

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Aerospaziale



**Politecnico
di Torino**

AMB
ENGINEERING

Tesi di Laurea Magistrale

Sviluppo di procedure in VR tramite Unity per l'addestramento di personale addetto all'impianto antincendio per sala prova motori aeronautici

Relatore

Dr. Stefano PRIMATESTA

Candidato

Filippo CAVO

Correlatore aziendale

Giulia SULAS (AMB Engineering)

Luglio 2024

Sommario

Il progetto di tesi presentato in questo elaborato è stato realizzato presso l'azienda *A.M.B. Engineering*, con l'obiettivo di sviluppare una simulazione in realtà virtuale (VR) finalizzata all'addestramento del personale addetto all'impianto antincendio di una sala prova motori aeronautici. Il lavoro è stato eseguito con l'ulteriore supporto tecnico dell'azienda *FireTech*, che ha fornito documentazione ed informazioni tecniche riguardanti l'impianto antincendio in esame.

Lo scopo del progetto è quello di studiare ed utilizzare le caratteristiche offerte dalla tecnologia VR, per lo sviluppo di un metodo di addestramento efficace ed innovativo. In particolare, tramite il motore grafico *Unity* è stata realizzata una simulazione in realtà virtuale che riproduce la sala prova motori ed il relativo impianto antincendio. Nell'ambiente virtuale viene dapprima implementata una *Procedura di Armamento* dell'impianto. Dopodichè, simulando la presenza di un incidente ed il conseguente incendio del motore, è prevista l'esecuzione di due procedure di emergenza, *Procedura Standard* e *Procedura Manuale*.

Nel presente elaborato di tesi si introduce dapprima il concetto di realtà virtuale, andando a descriverne le caratteristiche e lo stato dell'arte. Si analizzano dunque in dettaglio le applicazioni della tecnologia VR nei diversi settori, focalizzando l'attenzione su quello aeronautico. Viene dunque approfondito l'utilizzo finalizzato all'*addestramento* del personale aeronautico e manutentore, con un accenno riguardo alle certificazioni EASA. Si passa quindi a descrivere la fase di sviluppo della simulazione VR, andando a delineare hardware e software utilizzati, configurazione dell'impianto antincendio, e programmazione in Unity. Infine, viene presentata la demo VR ottenuta, con la spiegazione step-by-step delle procedure implementate.

La simulazione VR, risultato del lavoro di tesi, mira ad essere uno strumento di addestramento efficace ed innovativo. La tecnologia VR fornisce un'esperienza realistica, immersiva ed interattiva e consente, in questo caso, di riprodurre situazioni di emergenza non replicabili con tradizionali metodi di training, per ovvie ragioni di sicurezza.

Indice

Elenco delle figure	VII
1 Introduzione	1
1.1 Obiettivi	3
1.2 Outline	4
2 Stato dell'arte	6
2.1 Realtà virtuale	7
2.1.1 Architettura di un sistema VR	8
2.1.2 Hardware VR	9
2.2 Realtà virtuale: applicazioni	12
2.2.1 Gaming ed intrattenimento	15
2.2.2 Architettura	16
2.2.3 Esposizioni fieristiche	18
2.2.4 Automotive	21
2.2.5 Medicina	23
2.2.6 Esplorazioni spaziali	25
2.3 Realtà virtuale nel settore aeronautico	28
2.3.1 Dimensioni di mercato	28
2.3.2 Applicazioni	29
2.3.3 Realtà virtuale per l'addestramento del personale aeronautico e manutentore	35
3 Hardware e Software	47
3.1 Software	47
3.1.1 Unity	47
3.2 Hardware	50
3.2.1 Meta Quest 2	50
4 Impianto Antincendio della Sala Prova Motori	52
4.1 Planimetria e configurazione dell'impianto	52

4.2	Componenti dell'impianto antincendio	55
4.2.1	Centralina antincendio	55
4.2.2	Pulsantiera ausiliaria della Centralina antincendio	58
4.2.3	Pulsanti di Attivazione Allarme Antincendio e di Attivazione Scarica Estinguente	61
4.2.4	Avvisatori acustici e luminosi di Antincendio Scattato e di Scarica Attivata	62
4.2.5	Semaforo Antincendio	63
4.2.6	Microinterruttore porte	64
4.2.7	Valvola Manuale tubazione di scarica CO2	64
4.2.8	Elettrovalvola e Leva Manuale della bombola di scarica CO2	65
5	Sviluppo e Programmazione della simulazione VR	67
5.1	Realizzazione del modello 3D	68
5.2	Caratteristiche della simulazione VR	74
5.3	Sviluppo e programmazione in Unity	77
5.3.1	Creazione del progetto ed installazione di pacchetti e plug-in	77
5.3.2	Ambiente virtuale e player	78
5.3.3	Animazioni	80
5.3.4	Teleport	82
5.3.5	Pulsanti	84
5.3.6	Selettori a chiave	86
5.3.7	Spie, led e semafori	88
5.3.8	Timer della centralina antincendio	88
5.3.9	Effetti sonori	89
5.3.10	Sistemi particellari	90
5.3.11	Tablet di supporto	92
5.3.12	Frecce di aiuto	97
5.3.13	Divisione in scene	98
6	Procedure Operative	104
6.1	Procedura di Armamento	104
6.1.1	Step 1 e Step 2: verifica apertura valvola sulla tubazione dell'Acoustic Enclosure e della Fuel Pump Room	106
6.1.2	Step 3: chiusura porte di accesso all'Acoustic Enclosure	107
6.1.3	Step 4: selettori di 'Blocco Scarica CO2 Antincendio' in posizione OFF	108
6.2	Procedura Standard e Procedura Manuale	109
6.2.1	Step 1: attivazione Allarme Antincendio e Scarica Estinguente	111
6.2.2	Step 2: verifica presenza persone in Acoustic Enclosure	113
6.2.3	Step 3: blocco della scarica di agente estinguente	114

6.2.4	Step 4: verifica evacuazione del personale e rimozione del blocco della scarica	115
6.2.5	Step 5 (solo MAN): spostamento all’Impianto Bombole . . .	116
6.2.6	Step 6 (solo MAN): apertura manuale della valvola	117
6.2.7	Step 7: rilascio della scarica di CO2 ed estinzione dell’incendio	118
6.2.8	Step 8: ripristino del sistema antincendio	119
7	Conclusioni	121
	Bibliografia	125

Elenco delle figure

2.1	Tecnologie XR	6
2.2	AIP Cube di Zeltzer	8
2.3	Architettura di un sistema VR	8
2.4	Caratteristiche hardware dei sistemi VR [12]	10
2.5	Oculus Quest 2 headset [14]	11
2.6	Oculus Quest 2 controller [15] e Virtuix Omni treadmill [16]	12
2.7	Virtual Reality Market Size (USD billion)	14
2.8	Mercato globale VR diviso per applicazioni	15
2.9	Immagine tratta da Google Earth VR [24]	16
2.10	Processo di design eseguito tramite VR Sketch [26]	16
2.11	Visualizzazione e scelta di un interno tramite tecnologia VR	17
2.12	Visualizzazione AR di un macchinario industriale nell'ambiente di installazione [32]	19
2.13	Simulazione VR di un macchinario prodotto da Officine Meccaniche BBM [34]	20
2.14	Progettazione di un veicolo tramite VR (McLaren Automotive) [36]	21
2.15	Mazda Virtual Reality Car Configurator [41]	23
2.16	Formazione chirurgica in realtà virtuale [45]	24
2.17	Titan Lake VR training [48]	25
2.18	Utilizzo della realtà virtuale a bordo dell'ISS per il controllo remoto di un braccio robotico [50]	27
2.19	Mercato globale VR nel settore aerospazio e difesa diviso per appli- cazioni [55]	28
2.20	Virtual Reality Center di Embraer in Brasile [58]	30
2.21	Utilizzo della realtà virtuale nella produzione del 737 MAX 10 [59] .	31
2.22	CHIL di Lockheed Martin [61]	32
2.23	Intrattenimento VR dei passeggeri offerto da Iberia [67]	34
2.24	Leonardo AW169 VR configurator sviluppato da Dead Pixels [68] .	35
2.25	Vantaggi dei metodi di training basati sulla realtà estesa [69]	37
2.26	Airbus A320neo Full Flight Simulator di livello D [71]	38

2.27	Airbus Virtual Reality Procedure Trainer (VPT) [73]	39
2.28	Smart Chair del Battle Lab di Leonardo [74]	40
2.29	Rolls-Royce AE 2100 VR maintenance training	43
2.30	Sistema di addestramento MITHOS di Leonardo [84]	44
3.1	Schermata principale Unity	48
3.2	Meta Quest 2	50
4.1	Planimetria dell'impianto	53
4.2	Centralina Antincendio	55
4.3	Dettaglio del quadro superiore della Centralina Antincendio	56
4.4	Dettaglio del quadro inferiore della Centralina Antincendio	57
4.5	Pulsantiera ausiliaria	58
4.6	Elementi della pulsantiera ausiliaria relativa all'Area 1	59
4.7	Elementi della pulsantiera ausiliaria relativa all'Area 2	60
4.8	Pulsanti di Allarme Antincendio e di Attivazione Scarica Estinguente	61
4.9	Avvisatori acustici e luminosi di Antincendio Scattato e di Scarica Attivata	62
4.10	Semaforo Antincendio e Microinterruttore porte	63
4.11	Valvola Manuale tubazione di scarica CO2	64
4.12	Elettrovalvola e Leva di apertura manuale della bombola di scarica CO2	65
5.1	Modello 3D della Control Room	70
5.2	Modello 3D dell'Acoustic Enclosure	71
5.3	Modello 3D della Service Enclosure	72
5.4	Modello 3D del CO2 Enclosure Store	73
5.5	Schermata di Unity relativa alla gestione ed installazione dei pacchetti	77
5.6	Animation di Unity con relativa timeline	81
5.7	Esempio di script di teleport implementato nella simulazione VR	83
5.8	Script attraverso il quale viene implementato il countdown che precede il rilascio	89
5.9	Script di Scarica Rilasciata in cui viene attivata l'animazione di rilascio della CO2	91
5.10	Tablet di supporto	92
5.11	Script attraverso il quale viene implementato il carosello di immagini	96
5.12	Schema riportante i collegamenti predisposti tra le 5 scene	99
5.13	Script che contiene gli eventi di switch tra le varie scene	101
6.1	Diagramma di flusso della Procedura di Armamento	105
6.2	Verifica apertura valvola sulla tubazione di scarica CO2	106
6.3	Chiusura della porta di accesso	107

6.4	Conferma chiusura delle porte di accesso	108
6.5	Conclusione della Procedura di Armamento	109
6.6	Diagramma di flusso della Procedura Standard e della Procedura Manuale	110
6.7	Chiusura dello shutter	112
6.8	Attivazione pulsanti di emergenza	112
6.9	Verifica della presenza di persone attraverso la finestra di controllo .	113
6.10	Rotazione del selettore in posizione ON	114
6.11	Tacitazione segnalazioni acustiche	115
6.12	Schermata del tablet per spostamento all’Impianto Bombole	116
6.13	Apertura manuale della valvola di rilascio	117
6.14	Scarica di CO2 ed estinzione dell’incendio	118
6.15	Abilitazione pannello e disattivazione allarme	119
6.16	Ripristino del sistema antincendio	120

Capitolo 1

Introduzione

La *realtà virtuale (VR)* rappresenta una tecnologia sempre più diffusa ed utilizzata in diversi ambiti e settori. Il progressivo sviluppo tecnologico ha portato, specialmente negli ultimi anni, ad un importante miglioramento di hardware e software necessari all'implementazione di esperienze in realtà virtuale. Come prima conseguenza, si è dunque assistito ad un notevole incremento nella qualità delle simulazioni, con la possibilità di ottenere maggior realismo, immersività ed interattività. Inoltre, in secondo luogo, lo sviluppo di un sempre maggior numero di prodotti VR di varia tipologia, categoria e prezzo, ha reso tale tecnologia molto più accessibile e sfruttabile, in diversi ambiti. Attualmente, sono molteplici le applicazioni della realtà virtuale in diversi settori, a partire dal gaming e l'intrattenimento, fino ad arrivare all'architettura, alla medicina e al settore automotive.

A tal proposito, anche in *campo aerospaziale* si sta assistendo ad una sempre maggior rilevanza della tecnologia VR che, con le sue caratteristiche e potenzialità, può essere implementata in vari contesti. In particolare, tra le varie applicazioni si sottolinea innanzitutto un utilizzo a supporto delle fasi di progettazione e produzione. In questo senso, diverse aziende come Airbus, Boeing, Embraer, Lockheed Martin, stanno attualmente adottando soluzioni di tale tipo. Un altro importante impiego vede l'applicazione della realtà virtuale per fornire assistenza alla manutenzione. Sono stati infatti testati ed analizzati i benefici di tale tecnologia in questo ambito, con la possibilità di formare il personale anche a distanza ed in maniera più efficiente, rapida e sicura. Ulteriori utilizzi nel settore aerospaziale vedono poi l'impiego di realtà virtuale per l'intrattenimento dei passeggeri, nonché come supporto alle aziende per quanto riguarda la presentazione e l'esposizione di prodotti a potenziali acquirenti, vista la possibilità di ricreare oggetti di grandi dimensioni, consentendo la visualizzazione e l'interazione con essi all'interno di un ambiente virtuale.

Detto ciò, l'applicazione della realtà virtuale più rilevante in campo aerospaziale, anche dal punto di vista del mercato globale della VR, riguarda l'*addestramento del personale aeronautico e manutentore*. In questo senso, le tradizionali tecniche di addestramento prevedono studio su testi e manuali, insegnamento diretto e Computer Based Training (CBT). Come si può intuire, il principale svantaggio di tali metodi è la mancanza di un'interazione diretta con la macchina o con l'ambiente operativo, necessari per acquisire familiarità e praticità con questi ultimi. Aziende e compagnie affiancano dunque a queste tecniche un training fisico eseguito sul campo, che richiede però un importante dispendio di tempo e di risorse economiche, nonché particolare attenzione e rigore per garantire la sicurezza del personale.

In questo contesto la tecnologia VR, con le sue caratteristiche, può offrire una valida ed innovativa soluzione per il training, in grado di affiancare o sostituire l'addestramento tradizionale. Attraverso simulazioni in realtà virtuale è possibile infatti ricreare macchinari e componenti, ed inserirli in un ambiente virtuale che riproduca fedelmente il contesto operativo reale. Non da meno, l'operatore può interagire con gli elementi simulati e ricevere al contempo informazioni ed aiuti necessari all'apprendimento e alla formazione, attraverso un'esperienza realistica ed immersiva. Questo metodo di training risulta particolarmente efficace, in ambito aeronautico, per l'apprendimento di *Standard Operating Procedures (SOP)*, procedure standardizzate. Attraverso simulazioni VR si possono infatti riprodurre determinate procedure in un ambiente virtuale, guidando l'operatore durante l'esecuzione e consentendogli di familiarizzare ed apprendere le singole azioni. Inoltre, questo metodo permette un notevole sviluppo della memoria motoria, grazie alla possibilità di ripetere più e più volte lo svolgimento delle procedure in un ambiente sicuro, senza reali conseguenze in caso di errori o dimenticanze. La realtà virtuale ha infatti il vantaggio di far vivere all'utente una situazione reale, con la sola necessità di disporre dei dispositivi hardware e software opportuni, il che consente un'erogazione dell'addestramento flessibile e molto vantaggiosa da un punto di vista logistico, con l'ulteriore possibilità di training a distanza. Da ciò consegue un notevole risparmio in termini di tempi e costi. Non da meno, grazie alla tecnologia VR è possibile addestrare il personale in situazioni rischiose e di emergenza, altrimenti impossibili da ricreare durante un training fisico eseguito sul campo, per ovvie ragioni di sicurezza.

Diversi studi hanno dimostrato tali vantaggi nell'implementazione della realtà virtuale per l'addestramento di piloti e di personale aeronautico e manutentore, tanto che varie aziende e compagnie stanno adottando e testando nuove soluzioni di training VR. Ad evidenziare la crescente rilevanza che sta acquisendo la tecnologia VR in campo aeronautico, si sottolinea che anche EASA, di recente, ha rilasciato documentazione per accettare e regolamentare l'utilizzo di realtà virtuale a scopo addestrativo [1] [2] [3] [4].

1.1 Obiettivi

L'obiettivo del presente progetto di tesi è la realizzazione di una simulazione in realtà virtuale in cui implementare procedure operative, per l'addestramento del personale addetto all'impianto antincendio di una sala prova per motori aeronautici. Così facendo, si vuole ottenere un metodo di addestramento valido ed alternativo rispetto al training tradizionale.

Più in dettaglio, il lavoro di tesi, svolto presso l'azienda *A.M.B. Engineering*, prevede la creazione di un ambiente virtuale che riproduca fedelmente e realisticamente l'impianto antincendio della sala prova motori, comprensivo di tutti i locali e i componenti opportuni. Dopodiché, all'interno di quest'ultimo si vuole sviluppare e programmare una simulazione VR, tramite il motore grafico *Unity*, in modo da consentire l'addestramento su diverse procedure operative richieste durante le prove al banco dei motori aeronautici. La fase di sviluppo è stata svolta in stretta collaborazione con l'azienda *FireTech* che ha sviluppato l'impianto antincendio a CO₂, così da verificare e valutare passo dopo passo i risultati ottenuti, con lo scopo di raggiungere l'obiettivo prefissato. In particolare, il fine principale è quello di trovare i giusti compromessi per realizzare un'esperienza VR realistica, immersiva ed interattiva, comprensiva inoltre degli opportuni elementi didattici ed addestrativi. Questi ultimi sfavoriscono il realismo della simulazione ma sono essenziali per il raggiungimento degli obiettivi prestabiliti.

