*.

Come detto in precedenza, esistono altri sistemi *VR* che cercano di ricreare un'esperienza ancora più immersiva coinvolgendo anche altri sensi dell'essere umano, principalmente il tatto. Si parla, dunque, di sistemi tattili che esistono sotto forma di vesti, tute contenenti degli elementi vibrazionali e tattili. Tali dispositivi possono essere indossati e rappresentano un sottosistema a sé stante nell'ambito di una classificazione della tecnologia *VR*.

Un esempio che ben rappresenta tali tecnologie è la *TeslaSuit* [2.8]. Questo sistema è una tuta tattile *full body* ed è una soluzione per l'addestramento attraverso *VR*. Tale dispositivo fornisce all'utente dei *feedback* tattili che permettono di percepire sul proprio corpo eventi che accadono nell'ambiente virtuale come se fossero reali, riproducendo delle sensazioni fisiche nella maniera più fedele possibile. Inoltre, tale tuta permette il tracciamento dei movimenti dell'utente ed è dotato di un sistema biometrico in grado di raccogliere dati sullo stato di salute, lo stato emozionale ed il livello di stress

dell'utente, in modo da stimare l'efficacia del training e valutare la capacità dell'utente di performare sotto condizioni di pressione. Il funzionamento di tale dispositivo si basa su degli stimoli elettrici che agiscono a livello muscolare fornendo all'utente, per esempio, la sensazione di toccare realmente oggetti virtuali.

Un altro dispositivo che fa parte dei sistemi *VR* tattili sono i controller che forniscono dei *feedback* tattili. Uno fra questi è il prodotto dell'azienda *Tactical Haptics* chiamato *Reactive Grip*, si tratta di una via di mezzo fra un display tattile e un normale controller come quelli dell'*HTC Vive Pro*.

Questo dispositivo trasmette informazioni riguardo movimenti e forze attraverso *feedback* tattili trasmessi all'utente. Il sistema si basa su piatti scorrevoli situati nell'impugnatura del controller che simulano le forze di frizione e di taglio che l'utente proverebbe se toccasse un oggetto reale, quando, invece, sta interagendo con un oggetto virtuale. Grazie a questa caratteristica di ricreare la sensazione di afferrare un oggetto, questo tipo di dispositivo consente un'esperienza *VR* sempre più prossima alla realtà [2.9].



Figura 3.6: Reactive Grip

Ulteriori sistemi *VR* che è necessario citare in questo stato dell'arte sono i cosiddetti *Navigation Devices* che sono utilizzati per dare all'utente l'illusione del movimento attraverso lo spazio senza fine dell'ambiente virtuale e consentono all'utente stesso di essere un "dispositivo" che fornisce dati di *input* funzionali. Il loro funzionamento è basato su quello di un classico tapis-roulant con la differenza che gli attuali strumenti di supporto *VR* consentono un movimento in un piano bidimensionale, si parla dunque di un tapis-roulant omnidirezionale, *omnidirectional treadmill (ODT)*.

Uno di questi dispositivi attualmente in commercio è l'*Infinadeck ODT*, il quale consente all'utente di camminare liberamente in ogni direzione consentendo una sempre maggiore immersione nella realtà virtuale [2.10]. Il funzionamento di tale dispositivo è molto complesso e non è una tematica trattabile in questo elaborato, ma teoricamente si basa sul concetto di reagire all'azione dell'utente intento a camminare con un movimento uguale e opposto, in modo tale che l'utilizzatore resti fermo. Il movimento dell'utente è rilevato mediante l'utilizzo di due controller, simili a quelli dell'*HTC Vive Pro*, ma applicati ai piedi dell'utilizzatore, uniti al sistema di tracciamento basato sulle *basestation*.



Figura 3.7: Infinadeck tapis-roulant e controller

3.1 Stato dell'arte: sfide tecnologiche

Le sfide tecnologiche che sono state affrontate per rendere possibile la realizzazione di dispositivi *VR* sono molte e, ancora oggi, si cerca di ottimizzare le soluzioni trovate o si va alla ricerca di nuove tecnologie per rendere ancora più immersiva e realistica l'esperienza. In particolare, in questo elaborato verranno affrontati i problemi di qualità della visualizzazione delle immagini. Inoltre, per il problema della visualizzazione, saranno fornite le specifiche tecniche dei dispositivi *VR* attualmente presenti sul commercio, specifiche che hanno permesso di superare alcuni limiti tecnologici rendendo gli ambienti virtuali sempre più realistici.

Un articolo della rivista "*Wired*", dal titolo "*The Inside Story of Oculus Rift and How Virtual Reality Became Reality*" [2.5], raccontando le fasi iniziali della progettazione del sistema *Oculus Rift*, afferma che uno dei principali problemi che hanno dovuto affrontare tutti i pionieri nel settore *VR* è quello di ridurre la cosiddetta "*cybersickness*", ovvero un senso di nausea che si ha se il dispositivo *VR* ha troppa latenza o una scarsa qualità delle immagini. Dunque, le tecnologie di realtà virtuale devono essere il più possibile prive di ritardi e difetti grafici, tendere alla perfezione in questo. Infatti, se in un videogioco tradizionale un'eccessiva latenza può essere fastidiosa, con la realtà virtuale diventa nauseante e compromette l'esperienza.

3.1.1 Fattore umano

Come affermato da Heilig nel suo "*The cinema of the Future*" [1.10], siccome la realtà virtuale ha come compito quello di simulare il mondo reale, bisogna avere conoscenza di come "ingannare i sensi dell'utente". Questo problema non è di facile risoluzione, perché da un lato bisogna dare all'utilizzatore una buona sensazione di immersione nell'ambiente *VR* e dall'altro bisogna rendere fattibile tale soluzione, considerando limiti tecnologici ed economici.

Dunque, diventa necessario capire quali sono gli stimoli più importanti per un essere umano e la qualità che questi stimoli devono avere per “ingannare” l’utente. Dei cinque sensi dell’essere umano il più significativo è la vista che fornisce la maggior parte delle informazioni al nostro cervello e cattura gran parte della nostra attenzione. Infatti, come precedentemente affermato, la stimolazione della vista gioca un ruolo principale nelle tecnologie *VR* dei nostri giorni.

Successivamente, il secondo senso che più coinvolge l’essere umano è quello dell’udito che viene quasi sempre coinvolto nei sistemi di realtà virtuale.

Il tatto non gioca un ruolo fondamentale, se non per specifiche attività manuali, dove, invece, diventa essenziale. Olfatto e gusto non sono presi in considerazione nella maggior parte dei dispositivi *VR*, in quanto hanno un ruolo marginale ed è difficile implementare tecnologie che vadano a stimolare questi sensi [1.7].

Inoltre, un altro aspetto fondamentale, per permettere una buona immersione dell’utente nell’ambiente virtuale, è la sincronizzazione degli stimoli dati all’utente che è determinante per evitare quella *cybersickness* a cui si faceva prima riferimento.

3.1.2 Percezione visiva e specifiche tecniche

Come precedentemente affermato, le informazioni visive sono le più importanti per creare l’illusione dell’immersione in un mondo virtuale. Bisognerebbe essere in grado di ricreare dei *feedback* che eguagliano la visualizzazione dell’uomo dell’ambiente reale. Siccome questo non è possibile per lo stato dell’arte dei sistemi *VR* odierno, bisogna creare delle tecnologie che si avvicinino il più possibile a tale obiettivo ed andare incontro a dei compromessi che inevitabilmente influenzeranno la qualità dell’esperienza virtuale.

In seguito, si analizzeranno dei parametri caratterizzanti della vista e, quindi, dei sistemi di visualizzazione *VR* [1.7]:

- *Field of view (FOV)*, ovvero l'ampiezza della porzione del mondo osservabile in un dato momento. Gli occhi umani hanno un campo visivo, sia orizzontale che verticale, di circa 150 gradi. Tipicamente gli *HMD* supportano un *FOV* che va dai 40-60 gradi, fino ad arrivare a display con un ampio campo visivo fino a 140 gradi.
- *Acume visivo*, definito come la nitidezza della vista ed è misurata come la frazione di un pixel che attraversa un minuto di arco orizzontalmente. In altre parole, ad un acume visivo migliore corrisponde una capacità dell'occhio di distinguere con chiarezza porzioni dell'arco visivo sempre minori. Tale parametro varia a seconda dell'angolo che separa la posizione dell'oggetto dalla linea di vista, ovvero la linea centrale del campo visivo. L'area di maggior acume ricopre, quindi, la zona centrale del campo visivo, ovvero, spazza un angolo di circa due gradi ai lati della linea di vista. In tale zona, l'occhio umano può distinguere ad una separazione di un minuto di arco.

Anche il miglior display si allontana da tale qualità, se prendiamo un monitor con una risoluzione di 1280 x 1024 pixel supporta una risoluzione di 2.8 minuti di arco. Tipicamente gli *head-mounted display* offrono un acume visivo peggiore, con una risoluzione che va dai 4 ai 6 minuti di arco.

- *Refresh rate*, tale parametro è caratterizzante per un display che aggiorna le sue immagini con impulsi ripetuti nel tempo e indica la frequenza alla quale tali impulsi vengono mandati. Se questo parametro fosse troppo basso, specialmente per display molto luminosi, comporterebbe il fenomeno della percezione del "*flickering*" per l'occhio umano, ovvero, la percezione di un'immagine tremolante e ad intermittenza. Per eliminare tale fenomeno è necessario un *refresh rate* superiore ad un valore critico che, per schermi piccoli e poco luminosi, è di 15 Hz e per schermi grandi e luminosi arriva fino a 50 Hz. Le tecnologie odierne

soddisfano tale requisito e gli *HMD* dello stato dell'arte attuale hanno *refresh rate* che vanno dagli 80 Hz ai 110 Hz.

- *PPI (pixels per inch)*: è una misura della densità di pixel di un'immagine proiettata da un dispositivo elettronico, nel nostro caso un display. Si osservi che la densità di pixel non ha lo stesso significato della risoluzione, rappresenta il numero di dettagli su una superficie fisica del display, mentre la risoluzione indica il numero di pixel indipendentemente dalla loro dimensione. In altre parole, un pixel non ha dimensioni, è un'unità dell'immagine, ma quando l'immagine viene stampata o proiettata su un display il pixel acquisisce delle dimensioni fisiche e si può, dunque, parlare di densità di pixel, ovvero di *PPI*. Gli *HMD* attualmente in commercio spaziano da valori di densità di pixel che vanno all'incirca dai 600 PPI ai 1000 PPI.

La seguente tabella riporta le specifiche tecniche di quattro dei principali *HMD* disponibili allo stato dell'arte odierno, riassumendo le loro caratteristiche in base alle proprietà appena descritte [2.6_11_12_13_14]. Si osservi come i valori riportati rientrano nelle specifiche richieste per garantire un'esperienza virtuale che, a livello visivo, risulta immersiva e di buona qualità. Questo è dovuto al forte interesse rivolto ai sistemi *VR* negli ultimi anni che ha portato ad un forte sviluppo tecnologico.

	Display	FOV (°)	Risoluzione (pixels)	Refresh Rate (Hz)	PPI (pixels per inch)
HTC Vive Pro	Dual AMOLED 3.5" diagonal	110	2880 x 1600	90	615
Oculus Rift S	LCD	115	2560 x 1440	80	600
Pimax 8K	CLPL	200	7680 x 2160	90-110	534
HP Reverb G2	LCD	114	4320 x 2160	90	1056
Varjo XR-3	Full Frame Bionic Display with human-eye resolution	115	3840 x 3840	90	1700

Tabella 3.1: Specifiche tecniche stato dell'arte *HMD*

3.1.3 Latenza e display a bassa persistenza

Il successo delle applicazioni nell'ambito della realtà virtuale non dipende solamente dalla qualità delle immagini ma anche dalla naturalezza della simulazione virtuale. Un'esperienza *VR* deve dunque essere rapida, fluente e sincronizzare le sue risposte agli stimoli dati dall'utilizzatore. Un'eccessiva latenza non può essere accettata perché andrebbe ad intaccare il grado di immersione percepito dall'utilizzatore nell'ambiente *VR* e potrebbe portare alla *cybersickness*, e dunque ad un senso di nausea e disorientamento. La causa di tale malessere è riscontrabile nella differenza fra ciò che l'utilizzatore osserva nel movimento e le informazioni che sono mandate al cervello dal sistema vestibolare.

La principale causa della latenza è dovuta al *rendering*, ovvero il processo di generazione di un'immagine a partire da una descrizione matematica di una scena virtuale [2.15]. Quindi, la *frame update rate*, velocità nel generare e aggiornare un'immagine, ha un forte impatto sull'efficienza dell'esperienza *VR* e sul garantire un buon livello di immersione all'utilizzatore. La valutazione della *frame update rate*, necessaria per avere una buona performance del sistema *VR*, è dipendente dal tipo di sistema in questione. Una bassa latenza, dell'ordine dei 100 ms, non va ad inficiare il funzionamento di un simulatore di volo e, dunque, una *frame update rates* di 15 Hz può essere sufficiente per garantire un buon senso di presenza nell'ambiente virtuale. Invece, sono necessari valori più elevati, intorno ai 60 Hz, quando nell'ambiente *VR* ci sono movimenti veloci o è richiesta una maggiore qualità nel *rendering* delle immagini come, per esempio, nel caso dei sistemi di realtà aumentata.

Inoltre, tale *frame update rate* deve essere costante perché, se così non fosse, l'aggiornamento delle immagini non avverrebbe nell'istante di tempo atteso dall'utente e questo andrebbe a disorientarne i sensi, fino a condurre alla *cybersickness*.

Per concludere tale paragrafo, si riporta una delle scoperte in ambito tecnologico che ha avuto un forte impatto sullo sviluppo dei sistemi *VR* e sulla

risoluzione del problema della *cybersickness*, ovvero, i display a bassa persistenza [1.9]. Sviluppati dalla *Valve corporation* nel 2013, tali display rendono possibile una visualizzazione priva di ritardi e senza sbavature. Infatti, uno dei problemi che si sono dovuti affrontare nella progettazione degli *HMD* è quello della sbavatura dei pixel che compongono le immagini durante una rotazione o un movimento dell'utilizzatore, che genera delle figure sfocate e poco chiare. Tale difetto era dovuto alla tecnologia dei display LCD (*liquid-crystal display*), ad alta persistenza.

Questo problema è stato superato utilizzando i display a bassa persistenza che incorporano la tecnologia OLED. In questo caso, dei brevi tempi di esposizione producono un'immagine lampeggiante, che può comunque disturbare l'utente ma conduce ad un effettivo miglioramento rispetto alle immagini sfocate dei display precedenti. È possibile osservare tale differenza nella figura 3.8, in cui si mettono a confronto un'immagine presa da un display ad alta persistenza e la stessa su un display a bassa persistenza. Tali immagini sono generate con due prototipi del sistema *VR Oculus Rift*, uno con display LCD e l'altro con tecnologia OLED, entrambe catturate con l'utilizzatore in movimento.



Figura 3.8: A sinistra immagine su display ad alta persistenza, a destra stessa immagine su display a bassa persistenza, generati con simulatori *Oculus*

Si osservi come l'immagine di sinistra risulti più nitida a confronto dell'immagine sfocata sulla destra. Gli *HMD* odierni utilizzano tutti questa tecnologia a bassa persistenza sui loro display.

3.2 Stato dell'arte del training basato su VR

Considerato il forte sviluppo tecnologico che si sta avendo nell'ambito della realtà virtuale e della diffusione che i sistemi VR stanno avendo, con conseguente riduzione dei costi di tali sistemi, in sempre più situazioni si sta pensando di adoperare la realtà virtuale come strumento per fini educativi e come training per svolgere determinate operazioni. Il training in ambiente VR può essere di grande successo per l'apprendimento di specifici compiti in cui un addestramento nel mondo reale risulta essere impraticabile [1.11].

Due delle ragioni per cui la realtà virtuale si presta bene per scopi di training o educativi sono che è immersivo e permette un'interazione fisica con il sistema di training maggiore rispetto ad un training classico su carta o su desktop. La qualità dell'immersione data da sistemi VR produce un senso di presenza all'interno dell'ambiente di training che può condurre a dei migliori risultati nell'apprendimento. Dunque, l'esperienza in realtà virtuale risulterebbe essere più significativa per chi si sottopone al training e dunque restare più impressa nella memoria. Riassumendo, il training VR offre una soluzione ideale per approcciarsi, studiare e ricordare delle nuove conoscenze per tutti quelli che preferiscono uno stile di apprendimento visuale, uditivo e cinestetico, ovvero basato sul movimento.

In seguito, verranno riportati alcuni esempi dell'utilizzo della realtà virtuale a fini educativi e di training:

- Nel 1997 è stato testato un sistema VR per il training di alcuni vigili del fuoco della provincia di Madison in Alabama. L'obiettivo di tale progetto era quello di confrontare tre metodi di addestramento dei vigili del fuoco per acquisire conoscenze riguardo la navigazione spaziale in un edificio non conosciuto. I tre metodi di training consistevano nel training tradizionale su carta, training VR e nessun training. I pompieri venivano addestrati per conoscere la planimetria dell'edificio e le rotte da seguire per una missione di salvataggio in caso di incendio. Alla fine dell'addestramento i pompieri dovevano

entrare nell'edificio del dipartimento scientifico dell'università dell'Alabama, salvare una bambola situata in una specifica posizione e poi raggiungere una delle uscite seguendo una rotta predeterminata. Il tempo impiegato per compiere tali operazioni e il numero di svolte errate sono stati i parametri utilizzati per effettuare il confronto fra i tipi di training.

Il sistema di realtà virtuale utilizzato per questo addestramento si basa su un modello virtuale dell'edificio in questione, in cui tutte le stanze e corridoi sono stati modellati per assicurare uno spazio complesso e adatto alla navigazione. Gli utenti indossavano un particolare *HMD* chiamato *I-glasses Personal Display System* e comandavano il loro movimento nell'ambiente virtuale tramite un controller. La direzione del movimento era data dalla direzione dello sguardo del partecipante. Nella figura 3.9 è possibile osservare il modello virtuale dell'edificio [1.12].

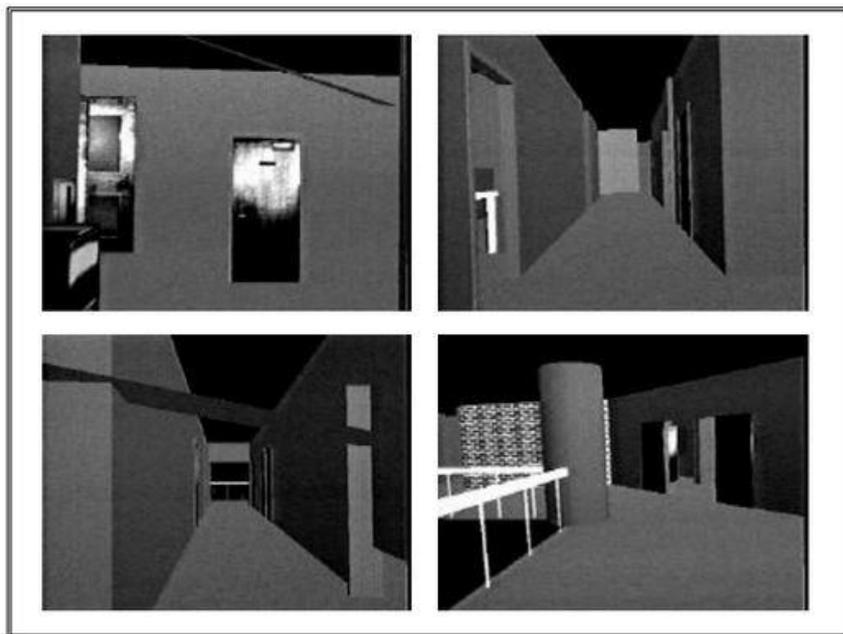


Figura 3.9: Modello virtuale dell'edificio del dipartimento scientifico dell'università dell'Alabama

- Nel 2014 viene effettuato uno studio sull'utilizzo di tecnologie *VR* ai fini dell'insegnamento in ambito medico, in particolare, chirurgico. Il dispositivo *VR* utilizzato è un *HMD* a cui viene aggiunto un supporto di puntamento basato su un sistema di tracciamento visivo della punta

dell'indice dell'utilizzatore. Alla visuale dell'utente attraverso le lenti dell'*HMD* viene, quindi, sovrapposto un marker che indica la posizione dell'indice. Tale sistema è utilizzato dall'operatore per mostrare i risultati di un'operazione di resezione transuretrale di un cancro alla vescica.

In questa applicazione, dunque, il sistema di realtà virtuale viene utilizzato per permettere una comunicazione interattiva fra l'utente e una classe di studenti di medicina, permettendo il preciso puntamento *real-time* dell'indice dell'insegnante, che può spiegare con accuratezza i dettagli dell'operazione [1.13].

- Alla luce dei rapidi sviluppi tecnologici e del crollo dei budget, l'aeronautica militare americana sta esplorando soluzioni innovative per il training con il progetto *Sailor 2025*. In questo scenario, la realtà virtuale offre un'alternativa a basso costo ai tradizionali metodi, permettendo agli utilizzatori di immergersi in ambienti 3D per allenare delle abilità critiche.

In un esperimento del 2017, viene fatto un confronto fra il training *VR* e il training classico su desktop di un computer per cercare di dimostrare l'efficacia della realtà virtuale nell'apprendimento di attività correlate all'ambito militare. I partecipanti sono stati testati nelle procedure manutentive dell'ingranaggio d'arresto E-28, un sistema che aggancia il velivolo per rallentarlo al suo atterraggio. Il confronto è stato fatto fra tre tipi di training, quello classico su desktop e due metodi di training *VR* basati su due diversi tipi di input, uno basato su input motori e l'altro su input vocali.

Analizzando gli errori commessi dai partecipanti si nota come il gruppo che ha affrontato un addestramento su desktop commette più errori sulle procedure, mentre il gruppo che ha svolto un training *VR* dimostra di avere compreso la procedura e commette errori legati all'esecuzione pratica delle attività richieste. Questo ed altri aspetti suggeriscono che il training *VR* può risultare più efficiente di quello classico e, dunque, che la realtà virtuale è un'opzione da tenere in considerazione per l'addestramento militare [1.11].

- Nel 2018 l'ESA, l'agenzia spaziale europea, ha effettuato uno studio sul potenziale dell'utilizzo di sistemi di realtà virtuale ai fini del training di astronauti per operazioni spaziali. In tale studio viene presentato la progettazione di uno scenario virtuale di una base lunare. In tale ambiente virtuale viene supportato il training degli astronauti per lavorare e vivere in una base lunare, uno dei possibili prossimi passi dell'esplorazione spaziale.

Nel training è simulato una situazione di emergenza dovuta ad un eventuale incendio in cui un astronauta deve seguire delle procedure standard per estinguerlo, procedure che sono applicate anche nella stazione spaziale internazionale per emergenze simili.

I *feedback* raccolti dagli utilizzatori di questo training *VR* sono risultati essere positivi. Il 94% degli utenti ha considerato l'esperienza completamente utile ed interessante ed il 75% ha affermato che tale soluzione possiede tutte le funzionalità e specifiche che si aspettavano di trovare [1.14].

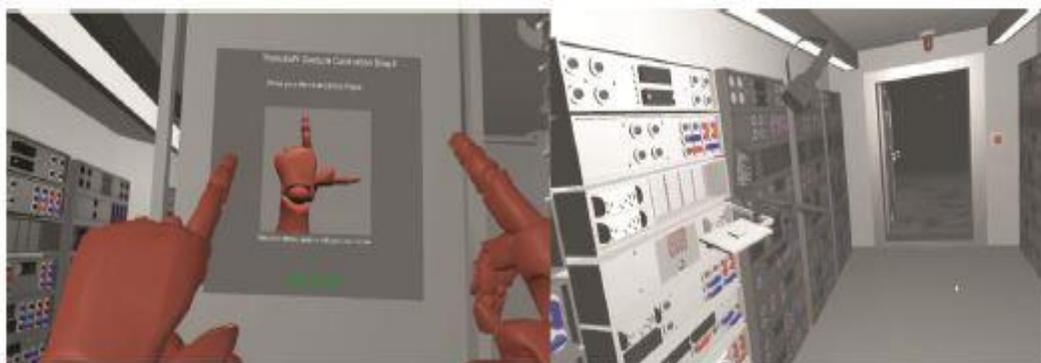


Figura 3.10: Punto di vista dell'utente immerso nella stazione lunare virtuale creata dall'ESA

Proprio il training basato sulla realtà virtuale sarà al centro della discussione di questo elaborato, in cui, nei successivi capitoli, verrà proposto un confronto fra un insegnamento classico su desktop di un computer e un training basato sulla realtà virtuale. Tale training è incentrato sull'apprendimento di una procedura operativa che i piloti svolgono a bordo del velivolo A-320 prima del decollo, la *before start procedure*.