Durante la simulazione VR si prevede l'implementazione di tre procedure operative, fornite da *FireTech*:

- *Procedura di Armamento*: consente di predisporre l'impianto antincendio per l'inizio delle prove sul motore. Si va quindi ad armare l'impianto in modo da consentire la successiva attivazione in caso di incendio;
- *Procedura Standard*: in seguito all'incendio del motore durante i test al banco, comporta l'esecuzione di una serie di step per far scattare l'allarme antincendio e attivare la scarica di agente estinguente nella zona interessata, così da estinguere l'incendio e mettere in sicurezza l'area;
- *Procedura Manuale*: è analoga alla Procedura Standard, ma simula la presenza di un malfunzionamento dell'elettrovalvola di rilascio della scarica di CO₂. L'operatore deve quindi eseguire, in aggiunta, una serie di step che consentono di azionare manualmente la valvola di rilascio, in maniera tale da attivare la scarica e portare al conseguente spegnimento dell'incendio.

Osservando le procedure si evidenzia come, un ulteriore obiettivo del progetto, sia quello di sfruttare le caratteristiche e le potenzialità della realtà virtuale per

riprodurre una pericolosa situazione di emergenza, su cui sarebbe altrimenti impossibile effettuare training in un ambiente fisico reale, per ovvie ragioni di sicurezza. Attraverso l'esperienza VR, l'operatore può quindi interagire con una situazione pericolosa, familiarizzando con l'ambiente circostante e con gli step da eseguire. In questo modo si punta ad allenare la memoria motoria ed ottenere un'esecuzione delle procedure sempre più rapida, efficiente e corretta, con beneficio sulla sicurezza generale.

Delineati gli obiettivi del lavoro di tesi, si andrà inoltre a descrivere nel seguente elaborato il concetto di realtà virtuale allo stato dell'arte, per arrivare poi ad approfondirne l'implementazione in campo aerospaziale. Si focalizzerà quindi l'attenzione sull'utilizzo finalizzato all'addestramento del personale, così da mostrare vantaggi e svantaggi del training VR, presentando il contesto generale in cui si inserisce il progetto sviluppato.

1.2 Outline

Il seguente elaborato di tesi si apre con una panoramica generale sul tema della realtà virtuale e sul suo **stato dell'arte**. Nel *Capitolo 2* viene quindi introdotto il concetto di realtà virtuale, con un approfondimento sugli hardware necessari all'implementazione. Dopodichè, si passa a descriverne le applicazioni nei diversi settori, focalizzandosi sugli utilizzi in campo aeronautico, in particolare per quanto riguarda l'addestramento dei piloti e del personale manutentore. Per quest'ultimo caso, si riportano i risultati ottenuti in diversi studi, condotti da università e aziende del settore.

Durante la presentazione dello stato dell'arte, si richiamano inoltre alcuni dati e statistiche di mercato, e si fa un cenno riguardo alla certificazione EASA sul training VR nel settore aeronautico.

Si passa dunque ad introdurre la parte operativa del progetto di tesi andando a delineare, nel *Capitolo 3*, gli **hardware** e i **software** che sono stati utilizzati. Tra questi ultimi, si approfondisce in maniera più dettagliata il motore grafico *Unity*, nel quale è stata eseguita la fase di sviluppo e programmazione della simulazione VR. Per quanto riguarda l'hardware, invece, si illustrano le caratteristiche del dispositivo VR *Meta Quest 2* utilizzato per l'interazione con la demo VR.

Nel *Capitolo 4* si descrive in dettaglio l'**impianto antincendio** della sala prova motori, nel quale vengono svolte le procedure operative. In particolare, si approfondiscono i principali componenti dell'impianto, illustrando il loro funzionamento e la loro collocazione nei vari locali. Vengono inoltre inserite immagini comparative

che riportano la resa ottenuta nella simulazione VR rispetto al componente reale.

Il *Capitolo 5* tratta invece tutta la fase di **sviluppo e programmazione** della simulazione VR. Si parte quindi dalla realizzazione dell'ambiente virtuale e dei modelli 3D dei componenti dell'impianto, per poi passare alla descrizione delle caratteristiche attribuite alla simulazione per lo sviluppo. Dunque, si approfondisce in dettaglio quest'ultima fase, eseguita in *Unity*, andando a spiegare nello specifico la programmazione dei vari eventi e degli elementi presenti nella scena. Per rendere più chiara ed efficace la comprensione, sono stati inoltre riportati alcuni degli script creati nell'ambiente di sviluppo integrato *Visual Studio*.

Infine, prima di trarre le conclusioni del lavoro di tesi, nel *Capitolo 6* viene illustrata l'esecuzione della demo VR e delle **procedure operative** in essa implementate. Si descrivono quindi i vari step della *Procedura di Armamento*, passando poi allo svolgimento delle procedure d'emergenza, in seguito alla simulazione di un incendio del motore. Per queste ultime, è stata introdotta, passo dopo passo, la *Procedura Manuale*, andando poi a spiegarne analogie e differenze rispetto alla *Procedura Standard*, così da fornire un tutorial completo della simulazione VR sviluppata.

Capitolo 2

Stato dell'arte

Il termine *realtà* indica tutto ciò che esiste effettivamente, indipendentemente dal soggetto che percepisce, e che allo stesso tempo ha la concretezza e la solidità di ciò che viene percepito con i sensi. Tuttavia, per meglio comprendere il concetto di tecnologia VR, è bene specificare che tale percezione può manifestarsi ugualmente sia che gli stimoli provengano dal mondo reale, sia che derivino da un mondo digitale. A tal proposito, si introduce il concetto di *Reality-Virtuality continuum*, scala che va dal completamente reale al completamente virtuale. Le posizioni che intercorrono tra i due estremi della scala vengono ricoperte dalla **Realtà estesa**, o **Extended Reality (XR)**, che racchiude al suo interno tutte le tecnologie ad oggi sviluppate che permettono di alterare la realtà del mondo fisico integrandola con elementi digitali virtuali [5].

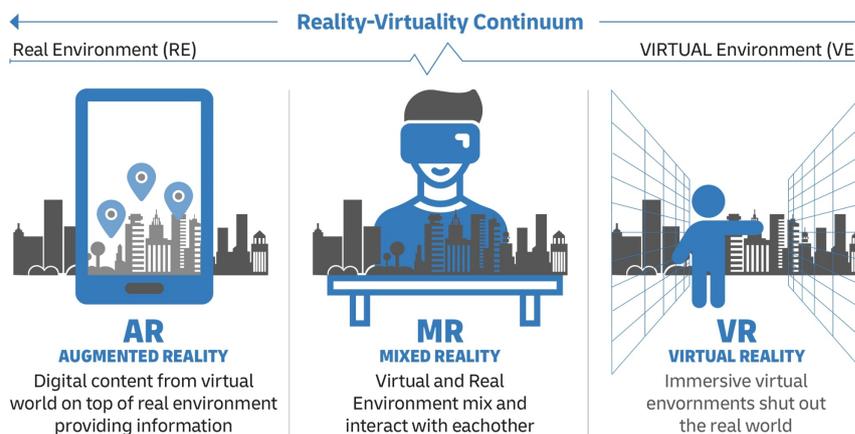


Figura 2.1: Tecnologie XR

Nello specifico, le tecnologie riportate in figura 2.1 [6] vengono definite come segue [7]:

- **Realtà aumentata (AR)**: sovrappone elementi digitali virtuali ad una visione del mondo reale. L'utente interagisce con l'ambiente fisico reale, mentre i contenuti digitali sono passivi.
- **Realtà mista (MR)**: elementi digitali virtuali vengono collocati ed integrati al mondo reale. L'utente può interagire attivamente sia con il mondo fisico reale che con gli elementi digitali;
- **Realtà virtuale (VR)**: l'utente è immerso in un ambiente virtuale completamente digitale e può interagire con esso.

In questo capitolo si andrà ad analizzare in dettaglio la tecnologia VR partendo dal suo sviluppo e arrivando ad evidenziarne le attuali e future potenzialità. Inoltre, verranno descritte le possibili applicazioni della realtà virtuale, confrontandole con quelle destinate alle altre tecnologie XR, in diversi ambiti. Infine, si focalizzerà lo studio sull'utilizzo di tecnologie VR per training e manutenzione in campo aeronautico.

2.1 Realtà virtuale

Il concetto di **realtà virtuale (VR)** indica una simulazione computer-based di un ambiente tridimensionale completamente digitale in cui l'utente è immerso e con cui può interagire grazie all'utilizzo di specifici hardware. Tale tecnologia fornisce all'utente stimoli di tipo visivo, sonoro e tattile al fine di indurre, il quanto più possibile, la percezione di essere fisicamente all'interno dell'ambiente virtuale simulato [7]. Proprio per questa ragione, la realtà virtuale si trova all'apice del concetto di *Reality-Virtuality continuum* introdotto in precedenza e, rispetto alle altre tecnologie XR, riesce dunque a suscitare un maggior senso di immersione e di interazione.

Questo aspetto viene ulteriormente sottolineato se si considera la spiegazione di realtà virtuale fornita tramite il cosiddetto *AIP Cube* di Zeltzer (1992). Tale grafico, rappresentato in figura 2.2, riporta sui tre assi di un piano cartesiano tridimensionale e in scala da 0 a 1, autonomia, interazione e presenza, così definite [7]:

- **Autonomia**: misura di come l'utente può reagire ad eventi e stimoli;
- **Interazione**: misura di come l'utente può interagire con l'ambiente e con gli oggetti;
- **Presenza**: misura di come l'utente percepisce di essere immerso attraverso stimoli sensoriali.

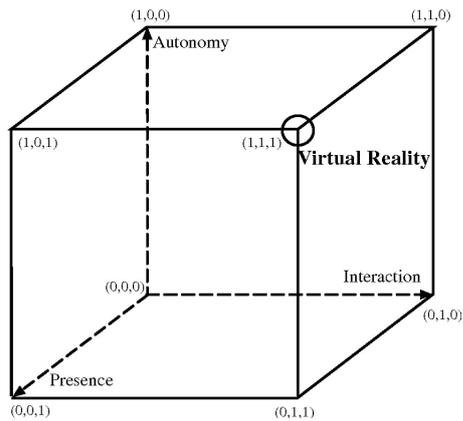


Figura 2.2: AIP Cube di Zeltzer

Come si può notare in figura 2.2 [8], la realtà virtuale è al vertice del cubo, dove le tre caratteristiche precedentemente elencate assumono il massimo valore della scala.

2.1.1 Architettura di un sistema VR

Un sistema VR richiede opportuni dispositivi hardware di input e di output, un software e un database che ne garantiscano l'interazione e un sistema grafico adeguato per creare l'ambiente virtuale. L'architettura del sistema può essere dunque schematizzata come segue:

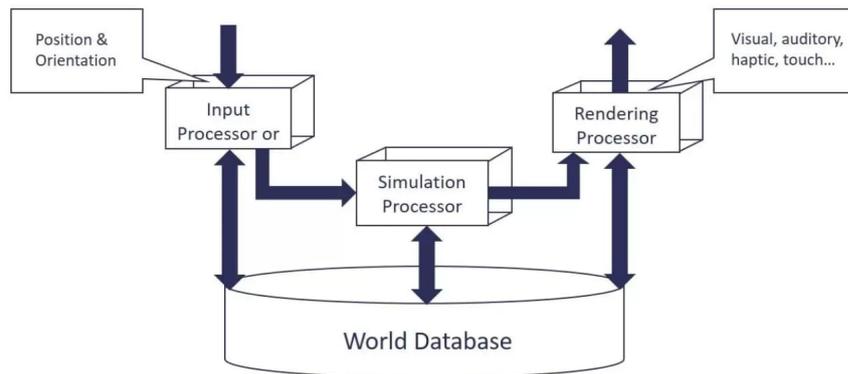


Figura 2.3: Architettura di un sistema VR

Come si può osservare in figura 2.3 [9], i *dispositivi di input* determinano il modo in cui l'utente comunica con il software e con la simulazione. Idealmente, per un'esperienza immersiva e realistica, tale comunicazione dovrebbe avvenire in maniera più naturale ed intuitiva possibile. Tuttavia, le attuali tecnologie si basano su hardware piuttosto invasivi, che verranno descritti più in dettaglio in seguito, nonostante si stiano cercando di sviluppare soluzioni sempre più adeguate e innovative.

Dopodichè, gli input in ingresso vengono gestiti da un processore che comunica con un database esteso e invia i dati al *processore di simulazione*. Quest'ultimo ha il compito di gestire l'interazione tra i dispositivi di input e di output, andando a controllare la dinamica dell'ambiente virtuale. In base ai dati ricevuti in input, verranno quindi generati in output gli opportuni feedback. Dunque, al fine di garantire un adeguato grado di immersività nella simulazione, il software ha l'importante compito di processare una grande quantità di dati e di operare in real-time [8].

A questo punto, un *processore di rendering* si occupa di ricreare le sensazioni da trasmettere in output all'utente, attraverso segnali di tipo visivo, uditivo e aptico [9]. I *dispositivi di output* sono dunque responsabili di presentare all'utente l'ambiente virtuale con le sue dinamiche, andando a fornire un'esperienza quanto più realistica, immersiva e coinvolgente possibile.

2.1.2 Hardware VR

Riprendendo l'architettura di un sistema VR, illustrata in precedenza in figura 2.3, l'interfaccia uomo-macchina che intercorre tra l'utente e il computer è fornita tramite specifici dispositivi hardware. Questi ultimi concorrono in maniera importante a determinare il senso di immersione e di realismo della simulazione VR. Per tale motivo, si considerano innanzitutto differenti hardware VR a seconda che il sistema VR considerato sia *non-immersivo*, *semi-immersivo* o *completamente immersivo*. Secondo questa classificazione si ha [10]:

- **Non-Immersive system:** solitamente chiamato *desktop VR*, tale sistema consiste in un monitor standard, senza particolari dispositivi di input e output, e fornisce dunque bassi livelli di presenza e interazione;
- **Semi-Immersive system:** vengono utilizzati un monitor o degli occhiali LCD (tipici della tecnologia AR) e l'interazione avviene tramite mouse, tastiera, joystick o tracciamento della posizione delle mani;
- **Fully-Immersive system:** l'utente viene immerso nell'ambiente virtuale tramite head-mounted display (HMD) o proiettori video (CAVE system) e l'interazione può essere accentuata dal movimento delle mani grazie ai dispositivi per il position tracking, da guanti aptici e da sistemi audio 3D [11].

	Desktop VR	Semi-Immersive VR	Fully-Immersive VR
Visual Displays	Desktop LCD monitor	Desktop LCD monitor; AR glasses	Head-mounted displays: -wired -mobile
Input Devices	Keyboard, mouse	Keyboard, mouse, 3D joystick; gesture recognition(AR)	Controllers; Navigation devices
Tracking Devices	none	head-mounted sensors(AR)	Hands and body sensors
Auditory Display	loudspeakers or headphones	loudspeakers or headphones	loudspeakers or headphones

Figura 2.4: Caratteristiche hardware dei sistemi VR [12]

Nonostante sia bene considerare questa prima classificazione dei sistemi VR, in seguito si farà riferimento solamente a *sistemi Fully-Immersive*, in quanto rappresentano la massima espressione di tecnologia VR e forniscono la maggiore immersività.

Output device Come già descritto in precedenza, questi dispositivi hanno il compito di trasmettere all'utente feedback visivi, uditivi e tattili. Tra questi, particolare importanza assumono gli **head-mounted display (HMD)**, visori in grado di fornire una visione stereoscopica del mondo virtuale e di presentarlo visivamente all'utente, con tutte le sue dinamiche [12]. Attualmente, gli headset dispongono inoltre di un sistema di tracciamento a 6 gradi di libertà (DOF), capace di rilevare e trasmettere accuratamente la posizione del corpo e l'orientamento dell'utente. Tale sistema può essere integrato nel dispositivo o supportato da un sistema di riferimento fisso esterno, costituito da una base-station. Spesso, gli HMD dispongono di cuffie stereo integrate che forniscono un ulteriore coinvolgimento sensoriale [13].

A seconda di come viene utilizzato il dispositivo ai fini della simulazione VR, si distingue:

- *Mobile HMD*: il dispositivo opera in modalità wireless, senza il collegamento con un computer. La simulazione è dunque basata sulle capacità del visore. Tale aspetto comporta dei lati negativi, quali una memoria limitata e un minor tempo di funzionamento determinato dalla durata della batteria;

- *Wired HMD*: il dispositivo opera mediante il collegamento con un computer, che si occupa di processare tutti i dati. Proprio per questo, le performance dipendono principalmente dalla potenza del computer a cui l'headset è collegato, il che permette di visualizzare complessi ambienti VR e di fornire un'esperienza più completa e qualitativa rispetto all'utilizzo wireless [12].



Figura 2.5: Oculus Quest 2 headset [14]

Tra i dispositivi di output è bene citare anche la presenza di *haptic device*, in grado di fornire all'utente un feedback tattile al fine di migliorare l'esperienza virtuale ed aumentare il coinvolgimento. Tali dispositivi sono attualmente in via di sviluppo ma non ancora ampiamente utilizzati.

Input device Permettono all'utente di interagire con la simulazione, captando i movimenti e trasmettendo informazioni al computer. I dispositivi di input vengono solitamente divisi in tre categorie [13]:

- *Controller*: forniscono input attraverso pulsanti, joystick e touchpad azionati dall'utente. Inoltre, il movimento dei controller stessi nell'ambiente reale viene catturato da un sistema di tracciamento a 6 DOF e contribuisce a generare ulteriori informazioni da inviare alla simulazione. Anche questi device possono essere wireless o wired e vengono solitamente utilizzati in coppia, uno per mano.
- *Navigation Device*: trasmettono all'utente la sensazione di potersi muovere in un ambiente senza limiti, pur rimanendo sul posto, e forniscono in input lo spostamento nel mondo virtuale. Fanno parte di questi dispositivi particolari tapis roulant, ODT (OmniDirectional Treadmill), dispositivi per camminare sul posto e particolari interfacce per il foot-tracking. Rispetto alla precedente categoria sono meno utilizzati e meno accessibili.

- *Tracking Device*: si dividono in full-body tracking e hand tracking. Il tracciamento può avvenire tramite diverse tecnologie, quali sensori magnetici, sensori inerziali IMU, biofeedback, guanti aptici e dispositivi di tracciamento ottico. Questi ultimi, rappresentano la soluzione più diffusa ed utilizzata. Consistono solitamente in telecamere ad infrarossi integrate nell'headset e capaci di tracciare una porzione di spazio emisferica attorno all'utente, o in una base-station esterna con telecamera ad infrarossi che svolge l' analoga funzione [10].



Figura 2.6: Oculus Quest 2 controller [15] e Virtuix Omni treadmill [16]

2.2 Realtà virtuale: applicazioni

Il livello di sviluppo raggiunto negli ultimi anni dalla tecnologia VR, unito alle crescenti prestazioni dei computer, a software avanzati e ad una maggiore accessibilità di hardware VR capaci di fornire esperienze fully-immersive, ha portato all'implementazione della realtà virtuale per molteplici applicazioni in diversi settori.

In particolare, a prescindere dal settore di utilizzo e dalle specifiche applicazioni, che verranno descritte più in dettaglio in seguito, le tecnologie VR possono essere sfruttate principalmente per i seguenti scopi [8]:

- **Visualizzazione di dati**: attraverso la realtà virtuale è possibile visualizzare dati scientifici in un ambiente tridimensionale, ed osservare la loro variazione in real-time modificando attivamente e in modo immersivo oggetti virtuali a cui i dati sono direttamente correlati. Analogamente, in campo scientifico tale tecnologia può essere sfruttata per visualizzare e modificare molecole chimiche e relativi legami.

- **Modellazione, progettazione e pianificazione:** la tecnologia VR offre la possibilità di visualizzare in real-time e in un ambiente virtuale 3D il prodotto in fase di progettazione e modellazione. In questo modo, l'utente può percepire in maniera molto realistica e funzionale l'oggetto di studio, andando ad identificare eventuali difetti e apportando modifiche in real-time. Attraverso la simulazione VR è possibile dunque creare prototipi virtuali e sfruttarli per test e valutazioni, risparmiando tempo, risorse economiche, manodopera e materiali necessari allo sviluppo di prototipi fisici reali [17].
- **Training:** una delle più importanti applicazioni della realtà virtuale, ad oggi, ne prevede l'utilizzo ai fini dell'addestramento del personale in diversi settori. Tale aspetto verrà approfondito più in dettaglio nei paragrafi successivi tuttavia, in prima battuta, si evidenziano notevoli vantaggi nell'implementazione di training VR, come l'immersività dell'esperienza fornita all'utente e la possibilità di poter simulare situazioni non riproducibili con metodi di training tradizionali per motivi di costi e di esposizione al rischio.
- **Educazione:** la tecnologia VR può essere utilizzata a scopi educativi in quanto contribuisce ad incrementare l'attenzione degli studenti riducendo le distrazioni visive e auditive e fornendo un metodo di apprendimento alternativo e innovativo. Gli studenti possono sperimentare ed esplorare ambienti e situazioni non riproducibili nel mondo fisico, in maniera sicura ed efficiente. Inoltre, attraverso l'interazione con il mondo virtuale, si sperimenta un metodo di educazione più improntato alla pratica, in confronto ai metodi tradizionali.
- **Fitness e sport:** la realtà virtuale può essere sfruttata per ludicizzare esercizi ed incrementare il livello di attività fisica. In tal senso, possono essere utilizzati dispositivi hardware specifici come gli ODT (OmniDirectional Treadmill) già presentati in precedenza, specialmente per incentivare l'attività fisica a scopo medico [18].
- **Cooperative working:** attraverso la creazione di ambienti virtuali condivisi è possibile collaborare con utenti connessi da remoto. In questo modo, più persone possono accedere contemporaneamente alla stessa area di lavoro virtuale e interagire in real-time con l'ambiente virtuale e con gli altri utenti, portando avanti progetti e lavori condivisi.
- **Intrattenimento:** se le precedenti applicazioni VR erano perlopiù rivolte al mondo dell'industria, il progressivo sviluppo di hardware VR e la maggiore accessibilità economica hanno permesso ad un bacino sempre più ampio di utenza di poter sperimentare tecnologia VR. In questo senso, l'utente comune utilizza la realtà virtuale all'interno della sfera dell'intrattenimento, integrando i comuni media con un'esperienza più immersiva e coinvolgente.

L'esperienza offerta dalla tecnologia VR, unita al livello di accessibilità e di sviluppo raggiunto ad oggi da hardware e software VR, sta portando ad una notevole crescita del settore. Le numerose applicazioni a cui si presta la realtà virtuale vengono sfruttate e specializzate in diversi settori, a partire dall'intrattenimento rivolto al grande pubblico fino ad arrivare all'implementazione in ambito medico o in campo industriale.

Tale sviluppo è dimostrato e supportato dai dati di mercato riguardanti la tecnologia VR, che confermano come quest'ultima stia raggiungendo numeri sempre più importanti sul mercato globale. Inoltre, i trend evidenziano un'ulteriore crescita del settore negli anni a venire. Secondo *Precedence Research* [19], la dimensione del mercato globale della realtà virtuale è stata valutata a 23.92 Mrd USD nel 2022 ed è previsto che raggiunga i 187.28 Mrd USD entro il 2032.

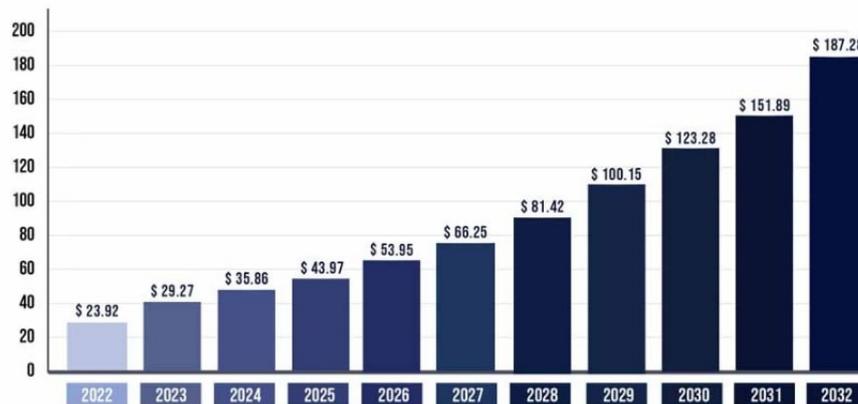


Figura 2.7: Virtual Reality Market Size (USD billion)

Questa crescita di mercato è dovuta principalmente all'implementazione sempre più massiccia di tecnologia VR nell'industria del gaming e dell'intrattenimento, nell'industria automotive, nel campo dell'architettura ed in ambito educativo. Tuttavia, i trend dimostrano un notevole incremento nell'accettazione della realtà virtuale per quanto riguarda il settore aerospazio e difesa, la sanità e i trasporti [19].

Nel grafico riportato in figura 2.8 [20] è possibile visualizzare la suddivisione per applicazioni del mercato globale della realtà virtuale nel 2019. A supporto di quanto anticipato, la percentuale maggiore è occupata da un utilizzo della tecnologia VR per applicazioni relative al gaming e all'intrattenimento, tuttavia, il settore aerospazio e difesa, la sanità e le imprese coprono una buona percentuale destinata a crescere nei prossimi anni, secondo le previsioni.

Global VR market share, by application, 2019 (%)

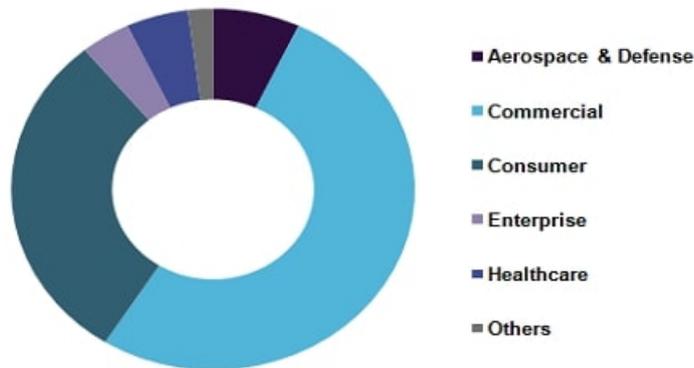


Figura 2.8: Mercato globale VR diviso per applicazioni

Si procede dunque analizzando più in dettaglio le principali e più rilevanti applicazioni della tecnologia VR in diversi settori.

2.2.1 Gaming ed intrattenimento

Un'importante percentuale del mercato della realtà virtuale è occupata dalla vendita di dispositivi VR utilizzati per fini ludici e di intrattenimento. Infatti, il sempre più accessibile prezzo di vendita di visori e device VR ha permesso di raggiungere un pubblico molto vasto e ha fatto sì che anche i privati possano acquistare e sfruttare tale tecnologia.

Proprio per questo motivo è stata sviluppata una nuova generazione di giochi con tecnologia di realtà virtuale VR che concede ai giocatori una prospettiva di gioco coinvolgente ed in prima persona. Gli utenti possono utilizzare i più semplici ed economici dispositivi stand-alone, o PC avanzati che supportano i più professionali HMD come Oculus Quest 2, HTC Vive e Pico 4 Pro [21].

Di pari passo con lo sviluppo di esperienze dedicate al gaming, è possibile sfruttare la realtà virtuale per l'intrattenimento. In tal senso, numerose esperienze sono offerte da **Meta** attraverso i suoi visori *Quest 2*, *Quest 3* e *Quest Pro*. All'utente viene proposta un'alternativa ai tradizionali media, con la possibilità di osservare video VR in collaborazione con *Youtube VR*, fruire documentari in una modalità del tutto immersiva, vivere spettacoli e show grazie alla tecnologia VR e partecipare ad eventi live VR insieme ad altri utenti [22]. Altre esperienze di intrattenimento prevedono l'utilizzo di realtà virtuale per viaggiare ed esplorare qualsiasi parte del mondo, grazie ad una simulazione sviluppata da **Google Earth**,

nonchè la possibilità di fare meditazione, svolgere attività fisica o dare spazio alla creatività disegnando e modellando all'interno di un ambiente virtuale [23].

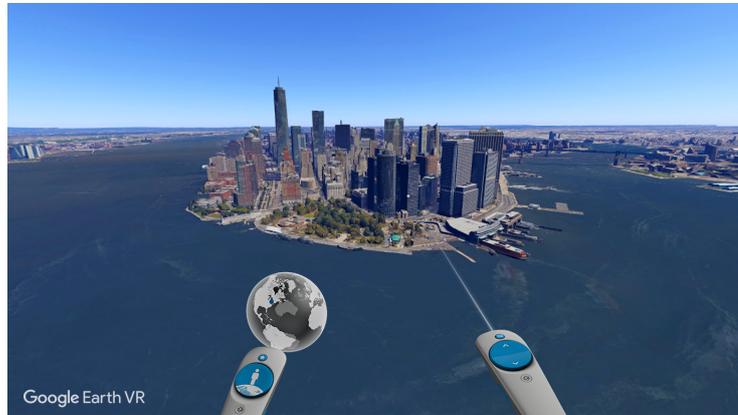


Figura 2.9: Immagine tratta da Google Earth VR [24]

2.2.2 Architettura

Con lo sviluppo della tecnologia VR, anche il campo dell'architettura ne sta sperimentando i vantaggi e i benefici. La realtà virtuale supporta infatti architetti e designer durante il processo di progettazione, fornendo un'esperienza coinvolgente ed immersiva. Gli utenti possono creare modelli 3D di edifici ed ambienti, esplorare i progetti da più prospettive, sperimentare condizioni di illuminazione e materiali e addirittura apportare modifiche in tempo reale. Ciò consente di rendere la fase di progettazione più interattiva ed efficiente, riducendone la durata ed il numero di iterazioni [25].

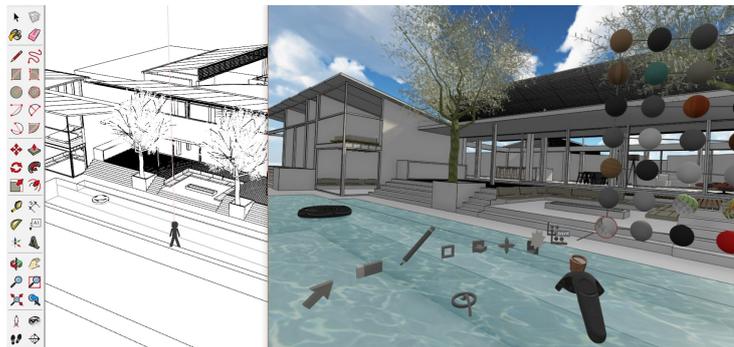


Figura 2.10: Processo di design eseguito tramite VR Sketch [26]

Inoltre, la possibilità di visualizzare e interagire con un progetto in un ambiente virtuale consente ai progettisti di identificare potenziali errori e di correggerli anticipatamente, risparmiando tempo e denaro. Ad esempio, **Skanska Construction** ha sfruttato la realtà virtuale durante la progettazione del LaGuardia Airport Central Terminal B [27]. Analogamente, la **Città di Helsinki** ha creato un digital twin della città per pianificare attraverso tecnologia VR diversi scenari di sviluppo urbano, analizzandone l'impatto sull'ambiente e sul paesaggio urbano.

Un altro aspetto vantaggioso dell'utilizzo della tecnologia VR è la possibilità di analizzare in totale sicurezza il modo in cui una struttura risponderà a particolari condizioni meteorologiche, terremoti e calamità naturali, andando ad apportare le opportune modifiche e valutazioni. Tale aspetto non sarebbe altrimenti verificabile nel mondo fisico reale. La società **Thornton Tomasetti**, ad esempio, ha utilizzato la realtà virtuale per simulare degli stress test ed analizzare le performance strutturali del Mercedes-Benz Stadium di Atlanta [28].

Infine, attraverso simulazioni VR si possono creare presentazioni interattive che consentono ai clienti di esplorare il progetto e richiedere eventuali modifiche prima che inizi la fase di costruzione. In tal senso, un esempio di applicazione è fornito dal prestigioso studio **Foster+Partners** che ha utilizzato la tecnologia VR per presentare ai clienti un virtual walkthrough del Bloomberg Headquarters di Londra [29]. Inoltre, attualmente, le aziende **Matterport** e **VR Global** hanno sviluppato piattaforme VR che permettono agli agenti immobiliari di fornire ai clienti la possibilità di effettuare virtual tour delle proprietà in vendita [30].

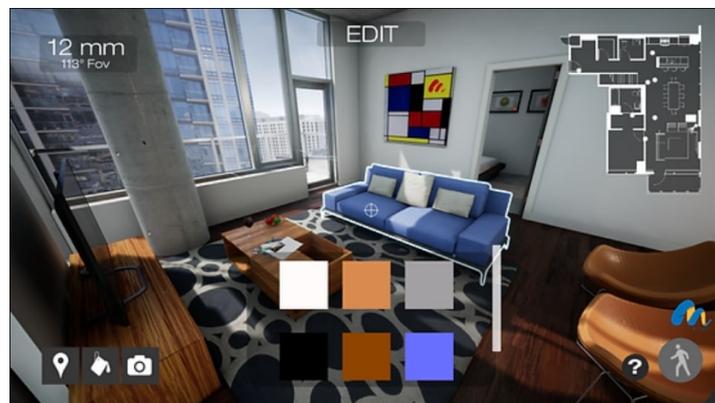


Figura 2.11: Visualizzazione e scelta di un interno tramite tecnologia VR

2.2.3 Esposizioni fieristiche

L'accessibilità e la versatilità della tecnologia VR, unite alla notevole immersività e al realismo delle simulazioni, hanno portato ad un utilizzo della realtà virtuale a supporto delle aziende nella fase di vendita e nel marketing B2B (Business-To-Business) e B2C (Business-To-Consumer). Attraverso simulazioni VR è possibile infatti ricreare ambienti e macchinari di elevata complessità e di grandi dimensioni, consentendo alle aziende di risolvere numerosi problemi economici e logistici quando si tratta di esibire ai clienti i propri prodotti. Inoltre, la possibilità di rappresentare un progetto ancora in fase di sviluppo tramite un'esperienza immersiva e coinvolgente, permette ad investitori e potenziali partner di comprendere e visualizzare al meglio quello che sarà il risultato finale.