4 Software e hardware utilizzati

Ai fini della realizzazione di questo elaborato di tesi sono stati utilizzati ampiamente dei software informatici per la realizzazione di un ambiente in realtà virtuale contenente la cabina di pilotaggio del velivolo A-320. Inoltre, tali software sono serviti per digitalizzare le procedure operative di volo e per permettere ad un utente di interagire con questa scena *VR*.

Per quanto riguarda gli hardware utilizzati si fa riferimento al capitolo 3 di questo elaborato dove è stato descritto il dispositivo *HTC Vive Pro* utilizzato per l'immersione e l'interazione dell'utente nello scenario virtuale.

4.1 Unity

Unity è un motore grafico multiplatforma sviluppato da *Unity Technologies* che consente lo sviluppo di videogiochi ed altri contenuti interattivi, quali visualizzazioni di scenari architettonici o animazioni tridimensionali in tempo reale. Per lo scopo dell'elaborato è stata utilizzata la versione *Unity 2019.2.13 f1 Personal*. Nella figura sottostante è possibile osservare nella zona centrale dell'interfaccia di *Unity* la scena del progetto, che raffigura tutto ciò che viene inserito e gestito dall'utente per creare l'esperienza di gioco voluta [2.16].

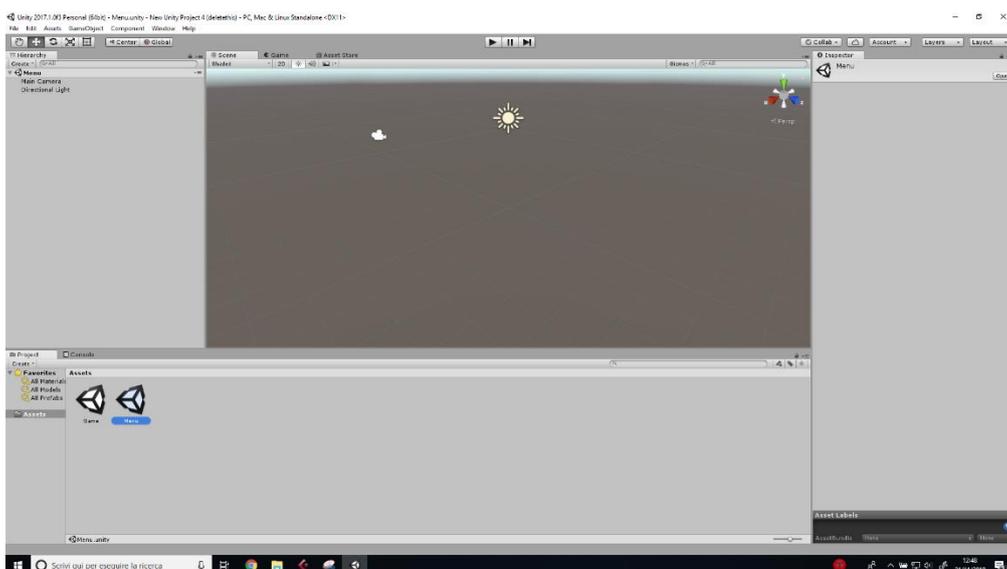


Figura 4.1: Interfaccia iniziale di Unity

Tale software dà la possibilità di creare giochi ed esperienze interattive sia in 2D che in 3D ed utilizza come principale linguaggio di programmazione C#. Utilizzando tale programma è possibile creare delle scene grafiche a partire da alcuni oggetti base predefiniti (cubi, sfere, cilindri, interfacce grafiche, ecc.) oppure di importare degli scenari generati su altre piattaforme per poi renderli interattivi mediante gli strumenti di *Unity*.

Per organizzare e gestire gli oggetti inseriti nella scena di *Unity* si utilizza una gerarchia, osservabile nella figura 4.2, in cui gli oggetti sono catalogati e collegati a seconda dell'interdipendenza fra gli stessi.



Figura 4.2: Gerarchia di *Unity* per la gestione degli oggetti della scena

Attraverso la gerarchia è possibile, quindi, organizzare le interdipendenze fra gli oggetti. Ovvero, decidere quale oggetto è dipendente da altri per quanto riguarda posizione, orientamento e altre caratteristiche che lo definiscono nella scena. Successivamente, sarà, quindi, possibile lavorare su un intero

gruppo di oggetti agendo unicamente sul più alto nella gerarchia, definito come padre.

Selezionando un oggetto dalla gerarchia questo sarà evidenziato nella scena progettata e verrà aperta anche una sezione attraverso la quale sarà possibile modificarne le caratteristiche, tale sezione è chiamata *Inspector*.

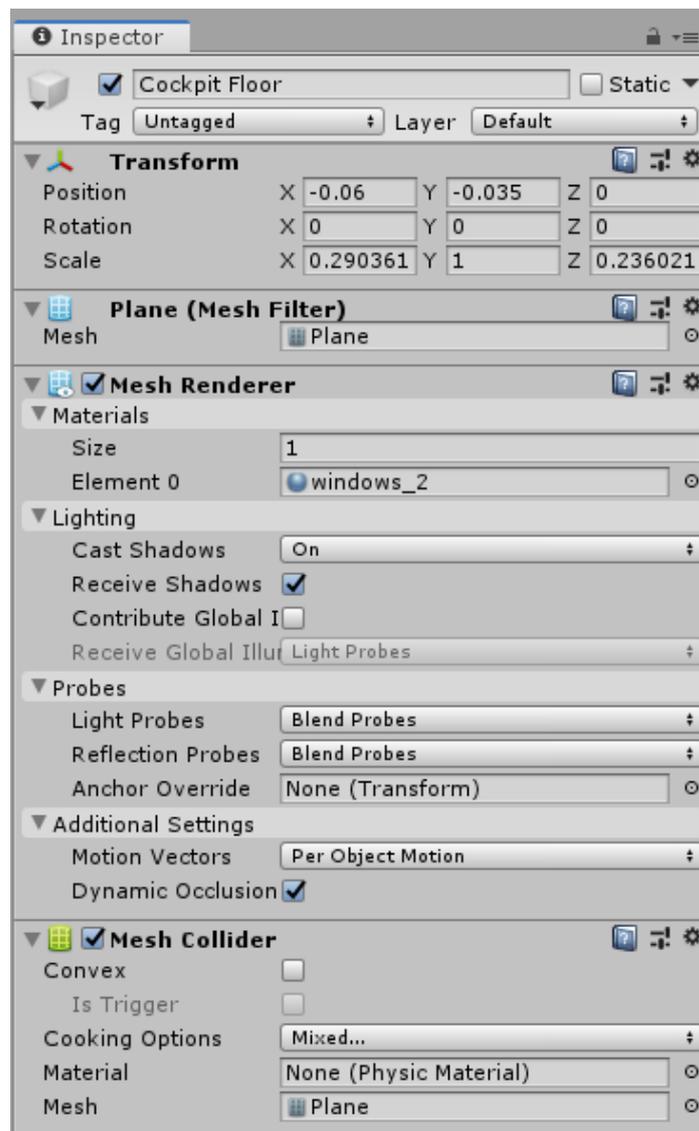


Figura 4.3: Esempio *Inspector* di un *GameObject* su *Unity*

Ogni oggetto su *Unity* è formato da una serie di componenti che definiscono tutte le caratteristiche e contengono tutte le informazioni dell'oggetto stesso. Un componente che appartiene a tutti gli oggetti di *Unity* è il *Transform* attraverso il quale è possibile definire la posizione nella scena, gli angoli di rotazione degli assi e le dimensioni dell'oggetto lungo ognuno dei suoi assi.

Tali impostazioni possono essere modificate agendo direttamente sull'*Inspector* oppure muovendo l'oggetto direttamente nella scena.

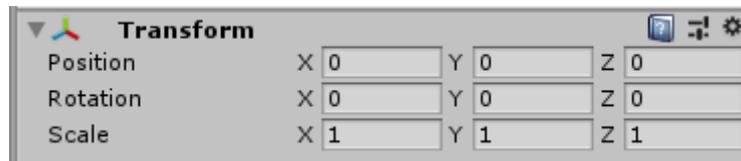


Figura 4.4: Esempio componente *Transform* di un *GameObject* su *Unity*

Altri componenti che possono essere assegnati ad un oggetto per definirne le caratteristiche sono, per esempio, *Rigidbody*, *Mesh Renderer*, *collider* e tanti altri che aggiungono sempre diverse qualità e funzionalità agli oggetti.

Con il componente *Rigidbody* si aggiungono le proprietà del comportamento fisico dell'oggetto, con *collider* si gestiscono le interazioni degli oggetti con altre superfici e *Mesh Renderer* viene utilizzato per cambiare e gestire i colori degli oggetti a cui è attribuito. Un altro componente utile che può essere attribuito ad un oggetto è uno script, un file di testo scritto in C#, che fornisce all'oggetto un comportamento personalizzato o la capacità di reagire quando si verificano determinate condizioni. Grazie a questo componente l'utente può interagire con gli oggetti e, quindi, con la scena generata su *Unity* utilizzando mouse e tastiera oppure, nell'ottica di questo elaborato di tesi, usufruendo degli hardware di realtà virtuale.

Un progetto su *Unity* si presenta sotto forma di un insieme di cartelle che è possibile gestire attraverso il software stesso, come è possibile osservare nella figura 4.5. Tali cartelle contengono tutte le informazioni e le proprietà che l'utente ha attribuito al suo progetto. Fra le cartelle è presente quella chiamata *Scenes*, che contiene tutte le scene disponibili. Il progettatore dello spazio di gioco può gestire questa sezione aggiungendo nuove cartelle a quelle presenti di default su *Unity*.

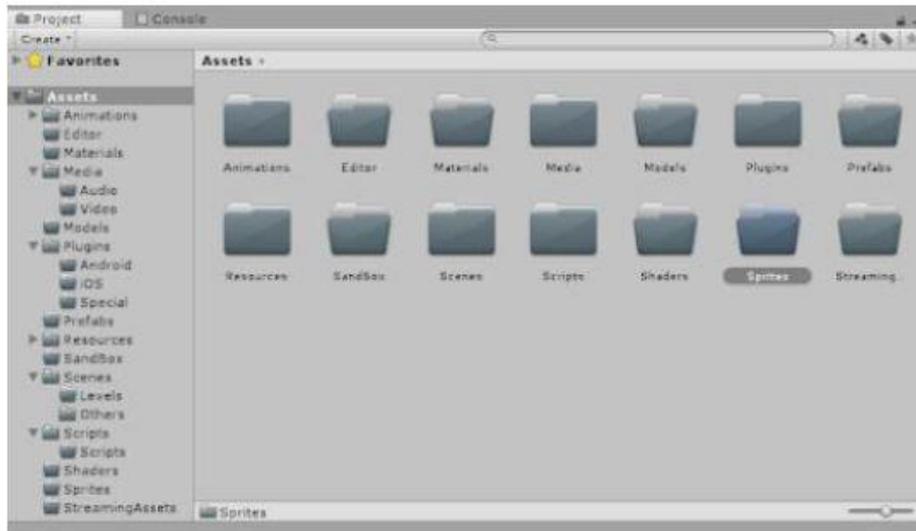


Figura 4.5: Interfaccia delle cartelle di un progetto su *Unity*

Una volta progettata la scena su *Unity*, è possibile entrare in modalità *Play*, attraverso la quale l'utente può interagire con gli oggetti presenti e testare il corretto funzionamento di quanto è stato progettato.

Come detto in precedenza, su *Unity* è possibile importare una scena grafica creata su un software più adatto alla sua realizzazione per poi gestire ed organizzare le interazioni fra la stessa e l'utente. Questa funzionalità è alla base dell'utilizzo che è stato fatto di *Unity* per questo elaborato. Infatti, è stato utilizzato un supporto, che verrà descritto in seguito, per rendere compatibili l'ambiente interattivo con la realtà virtuale, consentendo all'utente di interagire con la scena.

4.2 SteamVR

SteamVR è il software che permette l'utilizzo dell'hardware di realtà virtuale descritto nel terzo capitolo, garantendo un corretto funzionamento dell'esperienza in *VR*. Al momento dell'installazione di tale software è necessario posizionare le *basestation* all'interno dell'area di gioco, una di fronte all'altra ad una distanza massima di 5 metri. Successivamente, con i controller sarà possibile settare i confini della stanza in modo che siano visibili nell'ambiente virtuale consentendo all'utente di essere consapevole dello spazio che lo circonda, una volta che sarà immerso nell'esperienza *VR*.

Definita l'area di gioco e le impostazioni iniziali, sarà dunque possibile utilizzare SteamVR per riprodurre la scena creata su *Unity* in realtà virtuale in modo coerente. Ovvero, sarà garantito un corretto posizionamento reciproco degli oggetti della scena virtuale, dei controller e del visore, quindi dell'utente, rispetto all'ambiente [2.17].

Attraverso tale software sarà inoltre permesso all'utente di effettuare determinate operazioni, quali, per esempio, utilizzare il visore per osservare il monitor del computer a cui è collegato e agire direttamente sul PC stesso. Inoltre, sarà possibile modificare le impostazioni audio e video ed accedere ad alcuni contenuti di *Valve* come dei giochi in realtà virtuale, delle demo ed altre funzionalità offerte.

Infine, è opportuno evidenziare come SteamVR sia compatibile con molti degli hardware *VR* presenti sul mercato, quindi con i dispositivi *HTC Valve*, *Oculus Rift* e altri dei principali sistemi di realtà virtuale disponibili al giorno d'oggi.

4.3 Pacelab WEAVR

La piattaforma software di realtà estesa Pacelab WEAVR è un plug-in di *Unity* realizzato da una company tedesca di Txt e-Solution, PACE. Tale software fornisce una completa e robusta piattaforma di realtà estesa che permette di sviluppare e gestire dei training in realtà virtuale, consentendo l'interazione dell'utente con l'ambiente creato su *Unity* attraverso gli strumenti della realtà virtuale [2.18]. Tale software, infatti, è stato utilizzato in questo elaborato per realizzare ed integrare in *VR* le procedure operative per l'addestramento del personale di bordo.

Pacelab WEAVR si presenta come un pacchetto da aggiungere alle cartelle di progetto di *Unity*. Successivamente, sarà necessario attivare nelle *Player Settings* il supporto alla realtà virtuale ed impostare alcune funzionalità di *Unity* per garantire una corretta integrazione del plug-in.

Terminate tali operazioni iniziali, apparirà il *Game Object* WEAVR all'interno della scena su *Unity* e sarà attivo il pulsante WEAVR nella barra di menù. Da questo pulsante sarà possibile gestire ed attivare le estensioni di WEAVR da utilizzare per il progetto in questione. Per questo elaborato di tesi l'unica estensione che è stata utilizzata è quella chiamata *Virtual Reality*, attraverso la quale è possibile definire gli oggetti che permettono l'interazione fra l'hardware *VR* e l'ambiente su *Unity*, utilizzando come supporto SteamVR. È opportuno indicare che le informazioni utili per redigere questa sezione dell'elaborato di tesi sono prese da un manuale per l'utilizzo del supporto PaceLab WEAVR fornito dall'azienda *Txt e-Solution* [1.15].

Una volta che il progetto su *Unity* è stato propriamente impostato affinché supporti lo strumento di WEAVR, sarà possibile sviluppare il training in realtà virtuale. I passi da seguire sono quelli di creare una scena, creare delle procedure ed implementarle.

4.3.1 Creazione di una scena su WEAVR

La scena contiene l'ambiente, i menù e i *GameObjects* del progetto. I *GameObjects* incorporano tutti i componenti necessari affinché tali oggetti si comportino nella maniera voluta e con le giuste interazioni. Nella cartella d'installazione di WEAVR saranno presenti tutti gli script e i componenti necessari per l'interazione degli oggetti e per gestire il loro comportamento e le loro reazioni a determinati input.

Nella gerarchia di *Unity*, WEAVR aggiunge di default i componenti e i *Prefabs* necessari per realizzare le procedure e gestirle. Nel caso di un progetto di realtà virtuale immersiva, come quello sviluppato in questo elaborato di tesi, saranno abilitati anche dei componenti di SteamVR. Alcuni di questi componenti e *Prefabs* che permettono alla scena di diventare immersiva sono presentati nella lista sottostante:

- *VR_RIG*: questo componente controlla i movimenti dell'utente e le interazioni con la scena. Infatti, contiene i componenti che permettono all'utilizzatore di teletrasportarsi nella scena e di interagire con gli

oggetti della stessa utilizzando i controller. Inoltre, questo componente include la camera *VR* che rende l'esperienza immersiva.

- *Teleport point* e *teleport area*: per permettere all'utente di teletrasportarsi nella scena questa deve includere un'area valida in cui è possibile farlo. Il *teleport point*, deve essere posizionato sul terreno e consiste, dunque, in un punto valido nella scena per utilizzare la funzione di teletrasporto. Analogamente, la *teleport area* consiste in una zona situata sul suolo della scena in cui è possibile teletrasportarsi. Le dimensioni di questa zona sono controllabili con il componente *Transform* dell'oggetto. È opportuno ribadire che, nella cartella di WEAVR del progetto, si trovano i *Prefabs* che includono i due componenti in questione, il *teleport point* e la *teleport area*.

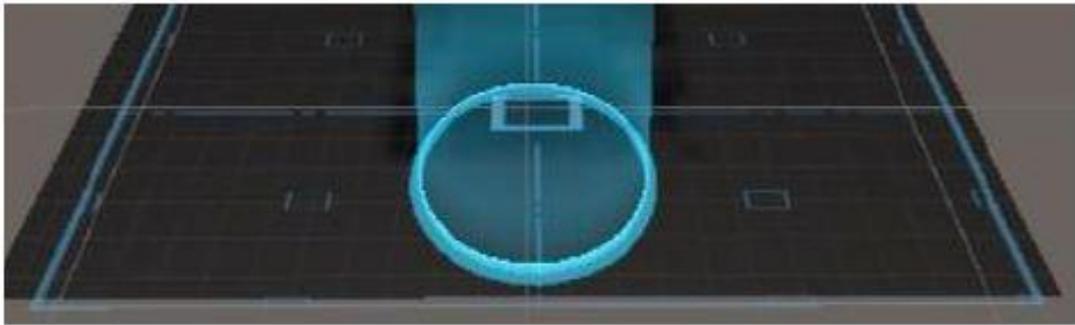


Figura 4.6: *Teleport point* (al centro) e *teleport area* (delimitata dai segmenti in azzurro)

- *Hands Poses*: la scena immersiva *VR* supporta la visualizzazione di un *renderer* delle mani dell'utilizzatore che agiranno in accordo con gli input dati dall'utente stesso e in base alle interazioni con gli oggetti della scena.

Nella figura seguente è possibile osservare, sulla sinistra, il *renderer* in questione con il controller *VR* e, sulla destra, il cambiamento della posizione della mano a causa dell'interazione con un oggetto. Le immagini sono prese dalla scena, utilizzata per questo elaborato di tesi, raffigurante la cabina di pilotaggio dell'A-320.



Figura 4.7: Sulla sinistra *renderer* delle mani con controller, sulla destra interazione *renderer* mano con oggetto *VR*

Successivamente, utilizzando il supporto di WEAVR, è possibile associare ai *GameObjects* dei componenti detti *Interactions*, ovvero degli script preimpostati che attribuiscono agli oggetti determinati comportamenti e modalità di interazione con l'utente. Nella lista sottostante saranno elencate e spiegate alcune di queste *interactions*, in particolare, alcune di quelle utilizzate per lo sviluppo del progetto di tesi:

- *VR_Object*: tale componente include tutte le impostazioni relative all'interazioni dell'utente con l'oggetto. Attraverso tale componente è inoltre possibile impostare l'*Interaction Mode*, ovvero la modalità di interazione del *renderer* della mano con l'oggetto in questione.
- *Grabbable*: questo componente permette all'utilizzatore di afferrare l'oggetto e muoverlo nell'ambiente di realtà virtuale.
- *Executable*: tale script viene utilizzato per chiamare e attivare una generica azione quando avviene un'interazione con l'oggetto.
- *Hinge Door*: il *GameObject* a cui viene assegnato tale componente può agire come una porta che ha una cerniera nel suo centro di rotazione, consentendo all'utente di ruotarlo passando dalla posizione "aperta" a "chiusa" e viceversa.

- *Three Way Switch*: componente che permette ad un oggetto di comportarsi come un interruttore con tre uscite. In questo elaborato è stato spesso utilizzato per interruttori caratterizzati da tre posizionamenti: ON, OFF e AUTO.

Un'altra classe di oggetti di WEAVR che è stata utilizzata per guidare l'utente immerso nell'ambiente *VR* è quella delle cosiddette *Billboard*. Ovvero, delle lavagnette contenenti un file di testo che spiega all'utente come deve agire nell'ambiente di realtà virtuale. Per esempio, sono state utilizzate le *billboard* per spiegare all'utente le azioni da svolgere per completare le procedure operative e guidarlo nella navigazione fra i nodi delle stesse. Questo componente è relazionato ad un altro oggetto mediante un collegamento grafico, un segmento osservabile nella figura 4.8, per chiarire all'utente su quale oggetto deve effettuare l'azione indicata dal testo nella *billboard*.

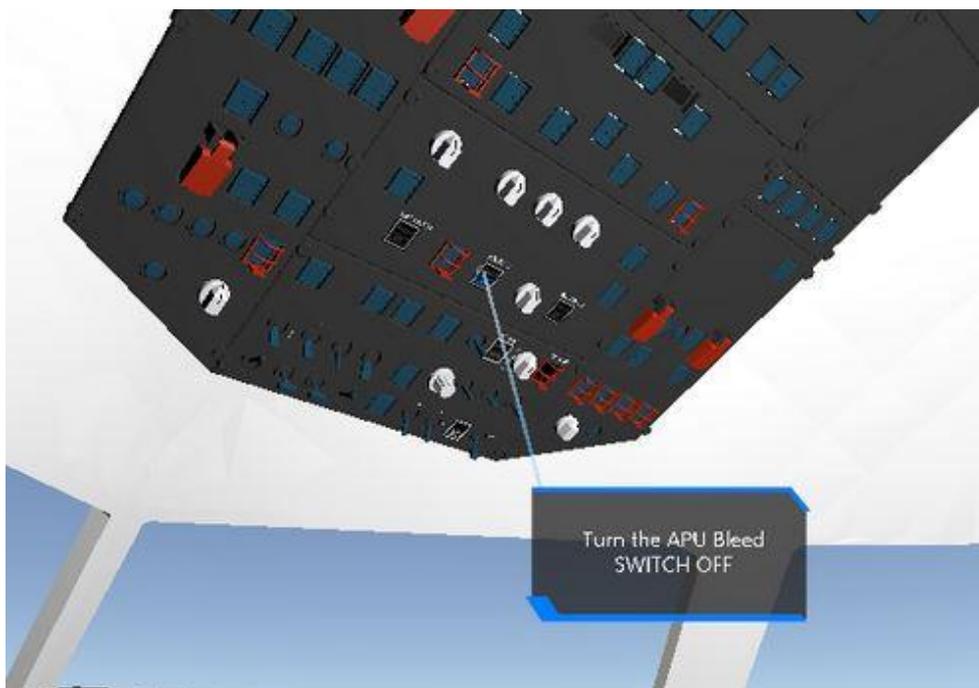


Figura 4.8: Esempio di una *Billboard* associata ad un oggetto della scena

4.3.2 Creazione di una procedura su WEAVR

Successivamente, dopo aver creato la scena e impostato tutte le interazioni che la caratterizzeranno, è necessario procedere con il successivo step, ovvero la creazione delle procedure.

Le procedure su WEAVR sono composte da una successione di step e dall'organizzazione di una navigazione fra uno step e il successivo. L'utente di questo software può creare le procedure graficamente organizzando la successione di step attraverso il tool *Procedure editor*.

Gli step sono gli elementi base di una procedura e appaiono all'utente come dei compiti da svolgere per portare a termine la procedura stessa. Ogni step ha un titolo, un numero ed una descrizione.