La realtà virtuale supporta quindi la fase di *prototipazione* e di *vendita*, ma può essere implementata anche per erogare *assistenza* e *formazione* ai clienti. In particolare, su macchinari complessi e di grandi dimensioni si utilizzano simulazioni VR per consentire ai tecnici di visualizzare con precisione tutti i componenti e ottenere spiegazioni pratiche e dettagliate relative all'utilizzo e alla risoluzione dei problemi. Ciò consente di ridurre notevolmente gli interventi in loco e i tempi di risoluzione dei guasti [31].

Come già anticipato, l'implementazione di tecnologia VR nella fase di vendita e servizio al cliente trova largo impiego da parte delle aziende per quanto riguarda le **esposizioni fieristiche**. Attraverso simulazioni in realtà virtuale è possibile infatti riprodurre fedelmente macchine ed apparecchiature pesanti di qualsiasi dimensione, effettuando dimostrazioni realistiche nello stand fieristico o simulando l'ambiente in cui dovranno essere collocate ed utilizzate. Inoltre, le simulazioni VR consentono di mostrare al cliente movimentazioni e funzionalità del macchinario rappresentato virtualmente. Ciò permette quindi alle aziende di semplificare e gestire la logistica per l'esposizione in fiera in modo innovativo, andando a ridurre notevolmente i costi di imballaggio e di trasporto, e consentendo di mostrare prodotti di grandi dimensioni in maniera dettagliata e precisa [32]. In aggiunta, l'esperienza offerta dalla simulazione VR permette di fornire dimostrazioni interattive delle principali funzionalità del prodotto, incuriosendo i clienti e coinvolgendoli in maniera realistica ed immersiva.

Oltre all'impiego della realtà virtuale, principalmente in ambienti fieristici, l'esposizione di un prodotto e delle sue caratteristiche può essere offerta in determinati casi attraverso simulazioni in **realtà aumentata**. La capacità della tecnologia AR di sovrapporre elementi digitali ad una visione del mondo reale consente, ad esempio, di visualizzare il macchinario industriale esattamente nel posto dove dovrà essere installato, permettendo al cliente di valutarne gli ingombri, gli spazi di fuga e i margini di sicurezza [32].



Figura 2.12: Visualizzazione AR di un macchinario industriale nell'ambiente di installazione [32]

Visti i numerosi vantaggi, diverse aziende che hanno a che fare con prodotti complessi e di grandi dimensioni, hanno adottato l'utilizzo di simulazioni VR e AR per l'esposizione al cliente. Per citare alcuni esempi, l'azienda **Villa Sistemi Medicali**, leader nella produzione e commercializzazione di sistemi radiologici, utilizza soluzioni AR attraverso uno showroom interattivo dei sistemi radiologici, nonché simulazioni VR di ambienti medicali in cui sono collocati i prodotti. Tali applicazioni hanno permesso di ridurre del 35% i costi per la partecipazione ad eventi fieristici. Inoltre, grazie all'accessibilità della tecnologia VR e AR, l'azienda è ora in grado di formare i venditori in tutto il mondo anche da remoto e di coinvolgere i clienti simulando le principali movimentazioni dei sistemi radiologici negli ambienti in cui dovranno essere installati [32].

Di pari passo, l'azienda **Bedeschi**, leader mondiale nella produzione di attrezzature e impianti per la movimentazione dei materiali, ha utilizzato soluzioni VR per esporre uno shiploader di 38 metri e altri impianti in azione alla fiera *Mining Indonesia* a Giacarta. I clienti hanno quindi potuto osservare, attraverso simulazioni VR, il funzionamento di macchinari ed impianti di grandi dimensioni in modo realistico, immersivo ed accessibile. Ad oggi l'azienda utilizza ampiamente piattaforme VR in ambiente fieristico come nuovo strumento di vendita [33].

Per riportare infine un ultimo esempio di applicazione, l'azienda **Officine Meccaniche BBM**, leader nella progettazione e produzione di attrezzature per la manutenzione del materiale ferroviario, ha implementato simulazioni in realtà

virtuale per presentare i propri prodotti in fiera. La grandezza e la complessità dei macchinari prodotti rende infatti difficile la loro esposizione in ambito fieristico ed inoltre, per motivi energetici e di sicurezza, risulta proibitivo mostrare ai clienti il relativo funzionamento. Per ovviare a tali problematiche, attraverso tecnologia VR sono stati riprodotti i modelli 3D di produzione dei macchinari e sono stati inseriti in un ambiente realistico e coinvolgente. Ciò ha permesso ai clienti di visualizzare i prodotti ed osservare tutte le fasi di utilizzo attraverso simulazioni dettagliate, realistiche ed immersive [34].



Figura 2.13: Simulazione VR di un macchinario prodotto da Officine Meccaniche BBM [34]

Per concludere, tra i numerosi vantaggi portati dall'utilizzo della realtà virtuale in ambito fieristico vi sono quindi:

- capacità di visualizzazione del prodotto in ogni dettaglio;
- possibilità di mostrare in maniera immersiva e realistica il prodotto, simulandone il funzionamento e informando l'utente sull'utilizzo e la manutenzione;
- eliminazione dei costi fieristici dovuti allo spazio necessario per esporre il prodotto;
- eliminazione dei costi di montaggio e smontaggio;
- eliminazione dei costi di trasporto;
- possibilità di portare i prodotti in tutte le fiere del mondo, a prescindere dalla complessità e dalle dimensioni di questi ultimi.

La realtà virtuale viene inoltre implementata nel settore automotive e, ultimamente, anche in settore aeronautico, per lo sviluppo di *showroom virtuali* e *configuratori VR*. Tale aspetto verrà approfondito più in dettaglio in seguito.

2.2.4 Automotive

Le caratteristiche della tecnologia VR hanno portato ad un importante impiego anche nell'industria automotive. In questo settore si possono infatti ritrovare numerose applicazioni della realtà virtuale. Alcuni dati risalenti al 2019 evidenziano che il mercato globale della realtà virtuale, in campo automotive, ha registrato \$759.3 milioni e si prevede una crescita fino a \$14727.9 milioni entro il 2027 [35].

Le principali applicazioni della tecnologia VR in campo automotive riguardano supporto alla fase di progettazione, training e servizi legati alla vendita e al cliente, quali VR showroom e configuratori VR.

VR per la progettazione di veicoli L'impiego della realtà virtuale a supporto della fase di progettazione consente di ottimizzare e semplificare la ricerca e lo sviluppo di nuovi veicoli. Tramite tecnologia VR è infatti possibile ricreare e visualizzare modelli 3D rappresentanti parti o interi veicoli, nonché manipolarli e modificarli per raggiungere i requisiti e i risultati voluti. Il supporto della simulazione VR consente dunque di sostituire la creazione di prototipi fisici con modelli virtuali, andando a ridurre notevolmente i tempi e le risorse impiegate. Inoltre, tramite tecnologia VR è possibile eseguire test drive virtuali dei prototipi simulati, andando a risparmiare ulteriormente anche su questa fase del processo di produzione. In tal senso, per citare un esempio, il *Virtual Reality Center of Excellence* (VRK) di **Volkswagen** impiega simulazioni VR durante la fase di progettazione e per virtual test drive, mentre **McLaren Automotive** utilizza la realtà virtuale a supporto del processo di design delle proprie supercar [36].



Figura 2.14: Progettazione di un veicolo tramite VR (McLaren Automotive) [36]

Addestramento VR in campo automotive Tra le varie applicazioni della realtà virtuale, una delle più efficaci e maggiormente implementate risulta essere l'impiego ai fini dell'addestramento. La tecnologia VR viene dunque sfruttata

durante il processo di produzione, andando a creare un digital twin della linea di assemblaggio e permettendo così ai tecnici di familiarizzare con i vari componenti e di memorizzare le operazioni da svolgere [37]. Diversi studi hanno dimostrato come la formazione VR per la fase di assemblaggio abbia portato notevoli vantaggi rispetto ai metodi di apprendimento tradizionali. In particolare, il training VR ha permesso ai tecnici di apprendere le procedure e le operazioni da svolgere più rapidamente e in maniera più efficace e precisa. A questo si aggiunge un incremento in termini di sicurezza, dal momento che l'addestramento VR è eseguito in un ambiente virtuale, dunque lontano da rischi e pericoli reali. Attualmente, **Volkswagen** utilizza questo metodo di training per addestrare più di 10000 dipendenti in oltre 30 differenti task, attraverso visori di ultima generazione. Analogamente, **BMW** e **Audi** hanno ritrovato diversi benefici nel proporre metodi di training per il processo di produzione e assemblaggio basati sulla realtà virtuale, andando a risparmiare in quanto a tempo e risorse economiche rispetto ai tradizionali metodi di addestramento. Inoltre, **Ford Motor Company** ha dimostrato di aver ridotto il numero di infortuni in linea di assemblaggio del 70%, grazie all'utilizzo di tecnologia VR [38].

Un altro impiego della realtà virtuale per scopi addestrativi prevede la simulazione di scenari virtuali adibiti a testare in sicurezza prototipi di vetture a guida autonoma, cercando inoltre di studiarne l'interazione con il conducente e permettendo a quest'ultimo di sperimentare particolari situazioni e condizioni di guida, senza correre rischi ed in maniera relativamente economica. Tale aspetto viene sfruttato anche per l'addestramento di conducenti che devono operare particolari veicoli in specifiche condizioni. Ad esempio, gli autisti di mezzi di soccorso o delle forze dell'ordine possono sperimentare rischiosi scenari di guida in maniera completamente sicura, o ancora i conducenti di macchine operatrici possono sfruttare la tecnologia VR per simulare particolari e rischiose manovre [39].

Configuratore auto e test drive VR Grazie alle caratteristiche della realtà virtuale, i rivenditori e le case automobilistiche possono introdurre nuovi servizi da offrire ai clienti, a supporto della fase di vendita. In particolare, il cliente che usufruisce della tecnologia VR può visualizzare il veicolo da acquistare, simulato in un ambiente virtuale, andando ad osservarne in dettaglio le caratteristiche. Viene offerta così un'esperienza di acquisto coinvolgente ed immersiva, con la possibilità di modificare in tempo reale diversi dettagli del prodotto, che può quindi essere configurato a piacimento ed esplorato virtualmente. Alcune case automobilistiche offrono inoltre la possibilità di eseguire virtual test drive, andando ad utilizzare la realtà virtuale per testare a tutti gli effetti il veicolo in uno scenario virtuale [37][39]. Come esempio di applicazione si riportano i *Virtual Reality Car Configurator* sviluppati e utilizzati da **Mazda**, **Porsche**, **Aston Martin** e **Toyota**, per citare alcuni dei numerosi marchi che hanno adottato tale tecnologia. Per quanto riguarda

inoltre la possibilità di virtual test drive, **Volvo** ha sviluppato un'esperienza di guida virtuale del modello XC90 che si basa sull'utilizzo di economici headset [40], mentre **Abarth** ha offerto una simulazione ancora più coinvolgente ed immersiva ai potenziali acquirenti di Abarth 595 Scorpioneoro, con l'impiego di più evoluti HMD.



Figura 2.15: Mazda Virtual Reality Car Configurator [41]

2.2.5 Medicina

La tecnologia VR, con i suoi sviluppi, viene attualmente utilizzata in campo medico e sta portando progresso ed innovazione nei programmi di riabilitazione cognitiva e motoria, nella diagnosi dei disturbi neurologici, come supporto durante gli interventi chirurgici e come metodo di training. Inoltre, i dispositivi VR hanno il pregio di aumentare l'accessibilità alle cure e accelerare le diagnosi, tanto che la *Food and Drug Administration* (FDA) statunitense ha recentemente inserito i device AR e VR tra i dispositivi medici [42].

Addestramento VR in campo medico Uno studio del Dipartimento di Medicina dell'*Università della California* (UCLA) di Los Angeles, ha dimostrato come l'utilizzo di tecnologia VR per il training dei chirurghi sia più efficace rispetto ai metodi tradizionali. In particolare, i risultati del test hanno evidenziato, per gli studenti formati con realtà virtuale, il 130% in più di nozioni acquisite, il 38% in più di passaggi completati correttamente ed un'esecuzione più veloce del 20% rispetto ai ragazzi addestrati con metodi tradizionali [43]. La simulazione VR permette infatti di ricreare situazioni complesse e critiche su cui esercitarsi, aumenta coinvolgimento e concentrazione degli studenti grazie all'immersività e all'interattività e permette di apprendere e memorizzare al meglio le operazioni da svolgere grazie al concetto del learn-by-doing. Attualmente diversi istituti

stanno implementando metodi di training per chirurghi basati su tecnologia VR, mentre altre applicazioni ne prevedono l'utilizzo per l'addestramento del personale di soccorso, ad esempio per retraining frequente di procedure BLS (Basic Life Support and Defibrillation). Per citare un esempio, attualmente il **Johnson & Johnson Institute** ha sviluppato esperienze di formazione chirurgica in realtà virtuale basate sull'utilizzo di headset VR [44].



Figura 2.16: Formazione chirurgica in realtà virtuale [45]

VR per la cura di disturbi psichiatrici La realtà virtuale è utilizzata con successo per la diagnosi ed il trattamento di diversi disordini mentali. Particolare efficacia riscontrano le terapie VR mirate alla cura della *fobia*, che consentono di esporre il paziente a stimoli suscitanti sintomi legati a tale disturbo. Attraverso la simulazione VR il paziente può quindi immaginarsi immerso in difficili situazioni e ricevere particolari stimoli, pur essendo fisicamente in un ambiente sicuro e controllato [46]. Altre applicazioni vedono l'implementazione della realtà virtuale per la cura e la diagnosi del disturbo da *deficit attenzione/iperattività* (ADHD) nei bambini o nella *sindrome da stress post-traumatico* (PTSD) negli adulti [42]. In quest'ultimo caso, la tecnologia VR è risultata molto efficace per curare tale disturbo tra i veterani dell'esercito americano. L'**Institute for Creative Technologies (ICT)**, ad esempio, ha ricreato scenari virtuali con ambientazioni simili a quelle vissute dai soldati in Iraq e Afghanistan, registrando ottimi risultati per il trattamento di PTSD [47].

Riabilitazione VR La tecnologia VR può essere utilizzata per ricreare ambienti virtuali adibiti alla valutazione e al trattamento di problemi cognitivi, emotivi e motori. Alcuni studi hanno dimostrato come, attraverso stimoli ricevuti tramite la realtà virtuale, i pazienti siano riusciti ad acquisire o migliorare le proprie capacità motorie in zone colpite a seguito di *infarto*, come ad esempio il labbro superiore, le mani o altre parti del corpo. I risultati raccolti hanno mostrato infatti numerosi

benefici rispetto ai metodi di riabilitazione tradizionali [46]. Inoltre, in pazienti affetti da *disturbi dello spettro autistico* (ASD), il realismo della simulazione VR ha permesso di acquisire importanti skill e di aumentare la probabilità che vengano riportate nella vita reale di tutti i giorni [47].

2.2.6 Esplorazioni spaziali

Durante la fase di preparazione ad una qualsiasi missione di esplorazione spaziale è necessario predisporre sessioni di addestramento quanto più dettagliate ed efficaci possibile. Gli astronauti devono essere preparati al meglio a situazioni estreme, con elevato tasso di rischio e in ambienti difficilmente riproducibili in modo fedele sulla Terra. Per questi motivi, la tecnologia VR gioca un ruolo importante per il **training degli astronauti** alle missioni spaziali. In particolare, per un'esperienza il quanto più coinvolgente e simile alla realtà, si sfruttano l'immersività, l'interazione e la presenza date dalla realtà virtuale, integrandole con ambienti e dispositivi in grado di simulare condizioni di gravità ridotta.

Per citare un esempio, l'**Australian Space Agency (ASA)**, in collaborazione con **Raytracer**, ha sviluppato un sistema virtuale di addestramento subacqueo per astronauti, chiamato *Titan Lake*.



Figura 2.17: Titan Lake VR training [48]

Gli utenti indossano un headset VR e vengono immersi all'interno di una piscina in modo da simulare condizioni di gravità ridotta. Grazie alla simulazione VR, agli astronauti vengono dunque proposti diversi scenari in cui esercitarsi, come l'addestramento in orbita lunare e marziana o l'attività extraveicolare presso l'ISS. Inoltre, vi è la possibilità di eseguire sessioni di training in team attraverso la riproduzione in real-time dello stesso scenario virtuale ad un gruppo di astronauti.

La tecnologia VR permette quindi di svolgere queste complesse attività di addestramento in modo più ripetibile, accurato, sicuro ed economico rispetto ad altri metodi tradizionali [48].

Recentemente anche la **NASA** sta implementando un metodo di addestramento simile, a discapito del training tradizionale. In particolare, è stato sviluppato il *NASA Extreme Environment Mission Operation* (NEEMO), ambiente subacqueo in cui gli astronauti svolgono sessioni di addestramento utilizzando la realtà virtuale per riprodurre scenari di missioni spaziali. Attraverso questa modalità di training è stato possibile ridurre il tempo necessario ad apprendere specifici task da 4 ore a solamente 1 ora [49].

La NASA sta inoltre utilizzando la tecnologia VR all'interno dell'*International Space Station* (ISS) in diverse applicazioni [50]:

- Controllo di sistemi robotici: **ESA (European Space Agency)** e **CNES (National Center for Space Studies)** stanno testando il controllo remoto di bracci robotici e veicoli spaziali utilizzando realtà virtuale abbinata ad un interfaccia aptica. I risultati verranno utilizzati per migliorare l'ergonomia delle workstation sulla ISS.
- Esercizi di allenamento immersivi: si crea un ambiente virtuale durante l'utilizzo della bicicletta per il training (CEVIS) all'interno dell'ISS, in modo da migliorare l'esperienza e accrescere la motivazione degli astronauti.
- Monitoraggio della percezione del tempo: è stato dimostrato che gli esseri umani variano la loro percezione del tempo se esposti per lunghi periodi a condizioni di microgravità. Attraverso la tecnologia VR, una volta al mese gli astronauti che si trovano sull'ISS eseguono dei test per valutare eventuali cambiamenti nella percezione del tempo.
- Studi scientifici: sfruttando la realtà virtuale all'interno dell'ISS, vengono condotti studi sull'influenza della gravità nell'afferrare oggetti, coordinare movimenti e valutare la posizione del proprio corpo rispetto ad altri elementi.

Per quanto riguarda le esplorazioni spaziali, la NASA sta infine sviluppando una superficie di esplorazione XR conosciuta come *Assessments of Physiology And Cognition in Hybrid-reality Environments* (APACHE). Lo scopo del progetto è quello di riprodurre uno scenario che riporti ad un'attività extraveicolare (EVA) di esplorazione planetaria, utilizzando una combinazione di realtà virtuale e realtà fisica. Tale esperienza dovrà simulare più fedelmente possibile il carico di lavoro fisico e cognitivo a cui potrebbero essere sottoposti gli astronauti. Il prodotto sarà poi sviluppato ulteriormente ed adattato per attività di training destinate a preparare gli astronauti alle prossime missioni spaziali previste sul suolo marziano [51].



Figura 2.18: Utilizzo della realtà virtuale a bordo dell'ISS per il controllo remoto di un braccio robotico [50]

Tra le aziende italiane, **Thales Alenia Space** sta attualmente sviluppando e adottando la tecnologia VR, soprattutto a supporto delle fasi di progettazione e produzione. La realtà virtuale viene ad esempio utilizzata all'interno degli impianti di produzione per organizzare le aree dedicate all'assemblaggio, integrazione e test (AIT) dei satelliti. Grazie alle sue caratteristiche, infatti, è possibile visualizzare e correggere rapidamente la disposizione dei diversi componenti ed equipaggiamenti all'interno degli impianti, in modo da facilitare il lavoro dei tecnici e l'accesso alle attrezzature necessarie. Per riportare alcuni esempi, tale tecnologia è stata adottata nello sviluppo delle nuove infrastrutture di Roma per determinare la miglior configurazione per l'assemblaggio e l'integrazione di otto satelliti della costellazione O3b. Inoltre, la realtà virtuale ha supportato anche la fase di assemblaggio del payload del satellite SES-17 e la fase di design del dirigibile stratosferico *Stratobus* [52].

Presso Thales Alenia Space è inoltre attivo il COSE (*COllaborative System Engineering*) Centre, dove si sviluppano metodi e software per l'utilizzo delle tecnologie VR nella routine di lavoro dei team internazionali a supporto delle operazioni a bordo della ISS. L'utilizzo di ambienti virtuali collaborativi ha portato infatti al consolidamento di nuovi processi che sono attualmente utilizzati a supporto della progettazione dei futuri Habitat Spaziali per missioni sulla Luna e su Marte. Inoltre, la simulazione VR favorisce la condivisione delle conoscenze e la progettazione orientata all'utente, riducendo i tempi e permettendo agli astronauti di fornire linee guida di progetto per futuri design [53].

Infine, attraverso una partnership con altre società, Thales sta sviluppando una piattaforma edumentertainment, *Lunar City*, che ha lo scopo di promuovere i viaggi in orbita, ispirare e formare le generazioni future attraverso esperienze immersive.

Il progetto è basato sull'impiego della tecnologia VR, che consentirà agli utenti di interagire virtualmente con lo Spazio, di collegarsi in tempo reale con l'ISS e in generale di avvicinarsi al turismo spaziale e comprendere l'importanza delle esplorazioni spaziali e della ricerca spaziale per il futuro dell'umanità [54]. Il tutto è basato sulla capacità della realtà virtuale di fornire esperienze immersive, attrattive e coinvolgenti.

2.3 Realtà virtuale nel settore aeronautico

La realtà virtuale sta acquisendo sempre più rilevanza nell'industria aeronautica e sta contribuendo in maniera importante allo sviluppo tecnologico e alla crescita del settore. In precedenza è già stato sottolineato come, nel mercato globale della realtà virtuale, le applicazioni volte al settore aeronautico e della difesa ricoprono una buona percentuale (figura 2.8), destinata peraltro a crescere.

2.3.1 Dimensioni di mercato

Analizzando più in dettaglio il mercato, le applicazioni della realtà virtuale nel settore aerospazio e difesa hanno registrato 391.9 milioni di dollari nel 2018 e si prevede possano raggiungere i 5840.7 milioni di dollari entro il 2026 [55]. E' chiaro dunque come la tecnologia VR stia avendo un forte impatto sull'innovazione e sullo sviluppo dell'industria aeronautica grazie alle sue caratteristiche e alle molteplici applicazioni.

Global Virtual Reality in Aerospace and Defense Market Share, By Application, 2018

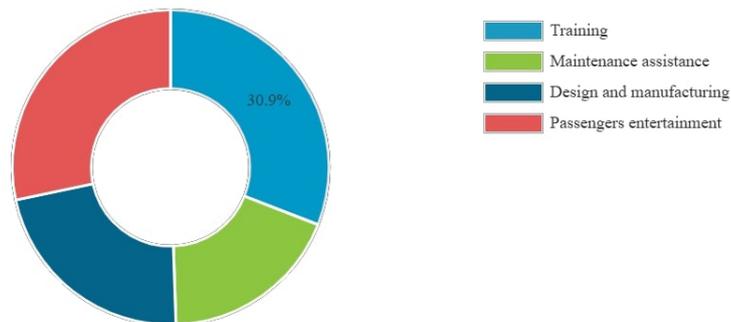


Figura 2.19: Mercato globale VR nel settore aerospazio e difesa diviso per applicazioni [55]

In particolare, tra queste, maggiore rilevanza assume l'implementazione di realtà virtuale per addestramento dei piloti e del personale aeronautico, con un 30.9% del mercato VR del settore (figura 2.19). A ciò segue, in ordine, l'applicazione

di tecnologia VR per l'intrattenimento dei passeggeri, per il supporto alle fasi di progettazione e fabbricazione e per il supporto alla manutenzione [55].

Il Nord America sta attualmente guidando lo sviluppo della realtà virtuale in campo aeronautico, con una quota di mercato pari a 136.3 milioni di dollari nel 2018 e, tale dato, è destinato a salire notevolmente grazie allo sviluppo globale del mercato e alla presenza di aziende chiave come *Google* e *HTC*. Tuttavia, ci si aspetta che anche l'Europa occupi una buona posizione di mercato, favorita dalla presenza di diverse industrie aeronautiche e della difesa che stanno adottando e sviluppando applicazioni in realtà virtuale [55].

2.3.2 Applicazioni

Come è già stato anticipato, la realtà virtuale sta trovando sempre maggiore applicazione nel settore aeronautico. La complessità dei prodotti, la tendenza all'innovazione tipica del settore ed il tentativo di ridurre i costi, dove possibile, hanno portato ad un crescente impiego della tecnologia VR a supporto dell'industria aeronautica.

Si riportano dunque in dettaglio le principali applicazioni della realtà virtuale in campo aeronautico.

Learning Tool per ingegneri aerospaziali Si stanno sviluppando simulazioni VR in cui, attraverso la creazione di un adeguato ambiente virtuale, gli ingegneri aerospaziali possono visualizzare parti di velivoli, motori aeronautici, strutture composite, in modo da analizzarne le caratteristiche e accrescere l'esperienza pratica. Solitamente, infatti, l'apprendimento è basato su nozioni teoriche e la parte pratica entra in gioco solamente quando l'ingegnere ha a che fare con velivoli e parti in ambito lavorativo. Un ambiente virtuale simulato in cui poter essere immersi ed interagire, rappresenta dunque un metodo di apprendimento innovativo ed efficace e permette di acquisire skill pratiche in un luogo controllato e sicuro [56].

Supporto alle fasi di progettazione e produzione La tecnologia VR, con le sue caratteristiche, rappresenta un importante strumento a supporto di progettisti e tecnici nelle fasi di progettazione e fabbricazione. Attraverso la realtà virtuale è possibile ricreare in un ambiente simulato parti e componenti in fase di design o addirittura interi velivoli [57]. In tal modo, l'utente può visualizzare il prodotto ed interagire con esso andando ad apportare modifiche e osservando i risultati in real-time. Il tutto è effettuato attraverso un'esperienza ad elevata immersività ed interazione, e in un ambiente sicuro. Inoltre, grazie alla simulazione VR, si ha una notevole riduzione dei costi e del tempo impiegato a sviluppare e produrre prototipi fisici che, soprattutto nelle prime fasi di design, possono essere sostituiti da digital twin.

Diverse aziende aeronautiche e centri di ricerca stanno attualmente sviluppando ed implementando simulazioni VR a supporto di progettazione e produzione.

A partire dal 2000, **Embraer** ha creduto nei possibili vantaggi e benefici della realtà virtuale. Il 23 Febbraio 2000, l'azienda ha fondato un Virtual Reality Center (*Centro de Realidade Virtual - CRV*) a São Paulo, a supporto del processo di sviluppo della famiglia di velivoli commerciali Embraer E-170/E-190. L'utilizzo della tecnologia VR ha portato a completare lo sviluppo del velivolo in 38 mesi, a discapito dei 60 mesi impiegati per il predecessore E-145. Il centro è stato poi aggiornato negli anni e attualmente fornisce supporto allo sviluppo e alla produzione della nuova generazione di velivoli E-Jets E2. Nel 2017 è stata completata l'installazione della tecnologia *3D Command Session* che fornisce un ulteriore grado di interazione, permettendo di manipolare modelli 3D ed identificare eventuali interferenze tra i sistemi [58].

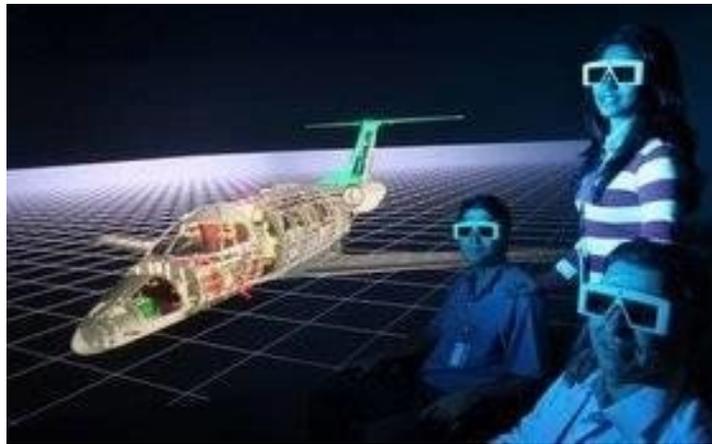


Figura 2.20: Virtual Reality Center di Embraer in Brasile [58]

Di pari passo con questa filosofia, anche **Boeing** sta attualmente utilizzando e sviluppando soluzioni VR e AR a supporto delle fasi di produzione. In particolare, attraverso la simulazione in realtà virtuale, i tecnici che curano la fase di assemblaggio e installazione del carrello del 737 MAX 10 possono visualizzare virtualmente il modo in cui il componente dovrà essere installato, potenziali problemi da fronteggiare durante l'installazione o il tipo di strumenti da adoperare. Così facendo, ci si prepara anticipatamente all'assemblaggio fisico vero e proprio, risparmiando tempo e denaro e anticipando eventuali problemi prima che determinino un incremento dei costi. La tecnologia VR ha supportato analogamente anche alcune fasi di produzione dei velivoli 777X e KC-46 tanker [59].



Figura 2.21: Utilizzo della realtà virtuale nella produzione del 737 MAX 10 [59]

Per citare un altro esempio, **Airbus** ha implementato applicazioni VR a servizio di ingegneri e progettisti per supportare i processi di progettazione e fabbricazione. Inoltre, la società ha fondato un centro dedicato, l'*Airbus Holographic Academy*, dove vengono studiate e sviluppate tecnologie VR, MR e AR per favorire la crescita e l'innovazione all'interno dell'azienda. In particolare, per quanto riguarda la realtà virtuale, sono state sviluppate applicazioni VR che permettono ai progettisti di interagire con modelli 3D digitali, con la possibilità di apportare modifiche in real-time. In tal modo, si supporta il processo di design dei velivoli andando a simulare modifiche e azioni in un ambiente virtuale sicuro e immersivo, risparmiando tempo e risorse economiche necessarie alla costruzione di prototipi ed infrastrutture adibite alla progettazione [60].

Airbus sta lavorando per standardizzare l'utilizzo della tecnologia VR a supporto dei dipendenti. In breve periodo ci si aspetta che ogni dipendente possa avere accesso a modelli 3D digitali dei velivoli, in modo da poter verificare rapidamente l'accessibilità a determinati componenti, processi di manutenzione o nuove soluzioni di design. Il tutto verrà implementato attraverso headset di ultima generazione [60].

Oltre alla realtà virtuale, Airbus utilizza anche **soluzioni AR** nelle operazioni di assemblaggio e manutenzione. Nello specifico, sfruttando l'utilizzo di un tablet e della tecnologia AR è stato possibile ridurre il tempo di ispezione di 60000 giunti della fusoliera dell' Airbus A380 da 3 settimane a solamente 3 giorni. Grazie allo stesso principio, l'utilizzo di visori *Microsoft HoloLens* forniti ai team che si occupano dell'impianto elettrico, ha permesso un'installazione il 25% più rapida [60].

Infine, anche **Lockheed Martin** sta portando avanti lo sviluppo e l'implementazione di tecnologia VR e AR nei processi di design e produzione. L'azienda ha fondato uno dei più importanti ed evoluti centri VR, il *Collaborative Human*

Immersive Laboratory (CHIL), che permette la collaborazione tra i team di design e di fabbricazione prima che il prodotto sia fisicamente sviluppato o siano costruite le opportune infrastrutture. Così facendo, grazie alla realtà virtuale si ottiene un notevole risparmio di tempi e costi, con la creazione di un ambiente virtuale simulato in cui è possibile testare nuove soluzioni e risolvere problemi rapidamente. Ad oggi, il CHIL sta sperimentando soluzioni sempre più innovative ed efficaci, dando ai tecnici la possibilità di fare pratica per l'installazione e l'assemblaggio di componenti e fornendo agli ingegneri la possibilità di valutare prestazioni reali dei prodotti già a partire da analisi sul modello virtuale. Come già sottolineato in precedenza, ciò consente un significativo risparmio di tempo e denaro rispetto alla costruzione di prototipi fisici [61].

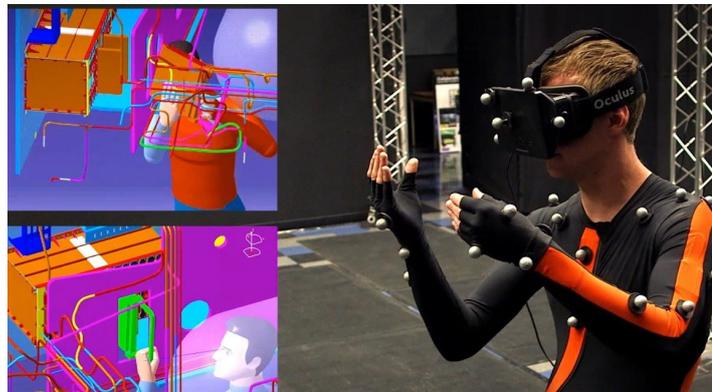


Figura 2.22: CHIL di Lockheed Martin [61]

In campo elicotteristico, **Bell Helicopter Textron** ha appoggiato l'utilizzo della realtà virtuale nel processo di design. Ad oggi tale tecnologia viene sviluppata ed implementata a supporto di progettisti ed ingegneri. Per citare un esempio, grazie ai numerosi vantaggi offerti dalla tecnologia VR, l'azienda ha completato il progetto del rivoluzionario *FXC-001* in tempi molto più brevi rispetto ad una progettazione con approccio tradizionale [62].

Assistenza alla manutenzione Un'ulteriore applicazione della realtà virtuale in campo aeronautico è quella di fornire assistenza alle operazioni di manutenzione. Sebbene, in tal senso, la tecnologia VR sia utilizzata soprattutto per l'addestramento del personale manutentore, che verrà approfondito in seguito, anche durante l'applicazione sul campo può apportare diversi vantaggi ed incrementare l'efficienza [57]. Gli addetti alla manutenzione possono infatti seguire simulazioni VR che aiutano ad eseguire determinate operazioni in modo più rapido, efficiente e sicuro [57]. Inoltre, la realtà virtuale può essere sfruttata per fornire assistenza alla manutenzione in remoto. In particolare, i team di manutenzione possono essere

guidati ricevendo informazioni da remoto tramite tecnologia VR mentre stanno operando, andando così ad aumentare l'efficienza del lavoro e diminuendo i tempi in gioco [56].