Utilizzando il *Create Procedure Wizard* è possibile creare e gestire le impostazioni iniziali di una procedura. Tramite questo strumento si può assegnare il nome alla procedura e impostare il suo *execution mode*, ovvero la modalità in cui la procedura viene proposta. Fra queste modalità quelle di default per un training *VR* sono la *automatic*, *guided* e *feedback*. La modalità *automatic* è propria di una procedura che viene eseguita in maniera autonoma dal sistema, mentre l'utente assume un ruolo passivo. Le procedure in modalità *guided* sono quelle in cui il sistema guida l'utente attraverso gli step della procedura fornendo degli indizi audio e video. Infine, in una procedura di tipo *feedback* l'utente esegue gli step della procedura in successione ed il sistema fornisce un riscontro positivo quando l'esecuzione di un singolo step è avvenuta correttamente.

Quando le impostazioni iniziali della procedura sono state definite è possibile procedere alla creazione della successione di step utilizzando il *Procedure editor*. In questo strumento è presente un'interfaccia grafica in cui gli elementi della procedura, quali nodi, gruppi e transizioni, possono essere spostati, interconnessi e modificati.

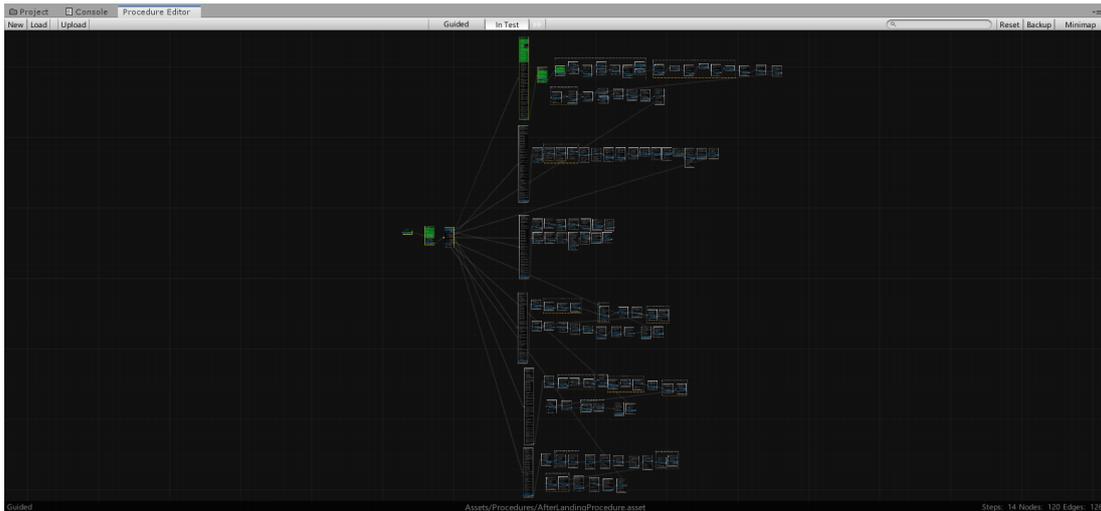


Figura 4.9: Procedure editor di WEAVR, esempio preso dal progetto di tesi

È opportuno descrivere meglio gli elementi della procedura prima citati. Un nodo è la più piccola unità della procedura e può consistere in uno step della procedura. Un gruppo di nodi viene generato per formare uno step della procedura nel caso in cui questo richieda più di una singola azione per essere eseguito. Le transizioni sono le connessioni fra due nodi, e su di esse è possibile impostare delle azioni che il sistema svolge a cavallo dei due nodi. Nelle figure successive, prese dal progetto *Unity* sviluppato durante il lavoro per questa tesi, saranno raffigurati gli elementi di una procedura appena descritti.

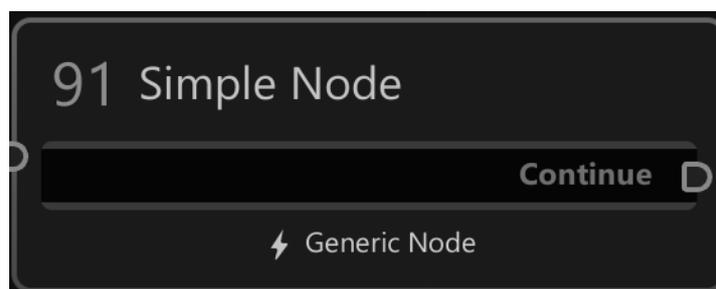


Figura 4.10: Esempio di un nodo, unità base di una procedura

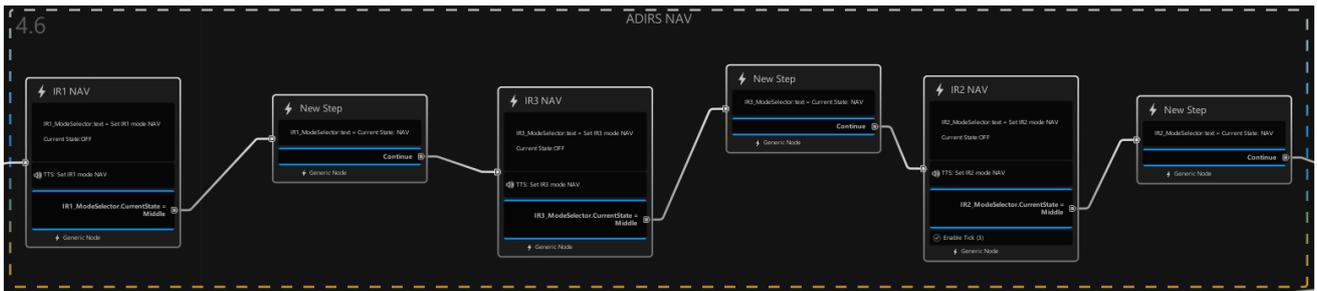


Figura 4.11: Esempio di un gruppo di nodi e transizioni che formano uno step procedurale

Nella figura 4.11 è possibile osservare anche le transizioni fra un nodo ed il successivo.

Ogni nodo è caratterizzato poi da un titolo, eventualmente una descrizione, delle azioni d'entrata, delle condizioni d'uscita e delle azioni d'uscita. Le azioni d'entrata compongono una lista di azioni che il sistema deve eseguire quando il nodo viene raggiunto. Le condizioni d'uscita sono una lista delle condizioni che devono verificarsi per uscire dal nodo corrente. Le azioni d'uscita, analogamente a quelle d'entrata, sono la sequenza di azioni che il sistema compie una volta che tutte le condizioni d'uscita sono rispettate.

Per completezza, le azioni sono il più piccolo elemento che può essere eseguito dal sistema. Queste possono avere diversi effetti sul progetto, possono servire per rendere eseguibile un *GameObject*, visualizzare un'immagine, spostare un oggetto della scena, modificare lo stato di un componente di un *GameObject*, far comparire una *billboard*, leggere un file di testo o numerose altre.

Le condizioni, invece, sono il più piccolo elemento di valutazione che il sistema usa per navigare nella successione di nodi. Una condizione d'uscita può essere associata ad un *GameObject* e richiedere una determinata condizione di un suo componente per passare al nodo successivo.

Per esempio, se ad un oggetto è attribuita una *interaction* di tipo *Hinge Door* la condizione d'uscita di un nodo può richiedere che tale oggetto si trovi nella posizione in cui la porta si considera chiusa. In un caso simile l'utente immerso nell'ambiente virtuale dovrà interagire con il determinato *GameObject* per chiuderlo e poter proseguire nel completare la procedura.

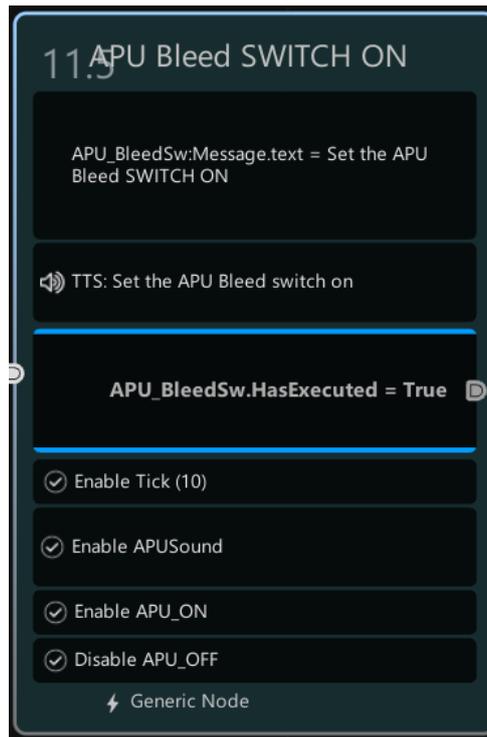


Figura 4.12: Esempio di un nodo con azioni d'entrata, condizioni d'uscita e azioni d'uscita

Un altro esempio di una condizione d'uscita può essere quella denominata come *Visually Inspected*. Ovvero, può essere richiesto all'utente di controllare un componente osservandolo e per far ciò egli dovrà avvicinarsi con l'*HMD* al *GameObject* in questione. Verrà visualizzata una cassetta trasparente sul *GameObject*, vedi figura 4.13, che andrà restringendosi fintanto che trascorra il tempo necessario per considerare il controllo effettuato e, quindi, soddisfatta la condizione d'uscita.



Figura 4.13: Condizione d'uscita *Visually inspected*

Si ritiene opportuno descrivere un particolare tipo di nodo, definito come *Hub node*. Tale nodo può essere composto da uno o più input e da uno o più output. Questo implica che per accedere ad un *hub node* è necessario che tutte le condizioni d'uscita dei nodi precedenti siano verificate. Una volta che questo accade vengono lanciate diverse esecuzioni in parallelo come output.

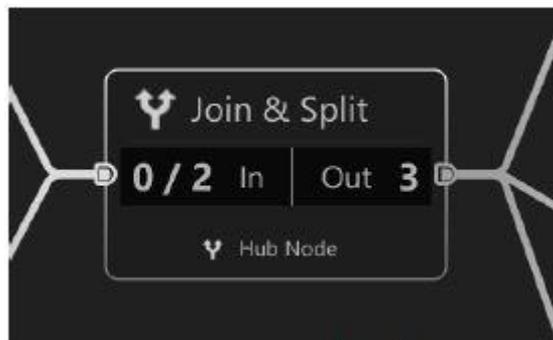


Figura 4.14: *Hub node*

Per aiutare l'utente durante la digitalizzazione di una procedura, WEAVR mette a disposizione il *Procedure Inspector*. Tale strumento è l'interfaccia attraverso la quale l'utente può osservare e gestire i dettagli di una procedura e dei suoi elementi. Attraverso il *Procedure Inspector* è dunque possibile modificare un nodo andando ad inserire le azioni d'entrata e d'uscita, e le condizioni d'uscita. Inoltre, tale strumento viene utilizzato per dare un titolo ai nodi e gestire le transizioni fra un nodo e il successivo.

Una volta strutturata la procedura questa può essere testata dall'utente, per farlo il pulsante "*In Test*" del *Procedure Editor* deve essere attivo. Mentre la navigazione attraverso la procedura prosegue, i diversi nodi e le diverse azioni saranno evidenziate in maniera diversa a seconda del tipo di esito ottenuto dall'azione stessa. Avremo un colore verde per le azioni eseguite correttamente, le condizioni d'uscita saranno evidenziate in blu una volta eseguite e, se un'azione non viene eseguita, appare un punto esclamativo di colore arancio o rosso a seconda della gravità dell'errore.

Infine, una volta che la procedura è stata creata e testata correttamente, si può passare all'ultima fase necessaria per sviluppare un training *VR* su WEAVR, ovvero implementare la procedura. L'implementazione delle procedure

consiste nel generare un *application*, file necessario per avviare la procedura quando si vuole utilizzare il training *VR* progettato.

Per concludere, si ritiene che l'interfaccia grafica fornita dal supporto Pacelab WEAVR per la digitalizzazione delle procedure operative, renda più intuitivo un approccio con la programmazione su *Unity*. In questo modo è possibile, anche per programmatori poco esperti, riuscire a modellare e a gestire un training in realtà virtuale.

5 Airbus A320

Per il training in realtà virtuale al centro di questo elaborato di tesi è stato utilizzato un ambiente che riproduce la cabina di pilotaggio del velivolo A320 dell'Airbus. Dunque, in questo capitolo, si ritiene opportuno stilare una descrizione di quelli che sono i sistemi caratterizzanti di questo velivolo e, in particolare, della sua cabina di pilotaggio.

L'Airbus è una società multinazionale aerospaziale fondata in Francia nel 1970. È un punto di riferimento internazionale nel settore aerospaziale che progetta e produce velivoli commerciali, elicotteri, trasporti militari, satelliti e lanciatori, oltre a fornire servizi di navigazione, comunicazione, mobilità urbana ed altri su scala globale [2.19].

La struttura di tale impresa si basa su tre principali divisioni: *Commercial Aircraft*, *Defence and Space* e *Helicopters*. Traducendo dall'inglese, quindi, velivoli commerciali, difesa e spazio ed elicotteri.

Il business principale dell'azienda, basato sui velivoli civili, ha sede in Francia in un sobborgo di Tolosa, Blagnac. Gli impianti adibiti alla produzione dei velivoli si situano principalmente in Europa tra Francia, Germania, Spagna e Regno Unito, ma anche in altri paesi come Cina, Stati Uniti e Canada.

L'Airbus ha prodotto e commercializzato il primo velivolo civile con un *fly-by-wire* digitale, l'A320, e il velivolo che può trasportare il più grande numero di passeggeri l'A380. Nell'ottobre del 2016 tale azienda aveva effettuato più di 110 milioni di voli, totalizzando 215 miliardi di chilometri e trasportando più di 12 miliardi di passeggeri. Questi dati ed altro la rendono una delle più grandi aziende nel settore aerospaziale.

La linea di prodotti dell'Airbus ha avuto inizio nel 1972 con l'A300. Successivamente, grazie al successo dell'azienda, è stato prodotto l'Airbus A320 che, come citato in precedenza, è di particolare interesse per essere stato il primo velivolo ad integrare un sistema di controllo *fly-by-wire* digitale. Tale velivolo è stato, e continua ad essere, un enorme successo a livello

commerciale e viene utilizzato da molte compagnie aeree per trasporti a corto e medio raggio. Altri prodotti per voli di questo tipo sono l'A318, A319 e l'A321. Per voli di lungo raggio l'Airbus propone i velivoli A330, A340, A350 e A380. In particolare, i velivoli A340 e A350 hanno un raggio operativo di volo di 16700 chilometri, il secondo più ampio dopo quello del velivolo della Boeing, principale *contender* dell'Airbus a livello globale, il Boeing 777-200LR.



Figura 5.1: Airbus A320

È opportuno, dunque, concentrarsi sul velivolo Airbus A320 essendo stato utilizzato per lo scenario virtuale di questo elaborato di tesi. Come affermato in precedenza, il successo di tale prodotto è di scala globale, infatti, un velivolo A320 decolla e atterra in media ogni 1,5 secondi e da quando è entrato in servizio, ha compiuto più di 117 milioni di cicli di volo, con un'affidabilità del 99,7% [1.16].

Tale velivolo ha una lunghezza di 37,57 metri, un'apertura alare di 34,10 metri e un diametro esterno della fusoliera di 3,95 metri. Nella figura 5.2 è possibile osservare queste ed altre dimensioni caratteristiche dell'*aircraft* in questione.

È dotato di due motori turbofan CFM-56 che possono produrre fino a 12kN di spinta ciascuno, può trasportare fino a 29 tonnellate di combustibile

garantendo una distanza percorribile massima di 5700 chilometri ad una velocità massima di 1010 km/h, corrispondente ad un Mach di volo di 0,82. Il peso massimo al decollo è di circa 79 tonnellate.

L'Airbus A320, in modalità *single-class*, può trasportare fino a 180 passeggeri con un volume dedicato al compartimento dei passeggeri di 139 metri cubi. Nella cabina passeggeri sono presenti cinque posti a sedere per i membri del personale di volo e in cabina di pilotaggio sono presenti due postazioni per pilota e primo ufficiale.

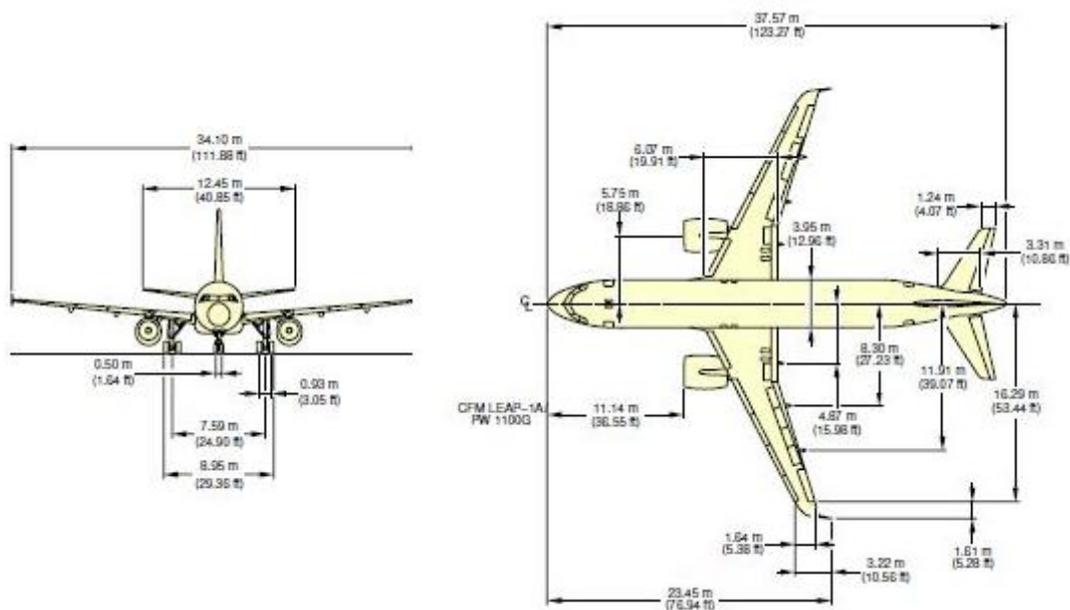


Figura 5.2: Dimensioni caratteristiche Airbus A320

A seguito del grande successo commerciale di questo velivolo, il numero del personale operativo richiesto è molto elevato, di conseguenza, l'addestramento di questo personale a bordo del velivolo fisico risulterebbe molto costoso, in particolare per i piloti. Per questo, si sono studiate alternative a questo tipo di training con la nascita di simulatori di volo e, nell'ultimo periodo, di training in realtà virtuale.

5.1 Sistemi del velivolo Airbus A320

In tale paragrafo verranno definiti i sistemi che caratterizzano il velivolo Airbus A320. Un sistema è un insieme di elementi diversi che insieme concorrono a produrre un risultato. Inoltre, un sistema è composto anche dalle relazioni fra i diversi elementi e queste relazioni ne sono il valore aggiunto.

Nel velivolo in questione, la gestione dei sistemi di bordo e la regolazione del loro funzionamento avviene nella cabina di pilotaggio, detta anche *cockpit*. I piloti, da questa cabina, gestiscono i vari sistemi e sottosistemi che compongono l'aereo. È possibile osservare il *cockpit* dell'A320 nella figura sottostante, grazie a delle immagini prese dalla *cockpit view* disponibile sul sito dell'Airbus [2.20].

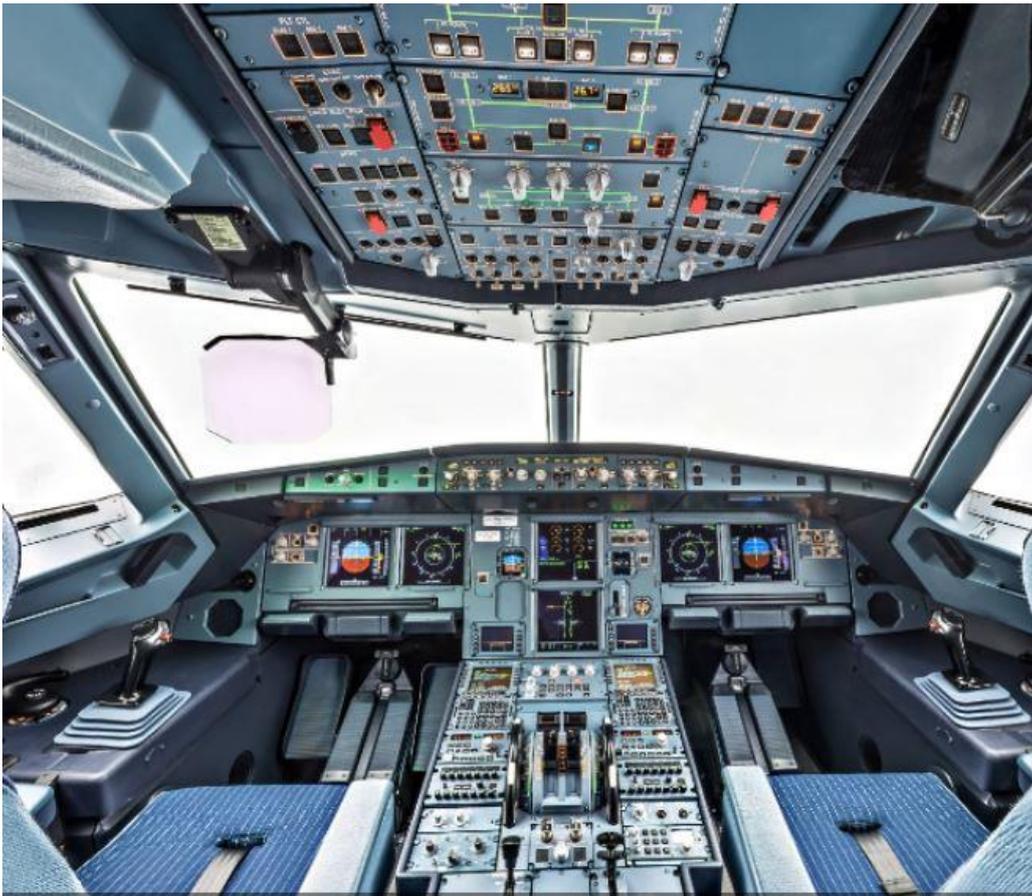


Figura 5.3: Cabina di pilotaggio Airbus A320

I velivoli aeronautici sono molto complessi e sono composti da un numero abbastanza elevato di sistemi principali:

- Struttura;
- Sistema avionico, suddividibile in:
 - Sistema di comunicazione;
 - Sistema di individuazione e identificazione;
 - Sistema di controllo del volo;
 - Sistema di navigazione;
- Sistema idraulico;
- Sistema pneumatico;
- Sistema elettrico.

È importante sottolineare come questi sistemi non sono a sé stanti, ma sono interconnessi fra loro ed interagiscono durante le fasi operative del velivolo. A loro volta tali sistemi sono suddivisibili in vari sottosistemi, come nel caso del sistema avionico, e vengono gestiti dal pilota in maniera manuale o automatica.

Nella cabina di pilotaggio, per eseguire la funzione di controllo e gestione di tali sistemi, sono presenti centinaia di pulsanti, *switch*, display, in generale diversi dispositivi di *input* e *output*. Vista la complessità dei sistemi e dei dispositivi per controllarli, la gestione dello spazio nella cabina di pilotaggio risulta avere un'importanza elevata. Lo spazio nel *cockpit* è suddiviso in tre zone principali raggiungibili dal pilota stando seduto: *front panel*, *pedestal* e *overhead panel*.

5.1.1 *Front panel*

Il *front panel* è situato davanti ai piloti, al di sotto del *windshield*, il parabrezza, e contiene la maggior parte dei dispositivi di *output* che forniscono informazioni ai piloti. La sua posizione è dovuta al fatto che deve essere facilmente monitorabile dai piloti in quanto fornisce dati *real-time* riguardo le condizioni di volo e lo stato del velivolo.



Figura 5.4: Front panel Airbus A320

Come è possibile vedere nella figura 5.4, nel *front panel* sono presenti principalmente i *flight deck display*, ovvero dei pannelli a cristalli liquidi che forniscono le informazioni necessarie al controllo del velivolo. Attraverso tali display è possibile navigare nei programmi di gestione dei vari sottosistemi e controllare svariati parametri.

Partendo da sinistra troviamo gli *EFIS (Electronic Flight Instrument System) display* legati al controllo del volo e alla navigazione. Questi consistono nei primi due display detti *PFD (Primary Flight Display)* e *ND (Navigation Display)* e vengono simmetricamente riprodotti anche sulla destra, al lato del primo ufficiale.