Per questo tipo di applicazione risulta particolarmente indicato anche l'utilizzo di **realtà aumentata**, che permette la sovrapposizione di informazioni ed immagini virtuali ad una visione del mondo reale, consentendo così ai manutentori di proseguire fisicamente nello svolgimento dei propri compiti ricevendo al contempo utili ed importanti indicazioni. In tal senso, esempi di applicazione si ritrovano in **Boeing** e **Airbus**, grazie all'adozione di visori *Microsoft HoloLens* o in **Lockheed Martin** che ha sperimentato l'utilizzo di smart glasses *Epson Moverio BT-200* [63].

Intrattenimento dei passeggeri Ricordando la divisione per applicazioni del mercato globale della realtà virtuale, rappresentata in figura 2.8, si evidenzia come l'utilizzo di tecnologia VR per l'intrattenimento dei passeggeri occupi un'importante porzione di mercato, seconda solamente alle applicazioni volte al training. Inoltre, l'*International Air Transport Association* (IATA) ha previsto che entro il 2036 il numero globale di passeggeri salirà fino a 7.8 miliardi, motivo per cui tale segmento è destinato ad assumere una posizione sempre più rilevante nel mercato VR dell'industria aeronautica. L'incremento dei passeggeri accresce infatti la domanda per innovative e avanzate soluzioni di intrattenimento, al fine di garantire una migliore qualità dei servizi offerti [55].

IATA ha collaborato con *Inflight VR* per presentare alle compagnie aeree una possibile soluzione VR per l'intrattenimento dei passeggeri. Sono stati resi disponibili film, programmi televisivi, ma anche informazioni sulla destinazione, visite guidate e servizi di shopping, in modo da dimostrare il vasto range di opzioni ricopribili con la tecnologia VR. Secondo Tim-Jasper Schaaf, direttore della divisione *Marketing and Sales* di IATA, nessun prodotto ha mai avuto in precedenza un feedback così positivo da parte delle compagnie aeree. Sulla stessa linea, uno studio condotto ad Aprile del 2018 da *SkyLights*, azienda di headset e prodotti VR, ha riportato che il 72% dei passeggeri sarebbero disposti ad utilizzare metodi di intrattenimento VR [64].

Ad oggi diverse compagnie aeree stanno testando ed implementando applicazioni in realtà virtuale per l'intrattenimento dei passeggeri. Ad esempio **Iberia**, in collaborazione con *Inflight VR*, offre attualmente dispositivi VR nelle tratte Madrid-New York e Madrid-Tel Aviv [65], mentre **Lufthansa** ed **Etihad Airways** stanno testando soluzioni di intrattenimento VR nelle business lounge degli aeroporti di Francoforte e Abu Dhabi, rispettivamente [66].



Figura 2.23: Intrattenimento VR dei passeggeri offerto da Iberia [67]

Infine, anche **Air France** sta sperimentando metodi VR di intrattenimento con un utilizzo specifico finalizzato a distrarre e tranquillizzare passeggeri ansiosi o paurosi di volare, sfruttando l'immersività e l'interazione offerte dalla tecnologia VR e migliorando quindi l'esperienza di volo [57].

Training L'utilizzo di tecnologia VR ai fini dell'addestramento del personale rappresenta ad oggi la più importante applicazione della realtà virtuale in campo aeronautico. Tale aspetto verrà dunque trattato in maniera più dettagliata ed approfondita successivamente.

Configuratore VR Come già visto per il settore automotive, anche nell'industria aerospaziale si stanno sviluppando soluzioni VR a supporto della vendita. Le aziende nel settore aerospaziale partecipano a esposizioni, fiere e, occasionalmente, raggiungono i clienti per incontri diretti per la vendita dei loro prodotti. Durante questi meeting vi è la necessità di mostrare il velivolo, sia che questo sia già in produzione o ancora in fase di progettazione. Normalmente si utilizzano mockup fisici o documenti tecnici che, in un caso comportano importanti costi, nell'altro non rendono al meglio le caratteristiche della macchina. Una soluzione alternativa prevede dunque la realizzazione di modelli 3D digitali del prodotto, inseriti in un adeguato ambiente virtuale. Utilizzando dispositivi VR, il cliente può dunque visualizzare ed esplorare il velivolo in ogni particolare estetico e tecnico, attraverso un'esperienza coinvolgente, efficace ed immersiva. Inoltre, è possibile interagire con il modello virtuale andando a selezionare diverse configurazioni estetiche e tecniche [68].

Per citare un esempio, tale soluzione è attualmente sviluppata dalla startup **Dead Pixels** che crea soluzioni di configurazione VR per elicotteri di *Leonardo* [68].



Figura 2.24: Leonardo AW169 VR configurator sviluppato da Dead Pixels [68]

2.3.3 Realtà virtuale per l'addestramento del personale aeronautico e manutentore

Nel mercato globale VR del settore aerospaziale, l'applicazione della realtà virtuale per addestramento del personale aeronautico e manutentore risulta essere la più rilevante, con una percentuale pari al 30.9% del mercato [55]. La tecnologia VR, con le sue caratteristiche, viene innanzitutto utilizzata per il training dei piloti, attraverso un'integrazione con i flight simulator, in modo da garantire un'esperienza più realistica ed immersiva. In secondo luogo, attraverso la simulazione di procedure e specifici ambienti digitali, la realtà virtuale rappresenta un valido strumento di addestramento per il personale di volo, per il personale di terra e per gli addetti alle operazioni di manutenzione. Si andranno dunque ad analizzare più in dettaglio tali aspetti, riportando dapprima una breve descrizione delle principali tecniche di addestramento finora implementate in campo aeronautico, in modo da comprendere al meglio i vantaggi e gli svantaggi nell'applicazione di tecnologia VR, e si passerà poi a descriverne le applicazioni per il training dei piloti e del personale manutentore.

Tecniche di addestramento in campo aeronautico Le principali tecniche di addestramento per il personale aeronautico e manutentore prevedono:

- Studio individuale o di gruppo su libri di testo e manuali;
- Insegnamento diretto in presenza;
- Insegnamento diretto in virtual classroom;
- Computer Based Training (CBT);
- VR training.

Tra questi metodi, i primi tre hanno lo svantaggio di non offrire la possibilità di interagire direttamente con la macchina, e quindi di poter acquisire familiarità fisica con gli strumenti da utilizzare e con l'ambiente in cui si opera. Per tale ragione, al fine di garantire un training completo ed esaustivo, aziende e compagnie devono affiancare tali metodi di addestramento ad un training pratico eseguito sul campo. Sarà quindi necessario investire in velivoli, componenti, strumenti, infrastrutture o avanzati sistemi di simulazione, esclusivamente a scopo addestrativo, il che comporta un importante dispendio di risorse economiche [7]. Per quanto riguarda il *Computer Based Training* (CBT), invece, esso rappresenta la principale alternativa al training basato sulla realtà virtuale. Questa tecnica di addestramento prevede l'accesso ad un software dedicato, tramite computer, attraverso il quale è possibile svolgere una serie di attività formative interattive, visualizzare e memorizzare procedure, accedere a schede ed immagini dettagliate dei componenti, o apprendere come svolgere determinate operazioni in condizioni nominali o durante guasti ed avarie. Il CBT rappresenta dunque un valido metodo multimediale, interattivo, facilmente accessibile e adeguato per il self-training [7]. Tuttavia anche in questo caso, come per le tecniche di addestramento descritte in precedenza, manca una parte pratica che consente il contatto con la macchina e con l'ambiente operativo, e che permette di apprendere al meglio le azioni da svolgere una volta che ci si trova a dover agire sul campo. In questo, la realtà virtuale, con le sue caratteristiche, rappresenta un'innovativa ed interessante alternativa ai metodi di addestramento tradizionale. La tecnologia VR è infatti in grado di fornire un ambiente di apprendimento immersivo, interattivo e coinvolgente, che consente all'utente di esplorare l'ambiente virtuale e gli oggetti digitali in esso contenuti, e di interagire dinamicamente con la simulazione. In campo aeronautico, tale sistema di addestramento diventa particolarmente interessante per l'apprendimento di procedure standardizzate (*Standard Operating Procedure - SOP*), necessarie per un'esecuzione ottimale, efficiente e sicura di determinati task. Per tale motivo, il training VR è indirizzato sia ai piloti che al personale aeronautico e manutentore.

Diversi sono i vantaggi derivanti dall'adozione di metodi di training VR-based. Innanzitutto, l'applicazione della tecnologia VR permette di ottenere una simulazione immersiva e interattiva, con un'alta qualità della parte visual e con l'opportunità di agire sulla memoria fisica e gestuale dell'utente, nonchè sul concetto di "learn by doing". Grazie a questi aspetti si riscontra un apprendimento più efficace rispetto ai metodi tradizionali, soprattutto a lungo termine, nonchè una riduzione del tempo di training. Inoltre, la simulazione VR consente di ripetere più volte le varie procedure con molta flessibilità e in un ambiente sicuro, con la possibilità di testare condizioni non nominali quali emergenze, guasti o situazioni avverse. Infine, come già anticipato in precedenza, attraverso l'implementazione della realtà virtuale si ha una notevole riduzione dei costi destinati a ricreare situazioni di training in cui potersi esercitare [7]. In figura 2.25 sono indicati, secondo *TXT Group*, i vantaggi

che il training VR comporta rispetto ai metodi di addestramento convenzionali.



Figura 2.25: Vantaggi dei metodi di training basati sulla realtà estesa [69]

Attualmente, nel settore aeronautico, diverse aziende e compagnie stanno sviluppando ed implementando soluzioni VR per l'addestramento dei piloti e del personale aeronautico e manutentore.

Addestramento VR per piloti Lo sviluppo tecnologico in campo aeronautico ha portato negli anni ad un impiego sempre più importante di simulatori di volo per l'addestramento dei piloti. Questo metodo di training si è dimostrato molto vantaggioso da un punto di vista delle competenze apprese e per la possibilità di riprodurre condizioni di volo rischiose o eventuali guasti ed emergenze, su cui difficilmente ci si potrebbe addestrare in modo sicuro con metodi tradizionali.

Il simulatore di volo è un dispositivo che ricrea artificialmente il volo di un velivolo e l'ambiente in cui vola, per l'addestramento dei piloti, design o altri scopi [70]. In base agli obiettivi del training, si hanno diverse categorie di simulatori. Generalmente, per l'addestramento dei piloti commerciali di aerei o elicotteri è necessario disporre dei più avanzati *Full Flight Simulator* (FFS) di tipo D. Questi ultimi sono caratterizzati da un cockpit che replica fedelmente il velivolo su cui si vuole effettuare il training, un sistema visual in grado di riportare ciò che si vede al di fuori del cockpit e un sistema motion con capacità di movimento su sei assi [70]. Un dispositivo di tale tipo offre un'esperienza di addestramento molto completa e realistica, motivo per il quale gli FFS di tipo D vengono certificati ed implementati per il training iniziale dei piloti, per il type-rating (conversione del pilota ad un altro velivolo) e per il recurring training (addestramento che i piloti commerciali devono eseguire periodicamente).

Nonostante i numerosi aspetti positivi, tali simulatori di volo presentano anche diversi svantaggi, come una notevole complessità, importanti ingombri e dimensioni, e un elevato costo (nell'ordine dei milioni di dollari per FFS di tipo D). In aggiunta,

i più avanzati FFS possono simulare un unico tipo di velivolo per cui sono stati sviluppati.



Figura 2.26: Airbus A320neo Full Flight Simulator di livello D [71]

Per tali ragioni, negli ultimi anni si sta pensando di sfruttare le caratteristiche della tecnologia VR per offrire un metodo di training alternativo e più accessibile. Attualmente, l'esperienza offerta da un FFS non può essere eguagliata da simulatori VR, specialmente per quanto riguarda gli standard e i requisiti richiesti per l'addestramento di piloti commerciali e militari esperti. Tuttavia, l'utilizzo di una simulazione in realtà virtuale nelle fasi iniziali del training di un pilota, può andare a sostituire metodi di addestramento basati su simulatori di categoria inferiore rispetto agli FFS, ma comunque molto costosi e meno accessibili economicamente e logisticamente. Per quanto riguarda l'addestramento più avanzato, eseguito con Full Flight Simulator, la tecnologia VR può però essere integrata all'utilizzo del simulatore stesso in modo da migliorare ulteriormente l'esperienza e ottenere una simulazione ancora più realistica, immersiva ed efficace ai fini del training.

Diverse aziende e compagnie aeree stanno sviluppando ed implementando simulazioni VR per l'addestramento dei piloti. La compagnia **KLM Cityhopper** sta attualmente adottando la realtà virtuale per il training dei piloti di velivoli Embraer E175 e E190. Grazie a tale soluzione, i piloti non devono necessariamente essere presenti in specifici luoghi adibiti alle lezioni o ai simulatori, e possono dunque esercitarsi in maniera più indipendente e flessibile, a seconda delle esigenze. Inoltre, la tecnologia VR permette di testare anche condizioni di volo avverse, situazioni di emergenza e condizioni di guasto, il tutto in un ambiente virtuale totalmente sicuro e privo di rischi. La compagnia ha inoltre appurato che tale metodo di

addestramento ha portato una notevole riduzione dei costi, avendo drasticamente diminuito il numero di aziende terze di supporto e avendo concesso una maggiore flessibilità nella pianificazione dei periodi di training dei piloti. Attualmente, l'addestramento VR affianca i programmi di training già esistenti e in utilizzo, tuttavia la compagnia sta cercando di ottenere alcuni corsi di addestramento VR certificati da EASA, in modo tale da poter rimpiazzare del tutto il training tradizionale [72].

Sulla stessa linea, **Airbus** ha sviluppato l' *Airbus Virtual Procedure Trainer* (VPT), soluzione in realtà virtuale che consente ai piloti di essere immersi in un cockpit virtuale in cui potersi addestrare sulle *Standard Operating Procedure* (SOP). Grazie alla tecnologia VR si ha così un metodo di training sulle procedure avanzato, senza il bisogno di ricorrere a flight simulator o Flight Navigation and Procedures Trainer (FNPT). Infatti, la simulazione VR sviluppata permette di eseguire ripetutamente diverse procedure all'interno di un cockpit completamente interattivo, dove i piloti possono intuitivamente agire su ogni leva, pulsante, switch o comando, seguendo la corretta sequenza di operazioni e allenando la propria memoria muscolare e conoscenza delle procedure. Attraverso l'utilizzo del VPT, i piloti hanno dimostrato di aver appreso le SOP in modo più efficace ed efficiente. Inoltre, il simulatore VR ha portato ad una diminuzione dei costi di addestramento e ad una maggiore flessibilità, dal momento che ogni pilota può scegliere tra un training in singolo con supporto di un'intelligenza artificiale, o il training online di gruppo insieme ad altri utenti. Attualmente, **Lufthansa Group** risulta essere il primo cliente per questa innovativa soluzione di training [73].



Figura 2.27: Airbus Virtual Reality Procedure Trainer (VPT) [73]

Anche **Leonardo** sta investendo nello sviluppo e nell'implementazione di simulazioni in realtà virtuale e in realtà aumentata. L'azienda ha riscontrato diversi benefici nell'utilizzo di tecnologia VR ai fini dell'addestramento. Innanzitutto si sottolinea la possibilità di preparare il personale ad affrontare situazioni complesse

in condizioni estreme, attraverso la creazione di scenari simulati virtuali, non riproducibili attraverso un addestramento fisico reale. Inoltre, alla maggiore efficacia del training si accosta un'importante riduzione dei costi. Tra le soluzioni implementate da Leonardo si sottolinea la **Smart Chair** del *Battle Lab* di Torino, postazione in grado di ricreare quella che potrebbe essere la cabina dei prossimi fighter di sesta generazione. Attraverso la Smart Chair è possibile gestire lo sviluppo dei futuri cockpit, che si prevede lascino al pilota la sola possibilità di agire fisicamente su cloche e manetta. Tutto il resto è virtuale, aumentato e immersivo, dai comandi impartiti con il movimento degli occhi ai tasti touch digitalizzati [74].



Figura 2.28: Smart Chair del Battle Lab di Leonardo [74]

Per quanto riguarda la *Divisione Elicotteri* di Leonardo, sono stati sviluppati sistemi virtuali avanzati per il training. Tra questi, particolare importanza è data al **Virtual and Extended Reality Simulator (VxR)**, basato sulla realtà virtuale e composto da un visore che riproduce la cabina, l'avionica e tutti i controlli di bordo. Inoltre, il simulatore è dotato anche di un feedback tattile quando si utilizzano i comandi, e offre una visuale "out of the window" in grado di garantire ampia profondità di campo visivo. L'esperienza simulata risulta quindi estremamente realistica ed immersiva [74]. Il simulatore VxR viene inoltre sfruttato per supportare lo sviluppo di simulatori multi-piattaforma, che andranno a spaziare tutta la famiglia di velivoli AW119, AW109 e AW09. Grazie alla tecnologia VR si ottengono infatti piattaforme più accessibili, con infrastrutture ridotte e notevoli diminuzioni dei costi di addestramento [75].

Addestramento VR per personale aeronautico e manutentore In precedenza è stato sottolineato come la realtà virtuale, con le sue caratteristiche, costituisca un innovativo metodo di addestramento, per diversi aspetti più vantaggioso rispetto alle tecniche di addestramento convenzionali. Recentemente, diversi

studi ne hanno investigato l'applicabilità e l'efficacia per il training di personale di volo, personale di terra e personale manutentore.

In un recente studio condotto dalla **Changwon National University** [76], è stata studiata l'applicazione della realtà virtuale e del concetto di metaverso a supporto dei tradizionali metodi di addestramento da remoto. Il sistema proposto è stato sviluppato con *Unity 3D* e sono stati utilizzati i dispositivi VR *HTC Vive Pro Eye* e *Oculus Rift S*. Nello studio è stata virtualmente simulata un'operazione di manutenzione effettuata sul velivolo KT-100, con la possibilità di accesso multiplo da parte degli utenti, in modo che più manutentori contemporaneamente potessero esercitarsi sulla stessa macchina. In particolare, sono stati affiancati un utente esperto ed un principiante, per evidenziare ancor più la potenzialità e l'efficacia di tale metodo di training a supporto dell'educazione da remoto. Agli utenti è stata quindi fornita la possibilità di esercitarsi in diverse operazioni di manutenzione da eseguire sul velivolo, e di riguardare procedure e descrizioni dei componenti, il tutto potendo comunicare ed interagire con gli altri utenti e con l'ambiente virtuale. Lo scopo dello studio è stato quello di comparare il sistema di training basato sulla realtà virtuale con i metodi tradizionali, per confermare i vantaggi portati dalla tecnologia VR. I due gruppi di manutentori che si sono sottoposti ai due diversi metodi di addestramento hanno effettuato un *post-test* per valutare le conoscenze acquisite nell'immediato ed un *retention-test*, a 10 giorni dall'esperienza, per verificare la knowledge retention. Inoltre, il VR training è stato valutato sulla base dell'usabilità del sistema attraverso una *system usability scale* (SUS), e sul senso di presenza nell'ambiente virtuale tramite l'*Igroup Presence Questionnaire* (IPQ). I risultati hanno confermato l'efficacia dell'addestramento effettuato tramite tecnologia VR, con un punteggio di 9.5 punti superiore rispetto al metodo di training classico per quanto riguarda il post-test, e di addirittura 15.25 punti superiore nel retention-test. Inoltre, il SUS test e l'IPQ hanno registrato entrambi valori superiori alla media [76]. Lo studio ha quindi evidenziato l'efficacia del sistema di addestramento sviluppato per il training del personale manutentore, considerando inoltre gli ulteriori vantaggi offerti dalla realtà virtuale, come la possibilità di poter ricreare virtualmente ambienti complessi e ad alto rischio, risparmiando tempi e costi ed incrementando la sicurezza del training.

Sulla stessa linea, uno studio condotto dalla **National Formosa University** [77] ha analizzato l'applicazione di un metodo di addestramento in realtà virtuale per la manutenzione del velivolo Dornier-228. In particolare, sono stati ricreati virtualmente un walk-around dell'aeromobile per eseguire le opportune ispezioni, una procedura di controllo del fuel system e la manutenzione dell'equilibratore orizzontale. Il sistema è stato sviluppato con l'impiego di *Unity 3D* e sono stati utilizzati i device VR *HTC Vive Pro* e *Oculus Quest 2*. Come per lo studio precedente, i candidati sono stati divisi in due gruppi, dei quali uno ha sperimentato

il metodo di training basato sulla tecnologia VR mentre l'altro ha seguito un addestramento tradizionale erogato tramite lezioni frontali e Computer Based Training (CBT). Dopo aver sottoposto i due gruppi ad un pre-test e ad un post-test, i risultati hanno evidenziato come la realtà virtuale abbia portato ad un training più coinvolgente, conveniente ed efficace rispetto ai metodi di addestramento convenzionali. Infatti, il test ha mostrato, a favore del training VR, una maggiore capacità dei candidati di rilevare difetti e anomalie durante il walk-around, una maggiore facilità nel ricercare informazioni richieste nei manuali di manutenzione, ed un miglioramento nella predizione di possibili guasti e nella gestione dei problemi. Inoltre, gli studenti hanno dimostrato una maggior propensione nel condividere tra loro le diverse opinioni e nel discutere insieme dei vari problemi o difetti riscontrati. L'addestramento con tecnologia VR ha portato poi ad un miglioramento della capacità di problem-solving dei candidati e ha favorito la capacità di lavorare in gruppo. In conclusione, lo studio ha sottolineato l'efficacia e i numerosi vantaggi portati dall'adozione di un metodo di training VR rivolto al personale manutentore [77].

Infine un'ulteriore analisi, simile a quanto riportato nei precedenti studi, è stata effettuata dall'**Universitat Jaume I** [78]. In questo caso, però, oltre ad una conferma dei risultati ottenuti già in precedenza, sono stati analizzati gli ulteriori vantaggi portati dall'aver ludicizzato l'esperienza. In particolare, attraverso l'aggiunta di progress bar ed un'organizzazione della simulazione che permette di accedere allo step successivo solo una volta completato il precedente, è stata ottenuta una maggiore motivazione degli utenti a ripetere più volte le procedure, nonché una riduzione del tempo impiegato per eseguire i diversi task. Inoltre, in fase di verifica finale, in aggiunta ai test eseguiti nei recenti studi, sono stati valutati eventuali sintomi di malessere portati da un utilizzo prolungato della tecnologia VR. Anche su questo aspetto, il *Simulator Sickness Questionnaire* (SSQ) ha avuto esito positivo, confermando la possibilità di implementare VR training con un basso rischio di provocare malessere negli utenti, soprattutto per tempi di utilizzo necessari a portare a termine le procedure richieste [78].

I vantaggi e l'efficacia dell'utilizzo di tecnologia VR per l'addestramento del personale hanno portato diverse aziende e compagnie aeronautiche a sviluppare ed implementare soluzioni di training VR, rivolte al personale aeronautico e manutentore. **Rolls-Royce** sta attualmente offrendo un servizio di training VR rivolto al personale addetto alla manutenzione del turboprop *AE 2100*. L'azienda ha confermato i benefici di tale metodo di addestramento, come una migliore qualità dell'apprendimento, l'assenza di rischi, l'accessibilità e la versatilità del servizio offerto, nonché un notevole risparmio di costi e di tempo impiegato [79].



Figura 2.29: Rolls-Royce AE 2100 VR maintenance training

Inoltre, in collaborazione con **Qatar Airways**, l'azienda sta cercando di implementare un sistema di training VR rivolto ad ingegneri e personale manutentore. Tale programma di training ha come oggetto il motore *Trent XWB*, le cui importanti dimensioni comportano operazioni di smontaggio e trasporto molto onerose, ai fini della manutenzione. Tramite l'utilizzo di device VR viene quindi fornito un efficace metodo di training, con un notevole risparmio sui costi. Fino ad ora, infatti, è necessario che l'azienda spedisca un motore a Doha essenzialmente per scopi addestrativi, o che la compagnia aerea utilizzi un motore in dotazione, con il rischio di arrecare danni e aumentare l'usura [80].

Anche **Leonardo Helicopters** sta sviluppando ed implementando sistemi VR a supporto del personale aeronautico e manutentore. Attraverso il progetto *Air4MAM* si sta studiando un sistema virtuale immersivo per l'addestramento dei manutentori, evoluzione tecnologica dei Virtual Maintenance Trainer (VMT) [81]. Questi ultimi consistono in simulazioni computer-based rappresentanti repliche digitali 3D di velivoli, inseriti in un ambiente virtuale. Gli utenti possono interagire con l'ambiente e con i modelli digitali, osservando i componenti e le parti ed esercitandosi nelle procedure di manutenzione. Attualmente, nei VMT sono implementati i velivoli AW169, AW139, AW189, NH90 e AW101 [82].

Ulteriore applicazione della tecnologia VR sviluppata da Leonardo è il **Modular Interactive Trainer for Helicopter Operators (MITHOS)**. Tale sistema è basato sull'utilizzo della realtà virtuale per l'addestramento degli operatori al verricello impegnati in compiti di soccorso o in missioni utility. Al suo interno è possibile simulare qualsiasi tipo di condizione atmosferica, formando così gli studenti sia su situazioni normali che critiche, comprese le procedure di emergenza. Tali scenari, infatti, sarebbero difficilmente replicabili durante le fasi di addestramento dal vivo, dato l'elevato rischio a cui sarebbero sottoposti i futuri operatori. Inoltre, MITHOS ha consentito di ridurre significativamente il costo per ora di formazione e di abbattere l'impatto ambientale in termini di consumi di carburante ed emissioni [74]. Il simulatore sarà collegato in futuro al Full Flight Simulator su cui avviene la formazione del personale in volo, in modo che il pilota e l'equipaggio in cabina

possano vivere la stessa ambientazione e collaborare al meglio [83].



Figura 2.30: Sistema di addestramento MITHOS di Leonardo [84]

Infine, nel white paper "*What Virtual Reality (VR) means for Ground Operations*" pubblicato dalla **International Air Transport Association (IATA)** nel 2019, si mostra un'ulteriore applicazione della realtà virtuale per l'addestramento del personale aeronautico [85]. In particolare, il documento riporta i vantaggi derivanti dall'implementazione di tecnologia VR per Ground Operation Training. Oltre agli aspetti positivi già analizzati e descritti in precedenza, l'utilizzo della realtà virtuale per l'addestramento del personale di terra consente di potersi esercitare in modo totalmente sicuro anche in condizioni meteo avverse o in caso di scarsa visibilità. Inoltre, grazie alla tecnologia VR, si ha un metodo di training accessibile ogni qual volta lo si richieda, rapido e veloce da impostare ed utilizzare senza particolari requisiti di spazio e facilmente aggiornabile. Nell'articolo si riporta poi, come esempio, il tool di addestramento *RampVR*, sviluppato da IATA per il training del personale addetto alle operazioni di rampa. Tale metodo di addestramento è stato testato per la formazione del personale di terra dell'Aeroporto di Francoforte. I candidati hanno testato lo strumento di training VR attraverso un'esperienza di "Aircraft Marshalling" e una di "Turnaround Inspections". I risultati hanno dimostrato ancora una volta l'efficacia e i vantaggi derivanti dall'applicazione di tecnologia VR per l'addestramento del personale. I candidati sottoposti al training VR hanno infatti mostrato maggior confidenza e consapevolezza nelle prime mansioni svolte effettivamente sul campo e, inoltre, le operazioni di aircraft marshalling hanno evidenziato i benefici della tecnologia VR sull'allenamento della memoria muscolare. Infine, l'esperienza è risultata molto vicina alla realtà, anche per quanto riguarda situazioni avverse, e non ci sono state evidenze di malessere generale portato dall'utilizzo prolungato di dispositivi VR. Per tali ragioni, RampVR

è stato inserito in modo permanente all'interno delle operazioni di training per il personale dell'Aeroporto di Francoforte [85].

Tecnologia VR e certificazioni EASA Finora sono state analizzate e descritte numerose applicazioni della realtà virtuale in campo aeronautico, specialmente per quanto riguarda l'addestramento del personale aeronautico e manutentore. Inoltre, come visto in precedenza, diversi casi di studio hanno riportato i vantaggi e l'efficacia del training VR, a tal punto che diverse aziende aerospaziali e compagnie aeree stanno attualmente sviluppando ed adottando tale tecnologia concretamente. Tuttavia, per arrivare ad un'implementazione estesa a tutto il settore e perchè la tecnica di addestramento VR sostituisca definitivamente i metodi di training tradizionali, è essenziale che venga riconosciuta e certificata dai principali organi di controllo del settore aeronautico. Dunque, per quanto concerne l'Unione Europea, l'organo di riferimento che regolarizza e controlla il settore aeronautico è l'**European Union Aviation Safety Agency (EASA)**. Recentemente, EASA ha compiuto diversi passi avanti nell'accettazione della realtà virtuale nel settore aeronautico.

- Nel 2021 EASA ha rilasciato il primo certificato per un Flight Simulation Training Device (FSTD) basato sulla realtà virtuale. Il dispositivo è stato sviluppato da *VRM Switzerland (VRMotion Ltd.)* ed è stato implementato per addestrare piloti di elicotteri su manovre pericolose in aree rischiose, dove è stato registrato un 20% di incidenti durante i voli di addestramento. L'adeguatezza della simulazione VR-based è stata valutata attraverso un programma che ha visto interessati piloti, autorità aeronautiche, istruttori di volo e test pilot. Il simulatore è risultato adeguato per il training, soprattutto per quanto riguarda le manovre di autorotazione, hovering e slope landing, dove sono richieste un'adeguata percezione dell'altezza e un ampio campo visivo. L'FSTD è qualificato come Flight and Navigation Procedures Trainer (FNPT) di livello 2 per l'elicottero Robinson R22 Beta II, il più utilizzato in tutto il mondo per quanto riguarda l'addestramento iniziale dei piloti [1].
- In un paper informativo pubblicato da EASA il 16 Marzo 2023, sono state rilasciate delle FSTD Special Conditions per l'utilizzo di Head Mounted Display (HMD) combinati ad una motion platform con inviluppo ridotto. Le Special Conditions descrivono dei requisiti aggiuntivi per l'implementazione di un cockpit basato sulla tecnologia VR. In particolare, il documento descrive nei dettagli i requisiti richiesti per il cockpit VR, per il feedback aptico e per l'accuratezza dell'head tracking system dell'HMD. Dopodichè, vengono indicati ulteriori requisiti richiesti per l'utilizzo di display HMD su dispositivi FTD e FNPT. Infine, viene regolata l'implementazione di un motion system in un FSTD basato sulla tecnologia VR, al fine di creare un ambiente di training

ancora più realistico e ridurre il malessere portato dall'utilizzo di dispositivi VR [2].

- Un ulteriore paper informativo pubblicato da EASA il 16 Marzo 2023 ha rilasciato delle FSTD Special Conditions per lo sviluppo di standard applicabili in risposta ad innovazioni che si dividono in due segmenti: da un lato lo sviluppo di nuovi tipi di velivoli, soprattutto eVTOL, ed il conseguente bisogno di FSTD capaci di rappresentarli; dall'altro, l'implementazione di tecnologie AR e VR sugli esistenti FSTD [3].
- L'EASA Annex IV to ED Decision 2020/002/R rilasciato il 13 Marzo 2020, fornisce invece indicazioni sull'implementazione di nuove metodologie e tecnologie di training nelle procedure di addestramento alla manutenzione degli aeromobili. Tra queste, si evidenziano in particolare il training basato su metodi multimediali e sulla realtà virtuale. Inoltre, viene raccomandato l'utilizzo di una corretta combinazione di diverse metodologie e strumenti di addestramento, al fine di accrescere l'efficacia finale del training [4].

Capitolo 3

Hardware e Software

Il progetto di tesi ha richiesto l'impiego di specifici hardware e software, necessari per la realizzazione dell'ambiente VR, per lo sviluppo e la programmazione della simulazione in realtà virtuale, e per l'interazione tra quest'ultima e l'utente.

Di seguito si andranno dunque ad introdurre hardware e software utilizzati per la realizzazione del progetto.

3.1 Software

Durante le varie fasi del lavoro di tesi sono stati sfruttati diversi software. La creazione dell'ambiente virtuale e dei modelli 3D dei componenti dell'impianto ha richiesto l'impiego dei programmi di modellazione 3D **Blender** [86] e **3D Studio Max** [87], oltre ad un software di visualizzazione 3D per la gestione dei file bim. In particolare, Blender è stato utilizzato per la realizzazione dell'ambiente VR a partire dalla planimetria, in quanto presenta lo stesso sistema di riferimento che si ritrova in Unity. La fase principale di sviluppo e programmazione della simulazione VR è stata invece eseguita in **Unity**, di cui si approfondiranno più in dettaglio caratteristiche e funzioni in seguito. Una volta creata l'applicazione VR, l'installazione sul visore è stata resa possibile dall'impiego dell'interfaccia **SideQuest** [88]. Infine, sono stati utilizzati software per la realizzazione e il perfezionamento di grafiche, e per l'inserimento di file audio nella simulazione.

3.1.1 Unity

Unity [89] è un motore grafico multi-piattaforma, di tipologia game engine, sviluppato da *Unity Technologies*. E' utilizzato per la creazione di videogiochi, interfacce grafiche e contenuti interattivi 2D e 3D, esperienze in realtà virtuale e realtà

aumentata e altre applicazioni interattive multiplatforma. Con le sue caratteristiche, il software fornisce supporto per le dinamiche di corpo rigido, il rilevamento delle collisioni e il rendering 3D, consentendo lo sviluppo di ambienti realistici e coinvolgenti, nonché l'interazione con essi e con gli oggetti inseriti nella scena. Inoltre, Unity fornisce la possibilità di integrare gli ambienti virtuali e le interfacce grafiche realizzate con modelli 3D, immagini, audio, video e script importabili nella scena. Queste risorse possono essere ottenute accedendo ad uno store online (*Asset Store*) messo a disposizione dagli sviluppatori del software, e contenente varie librerie e modelli scaricabili ed utilizzabili, semplificando così il processo di sviluppo [90].

Altre importanti caratteristiche di Unity sono il supporto dei linguaggi di programmazione *C++*, *C#* e *JavaScript*. In particolare, nel progetto di tesi sono stati sviluppati script in linguaggio *C#*, attraverso l'ambiente di sviluppo integrato **Visual Studio** [91].

A queste funzionalità si aggiunge la possibilità di esportare i progetti realizzati su molteplici piattaforme, tra cui sistemi operativi desktop, console, device per VR e AR, sistemi operativi mobile, siti web. Infine, Unity è dotato di un'interfaccia intuitiva, che semplifica lo sviluppo dei progetti e aiuta nella gestione delle risorse e delle scene create.