Nella zona centrale troviamo gli *ECAM (Electronic Centralized Aircraft Monitoring) display* suddivisi in *Upper display* e *System display*. L'*Upper display* raffigura informazioni riguardanti i motori e vari *warning*, mentre il *System display* contiene informazioni riguardanti i vari sistemi e sottosistemi del velivolo ed è composto da varie schermate che il pilota può selezionare attraverso la pulsantiera dell'*ECAM*.

Si andrà, dunque, a descrivere i vari elementi che compongono il *front panel* [2.21]:

- *PFD (Primary Flight Display): display* legato al controllo del volo dove è possibile osservare la linea dell'orizzonte artificiale. Su tale schermo sono visualizzati gli angoli di beccheggio e di rollio del

velivolo, visualizzabili grazie all'elaborazione delle informazioni raccolte dal sistema inerziale dell'*aircraft*. Inoltre, vengono visualizzate le traiettorie da seguire ed il pilota può, dunque, controllare quale sia l'angolo di assetto corretto da seguire.

Sulla sinistra del *display* si ha un'indicazione della velocità del velivolo e vengono fornite la velocità minima e quella massima in relazione all'assetto del velivolo. Inoltre, è visualizzata la *target speed*, ovvero, la velocità prevista dal piano di volo. Sulla destra, invece, è possibile trovare indicazioni sull'altitudine a cui si trova l'aereo ed anche quella prevista dal piano di volo. Sempre sulla destra è presente il variometro che dà indicazioni riguardo l'andamento della quota, che ci dice se il velivolo è in fase di ascesa o di discesa. Altre informazioni presenti sul *PFD* sono il numero di Mach e i modi dell'autopilota in funzione.



Figura 5.5: Primary Flight Display Airbus A320

- *ND (Navigation Display)*: *display* che fornisce le informazioni sulla navigazione, è anche noto come *Multifunctional Display*. Infatti, su questo schermo è possibile trovare la posizione del velivolo e la sua traiettoria, dunque, i *waypoints* e la rotta per raggiungere la destinazione. Su di esso possono anche essere visualizzate informazioni sulle condizioni meteo che circondano il velivolo ed indicare l'eventuale presenza di precipitazioni.

Sono visualizzati anche l'angolo di *drift*, angolo fra il muso del velivolo e il vettore velocità, la *ground speed* e la *TAS (True Air Speed)*, dati che si differenziano per la velocità del vento. Inoltre, su tale *display* arrivano le informazioni dal *TCAS (Traffic Collision Avoidance System)*, dunque, informazioni sulla presenza di altri velivoli nell'area circostante.

- *E/WD (Engine Warning Display)*: prima chiamato come l'*Upper Display* dell'*ECAM*, si trova nella zona centrale del *front panel* ed è lo schermo dedicato ai motori del velivolo e alla visualizzazione dei *warning*. Su tale *display*, dunque, troviamo informazioni come le prestazioni dei propulsori, la temperatura del gas d'uscita, il numero di giri dell'albero di bassa pressione e l'*EPR (Engine Pressure Ratio)*. Inoltre, vengono visualizzate le *checklist* che contengono le azioni che il pilota deve effettuare. Nella sezione dedicata ai *warnings* si trovano indicazioni su quello che potrebbe non funzionare e le procedure da svolgere per risolvere tali problemi.



Figura 5.6: ECAM_E/WD (Engine Warning Display)

- *SD (System Display)*: in questo *display* vengono visualizzate tutte le informazioni riguardanti i vari sistemi del velivolo. Per ogni sistema è dedicata una pagina di tale schermo e il pilota può navigare fra le

varie schermate attraverso la pulsantiera dell'*ECAM* situata sul *Pedestal*. Alcune di queste schermate sono state utilizzate nelle procedure operative digitalizzate in questo elaborato di tesi.

Tale display, insieme al *E/WD* precedentemente descritto, fa parte dell'*ECAM (Electronic Centralized Aircraft Monitoring)* che racchiude, dunque, tutte le informazioni riguardanti i motori ed i vari sistemi del velivolo.

- *Navigation Controls*: situato nella parte superiore del *front panel* e, come è possibile osservare nella figura 5.7, si riproduce simmetricamente dal lato del pilota e da quello del primo ufficiale.



Figura 5.7: Pannelli del *Navigation Control*

In questa sezione si trovano i controlli di navigazione ed è suddividibile in tre pannelli dedicati a:

- *Warning Lights* (luci di allarme): in questo pannello, che si trova sulla sinistra, è situata la *Master Warning Light* che diventa rossa per avvertimenti di terzo livello ed è accompagnata da un segnale sonoro. Inoltre, è possibile trovare la *Master Caution Light* che si illumina di ambrato per *warning* di secondo livello accompagnato da una singola nota audio;
- *EFIS Control Panel*: pannello dedicato alla gestione dei *display* dell'*EFIS (Electronic Flight Instrument System)*, ovvero, il *PFD* e il *ND* precedentemente descritti. Agendo su tale pannello è possibile, dunque, gestire le informazioni che sono visualizzate su tali *display*. Inoltre, è presente la *Barometric Window* che indica il

riferimento barometrico disponibile in pollici di mercurio, *inHg*, e in etto-pascal, *hPa*.

- *Flight Control Unit*: pannello situato nella zona centrale del *front panel* e attraverso il quale il pilota può impostare i dati di volo utilizzati dal sistema dell'autopilota. Inoltre, vengono raffigurate informazioni importanti riguardo lo stato del velivolo come velocità e numero di Mach, Altitudine e *vertical speed*.
- *Backup Instruments*: questi strumenti hanno una funzione di *backup* rispetto agli strumenti principali, ossia i *display* precedentemente descritti. Tali strumenti sono meccanici e, dunque, sono in grado di sostituire la loro controparte elettrica in caso di guasto, garantendo un corretto svolgimento delle operazioni di volo. Fra questi troviamo:
 - *Standby Airspeed Indicator*: strumento meccanico connesso direttamente al tubo di Pitot e fornisce il dato riguardante la *Airspeed*.

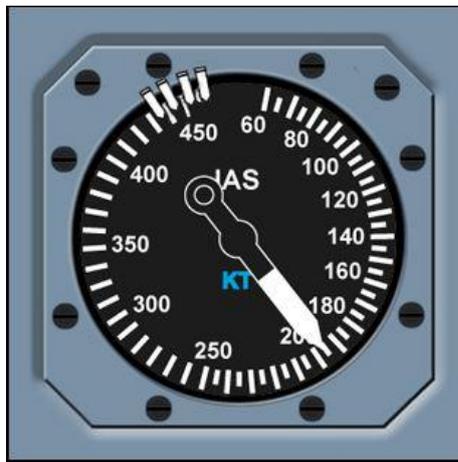


Figura 5.8: *Standby Airspeed Indicator*

- *Standby Altimeter*: strumento meccanico che fornisce il dato riguardante la quota del velivolo in caso di *failure* dei sistemi elettronici principali;

- *Standby Attitude Indicator*: strumento meccanico che fornisce informazioni riguardo l'assetto del velivolo e resta attivo per cinque minuti dopo una *failure* totale del sistema elettrico.
- *Landing Gear Lever*: la leva del carrello di atterraggio, situata sul *front panel*, fornisce segnali elettrici all'alimentazione idraulica del carrello stesso. Tale leva è dotata di un meccanismo di blocco che previene qualsiasi movimento accidentale della stessa e, dunque, di retrainare il carrello quando il velivolo è a terra. Le due posizioni della leva *up* e *down*, coincidono rispettivamente con la posizione retrainata ed estesa del carrello di atterraggio.

5.1.2 Pedestal

Questa sezione del *cockpit* è situata fra le due postazioni di pilota e primo ufficiale nella parte bassa della cabina di pilotaggio. In esso sono presenti quasi tutti i comandi relativi ai sistemi di bordo del velivolo. In seguito, verranno elencati e descritti i vari pannelli che compongono il *Pedestal* [2.21].



Figura 5.9: *Pedestal* Airbus A320

- *MCDU (Multifunction Control Display Unit)*: tale unità di controllo è l'interfaccia fra i piloti e il *FMGS (Flight Management Guidance System)*, ovvero quel sistema che gestisce la navigazione. In particolare, tale sistema contiene il *database* di navigazione, permette l'auto-sintonizzazione con i *NAVAID*, dispositivi fisici a terra che il velivolo utilizza per la navigazione, fornisce il calcolo della posizione dell'*aircraft*, effettua controlli sull'accuratezza della navigazione e gestisce il piano di volo.

Il pilota inserisce il piano di volo ed altri requisiti attraverso l'*MCDU* e, successivamente, il *FMGS* genera i profili di discesa e salita per la partenza e l'atterraggio, fornisce una guida automatica per il velivolo e calcola la posizione corrente e il futuro progresso dell'*aircraft* lungo la traiettoria di volo.



Figura 5.10: *MCDU* Airbus A320

- *Switching panel*: un pannello situato nella zona centrale del *pedestal*, al di sotto del *front panel*. Qui è possibile individuare quattro manopole attraverso le quali il pilota può riconfigurare i *display* del *front panel* in caso di una *failure* di qualche componente.

- *ECAM Control Panel*: come affermato in precedenza, attraverso il pannello di controllo dell'*ECAM* il pilota può navigare fra le varie schermate dei *display* in questione e gestire le informazioni visualizzate.
- *Radio Management Panel*: attraverso tale pannello i piloti possono gestire le radiofrequenze necessarie alla navigazione e alla comunicazione. È possibile selezionare diversi radiotrasmettitori e, dunque, gestire la frequenza di diversi dispositivi. Infatti, su velivoli di grandi dimensioni, come l'Airbus A320, sono presenti diversi apparati per la trasmissione in radiofrequenza, in modo da garantire un livello di ridondanza opportuno.



Figura 5.11: Radio Management Panel Airbus A320

- *Audio Control Panel*: Tale pannello di controllo permette la gestione dei vari apparati radio, selezionando quale di questi si vuole utilizzare per la comunicazione e la navigazione. Inoltre, tramite questo pannello è possibile regolare il volume ed attuare delle comunicazioni interne al velivolo.
- *Weather Radar and PWS Control Panel*: attraverso tale pannello il pilota può gestire la funzione del velivolo atta ad identificare le perturbazioni e le turbolenze che si possono trovare lungo la traiettoria del velivolo, funzione fornita dal radar meteorologico. Tali informazioni saranno poi visualizzate sul *Navigation Display*, in

modo da avvertire il pilota nel caso di turbolenze ed eventi meteorologici significativi.

Il *PWS (Predictive Windshear System)* utilizza il radar meteo per individuare eventuali effetti doppler significativi, situati nelle precipitazioni che circondano il velivolo, che possono disturbare il sistema di comunicazione e di navigazione del velivolo [2.22].

- *TCAS/ATC Transponder Control Panel*: questo pannello di controllo permette al pilota di gestire i *transponder* del *TCAS* e dell'*ATC*, ed è situato nella parte destra del *pedestal* dal lato del primo ufficiale di volo.

Il *TCAS (Traffic Collision Avoidance System)* fa parte del sistema di individuazione ed identificazione del velivolo. Il suo funzionamento è basato su un *transponder* MODE-S e svolge un ruolo di *backup* ad una funzione che deve essere garantita da terra, ovvero, la separazione da altri velivoli. I *transponder* dell'*ATC (Air Traffic Control)* sono proprio quelli che vengono utilizzati per comunicare con il centro di gestione del traffico aereo a terra.



Figura 5.12: *TCAS/ATC Transponder Control Panel* Airbus A320

- *Speed Brakes Lever* e *Flaps Lever*: leve che servono per gestire l'estensione e la ritrazione rispettivamente degli *speed brakes* e dei *flaps* e *slats* del velivolo.

L'attivazione degli *speed brakes* viene gestita attraverso la leva in questione e sull'*ECAM System Display*, nella pagina opportuna, verrà visualizzato un promemoria per il pilota che indica che questi freni sono estesi. Tale avviso diventa di colore giallo se gli *speed brakes*

sono estesi quando i propulsori non sono nella condizione di funzionamento di *IDLE*, il funzionamento a minima potenza.

I cinque *slats* e i due *flaps* di ogni ala sono controllati elettricamente attraverso gli input dati dal pilota con questa leva ed il loro movimento viene concretizzato mediante degli attuatori idraulici.

- *Engine Thrust Levers*: situate al centro del *Pedestal*, come è possibile osservare nella figura 5.13, sono due leve adibite al controllo della spinta dei motori oppure per impostare l'autorità del sistema di *auto-thrust*.

Tali leve possono essere gestite solo manualmente dal pilota e, quando sono mosse, trasmettono dei segnali al *FADEC (Full Authority Digital Engine Control)*, ovvero un sistema che controlla tutti gli aspetti legati alle performance dei motori in maniera digitale. Il *FADEC*, dunque, calcola il livello limite di spinta e l'*EPR (Engine Pressure Ratio)* che caratterizzano il funzionamento del motore, in base alla posizione delle leve.

Ci sono cinque posizioni di arresto delle leve che definiscono il funzionamento dei motori ed il livello di spinta:

- *Takeoff/ Go-around (TO/GA)*
- *Flex/Max Continuous Thrust (FLX/MCT)*
- *Climb (CL)*
- *Forward Idle*
- *Max Reverse*

- *Engine Start and Ignition Panel*: pannello adibito alla gestione dei motori ed è situato immediatamente al di sotto delle *Engine Thrust Levers*.

In questo pannello sono presenti due *Engine Master Switch* che se sono posizionati su *OFF* chiudono le valvole del combustibile dei motori e resettano i canali di comunicazione del *FADEC*. Mentre quando questi *switch* sono impostati su *ON*, le valvole vengono aperte e i motori sono accessi in maniera automatica o manuale, attraverso i

comandi dell'*Engine Manual Start and Ignition Panel* situato sull'*Overhead Panel*.

Inoltre, sono presenti due luci dette *engine fire/fault lights*, una per ogni motore. La scritta *Fire* si illumina di rosso per segnalare la presenza di fuoco nel rispettivo motore o durante un *fire test*. Mentre, la scritta *Fault* si illumina di giallo in occasione di un avvio automatico interrotto o di una *failure* nel funzionamento delle valvole.

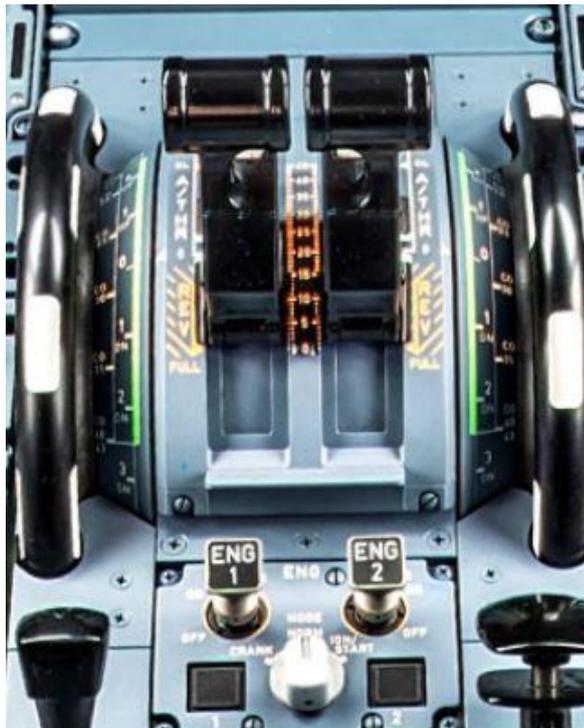


Figura 5.13: *Thrust Levers ed Engine Start and Ignition Panel*

- *Parking Brake Handle*: maniglia per l'attivazione del freno di stazionamento del velivolo. L'attivazione di tale freno disattiva tutti gli altri freni del velivolo. Inoltre, sull'*ECAM display* appare un promemoria che avvisa il pilota quando il *parking brake* è attivo.
- *Emergency Gravity Gear Extension Handle*: maniglia che garantisce l'estensione del carrello di atterraggio nell'eventualità di una *failure* del sistema idraulico, elettrico o meccanico. Tale dispositivo è situato nella parte finale del *Pedestal* e per attivarlo i piloti devono tirare la maniglia e poi ruotarla in senso orario compiendo tre giri completi.

5.1.3 Overhead Panel

L'Overhead Panel è situato, come è intuibile dal nome, nella zona superiore del cockpit al di sopra delle postazioni dei piloti. Su questo pannello si trovano svariati pulsanti e manopole che sono utilizzati dai piloti per svolgere la funzione di controllo e gestione di tutti gli altri sistemi di bordo del velivolo.

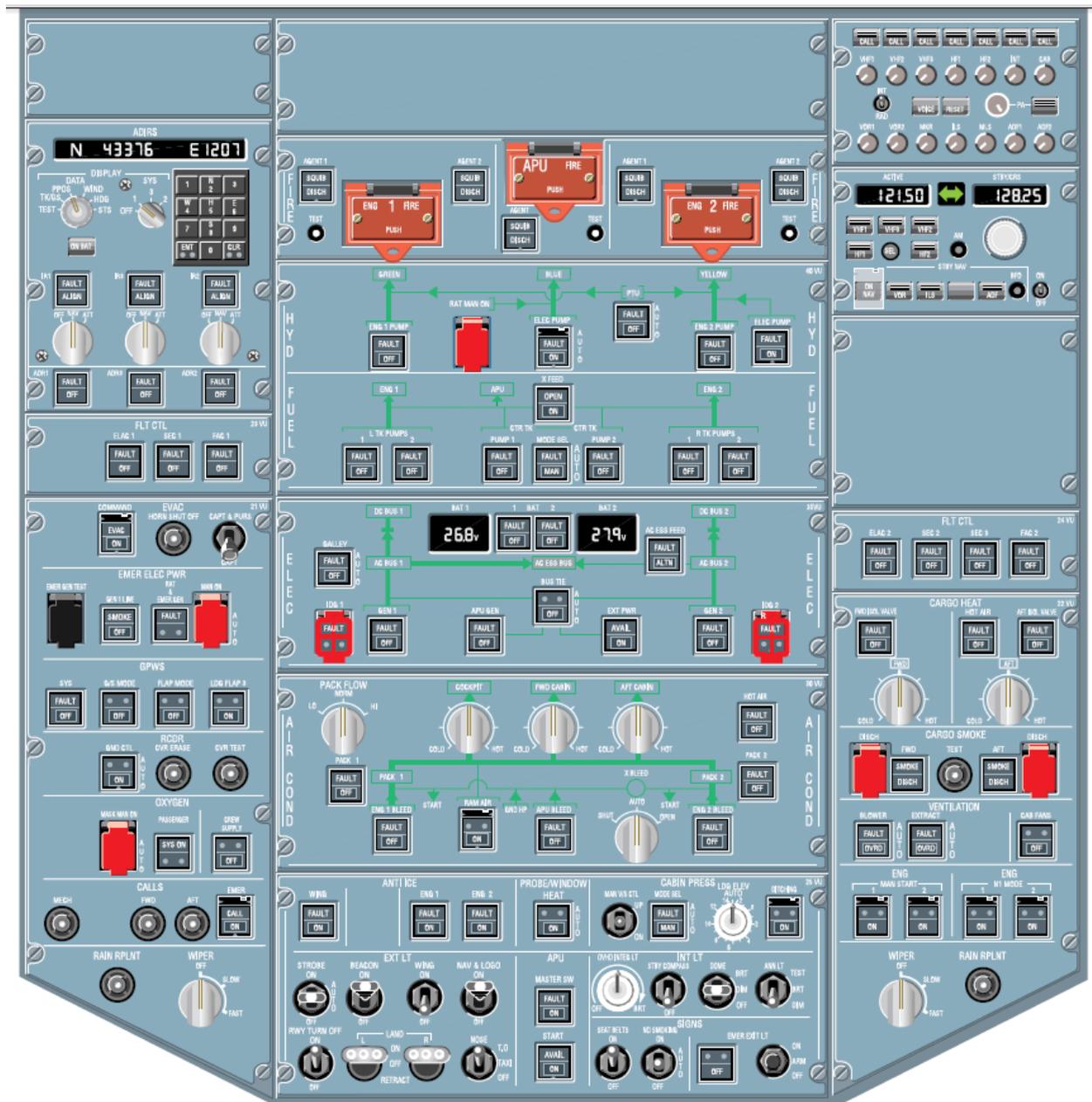


Figura 5.14: Overhead Panel Airbus A320

In questa sezione del cockpit sono presenti più di un centinaio di comandi suddivisi in diversi pannelli che saranno qui elencati [2.21]:

- *ADIRS Control Panel;*
- *Flight Control Computers Panel;*
- *Emergency Evacuation Panel;*
- *Emergency Electrical Control Panel;*
- *Recorder Panel;*
- *Oxygen Panel;*
- *Windshield Wiper Panel;*
- *Engine and APU Fire Panel;*
- *Hydraulic Control Panel;*
- *Fuel Control Panel;*
- *Electrical Control Panel;*
- *Air Conditioning Control Panel;*
- *Anti-Ice Panel;*
- *Cabin Pressurization Control Panel;*
- *Exterior Lighting Control Panel;*
- *APU Control Panel;*
- *Integral and Cabin Signs Lighting Control Panel;*
- *Cockpit Door Control Panel;*
- *Cargo Heat Control Panel;*
- *A320 Cargo Smoke Panel;*
- *Ventilation Control Panel;*
- *Engine Manual Start and Ignition Panel.*

In questo capitolo sarà proposto solo questo riepilogo dei singoli pannelli che compongono l'*Overhead Panel*, ognuno dei quali gestisce uno dei vari sottosistemi del velivolo A320. Il numero elevato dei comandi in questione, infatti, richiederebbe una descrizione nel dettaglio di ogni singolo componente troppo estesa e si ritiene non sia necessaria per gli scopi di questo elaborato di tesi.

Nel capitolo successivo, in cui ci si occuperà della descrizione delle procedure operative digitalizzate in questo elaborato di tesi, verrà descritta più nel dettaglio la funzione di quei pannelli che sono coinvolti nelle procedure di interesse.

Dalla trattazione effettuata in questo capitolo si deduce la complessità dei comandi presenti nella cabina di pilotaggio del velivolo Airbus A320. Da questa caratteristica nasce, dunque, la necessità di avere delle procedure operative come guida per il personale di bordo e dunque, di effettuare dei training con lo scopo di addestrarli. Per questo gli strumenti della realtà virtuale possono risultare utili nel rendere più efficiente il training dei piloti e migliorare il loro apprendimento delle procedure stesse.

6 Procedure: *Before Start* e *De-icing*

In un sistema uomo-macchina complesso, come quello di un velivolo, le operazioni spesso dipendono da un gruppo di procedure che indicano all'operatore umano, rappresentato in questo elaborato di tesi dal pilota, la maniera in cui devono essere svolte determinate *task* sul velivolo. L'intento delle procedure è, quindi, quello di fornire una guida al pilota per assicurare un modo logico, efficiente, sicuro e standardizzato di portare a termine gli obiettivi di missione [1.17]

Le procedure, per un sistema uomo-macchina complesso, sono fondamentali, non solo per evitare il mancato raggiungimento degli obiettivi di missione ma anche per scongiurare tragiche conseguenze a danno sia della macchina che degli uomini facenti parte del sistema. Per assicurare, dunque, che le operazioni siano svolte in maniera sicura e prevedibile bisogna fornire al pilota una guida "*step-by-step*" che sia coerente e che non lasci spazio ad errori o ad eventi inaspettati. Infatti, ogni deviazione da queste standardizzazioni comporta un rischio nella gestione della missione.

In questo elaborato di tesi sono state digitalizzate due procedure operative del velivolo Airbus A320, ovvero, la *Before start procedure* e la *De-icing procedure*. In particolare, verrà analizzata più nel dettaglio la *Before Start* e della seconda verrà fornito solo un breve riepilogo. Per trovare una dettagliata descrizione della *De-icing procedure*, si fa riferimento all'elaborato "Digitalizzazione e analisi di procedure operative per l'addestramento di piloti in ambiente di realtà virtuale" del mio collega Andrea Pavone, con il quale ho collaborato nei lavori per lo sviluppo di questa tesi.

Per la trattazione di questo capitolo si fa riferimento al "A320 *FCTM (Flight Crew Training Manual)*", ovvero il manuale di addestramento del personale di volo dell'A320 [1.18].

6.1 *Before start procedure* nell'ambiente VR

6.1.1 Introduzione

La procedura di *Before start* fa parte del gruppo di procedure che servono per la gestione delle cosiddette *normal operations*, ovvero quelle operazioni che devono essere svolte in condizioni normali e che seguono delle tecniche da applicare in ogni fase di volo per ottimizzare l'uso del velivolo Airbus A320.

Queste procedure si basano sulle *normal checklists* che prendono in considerazione le informazioni trasmesse sull'ECAM display e includono solo gli elementi che possono avere un impatto diretto sulla sicurezza ed efficienza del volo. Alcune di queste *checklist* sono divise in due sezioni, la sezione detta "*Down to the Line*" e quella "*Below the Line*". Questo viene fatto per aiutare il personale di volo nella gestione del carico di lavoro. In particolare, per la *Before start procedure* la prima sezione, "*Down to the Line*", deve essere utilizzata quando il *Load and Trim Sheet*, foglio di carico e di taglio, è disponibile e i dati per il decollo sono impostati. La seconda sezione, "*Below the Line*", viene utilizzata dopo aver ottenuto la *clearance* per la partenza. Nella figura 6.1, è possibile osservare la *checklist* della procedura in questione e distinguere le due sezioni appena descritte.

BEFORE START	
COCKPIT PREP.....	COMPLETED (BOTH)
GEAR PINS and COVERS.....	REMOVED
SIGNS.....	ON/AUTO
ADIRS.....	NAV
FUEL QUANTITY.....	KG.LB
TO DATA.....	SET
BARO REF.....	SET (BOTH)
WINDOWS/DOORS.....	CLOSED (BOTH)
BEACON.....	ON
THR LEVERS.....	IDLE
PARKING BRAKE.....	AS RQRD

Figura 6.1: Checklist della procedura di *Before start*

Riassumendo, la procedura di *Before start* viene svolta per assicurare che il velivolo sia in condizioni di sicurezza e che siano svolti tutti i passaggi per poi procedere con l'accensione dei motori. Sarà, dunque, necessario ottenere un giudizio globale sullo stato del velivolo e, alla fine di tale procedura, il velivolo sarà pronto per procedere al decollo.

Per la digitalizzazione delle procedure è stato utilizzato il supporto di *Unity*, PaceLab WEAVR, descritto nel quarto capitolo. Queste procedure sono inserite, all'interno del progetto *Unity* svolto in collaborazione con l'azienda *Txt e-Solutions*, in un unico blocco procedurale che contiene anche le procedure *After Start*, *After Landing*, *Procedure Parking* e *Securing the Aircraft* descritte negli elaborati di tesi "Analisi di procedure operative per l'addestramento del personale aeronautico in ambiente di realtà virtuale" di Frédéric Vianale e in quello di Lorenzo Fava, "Digitalizzazione di procedure operative per l'addestramento del personale aeronautico in ambiente di realtà virtuale", di cui tale progetto ne è la continuazione. Nella figura 6.2 viene riportato questo blocco procedurale per intero.

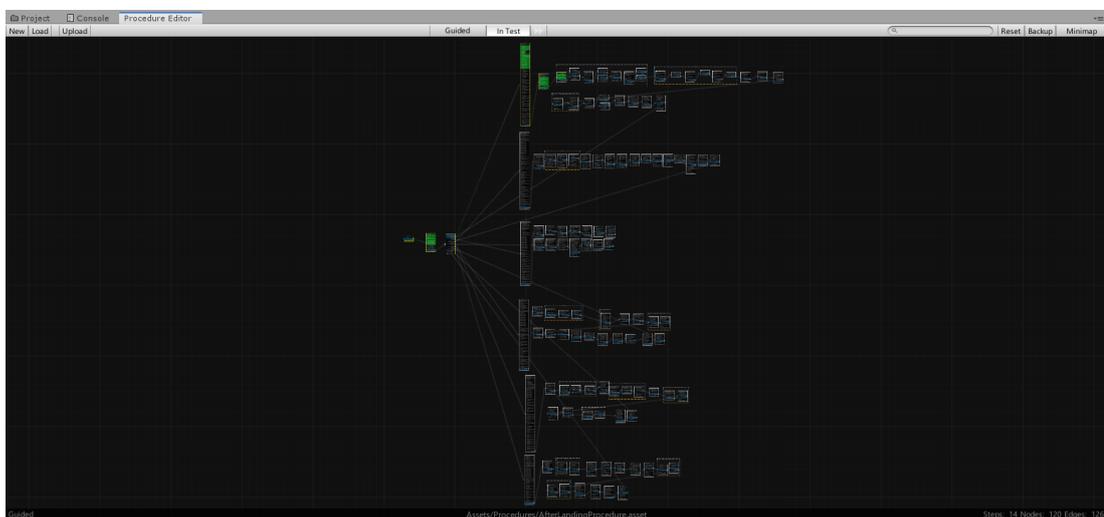


Figura 6.2: Progetto *Unity* contenente tutte le procedure digitalizzate in collaborazione con l'azienda *Txt e-Solutions*

Per consentire all'utente immerso nell'ambiente di realtà virtuale di muoversi all'interno di questo blocco procedurale, è presente un tablet tramite il quale è possibile selezionare la procedura della quale si vuole effettuare il training.

Tale tablet appare all'utente nella cabina di pilotaggio ed egli potrà afferrarlo e posizionarlo nella maniera che ritiene più opportuna e comoda per leggere ed interagire con le sue schermate. Nella figura sottostante è rappresentata la schermata iniziale e le tre opzioni che avrà l'utente per interagire con tale schermata.

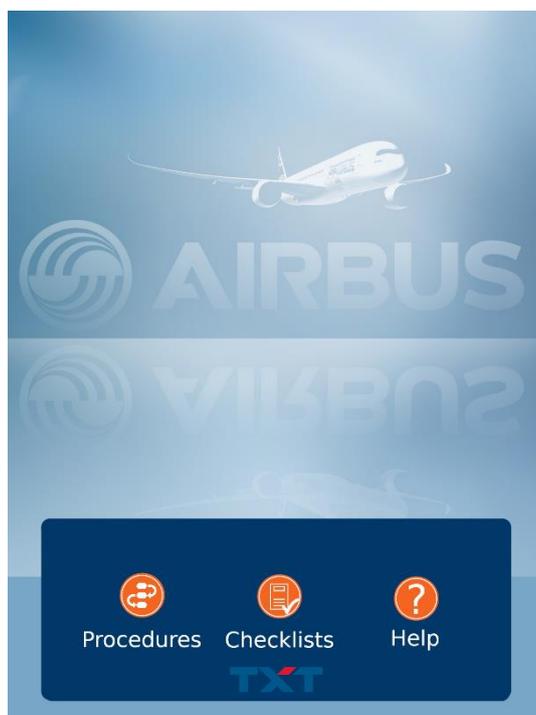


Figura 6.3: Schermata iniziale del Tablet utilizzato in realtà virtuale

Il pulsante *Checklist*, dà accesso alla lista degli step delle procedure, ovvero gli step che il pilota deve svolgere durante le fasi di volo e, nel nostro caso, i passi che l'utente deve controllare di aver svolto al compimento di una procedura. Accedendo alla schermata *Checklist* saranno disponibili due pagine, una contenente le procedure dell'Airbus A320 legate alle *Normal Operations* e nell'altra sarà possibile trovare la *checklist* della *De-icing procedure*. In seguito, sono riportate queste due schermate.

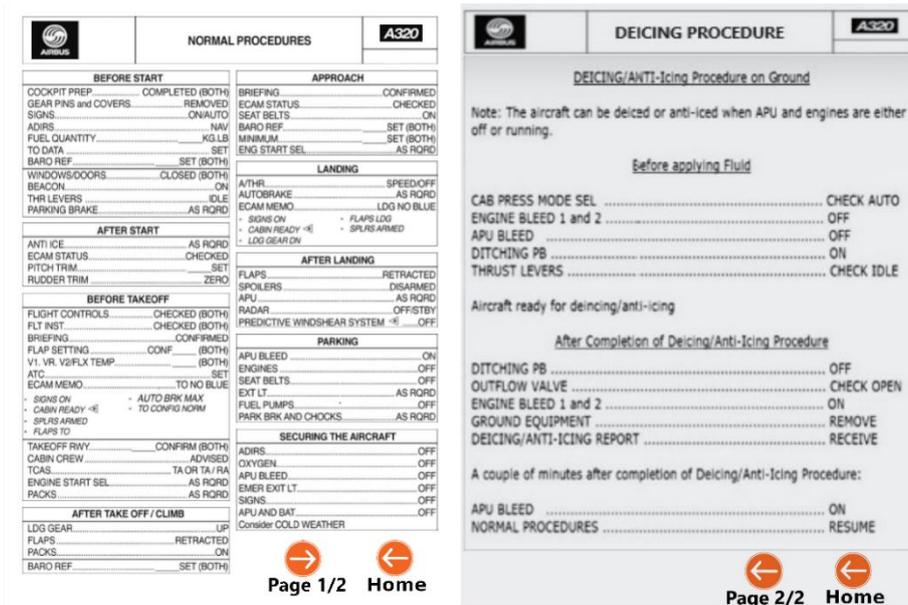


Figura 6.4: Schermate Checklist del Tablet

L'utente, premendo il pulsante *Help*, avrà accesso ad una schermata esplicativa del funzionamento del tablet, in cui è riportato quanto detto finora. Inoltre, in tale schermata, viene spiegato all'utente che al termine dello svolgimento della procedura egli potrà riavviare la stessa o selezionarne una nuova.

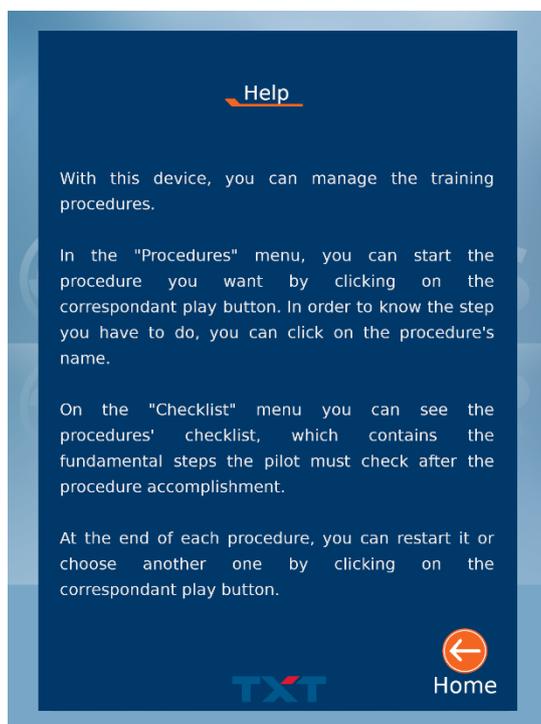


Figura 6.5: Schermata Help del tablet

Infine, selezionando il pulsante *Procedures*, l'utente avrà accesso ad una lista delle procedure dell'Airbus A320 disponibili in questo training di realtà virtuale e, interagendo con questa schermata, l'utente potrà avviare l'addestramento.

Per ogni procedura, esiste la possibilità di selezionare un pulsante *Play* per avviare il training, oppure, di selezionare il nome della procedura e avere accesso alla lista degli step da effettuare nella procedura stessa.

È opportuno evidenziare che, in ognuna di queste schermate, è presente un pulsante *Home* per fare ritorno alla schermata iniziale del tablet.

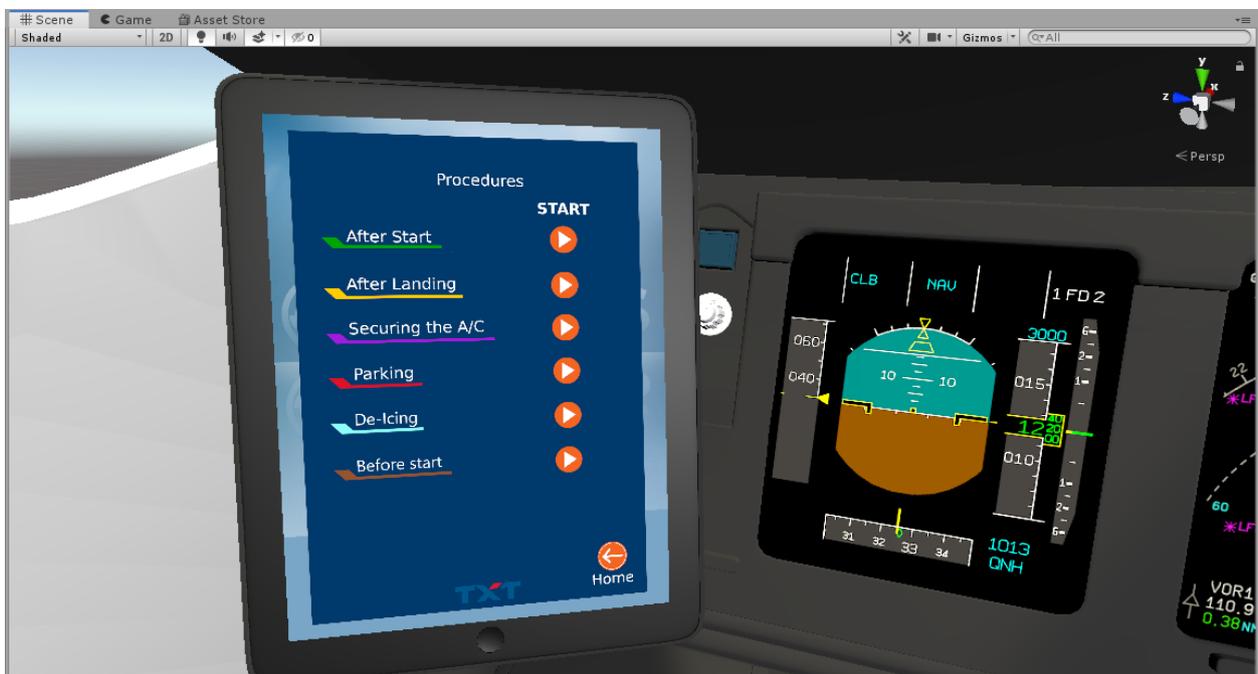


Figura 6.6: Schermata *Procedures* del tablet nell'ambiente VR su Unity

Selezionando, dunque, il nome della procedura in questione, *Before start*, si avrà accesso ad una schermata che riporta gli step di tale procedura, come è possibile osservare nella figura 6.7. In seguito, verrà proposta una descrizione di questi passaggi.

Nel corso della navigazione dell'utente nella successione di nodi della procedura e, dunque, nello svolgimento del training, verrà visualizzato un *tick* in corrispondenza degli step correttamente eseguiti. Anche questi sono osservabili nella figura sottostante. Questi *tick*, una volta conclusa la procedura, verranno rimossi dalla schermata del tablet in modo che questo sia correttamente impostato per un'eventuale ripetizione della procedura stessa.



Figura 6.7: Schermata del tablet con gli step della *Before start procedure*

Si ritiene opportuno riportare i primi nodi del blocco procedurale, rappresentato in figura 6.2, nei quali è digitalizzata la possibilità dell'utente di interagire col tablet per selezionare la procedura della quale si vuole effettuare il training.

Il primo nodo è lo step iniziale, *start step*, ovvero il nodo che dà inizio alla procedura. Successivamente, nel nodo chiamato *Welcome* viene abilitato il tablet, *iPadTxt_Procedures*, e viene visualizzata una *billboard* di benvenuto che invita l'utente a prendere il tablet per selezionare il training d'interesse, vedi figura 6.9. Infine, nel nodo *Procedure starter* sono presenti diverse *exit conditions*, una per ogni procedura, e, selezionando il pulsante *play* corrispondente al training d'interesse, l'utente guiderà la navigazione fra i nodi del progetto creato tramite PaceLab WEAVR.

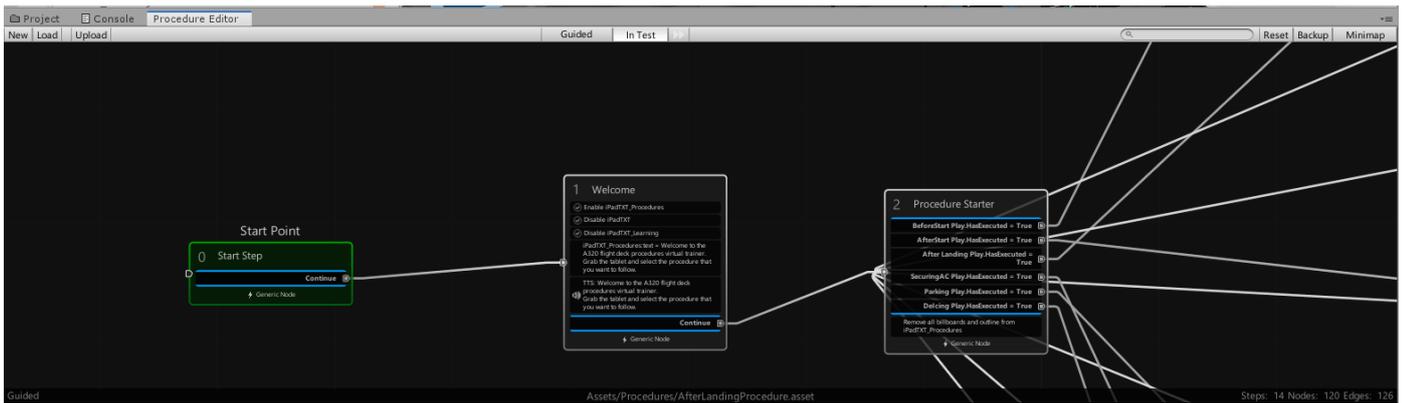


Figura 6.8: Nodi iniziali del blocco progettuale sul Procedure editor



Figura 6.9: Billboard di benvenuto

Una volta, dunque, selezionato il pulsante *play* corrispondente alla *Before start procedure* verrà avviata tale procedura. L'utente sarà guidato nella navigazione fra gli step di questa procedura da delle *billboard* esplicative delle azioni da compiere per passare al nodo successivo e completare il training. Tali *billboard* saranno anche accompagnate da un messaggio vocale, che riprodurrà il testo delle *billboard* stesse, implementato attraverso il componente *Text to Speech* di WEAVR.

Il primo nodo della *Before start procedure*, analogamente al nodo *Welcome* precedentemente descritto, introduce l'utente nella procedura e lo invita a seguire le istruzioni che saranno riportate sulle *billboard*. Per aiutare l'utente nell'individuare prontamente tali istruzioni, apparirà nel suo campo visivo una freccia di navigazione indirizzata verso la *billboard* d'interesse, rappresentata nella figura 6.10.

Inoltre, in questo primo nodo, verranno attivati tutti i *Gameobjects* ed i loro componenti che saranno coinvolti in tale procedura. In aggiunta, saranno impostate le posizioni iniziali di questi componenti a seconda dello stato in cui questi si trovano sul velivolo prima dell'inizio della procedura di *Before start*.



Figura 6.10: Freccia di navigazione che guida l'utente per individuare le *billboard*

6.1.2 Procedure steps

In seguito, saranno descritti i singoli step della *Before start procedure*.

- *Cockpit preparation ... Completed (both)*

Gli obbiettivi della preparazione preliminare del cockpit sono:

- Assicurarsi che tutti i controlli di sicurezza siano stati eseguiti prima di fornire energia elettrica al velivolo;
- Controllare che il livello dei liquidi sia corretto, ovvero controllare il livello dell'olio, la pressione idraulica e quella dell'ossigeno;
- Controllare il corretto posizionamento delle leve delle superfici di controllo (*slats/flaps, parking brake ...*);

- ***Gear pins and covers ... Removed***

In questo step il pilota deve controllare la corretta rimozione dei *gear pins*, ovvero dei perni che bloccano il carrello di atterraggio del velivolo, e delle coperture esterne del velivolo.

È necessario sottolineare come per questi due step iniziali della procedura, all'utente che effettua il training *VR*, non è richiesto di compiere nessuna azione in particolare ma verrà visualizzata una *billboard* che segnala il corretto svolgimento di questi step. Questo è stato dovuto all'impossibilità di implementare questi due passaggi nell'ambiente di realtà virtuale.

- ***Signs ... ON/AUTO***

Tale step consiste nell'impostare in modalità ON gli *switch* del pannello *Integral and Cabin Signs Lighting Control Panel* dell'*Overhead panel*, evidenziato nella seguente figura.

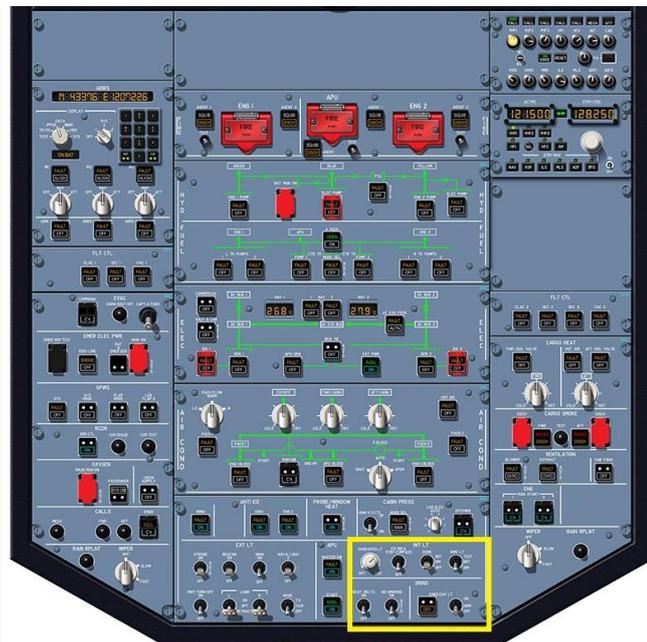


Figura 6.11: *Overhead panel, Integral and Cabin Signs Lighting Control Panel*

In particolare, l'utente dovrà:

- Accendere le luci delle cintura di sicurezza impostando su ON lo *switch* definito come *Seat Belts*;

- Accendere le luci che indicano il divieto di fumare impostando su ON lo *switch* chiamato *No smoking*;
- Attivare la modalità di emergenza premendo il pulsante *Emergency mode*;
- Accendere le luci delle uscite di emergenza impostando su ON lo *switch* chiamato *Emer Exit Lt*, che sta per *Emergency exit lights*;

- **ADIRS ... NAV**

L'*ADIRS* (*Air Data Inertial Reference System*) è un sistema che fornisce informazioni riguardanti i dati aerei (velocità dell'aria, angolo di attacco e pressione) e i riferimenti inerziali (posizione e altitudine). Tali informazioni giungono al pilota, tramite la visualizzazione sui display EFIS, e ad altri sistemi del velivolo come, per esempio, il sistema motori o l'autopilota. In questo step della procedura, dunque, l'utente dovrà impostare i tre *switch* del pannello *ADIRS* in modalità *NAV*.

Questa operazione viene svolta dal pilota prima del volo per iniziare l'allineamento dei sistemi *ADIRS*, ovvero, per impostare la *ground speed* a zero e aggiornare la posizione dell'*Inertial Reference System* (*IRS*) in relazione alle coordinate di riferimento dell'aeroporto. L'allineamento dura all'incirca dieci minuti e deve essere completato prima di qualsiasi movimento del velivolo.

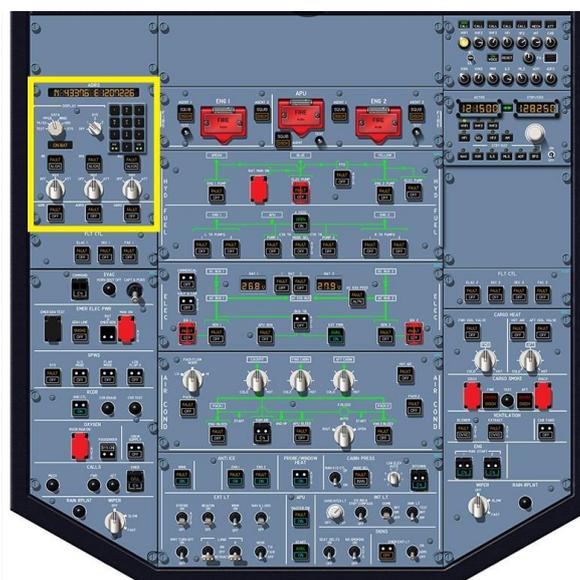


Figura 6.12: Overhead panel, pannello ADIRS

- ***Fuel Quantity ... Kg. Lb***

In questo step l'utente deve controllare la quantità di combustibile disponibile osservando l'*ECAM Upper display*.

È opportuno specificare come per questi tipi di controlli l'utente immerso nell'ambiente di realtà virtuale deve soddisfare la condizione d'uscita *Visually Inspected*, descritta nel quarto capitolo di questo elaborato, ovvero, deve semplicemente osservare il componente indicato dalla *billboard*. In seguito, viene riportata una figura raffigurante il nodo di questo step procedurale e la condizione d'uscita in questione.

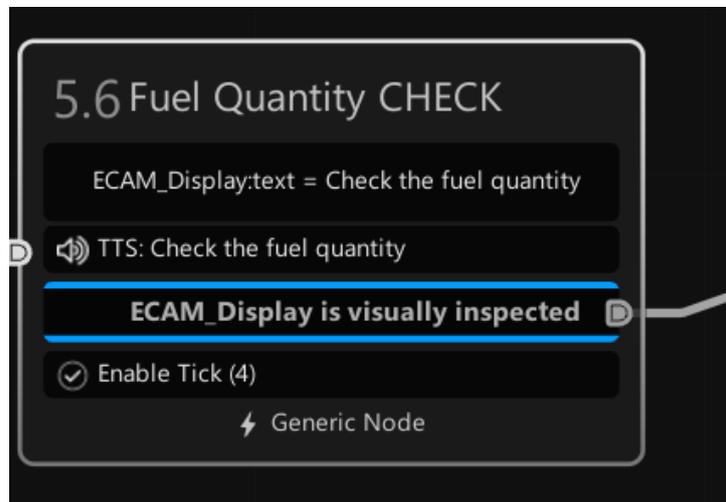


Figura 6.13: Nodo per il controllo del carburante e la condizione d'uscita *Visually inspected*

- ***To Data ... SET***

Questo step procedurale è quello in cui il pilota si occupa di inserire i dati di navigazione e, successivamente, utilizzare tali dati. Attraverso il *FMS*, *Flight Management System*, il pilota può gestire il piano di volo e, mediante l'utilizzo di vari sensori, determinare la posizione del velivolo.

In questa fase di *Before start*, il pilota utilizzando la tastiera dell'*MCDU*, il display che visualizza le informazioni del *FMS*, deve svolgere diversi compiti che sono qui elencati:

- Controllare la validità dei NAVAID, dispositivi fisici a terra che il velivolo utilizza per la navigazione, e dei *waypoints* che sono stati caricati in voli precedenti.
- Verificare che la posizione del velivolo indicata sull'*MCDU* sia corrispondente alla sua reale posizione.
- Compilare la pagina del *MCDU* denominata F-PLN inserendo la *take-off runway*, pista di decollo, i limiti per velocità ed altitudine, il corretto passaggio per i *waypoint* e gli step previsti di salita e discesa in accordo con il piano di volo.
- Controllare la pagina del *MCDU* detta *RAD NAV* e aggiungere manualmente tutti i *NAVAID* richiesti dal piano di volo.

Per quanto concerne il training *VR*, l'utente, non essendoci la possibilità di interagire con l'*MCDU*, dovrà procedere osservando tale display per il tempo necessario a soddisfare la condizione d'uscita *Visually Inspected*.

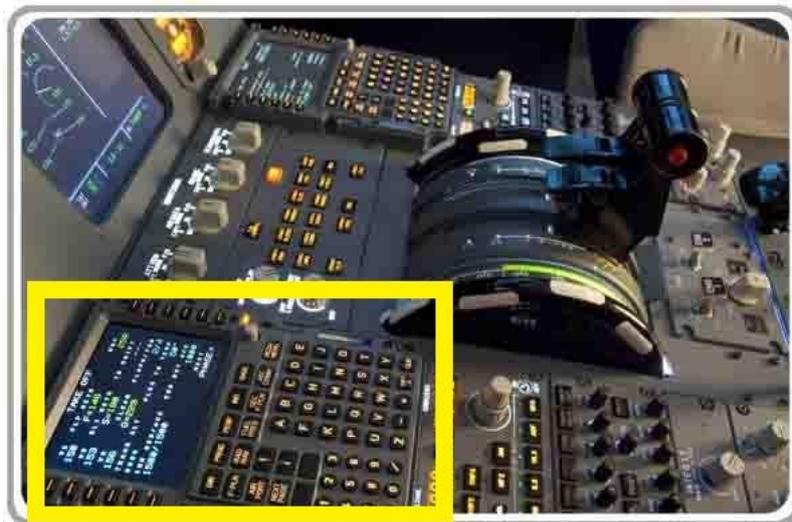


Figura 6.14: *MCDU* sul *pedestal* dell'A320

- ***Baro Ref ... SET (both)***

In questo step il personale di bordo dovrà impostare l'unità di misura della pressione utilizzando l'apposito pulsante sul *front panel* dell'Airbus A320, che è possibile osservare nella figura 6.15. Le due

unità di misura disponibili sono i pollici di mercurio, *inHg*, e gli ettopascal, *hPa*.

Nella simulazione in realtà virtuale l'utente andrà ad interagire con tale pulsante per passare allo step successivo attraverso il *trigger* posteriore dei controller.



Figura 6.15: *Front panel e baro-reference*

- ***Windows/Doors ... Closed (both)***

Questo è il primo step della sezione “*Below the Line*” della *Before start procedure*, che, come detto in precedenza, viene seguita dopo aver ottenuto la *clearance* per la partenza

In tale step il pilota dovrà controllare, attraverso l'*ECAM* display, che le porte e le finestre del velivolo siano correttamente chiuse.

Nell'esperienza *VR* l'utente dovrà svolgere due azioni per passare al nodo successivo. Innanzitutto, dovrà interagire con il pannello di controllo dell'*ECAM* premendo il pulsante “*Door*” in modo tale da modificare la schermata visualizzata sul display. La schermata che apparirà nell'ambiente virtuale sarà effettivamente quella utilizzata dai piloti per controllare lo stato di porte e finestre, si osservi la figura 6.16 nella pagina seguente. Dunque, l'utente dovrà procedere osservando il display dell'*ECAM*, come da prassi per questo tipo di controlli.

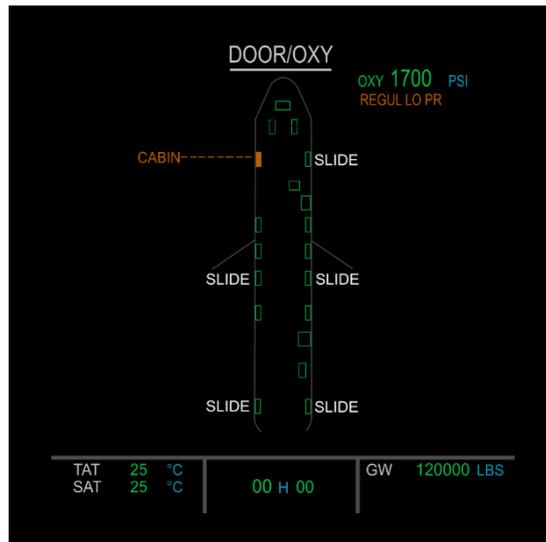


Figura 6.16: Schermata “door” dell’ECAM display

- **Beacon ... ON**

L’utente dovrà impostare su ON lo *switch* del *beacon* sull’*overhead panel*. Questo servirà ad attivare il radiofaro del velivolo per consentire la sua localizzazione e identificazione. Nella figura 6.17 è indicata la posizione di questo *switch*.

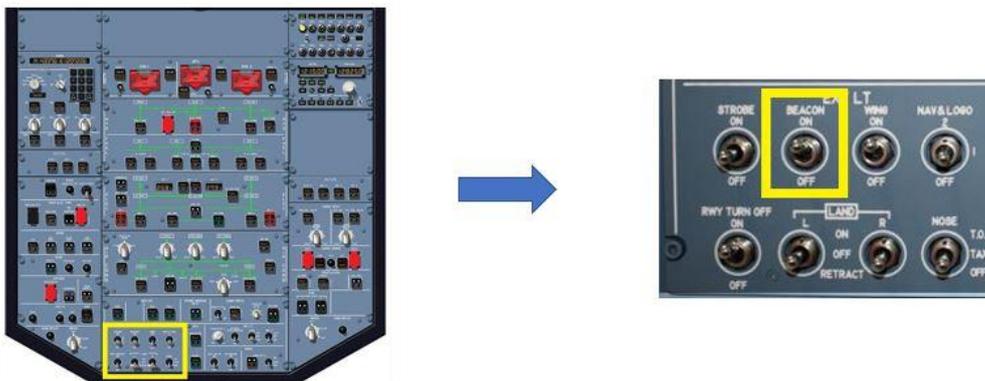


Figura 6.17: Switch del Beacon sull’overhead panel

- **Thr Levers ... IDLE**

In tale step, il pilota, e quindi l’utente immerso nell’ambiente virtuale, dovrà controllare che la posizione dei comandi dei *thrusters*, ovvero i propulsori, sia impostata su un funzionamento in *IDLE*.

Tale termine indica che i motori stanno funzionando al minimo ed è la condizione richiesta prima di procedere con il decollo.

- ***Parking Brake ... AS RQRD***

Questo ultimo passaggio della procedura richiede al pilota di controllare che la posizione del *Parking Brake*, ovvero del freno di stazionamento del velivolo, sia quella prevista, come indica la sigla “*AS RQRD*” che sta per *as required*, ovvero come richiesto.

La posizione del freno di stazionamento prevista per questa fase di volo è su ON. Nella figura 6.18 è raffigurata la posizione del *parking brake* sul *pedestal* dell’A320.

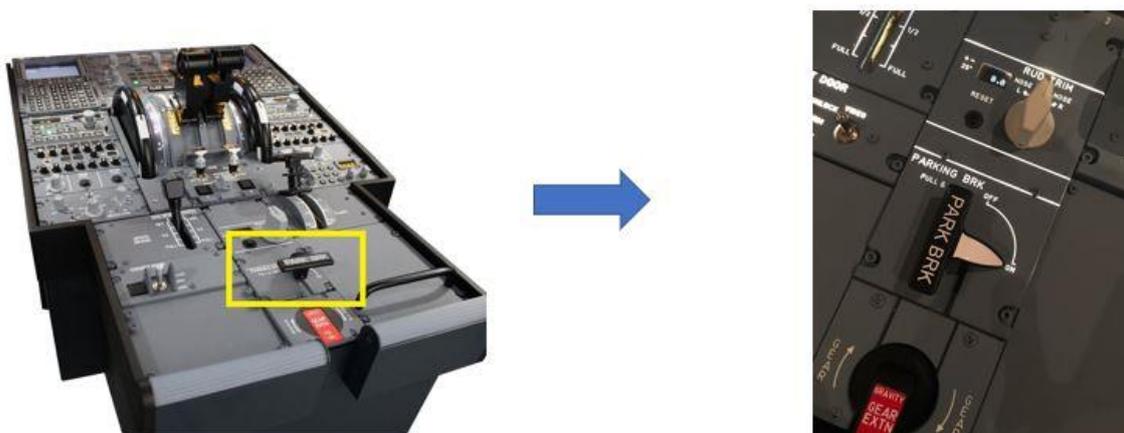


Figura 6.18: *Pedestal dell’A320 e parking brake*

Terminato quest’ultimo step la procedura di *Before start* sarà conclusa e, dunque, l’utente immerso nell’ambiente di realtà virtuale dovrà controllare la *checklist* tramite il tablet. Successivamente, avrà la possibilità di ripetere la procedura o di selezionarne una nuova, continuando così ad effettuare il training *VR*. Questo sarà spiegato all’utente sempre attraverso lo strumento delle *billboard*.

In seguito, sono riportate delle immagini raffiguranti i nodi della procedura di *Before Start* nel *Procedure Editor* di WEAVR. È opportuno indicare che, per quei nodi che sono stati utilizzati come esempi esplicativi di concetti trattati precedentemente in questo elaborato di tesi, verrà solo riportato il numero della figura di riferimento.

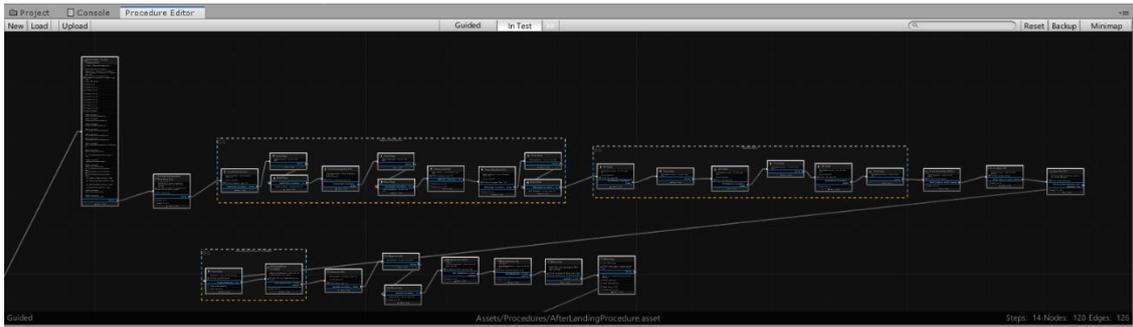


Figura 6.19: Before start procedure sul Procedure editor di WEAVR

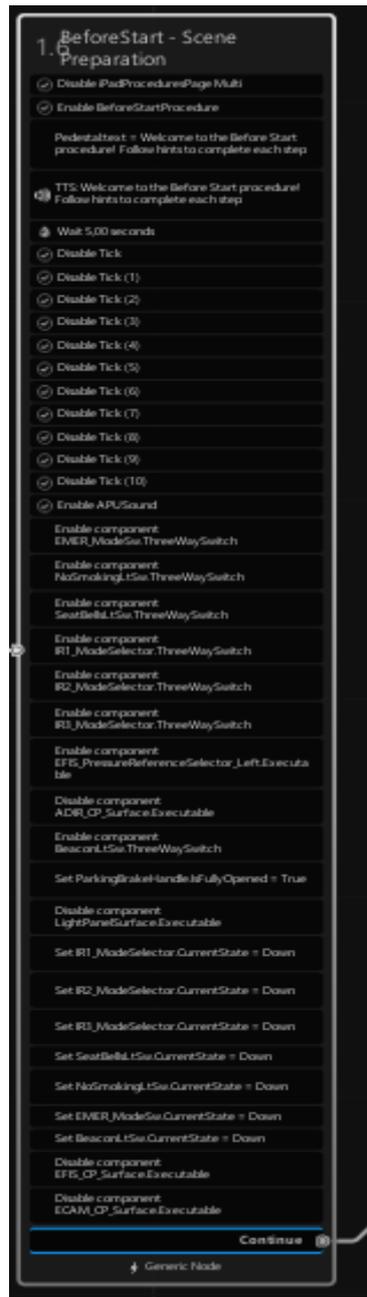


Figura 6.20: Nodo introduttivo della Before start Procedure

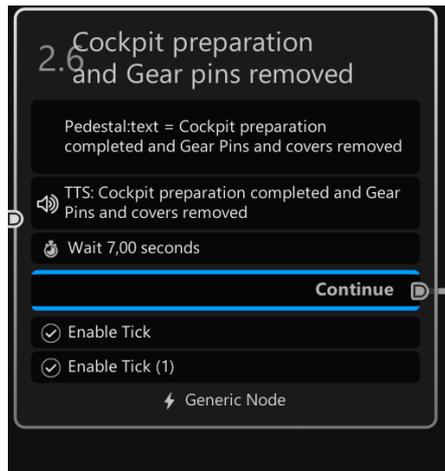


Figura 6.21: Cockpit preparation and Gear pins

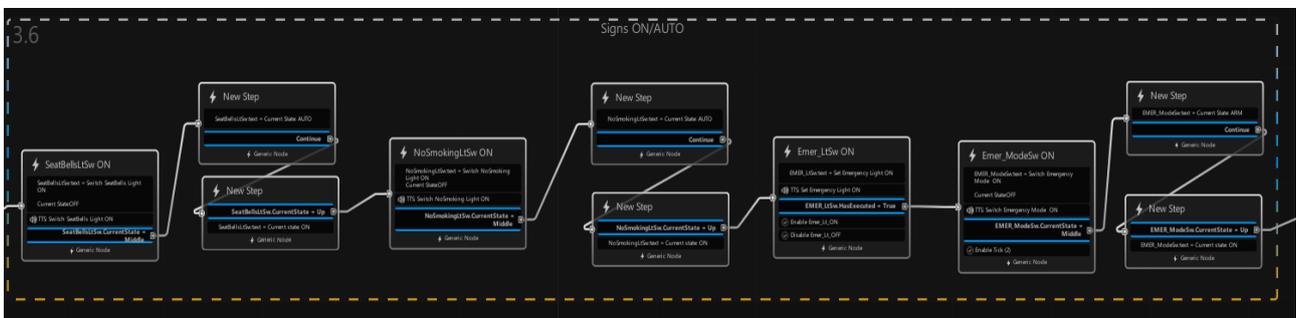


Figura 6.22: Signs ON

Per visualizzare i nodi relativi agli step “ADIRS ... NAV” e “Fuel Quantity ... Kg. Lb” si fa riferimento rispettivamente alle figure 4.11 e 6.13.

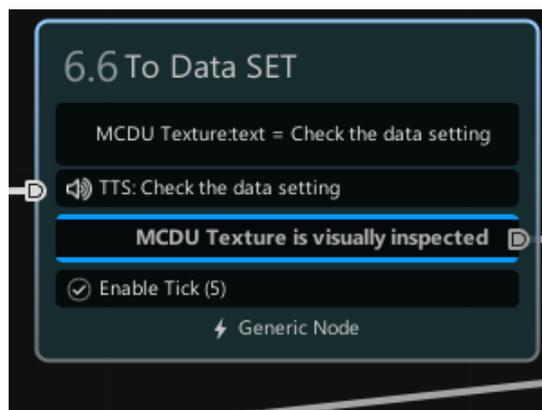


Figura 6.23: Data SET

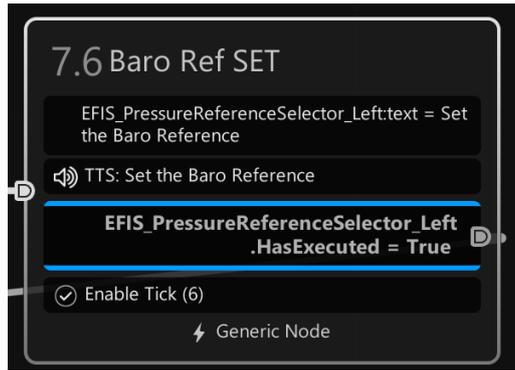


Figura 6.24: Baro reference SET

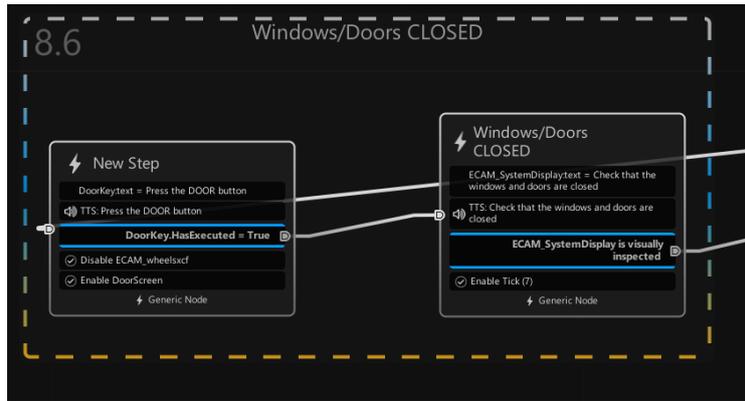


Figura 6.25: Windows/Doors Closed

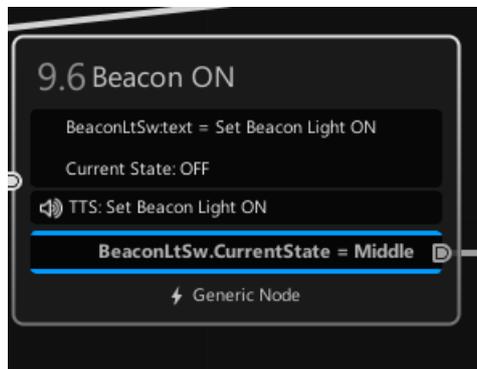


Figura 6.26: Beacon ON

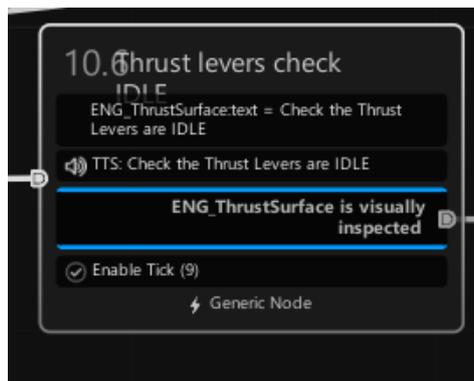


Figura 6.27: Thrust Levers IDLE

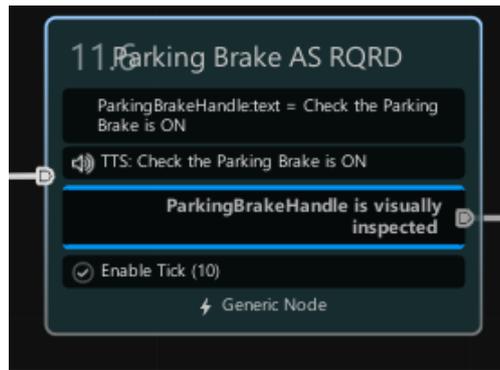


Figura 6.28: Parking Brake as required

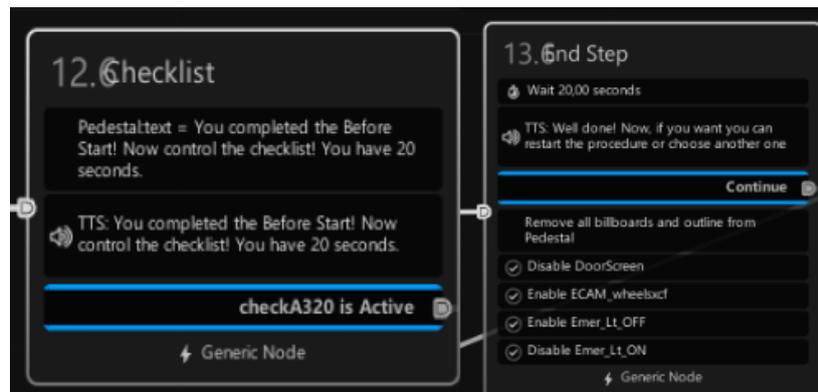


Figura 6.29: Final steps

6.2 De-icing Procedure

La *De-icing procedure* non appartiene alla classe delle *Normal Operations* prima descritte, ma nel manuale dell'A320, il *Flight Crew Training Manual (FCTM)* [1.18], viene inserita nel capitolo intitolato *supplementary information*. In particolare, si trova nella sezione *Adverse weather* che riguarda le operazioni da compiere quando il velivolo si ritrova in circostanze di condizioni climatiche avverse.

Questa procedura è finalizzata a rimuovere il ghiaccio o a prevenire il suo accumulo sulle superfici del velivolo fino all'inizio del decollo dello stesso. Tale operazione viene svolta mediante l'utilizzo di fluidi appositi che non devono permanere sulle superfici del velivolo al momento del decollo per non inficiare le performance di volo dello stesso.

DEICING PROCEDURE		A320
<u>DEICING/ANTI-Icing Procedure on Ground</u>		
Note: The aircraft can be deiced or anti-iced when APU and engines are either off or running.		
<u>Before applying Fluid</u>		
CAB PRESS MODE SEL		CHECK AUTO
ENGINE BLEED 1 and 2		OFF
APU BLEED		OFF
DITCHING PB		ON
THRUST LEVERS		CHECK IDLE
Aircraft ready for deicing/anti-icing		
<u>After Completion of Deicing/Anti-Icing Procedure</u>		
DITCHING PB		OFF
OUTFLOW VALVE		CHECK OPEN
ENGINE BLEED 1 and 2		ON
GROUND EQUIPMENT		REMOVE
DEICING/ANTI-ICING REPORT		RECEIVE
A couple of minutes after completion of Deicing/Anti-Icing Procedure:		
APU BLEED		ON
NORMAL PROCEDURES		RESUME

Figura 6.30: Checklist della De-icing procedure

Nella figura 6.30 è riportata la *checklist* di questa procedura. Si noti come questa è suddivisa in due sezioni che indicano le azioni da svolgere prima e dopo aver applicato i fluidi appositi per l'operazione di *de-icing*.

Adesso saranno elencati e descritti i vari step della procedura. Essendo alcuni di questi passaggi collegati fra loro, delle volte verrà fornita una descrizione per più di uno step per volta.

- ***Cab Press Mode Sel ... Check Auto***

Controllare che la gestione della pressurizzazione in cabina sia in modalità AUTO.

- ***Engine Bleed 1 and 2 ... OFF***

- ***APU Bleed ... OFF***

- ***Ditching PB ... ON***

Tutti i pulsanti relativi ai motori e ai *bleed* dell'APU devono essere impostati su OFF e quello del *ditching* su ON. Questo viene fatto per prevenire qualsiasi tipo di ingestione dei fluidi per il *de-icing* da parte

dei motori. Infatti, il pulsante del *ditching* attiva una funzione del velivolo che chiude tutte le prese d'aria, valvole e altre aperture sulla parte inferiore dello stesso.

Il velivolo, infatti, può essere sottoposto alla procedura di *de-icing* solo se i motori e l'APU sono spenti.

- ***Thrust Levers ... Check Idle***

Una volta spenti i motori, bisognerà controllare che le leve dei propulsori siano posizionate in modo da corrispondere ad un funzionamento al minimo dei motori.

In dipendenza della severità delle condizioni climatiche, l'applicazione dei fluidi antigelo avrà una durata differente. Potrebbe essere necessaria anche una doppia applicazione di due diversi fluidi, uno per riscaldare e scongelare il velivolo ed il secondo con funzione preventiva alla formazione di nuovo ghiaccio.

- ***Ditching PB ... OFF***

- ***Outflow Valve ... Check Open***

Con questi step si passa alla seconda sezione della procedura in quanto è stata completata l'operazione di *de-icing* e rimosso il ghiaccio indesiderato dalle superfici del velivolo.

Dunque, è possibile disattivare la funzione di *ditching*. Inoltre, è richiesta al pilota un'ulteriore verifica che tale funzione sia stata correttamente disattivata. Infatti, egli dovrà controllare che la valvola di *outflow* sia aperta.

- ***Engine Bleed 1 and 2 ... ON***

Terminate le operazioni di *de-icing* non sarà più presente il rischio di un'ingestione dei fluidi antigelo da parte dei motori. Di conseguenza questi potranno essere riattivati.

- ***Ground Equipment ... Remove***

Al termine delle operazioni di *de-icing* sarà necessario effettuare un'ispezione esterna del velivolo. Questo per controllare che il ghiaccio sia stato effettivamente rimosso e, successivamente, rimuovere l'equipaggiamento utilizzato per applicare i fluidi antigelo.

- ***De-icing/Anti-icing Report ... Receive***

Deve essere stilato un report delle operazioni di *de-icing* per indicare il tipo di fluido utilizzato, quando tale fluido è stato applicato e per quanto tempo.

- ***APU Bleed ... ON***

È necessario che trascorra qualche minuto dal termine delle operazioni di *de-icing* prima di riattivare i *Bleed* dell'APU. Questo per permettere al fluido antigelo di lasciare la superficie del velivolo ed evitare ingestioni.

- ***Normal Procedure ... Resume***

Si può dunque considerare conclusa la procedura di *de-icing* ed il personale di bordo potrà riprendere a seguire le procedure che gestiscono le *normal operations*.

Come affermato in precedenza, per una descrizione più dettagliata della *de-icing procedure* e della sequenza di nodi creata sul supporto PaceLab WEAVR, si fa riferimento all'elaborato di tesi redatto dal mio collega Andrea Pavone, con il quale ho collaborato nella digitalizzazione di entrambe le procedure e nella gestione del training. Elaborato dal titolo "Digitalizzazione e analisi di procedure operative per l'addestramento di piloti in ambiente di realtà virtuale".

7 Analisi del training in realtà virtuale

Una volta terminata la digitalizzazione delle procedure, utilizzando il supporto PaceLab WEAVR, è stato organizzato un test mirato al confronto fra il training classico sul desktop di un computer, che si definisce *computer-based*, e il training in realtà virtuale. Per questo confronto è stata utilizzata la procedura di *Before start* precedentemente descritta. Gli utenti che hanno partecipato a questo test sono stati divisi in un gruppo che ha effettuato il training su computer, mediante una presentazione *power-point*, ed il gruppo che ha effettuato il training in realtà virtuale.

Come detto nel paragrafo 3.2 di questo elaborato di tesi, il training in ambiente *VR* può essere di grande successo per l'apprendimento di specifici compiti in cui un addestramento nel mondo reale risulta essere impraticabile. Inoltre, questo tipo di addestramento, essendo immersivo, permette un'interazione fisica con il sistema di training maggiore rispetto ad un training classico su carta o su desktop. La qualità dell'immersione data da sistemi *VR* produce un senso di presenza all'interno dell'ambiente di training che può condurre a dei migliori risultati. In particolare, offre una soluzione ideale per l'apprendimento di nuove conoscenze che necessitano un approccio visivo, uditivo e cinestetico, ovvero basato sul movimento.

Con queste premesse, dunque, il risultato atteso da questo confronto è che l'esperienza in realtà virtuale risulti più significativa per chi si sottopone al training e che conduca a migliori risultati restando più impressa nella memoria degli utenti. Infatti, ci si aspetta che il gruppo che effettua il training in realtà virtuale sviluppi una memoria motoria e visiva che conduca ad un migliore apprendimento degli step della procedura.

È opportuno indicare come, viste le ristrettezze dovute all'emergenza legata al Covid-19 presenti al momento dello sviluppo di questo elaborato di tesi, non è stato possibile far partecipare il numero voluto di candidati. Infatti, è risultato difficile permettere l'accesso ai laboratori del Politecnico ad un

numero elevato di persone e reperire candidati in grado di partecipare al training.

Quindi, i dati che verranno riportati in seguito sono basati su un campione ridotto e si riserva per il futuro la possibilità di effettuare questo confronto con un maggior numero di candidati in modo da accrescere la validità dello studio proposto.

7.1 Organizzazione del test

Come precedentemente anticipato, i candidati sono stati divisi in due gruppi, che da ora in poi verranno chiamati come gruppo *VR*, composto da coloro che hanno effettuato il training in realtà virtuale, e gruppo *computer-based*, i membri del quale hanno seguito il training sul desktop del computer attraverso una presentazione *power-point*. Per le motivazioni prima spiegate, i gruppi sono composti da tre persone per il gruppo *VR* e due per il gruppo *computer-based*.

Una volta effettuato il training, i membri di entrambi i gruppi sono stati sottoposti ad un esame su simulatore fisico in cui hanno riprodotto i passaggi della procedura di *Before start* e sono stati valutati in base alla correttezza della loro prestazione. Infatti, in base all'azione svolta dal candidato è stato attribuito un punteggio secondo una scala di valori che verrà riportata in seguito.

Al gruppo *computer-based* è stato fornito una presentazione power-point, disponibile all'Appendice A di questo elaborato, in cui veniva introdotta la *Before start procedure* con un breve riassunto della sua funzione e delle sue caratteristiche. Nella slide successiva è stata inserita la *checklist* della procedura in questione.

In seguito, nella presentazione sono stati descritti tutti gli step che compongono la procedura, spiegandone le caratteristiche e avvalendosi di immagini per indicare al candidato la posizione degli oggetti all'interno del *cockpit* dell'A320 con i quali i piloti interagiscono per attuare la procedura. È possibile osservare alcune di queste immagini nel paragrafo 6.1.2 di questo

elaborato di tesi, utilizzate per la descrizione degli step della *Before start procedure*.

Alla fine della presentazione è stato inserito un video in lingua inglese preso da *YouTube* che i candidati del gruppo *computer-based* hanno avuto la possibilità di visualizzare. In questo video, utilizzando un software che riproduce sul monitor il *cockpit* dell'A320, viene spiegata la procedura di *Before start* andando ad effettuare tutti i passaggi che la compongono e descrivendone brevemente il significato [2.23].

I membri del gruppo *VR*, invece, hanno utilizzato il sistema di realtà virtuale *HTC Vive Pro*, descritto nel terzo capitolo di questo elaborato, per immergersi nell'ambiente del *cockpit* dell'Airbus A320. I candidati, dunque, hanno effettuato la procedura di *Before start* di cui si è parlato nel sesto capitolo.

Ad entrambi i gruppi è stata proposta un'organizzazione delle tempistiche del training che prevedeva due periodi di quindici minuti di studio, intervallati da una pausa di cinque minuti. Però, durante l'esecuzione dei training, ci si è reso conto che tutti i candidati si sono ritenuti pronti per effettuare l'esame su simulatore fisico prima del trascorrere di questi tempi e si è considerato opportuno lasciare libertà ai candidati stessi di gestire le tempistiche del training. In seguito, verrà riportata la durata dell'addestramento di ogni singolo candidato.

È necessario sottolineare come ai membri del gruppo *VR* è stato concesso un tempo di adattamento all'ambiente e agli strumenti di realtà virtuale, che non è stato considerato nella durata del training. Questo periodo di adattamento, della durata di circa cinque minuti, è indispensabile per permettere all'utente di prendere dimestichezza con l'ambiente virtuale e con le modalità di interazione con gli oggetti ivi presenti. Ovviamente, in questo periodo, i candidati non hanno preso parte alla procedura di *Before start*. Si evidenzia come questo tempo di adattamento è necessario solo al primo approccio del candidato con gli strumenti *VR* e, quindi, non è di forte impatto sulle tempistiche generali del training.

Una volta effettuato il training, i candidati sono stati sottoposti ad un esame effettuato sul simulatore fisico del velivolo Airbus A320 presente nel laboratorio di simulazione del volo del Politecnico di Torino. A causa dell'assenza su tale simulatore fisico dell'*Overhead panel*, è stato utilizzato, in alternativa, un pannello di legno con una stampa raffigurante lo stesso, in modo tale che i partecipanti al test potessero indicare i pulsanti necessari per lo svolgimento della procedura.



Figura 7.1: *Overhead panel* utilizzato per l'esame su simulatore fisico

Ai candidati è stato richiesto di riprodurre le azioni presentate durante il training per eseguire la procedura di *Before start*. Durante l'esame sono stati supportati tramite la lettura *step-by-side* della *checklist* di questa procedura, osservabile nella figura 6.1.

Affiancandoli durante lo svolgimento dell'esame è stato possibile riportare la corretta esecuzione della procedura assegnando un punteggio per ogni singolo step. I punteggi sono stati così organizzati:

- 1 punto: Azione eseguita correttamente (pulsante esatto, check corretto ...);

- 0.75 punti: Pulsante selezionato adiacente a quello corretto;
- 0.5 punti: Pulsante selezionato sullo stesso pannello di quello corretto;
- 0.25 punti: Pulsante selezionato nella stessa zona di quello corretto (*overhead panel, front panel e pedestal* sono le tre zone considerate);
- 0 punti: Azione non eseguita/ eseguita in maniera errata

A tutti i membri di entrambi i gruppi è stato poi richiesto di far ritorno al laboratorio a distanza di una settimana per effettuare nuovamente l'esame su simulatore fisico.

Questo è stato fatto in modo tale da testare la persistenza delle informazioni assimilate nel tempo nella memoria dei candidati. Anche in questo caso il risultato atteso era quello di avere una migliore resa per il gruppo *VR*, aspettandosi che l'aver eseguito la procedura fisicamente immersi nell'ambiente di realtà virtuale contribuisse ad una migliore memoria motoria della procedura stessa.

7.2 Risultati del test

I punteggi sono stati poi riportati sulle tabelle sottostanti per ogni candidato, dividendoli nei due gruppi *VR* e *computer-based*. In queste tabelle, oltre ai punteggi per ogni singolo step, sono riportate anche le durate del training e dell'esame su simulatore fisico.

Gruppo VR		SIGNS...ON				ADIRS...NAV			FUEL_QTY	TO_DATA...SET	BARO_REF...SET
Candidato	Tempo studio [min]	SeatBeltsSw	NoSmokingSw	EmerMode	EmerSw	IR1	IR2	IR3	ECAMCheck	MCDUcheck	BaroRefButton
1	13	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	20	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3	16	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
WINDOW/DOOR...CLOSED		BEACON...ON	THR_LEV...IDLE	PARKBREAK_AS RQRD		Punteggio	Tempo esecuzione test [min]				
Candidato	DoorKey	ECAMCheck	BeaconSw	ThrLeversCheck	ParkBreakOn						
1	1	1	1	1	1	15	1:13				
2	1	0	1	1	1	14	1:37				
3	1	1	0,75	1	1	14,75	1:20				
Gruppo Computer-based		SIGNS...ON				ADIRS...NAV			FUEL_QTY	TO_DATA...SET	BARO_REF...SET
Candidato	Tempo studio [min]	SeatBeltsSw	NoSmokingSw	EmerMode	EmerSw	IR1	IR2	IR3	ECAMCheck	MCDUcheck	BaroRefButton
1	8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	14	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
WINDOW/DOOR...CLOSED		BEACON...ON	THR_LEV...IDLE	PARKBREAK_AS RQRD		Punteggio	Tempo esecuzione test [min]				
Candidato	DoorKey	ECAMCheck	BeaconSw	ThrLeversCheck	ParkBreakOn						
1	1	1	0,75	1	1	14,75	1:18				
2	1	1	1	1	1	15	0:54				

Tabella 7.1: Risultati esame su simulatore fisico, prima iterazione

Possiamo osservare come la durata dell'esame, riportata come "tempo esecuzione test", sia relativamente la stessa fra tutti i candidati aggirandosi attorno alla durata di un minuto. Più significativo è il dato sulla durata del training, "tempo studio". Per il gruppo *VR* in media il training ha avuto una durata di 16,3 minuti, tempo più lungo della durata media dell'addestramento del gruppo *computer-based* che è di 11 minuti. Questo può essere dovuto al fatto che tutti i candidati del gruppo *VR* erano alla loro prima esperienza di realtà virtuale e quindi, nonostante il periodo di adattamento a loro concesso, hanno avuto bisogno di ripetere la procedura più volte per assimilarne gli step. Invece, i membri del gruppo *computer-based*, entrambi studenti o laureati del Politecnico di Torino, hanno affrontato un training che si basava su un tipo di apprendimento più simile a quello utilizzato durante il loro percorso di studi. Questo, si ipotizza, ha permesso loro di assimilare più rapidamente i passaggi della procedura di *Before start*.

Inoltre, questa differenza fra le tempistiche del training dei due gruppi potrebbe essere dovuta ad una migliore *user experience* del training in realtà virtuale, che potrebbe aver intrattenuto per più tempo i candidati, ai quali, infatti, non era stato richiesto di completare il training rapidamente. In quest'ottica, si potrebbe affermare che il training *computer-based* risulti meno interessante e dilettevole di quello in realtà virtuale.

Per quanto riguarda i punteggi ottenuti dai singoli candidati è possibile osservare la figura 7.2 sottostante.

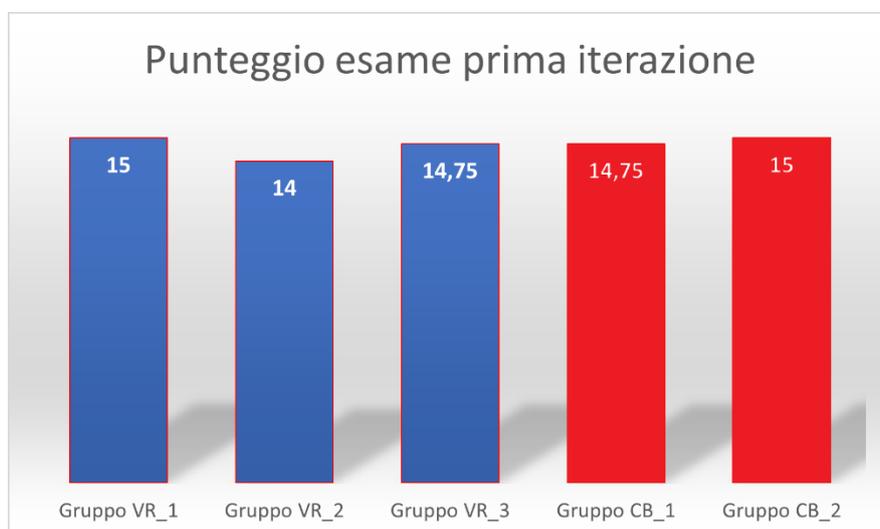


Figura 7.2: Punteggio esame prima iterazione

In tale grafico si osservano in blu i punteggi dei candidati del gruppo *VR* ed in rosso quelli dei membri del gruppo *computer-based*. Nella parte introduttiva di questo capitolo si era ipotizzato un miglior rendimento del training *VR* per le sue caratteristiche immersive. Ciò nonostante, possiamo notare una mancanza di differenza fra i risultati ottenuti dai due gruppi, che in media hanno totalizzato punteggi di 14,58 per il gruppo *VR* e 14,88 per quello *computer-based*. Infatti, tutti i candidati hanno ottenuto un punteggio massimo o commesso un errore in uno solo degli step della procedura, errore che si può considerare trascurabile. Il punteggio massimo, infatti, è 15 su altrettanti singoli step di questa procedura, quindi, dai punteggi ottenuti si deduce che nel breve termine, l'esame su simulatore fisico è stato effettuato immediatamente dopo il training, non ci sono differenze fra i due tipi di addestramento.

Per spiegare le motivazioni di tale mancanza di differenze fra i due gruppi è possibile prendere spunto dai risultati ottenuti da uno studio sul training *VR* “The Effectiveness of Virtual Reality for Administering Spatial navigation Training to Firefighters”, descritto nel paragrafo 3.2 di questo elaborato [1.12]. In questo studio, in maniera analoga, i risultati ottenuti dal confronto fra training *VR* e training classico su carta non presentano variazioni significative, nonostante ci si attendesse un miglior rendimento dell'addestramento in realtà virtuale.

Le motivazioni annesse sono molteplici e ben si prestano a spiegare i risultati ottenuti dal confronto fatto in questo elaborato di tesi. In primo luogo, si può affermare che entrambi i tipi di addestramento hanno raggiunto il massimo rendimento possibile viste le caratteristiche del test stesso. Infatti, a causa delle circostanze in cui tale analisi è stata svolta e al campione ristretto di candidati, è stato possibile far partecipare al test solo esperti del settore aeronautico, docenti, ricercatori o studenti del dipartimento di ingegneria aerospaziale del Politecnico di Torino. Questo campione di persone, dunque, aveva già familiarità con il *cockpit* dell'Airbus A320 e con il simulatore fisico, e si pensa che questo fattore abbia influenzato il rapido apprendimento della procedura e il raggiungimento di ottimi risultati.

Un'altra motivazione di questa mancanza di differenza fra i due tipi di training può essere quella della maggiore confidenza dei candidati con uno studio classico basato su un testo scritto. Questo, può aver pareggiato i vantaggi dell'immersione e dell'apprendimento cinestetico dati dal training VR.

Saranno ora analizzati i risultati ottenuti nella seconda iterazione dell'esame, effettuata dopo una settimana dal training. Si sottolinea come ai candidati non è stata data la possibilità di addestrarsi nuovamente sulla procedura di *Before start* e, dunque, i risultati ottenuti si basano sull'apprendimento legato all'unico training effettuato una settimana prima di questa seconda iterazione.

Ripetizione Test dopo una settimana										
Gruppo VR										
Candidato	SIGNS...ON				ADIRS...NAV			FUEL_QTY	TO_DATA...SET	BARO_REF...SET
	SeatBeltsSw	NoSmokingSw	EmerMode	EmerSw	IR1	IR2	IR3	ECAMCheck	MCDUcheck	BaroRefButton
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1	1	0,5	1	1
3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Gruppo Computer-Based										
Candidato	SIGNS...ON				ADIRS...NAV			FUEL_QTY	TO_DATA...SET	BARO_REF...SET
	SeatBeltsSw	NoSmokingSw	EmerMode	EmerSw	IR1	IR2	IR3	ECAMCheck	MCDUcheck	BaroRefButton
1	0,5	0,5	0,5	0,5	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1	1	0,5	1	1
Gruppo VR										
Candidato	WINDOW/DOOR...CLOSED		BEACON...ON	THR_LEV...IDLE	PARKBREAK...AS RQRD	Punteggio	Tempo esecuzione test [min]			
	DoorKey	ECAMCheck	BeaconSw	ThrLeversCheck	ParkBreakOn					
1	1	0	1	1	1	14	1:10			
2	1	1	1	1	1	14,5	01:05			
3	1	1	1	1	1	15	01:14			
Gruppo Computer-Based										
Candidato	SIGNS...ON				ADIRS...NAV			FUEL_QTY	TO_DATA...SET	BARO_REF...SET
	SeatBeltsSw	NoSmokingSw	EmerMode	EmerSw	IR1	IR2	IR3	ECAMCheck	MCDUcheck	BaroRefButton
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1	1	0,5	1	1
Gruppo VR										
Candidato	WINDOW/DOOR...CLOSED		BEACON...ON	THR_LEV...IDLE	PARKBREAK...AS RQRD	Punteggio	Tempo esecuzione test [min]			
	DoorKey	ECAMCheck	BeaconSw	ThrLeversCheck	ParkBreakOn					
1	1	1	1	1	1	13	01:08			
2	1	0,5	1	1	1	14	01:22			

Tabella 7.2: Risultati esame su simulatore fisico, seconda iterazione

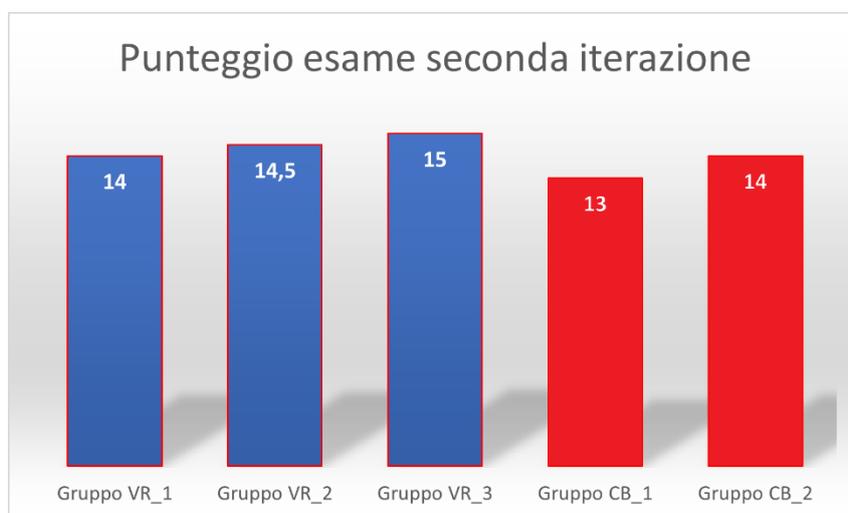


Figura 7.3: Punteggio esame seconda iterazione

Dai risultati ottenuti da questa seconda iterazione possiamo notare una leggera differenza a vantaggio del gruppo *VR*. Infatti, in media i due gruppi hanno totalizzato punteggi di 14,5 per il gruppo *VR* e 13,5 per quello *computer-based*. Tale differenza, seppur minima, si pensa sia dovuta al fattore immersivo del training di realtà virtuale e alla possibilità che i membri del gruppo *VR* hanno avuto di effettuare fisicamente la procedura durante l'addestramento. Questa osservazione deriva anche dai commenti fatti dai candidati di questo gruppo che hanno affermato di ricordare i movimenti fatti nell'ambiente virtuale durante il training.

Quindi, basandosi sulle percentuali di peggioramento dei risultati ottenuti dai due gruppi a distanza di una settimana dal training, si potrebbe affermare una maggiore persistenza nel tempo dell'apprendimento ottenuto mediante il training in realtà virtuale. Infatti, in media, il punteggio del gruppo *VR* è rimasto stabile passando da 14,58 a 14,5, con una percentuale di peggioramento pari a -0,5%. Invece, il gruppo *computer-based* ha riportato una percentuale di peggioramento pari a -9%, passando, a distanza di una settimana, da un punteggio medio di 14,88 a 13,5. Ancora una volta si sottolinea come lo scarso numero di candidati non permette affermazioni certe sui risultati ottenuti, ma il training *VR* sembrerebbe portare ad una migliore persistenza dell'apprendimento.

A conclusione, si pensa sia opportuno effettuare un ulteriore confronto fra i due tipi di training mantenendo invariante le modalità ma aumentando il campione di candidati per accrescere la validità dell'analisi.

In secondo luogo, potrebbe essere opportuno anche aumentare gli step ed il numero delle procedure su cui il training è incentrato, in modo da accrescere la difficoltà del test ed ottenere risultati più distanti dal punteggio massimo. Questo non è stato possibile, visto che i candidati che si sono offerti volontari durante questo test hanno dovuto farlo negli orari lavorativi e, dunque, non è stato ritenuto opportuno richiedere loro più tempo di quanto già ci era stato gentilmente concesso.

7.3 Questionario *VR*

Per valutare la qualità dell'esperienza in realtà virtuale dei candidati è stato chiesto loro di compilare un questionario di dieci domande, che andava a porre quesiti riguardanti le loro sensazioni in relazione all'esperienza di realtà virtuale in cui si sono immersi. Per la compilazione di tale questionario, disponibile nell'Appendice B di questo elaborato di tesi, si è preso spunto dal “*Presence questionnaire*” di Witmer e Singer, questionario del 1994 che raccoglie informazioni sull'esperienza di utenti che hanno avuto la possibilità di provare un'esperienza *VR* [1.19].

Anche i membri del gruppo *computer-based*, una volta effettuato il training e l'esame su simulatore fisico, hanno avuto la possibilità di immergersi nell'ambiente di realtà virtuale del *cockpit* dell'A320 e testare alcune delle procedure sviluppate. Perciò, anche ai candidati di questo gruppo è stato richiesto di compilare il questionario *VR*.

Tale questionario, è composto da dieci domande e, per ogni quesito, è presente una scala di valori da 1-7 per indicare la risposta. In particolare, i dieci quesiti vertono su le sensazioni dell'utente in relazione al grado di coinvolgimento nell'ambiente virtuale, possibilità di controllare gli eventi, rapidità di adattamento ed altri parametri utili alla valutazione della qualità dell'esperienza in realtà virtuale. Inoltre, alla fine del questionario, è stato lasciato uno spazio ad ogni candidato per inserire eventuali commenti sulla loro esperienza che verranno analizzati in seguito.

Nel grafico sottostante, viene presentata la media basata sulle risposte di ogni candidato per ogni domanda, su una scala di valori che, appunto, va da 1-7.

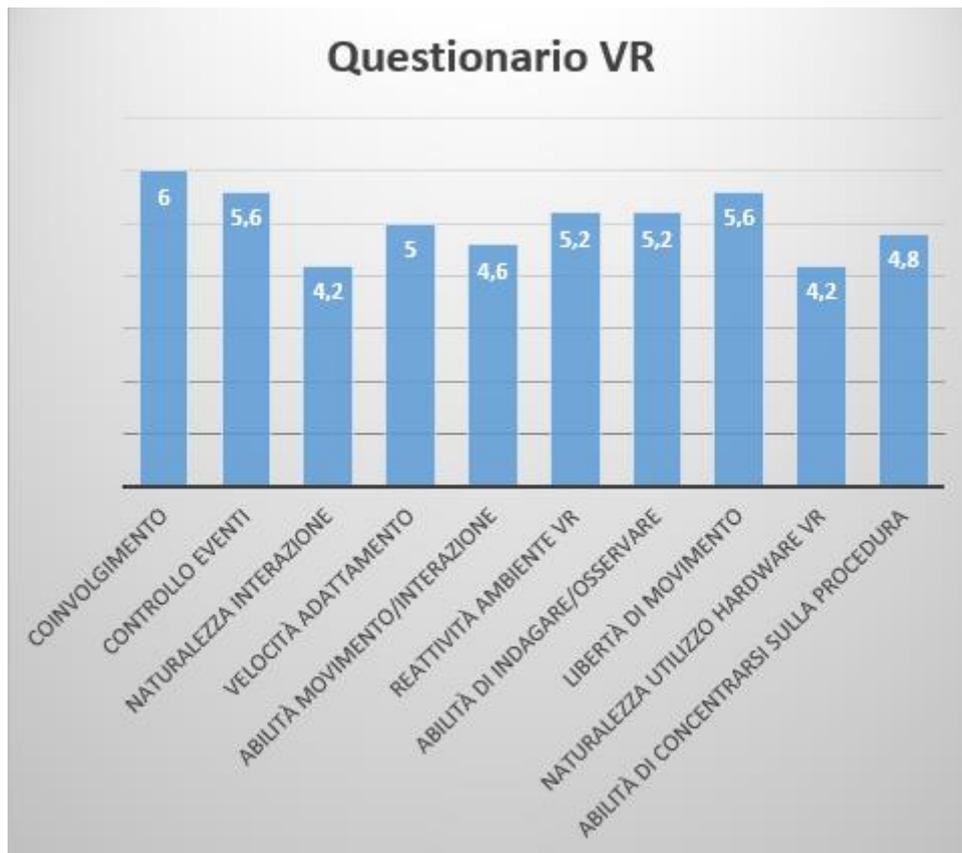


Figura 7.4: Media delle risposte al questionario *VR*

Dalle risposte date dai candidati al questionario in questione si può affermare che, in media, gli utenti hanno provato un elevato grado di coinvolgimento nell'ambiente di realtà virtuale e una buona capacità di controllare gli eventi e di muoversi all'interno dello scenario virtuale. Altri aspetti positivi riguardano la reattività dell'ambiente *VR* agli input forniti dall'utente e alla possibilità dei candidati di osservare ed ispezionare gli oggetti ivi presenti.

Possiamo osservare come gli utenti hanno provato una scarsa naturalezza nell'interazione con l'ambiente e, dunque, nell'utilizzo degli *hardware* di realtà virtuale utilizzati. Questo, dunque, va a convalidare le ipotesi fatte sui risultati del confronto fatto fra training *VR* e training *computer-based*. Infatti, questa scarsa naturalezza è dovuta al fatto che gli utenti si sono interfacciati con un'esperienza nuova e ad uno stile di apprendimento diverso da quello a cui sono abituati. Questo può aver inficiato i risultati del test, intaccando la capacità dei candidati di concentrarsi sull'apprendimento della procedura a

causa dell'attenzione dedicata all'imparare ad interagire con l'ambiente virtuale.

Nella sezione dedicata ai commenti, un utente ha lamentato una difficoltà nell'interazione con i *GameObjects* dell'ambiente virtuale, in particolare, nella gestione di pulsanti e leve. Questa difficoltà è un fattore che ha contribuito alla scarsa naturalezza di cui si discuteva precedentemente.

Un altro commento è risultato utile per un futuro lavoro di miglioramento del training *VR* e, in particolare, della digitalizzazione delle procedure. In quanto, l'utente in questione richiedeva la possibilità di richiamare le *billboard*, contenenti le istruzioni per svolgere la procedura, nel momento in cui non riusciva ad individuarle prontamente. Dunque, in aggiunta alla freccia di navigazione [figura 6.10], strumento che aiuta l'utente a visualizzare le *billboard* quando queste non sono nel suo campo visivo, sarà opportuno implementare la possibilità di richiamare tali *billboard* una volta che il tempo di visualizzazione delle stesse sia scaduto.

8 Conclusioni

Nel capitolo conclusivo di tale elaborato di tesi si ritiene opportuno analizzare il lavoro di digitalizzazione delle procedure svolto ed indicare possibili future modifiche da effettuare sia per quanto riguarda le procedure stesse che per l'organizzazione dell'analisi del training in realtà virtuale proposta.

In particolare, si vuole sottolineare l'ottimo aiuto ricevuto dal supporto PaceLab WEAVR, fornito dall'azienda Txt e-Solutions. Infatti, sia io che il mio collega Andrea Pavone eravamo alla prima esperienza con *Unity* e con la digitalizzazione delle procedure. Nonostante ciò, abbiamo trovato di facile approccio il supporto WEAVR che, basandosi su una costruzione grafica della successione di nodi, risulta essere intuitivo e, si suppone, di più facile utilizzo rispetto alla programmazione in *C#* che caratterizza *Unity*.

Per fornire una migliore esperienza di realtà virtuale agli utenti e migliore la resa del training *VR*, ci si ripropone di aggiungere tutte le scritte e indicazioni presenti nel reale *cockpit* dell'Airbus A320 e che in parte sono mancanti nello scenario di realtà virtuale utilizzato.

Infine, per aumentare la validità del confronto fra i due tipi di training, come accennato in precedenza, si vuole in futuro ripetere tale esperienza con un campione più grande di persone. Questo non è stato possibile a causa delle restrizioni dovute all'emergenza Covid-19, in cui ci si è ritrovati nel periodo di lavoro per tale elaborato di tesi. Si ritiene che tale aspetto possa andare a differenziare i risultati ottenuti e a fornire un confronto ancora più accurato.

Inoltre, per future iterazioni, si potrebbe incrementare il numero di procedure e di step da far studiare ai candidati che si sottopongono al training, in modo tale da aumentare la difficoltà del training stesso. Si ritiene che anche tale modifica andrebbe a differenziare i risultati ottenuti dai candidati nell'esame su simulatore fisico, allontanandoli dal punteggio massimo e fornendo all'analisi un maggior numero di input di riflessione.

Per concludere, si ritiene che lo strumento della realtà virtuale fornisca un ottimo supporto alla digitalizzazione delle procedure in ambito aeronautico e sia un settore da approfondire, con ampie possibilità di ottima resa nel training del personale di volo e non solo.

Bibliografia

[1.1] Muhanna A. Muhanna: *Virtual Reality and the Cave: Taxonomy, Interaction Challenges and Research Directions*, King Hussein School for Computing Sciences, Princess Sumaya University for Technology, Amman, Jordan (2013).

[1.2] Yuri Antonio Gonçalves Vilas Boas: *Overview of Virtual Reality Technologies*, School of Electronics and Computer Science, University of Southampton, United Kingdom (2013).

[1.3] M. Gigante: *Virtual Reality: Definitions, History and Applications. "Virtual Reality Systems"*, Academic Press, ISBN 0-12-22-77-48-1 (1993).

[1.4] Laura Freina, Michela Ott: *A Literature Review on Immersive Virtual Reality in Education: State of the Art and Perspectives*, Institute for Educational Technology, CNR, Genova, Italy (2014).

[1.5] D. Roberts, A. Menozzi, B. Clipp, P. Russler, J. Cook, R. Karl, E. Wenger, W. Church, J. Mauger, C. Volpe, C. Argenta, M. Wille, S. Snarski, T. Sherrill, J. Lupo, R. Hobson, J. Frahm and J. Heinly: *Soldier-worn Augmented Reality System for Tactical Icon Visualization*, The University of North Carolina, Chapel Hill, NC, USA (2012).

[1.6] Ivan E. Sutherland: *The ultimate display*, Information Processing Techniques office, ARPA, OSD (1965).

[1.7] Tomasz Mazuryk, Michael Gervautz: *Virtual Reality: History, Applications, Technology and Future*, Institute of Computer Graphics, Vienna University of Technology, Austria (1996).

[1.8] Steven Feiner, Blair MacIntyre, Doree Seligmann: *Knowledge_based Augmented reality*, ACM Business Meetings (1993).

[1.9] Christoph Anthes, Ruben Garcia-Hernandez, Markus Wiedemann, Dieter Kranzlmüller: *State of the art of Virtual Reality Technology*, Ludwig Maximilians University, Munchen, Germany (2016).

[1.10] Morton Leonard Heilig: *EL Cine del Futuro, The Cinema of the Future*, The Massachusetts Institute of Technology, USA (1992).

[1.11] K.T. Bailey, Cheryl I. Johnson, Bradford L. Schroeder, and Matthew D. Marraffino: *Using Virtual Reality for Training Maintenance Procedures*, Naval Air Warfare Center Training Systems Division, Orlando, FL (2017).

[1.12] James P. Bliss, Philip D. Tidwell and Michael A.: *The Effectiveness of Virtual Reality for Administering Spatial navigation Training to Firefighters*, The University of Alabama in Huntsville (1997).

[1.13] Soichiro Yoshida, Kazunori Kihara, Hideki Takeshita and Yasuhisa Fujii: *Instructive head-mounted display system: pointing device using a vision-based finger tracking technique applied to surgical education*, Tokyo Medical and Dental University Graduate School, Tokyo, Japan (2014).

[1.14] Manuel Olbrich, Holger Graf, Jens Keil, Rüdiger Gad, Steffen Bamfaste, and Frank Nicolini: *Virtual Reality Based Space Operations - A Study of ESA's Potential for VR Based Training and Simulation*, European Space Operation Center, Darmstadt, Germany (2018).

[1.15] PaceLab WEAVR - *WEAVR Creator-User Manual* .

[1.16] Airbus A320: *Aircraft characteristics airport and maintenance planning*.

[1.17] Asaf Degani, Earl L. Wiener: *On the Design of Flight-Deck Procedures*, San Jose State University Foundation, San Jose, CA (1994).

[1.18] A320 *Flight Crew Training Manual (FCTM)*.

[1.19] Witmer e Singer: *Presence Questionnaire* (1994).

Sitografia

[2.1] https://www.lexico.com/definition/virtual_reality .

[2.2] <https://virtualspeech.com/blog/history-of-vr> .

[2.3] <https://whatis.techtarget.com/definition/Google-Street-View> .

[2.4] <https://arvr.google.com/cardboard/> .

[2.5] <https://www.wired.com/2014/05/oculus-rift-4/> .

[2.6] <https://www.vive.com/eu/product/vive-pro/> .

[2.7] https://www.hwupgrade.it/news/wearables/htc-vive-pre-ecco-come-si-usa-in-casa-il-visore-vr-pronti-a-spostare-mobili_60779.html .

[2.8] <https://teslasuit.io/> .

[2.9] <https://tacticalhaptics.com/products/> .

[2.10] <https://infinadeck.com/> .

[2.11] <https://www.oculus.com/compare/> .

[2.12] <https://eu.pimax.com/products/vision-8k-plus-withoutmas> .

[2.13] <https://www8.hp.com/us/en/vr/reverb-g2-vr-headset-omniconcept-edition.html> .

[2.14] <https://varjo.com/products/xr-3/> .

[2.15] <https://it.wikipedia.org/wiki/Rendering> .

[2.16] <https://unity.com/> .

[2.17] <https://www.steamvr.com/en/> .

[2.18] <https://www.txtgroup.com/markets/solutions/pacelab-weavr/> .

[2.19] <https://www.airbus.com/>

[2.20] https://ccntservice.airbus.com/apps/cockpits/a320/?_ga=2 .

[2.21] https://www.a320dp.com/A320_DP/panels.html .

[2.22] <https://www.quora.com/How-does-the-predictive-windshear-system-PWS-work-in-an-aircraft>

[2.23] <https://www.youtube.com/watch?v=6tR5v223xzU&t=60s> .

9 Ringraziamenti

Per la compilazione di questo elaborato di tesi desidero ringraziare in primo luogo il Professor Guglieri, il relatore, per la possibilità di mettermi in contatto con l'azienda *Txt e-Solutions* e aver permesso la realizzazione dell'elaborato stesso. Inoltre, i miei ringraziamenti vanno al Dottor Stefano Primatesta, correlatore di questo progetto, che mi ha seguito durante tutto il lavoro svolto sia per la digitalizzazione delle procedure che per l'organizzazione dei test per l'analisi del training di realtà virtuale.

Successivamente, voglio ringraziare l'azienda *Txt e-Solutions* che ci ha fornito i supporti necessari a svolgere questo elaborato e, in particolare, l'Ingegnere Fabrizio Sillano, il relatore aziendale, che ci ha seguito e guidato per tutta la durata di tutto il progetto.

Trovo opportuno citare anche il mio collega Andrea Pavone con il quale ho collaborato sia nel lavoro sul supporto Pacelab WEAVR per la creazione delle procedure operative su *Unity* e nell'organizzazione e messa in pratica del confronto fra i due tipi di training proposto in questo elaborato. In relazione a quest'ultimo, si ringraziano anche tutti i candidati che si sono resi disponibili per partecipare al training e all'esame su simulatore fisico.

Per ultimo vorrei ringraziare la mia famiglia che mi è stata sempre vicina durante tutto il percorso di laurea, sia triennale che magistrale. In particolare, i miei genitori che mi hanno sempre supportato ed hanno reso possibili i risultati che in breve potrò festeggiare. Un ringraziamento speciale va anche a mia sorella, che vedo sia come un'amica che come a qualcuno a cui chiedere consigli, e a tutti gli amici che durante gli anni universitari mi sono stati a fianco. Fra le amicizie ringrazio la comitiva della mia città, Trani, amici storici con cui sono cresciuto e continuo a crescere, sia quelli con cui ho condiviso la mia vita torinese da cui ho imparato molto.

Appendice A – Presentazione training *computer-based*

Before start procedure

La procedura di "Before Start" viene svolta per assicurare che l'aereo sia in condizioni di sicurezza e che siano svolti tutti gli step per poter procedere con l'accensione dei motori.

Sarà dunque necessario ottenere un giudizio globale sullo stato del velivolo ed effettuare una procedura che renderà l'aircraft pronto per il decollo.

Maggiori informazioni si possono trovare nel A320_FCTM Flight Crew Training Manual nella sessione Normal Operations-Pre Start.

1

Checklist Before start procedure

BEFORE START	
COCKPIT PREP.....	COMPLETED (BOTH)
GEAR PINS and COVERS.....	REMOVED
SIGNS.....	ON/AUTO
ADIRS.....	NAV
FUEL QUANTITY.....	_____ KG.LB
TO DATA	SET
BARO REF.....	SET (BOTH)

WINDOWS/DOORS.....	CLOSED (BOTH)
BEACON.....	ON
THR LEVERS	IDLE
PARKING BRAKE.....	AS RQRD

In seguito verranno descritti i singoli step della procedura

2

Cockpit preparation ... Completed (both)

Gli obiettivi della Cockpit Preparation sono:

- Assicurare che tutti i requisiti di sicurezza siano garantiti prima di fornire energia elettrica;
- Controllare il livello dei fluidi (es: olio, pressione idraulica ...);
- Controllare la posizione delle superfici di controllo (es: slats/flaps ...);

Gear pins and covers ... Removed

Controllare che i Gear Pins e le coperture esterne siano rimosse dall'aircraft.

Nota: Durante il test per questi step non verrà richiesta alcuna azione

3

Signs ... On/Auto

Il *signs panel* è posizionato sull' *overhead panel*



4

1. Impostare su ON lo switch *Seat Belt Light*



2. Impostare su ON lo switch *No smoking*



3. Attivare *Emergency mode*



4. Impostare su ON lo switch *Emergency Light*

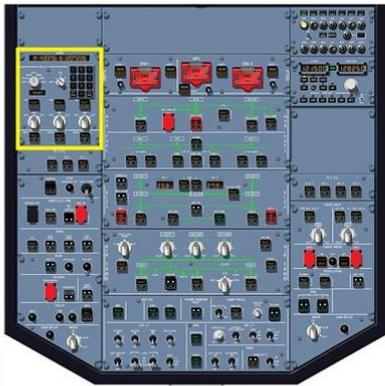


5

ADIRS ... NAV

L' *ADIRS panel* è posizionato sull' *overhead panel*

Posizionare le tre manopole del pannello ADIRS in modalità NAV



6

FUEL QUANTITY ... KG.LB

Controllare il quantitativo di carburante a bordo osservando l'ECAM display



7

TO DATA ... SET

Controllare il data setting osservando l'MCDU



8

BARO REF ... SET (BOTH)

Settare l'unità di misura della pressione



9

WINDOWS/DOORS ... CLOSED (BOTH)

1. Selezionare sulla pulsantiera dell'ECAM il pulsante "DOOR"

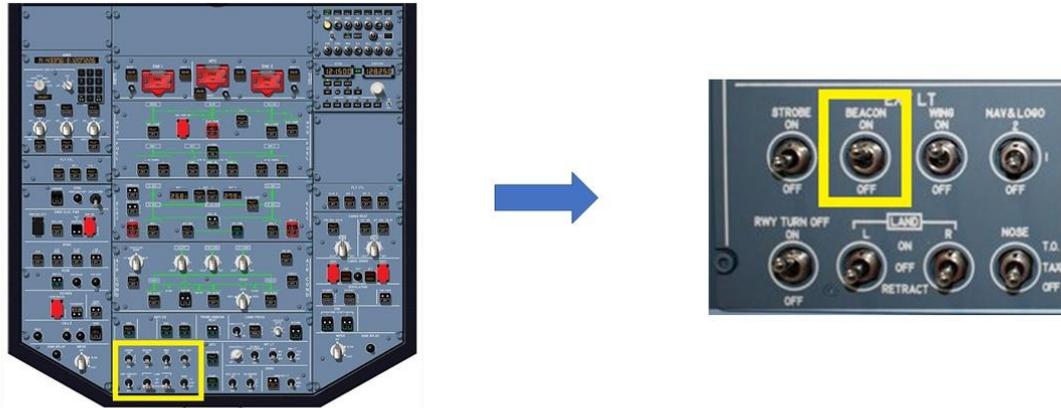
2. Controllare che le porte e le finestre siano chiuse osservando l'ECAM System display



10

BEACON ... ON

Impostare su ON lo switch *Beacon Light*



11

THR LEVERS ... IDLE

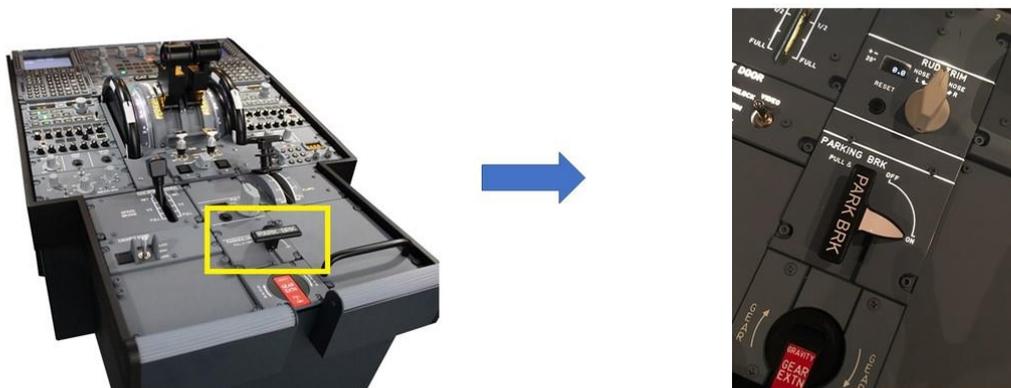
Controllare che le leve dei *thrusters* siano in IDLE



12

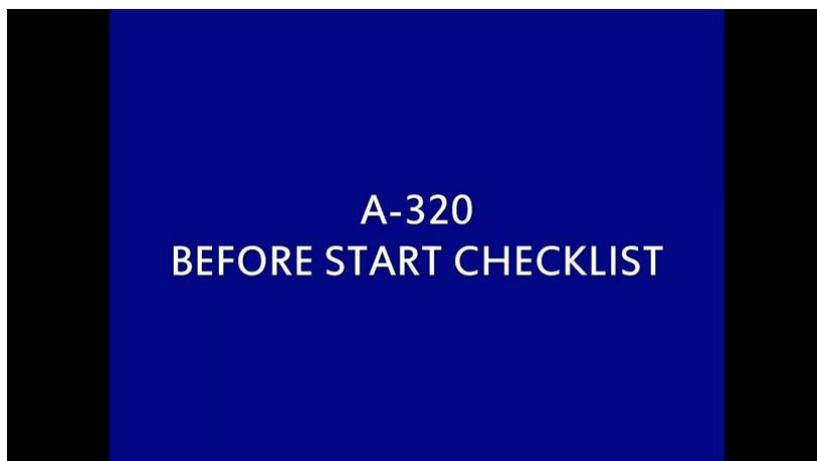
PARKING BRAKE ... AS RQRD

Controllare che il *parking brake* sia attivo, come richiesto



13

Video completo della *Before start procedure*



14

Valutazione test

Dopo il training verrà effettuato un test su simulatore fisico che verrà valutato con i seguenti punteggi per ogni singola azione da effettuare:

- 1 : Azione eseguita correttamente (pulsante esatto, check corretto ...);
- 0.75 : Pulsante selezionato adiacente a quello corretto;
- 0.5 : Pulsante selezionato sullo stesso pannello di quello corretto;
- 0.25 : Pulsante selezionato nella stessa zona di quello corretto (Overhead panel, Front panel, pedestal);
- 0 : Azione non eseguita/ eseguita in maniera errata.