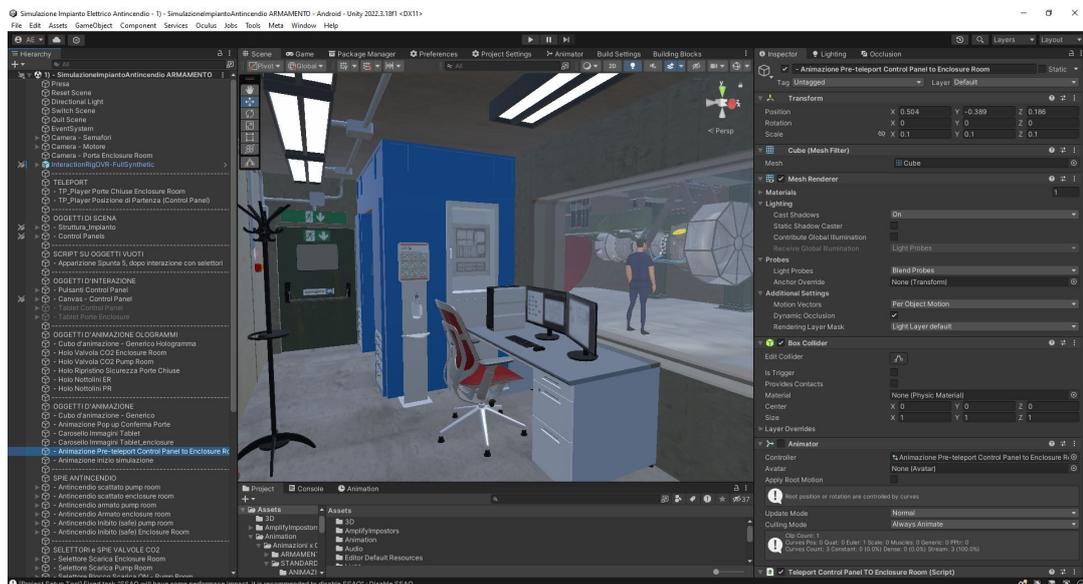


Figura 3.1: Schermata principale Unity

In figura 3.1 è riportata la schermata principale di Unity, composta da diversi pannelli che possono essere posizionati a piacimento. Nello specifico, si ha:

- **Hierarchy:** gerarchia in cui vengono inseriti tutti gli elementi presenti nella scena. Questi ultimi possono essere inoltre organizzati secondo una struttura di classificazione padre-figlio, andando così a stabilire le relazioni tra i vari oggetti;
- **Project:** contiene gli *asset* del progetto suddivisi in cartelle, richiamando la directory presente nella cartella principale. Tra gli asset si trova tutto ciò che deve essere importato in fase di creazione del progetto, come pacchetti, modelli 3D, texture, materiali, script, file audio;
- **Console:** finestra di debug dove, una volta lanciata la simulazione, vengono indicati errori, warning ed informazioni utili allo sviluppatore per verificare il corretto funzionamento del progetto;
- **Animation:** finestra che contiene la timeline con cui si vanno a creare ed impostare automatismi su determinati oggetti della scena, in modo da ottenere animazioni ed azioni automatiche;
- **Package Manager:** tool utilizzato per gestire i pacchetti che vengono scaricati dall'Asset Store;
- **Inspector:** finestra d'ispezione dove è possibile programmare e modificare caratteristiche e funzioni del *GameObject* selezionato, compresi gli script ad esso associati;
- **Scene:** finestra di lavoro, situata solitamente al centro della schermata, dove si visualizza e si compone la scena. Lo sviluppatore ha la possibilità di spostarsi all'interno di quest'ultima, in modo da creare e visualizzare l'ambiente virtuale. Si possono inoltre modificare e posizionare i diversi *GameObject* ed importare i vari asset all'interno della scena;
- **Game:** finestra di output che, una volta lanciata la simulazione, permette di visualizzare il risultato della programmazione svolta fino a quel momento. Nello specifico, durante lo sviluppo, si andrà a verificare passo dopo passo il prodotto finale per come verrà visualizzato sul visore VR.

Nel lavoro di tesi è stata utilizzata la versione *2022.3.18f1* di Unity per la creazione della simulazione VR. Il software, con le sue caratteristiche e funzioni, ha supportato lo sviluppo dell'ambiente virtuale e la fase di programmazione, essenziale per gestire l'interazione con gli oggetti della scena, così da fornire realismo e interattività alla simulazione. In particolare, per la programmazione VR è stato utilizzato l'apposito pacchetto SDK di Meta, **Meta XR All-in-One** in versione *62.0.0*, inserito nel progetto dal *Package Manager* di Unity.

Inoltre, tramite Unity sono state impostate la fisicità e le proprietà dei vari *GameObject*, il rendering, gli effetti audio e i sistemi particellari presenti nella demo VR. Il tutto è stato sviluppato in modo da garantire la compatibilità con il visore VR, sfruttando la versatilità e la caratteristica di motore grafico multi-piattaforma di Unity.

La fase di sviluppo e programmazione è approfondita al capitolo 5, dove sono inoltre descritte in dettaglio le funzionalità del software implementate nella realizzazione della simulazione.

3.2 Hardware

La simulazione VR sviluppata durante il progetto di tesi è stata realizzata presso l'azienda *A.M.B. Engineering*. La creazione dell'ambiente virtuale e la fase di programmazione della demo VR sono state dunque eseguite con il supporto di computer dotati di prestazioni grafiche elevate, in dotazione presso l'azienda. Per quanto riguarda l'hardware VR, è stato utilizzato un visore **Meta Quest 2**.

3.2.1 Meta Quest 2

Meta Quest 2 è un dispositivo VR all-in-one avanzato, costituito da un visore stand-alone e due controller.



Figura 3.2: Meta Quest 2

Il prezzo accessibile, la facilità di utilizzo e le caratteristiche stand-alone del visore, soddisfano le finalità e gli scopi addestrativi della simulazione VR sviluppata in questo progetto di tesi. A questo si aggiungono buone capacità e buona

risoluzione anche in modalità wireless, oltre alla possibilità di collegamento con PC per ottenere prestazioni maggiori. Quest 2 permette inoltre di interagire con l'ambiente virtuale attraverso i controller o semplicemente grazie all'uso delle mani, garantendo esperienze realistiche ed immersive.

Analizzando più in dettaglio caratteristiche e specifiche tecniche, il dispositivo è equipaggiato con tecnologia a sei gradi di libertà (**6 DoF**) per il tracking di testa, mani e corpo, senza la necessità di utilizzare sensori e base-station esterne. In particolare, il tracciamento viene effettuato tramite 4 telecamere poste sul visore, che seguono i movimenti dell'utente e dei **controller Oculus Touch**.

Questi ultimi, permettono l'interazione con la simulazione VR attraverso il loro stesso movimento nello spazio e tramite joystick e pulsanti, offrendo ottime proprietà ergonomiche. Tuttavia, come anticipato, Quest 2 integra inoltre l'**hand tracking**, il che fornisce la possibilità di interagire con l'esperienza VR in modo più intuitivo e naturale, usando semplicemente i gesti delle mani [92]. Questa caratteristica è stata implementata nella simulazione VR sviluppata, così da rendere l'esperienza ancora più realistica, intuitiva ed immersiva. Tale scelta è sostenuta inoltre dal fatto che, le azioni richieste all'utente durante la demo VR, non sono così complesse ed elaborate da richiedere l'utilizzo dei controller. Questo gioca a favore di realismo, portabilità e semplicità nell'apprendimento dell'utilizzo del dispositivo, fondamentali visti i fini della simulazione legati all'addestramento del personale.

Per quanto riguarda le specifiche tecniche, il visore è dotato di un **processore Qualcomm Snapdragon XR2**, molto prestazionale ed utilizzato solitamente per smartphone, e di un display LCD a commutazione rapida con **risoluzione di 1832x1920** per occhio. Quest'ultimo supporta inoltre **frequenza di aggiornamento a 60, 72 e 90 Hz**, e fornisce compatibilità per l'utilizzo con occhiali [93]. Quest 2 dispone infine di altoparlanti che offrono **audio posizionale 3D**, integrati direttamente nel visore, in modo da permettere l'ascolto dell'ambiente circostante senza la necessità di dover indossare delle cuffie. Anche quest'ultimo aspetto contribuisce all'ottenimento di un'esperienza VR completa ed immersiva.

Come anticipato, nel progetto di tesi è stata sviluppata una simulazione VR a mani libere, e capace di essere processata dal visore in modalità wireless, senza il bisogno di collegamento con un PC esterno. Queste caratteristiche sono determinanti per rendere più semplice ed accessibile l'erogazione del prodotto in aziende esterne o siti dove si tiene l'addestramento, nonchè nel caso di esposizione a potenziali clienti.

Capitolo 4

Impianto Antincendio della Sala Prova Motori

Il progetto di tesi prevede lo sviluppo di una simulazione VR a supporto dell'addestramento del personale addetto all'impianto antincendio per una sala prova di motori aeronautici, sviluppato dall'azienda *FireTech*. Prima e durante le attività di testing in sala prova, è necessario predisporre adeguatamente l'impianto antincendio attraverso l'apprendimento e la familiarizzazione di procedure prestabilite. Analogamente, in caso di incendio durante i test al banco, si richiede di intervenire seguendo precise procedure, al fine di ristabilire tempestivamente una condizione di sicurezza ed evitare quanto più possibile la propagazione delle fiamme.

In questo contesto, per meglio comprendere le fasi di sviluppo e programmazione della simulazione in realtà virtuale, si andrà a descrivere la configurazione dell'**Impianto Antincendio della Sala Prova Motori**, focalizzando l'attenzione sui componenti e gli aspetti più rilevanti ai fini del progetto. In particolare, si andranno ad introdurre più in dettaglio i locali e i componenti con cui si hanno interazioni durante lo svolgimento delle procedure.

4.1 Planimetria e configurazione dell'impianto

L'impianto, si divide principalmente in 6 locali, alcuni dei quali comunicanti tra loro.

La **planimetria** della struttura adibita alla prova al banco dei motori e la locazione dei principali componenti dell'impianto elettrico antincendio, sono riportate di seguito:

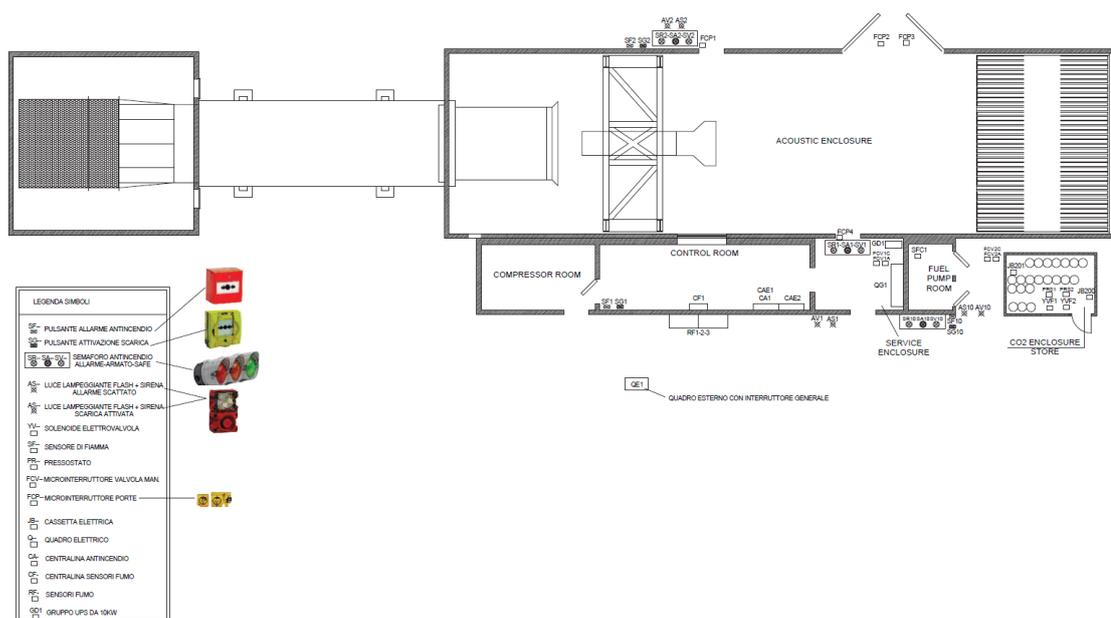


Figura 4.1: Planimetria dell'impianto

L'impianto è dunque suddiviso in:

- Acoustic Enclosure:** cella di prova dove avviene il test al banco del motore. Si tratta del locale più grande dell'impianto, adibito ad ospitare il motore sottoposto ad attività di testing. Contiene dunque la *struttura di supporto* su cui vengono installati i propulsori, un *condotto di aerazione* per alimentare la presa d'aria del motore e un *sistema di uscita dell'aria* che porta i gas in uscita dal motore ad organi di filtraggio ed assorbimento del rumore, prima dell'emissione in ambiente esterno [94]. Il condotto di aerazione è connesso all'Acoustic Enclosure tramite una saracinesca (*shutter*) che viene aperta durante le attività di test, consentendo l'ingresso dell'aria. La sala di prova deve essere predisposta, per quanto riguarda l'*acustica*, in modo da isolare e ridurre il quanto più possibile rumore e vibrazioni prodotti dal propulsore. Per quanto riguarda l'*impianto antincendio*, invece, il locale dispone di ugelli di rilascio dai quali viene emessa la scarica di agente estinguente, attivata in caso di incendio. Sono presenti inoltre, sulla parete esterna, i *semafori antincendio* che indicano lo stato di funzionamento dell'impianto antincendio, le *luci lampeggianti* e le *sirene* che avvertono in caso di antincendio scattato e di scarica attivata, ed infine i pulsanti di *Allarme Antincendio* e *Attivazione della Scarica* relativi all'Acoustic Enclosure.
- Compressor Room:** locale adiacente alla Control Room, con cui comunica tramite una porta di accesso. Contiene serbatoi e sistemi che permettono di

fornire aria compressa all'Acoustic Enclosure durante i test al banco. Ciò consente di ottenere un controllo della pressione dell'aria in ingresso nella presa del motore, permettendo di variare la pressione in base alle condizioni e al tipo di prova richiesta. Inoltre, durante la fase di avvio del propulsore installato al banco, è necessario fornire aria compressa per mettere in rotazione gli organi rotanti fino all'innescio della combustione [94] [95].

- **Control Room:** sala controllo dove tecnici e ingegneri impostano e gestiscono il banco di prova, acquisiscono i dati ricavati durante i test, monitorano lo svolgimento delle prove. A tal fine, il locale è dotato di un *vetro di controllo* che permette di monitorare l'interno dell'Acoustic Enclosure. Il vetro è posizionato in modo da fornire una buona visuale del motore ed è progettato per isolare l'ambiente da rumori e vibrazioni e garantire la sicurezza del personale. Davanti al vetro di controllo vi è la *Console di Comando e Controllo* dalla quale gestire il banco prova. Dalla Control Room si ha accesso anche al controllo e alla predisposizione dell'*impianto antincendio*: sulla parete opposta rispetto alla console di comando del banco prova, vi sono infatti collocate le *centraline antincendio* che permettono di gestire l'intero impianto antincendio. Analogamente all'Acoustic Enclosure, il locale è dotato di un pulsante di *allarme antincendio* e di un pulsante di *attivazione della scarica*, dal quale è possibile attivare il rilascio in Acoustic Enclosure.
- **Service Enclosure:** locale che collega Control Room ed Acoustic Enclosure. Al suo interno si trova la *porta di accesso* all'Acoustic Enclosure, al di sopra della quale sono collocati i *semafori antincendio* che indicano lo stato di funzionamento dell'impianto antincendio. Sono presenti inoltre un *quadro elettrico* e una *valvola manuale* attraverso la quale, agendo su una apposita leva, si apre il passaggio della tubazione di scarica CO₂ dell'Acoustic Enclosure. In caso di attivazione della scarica, l'agente estinguente può in questo modo affluire nelle tubazioni dirette all'interno della cella prova motori.
- **Fuel Pump Room:** locale che contiene le pompe di combustibile, necessarie per fornire carburante al motore durante i test. Vista la criticità dell'area in caso di incendio, come l'Acoustic Enclosure è dotata di *ugelli* per il rilascio dell'agente estinguente. Inoltre al di fuori della stanza, sulla parete esterna, sono installati i *semafori antincendio* che indicano lo stato di funzionamento dell'impianto antincendio, le *luci lampeggianti* e le *sirene* che avvisano in caso di antincendio scattato e di scarica attivata, ed infine i pulsanti di *allarme antincendio* e *attivazione della scarica* relativi alla Fuel Pump Room.
- **CO₂ Enclosure Store:** locale separato dal resto della struttura ed utilizzato per lo stoccaggio delle *bombole di CO₂* dell'impianto antincendio. Da qui partono le due tubazioni di scarica della CO₂, una diretta all'Acoustic

Enclosure, l'altra alla Fuel Pump Room. Il rilascio viene attivato automaticamente attraverso un'elettrovalvola o manualmente agendo su una apposita leva installata direttamente sulla bombola. All'esterno del CO2 Enclosure Store, sulla tubazioni diretta alla Fuel Pump Room è presente una *valvola manuale* comandata tramite una leva, attraverso la quale è possibile aprire o chiudere il passaggio di agente estinguente.

4.2 Componenti dell'impianto antincendio

Come anticipato, ai fini dello sviluppo della simulazione VR è opportuno approfondire più in dettaglio caratteristiche e funzioni dei principali componenti dell'impianto elettrico antincendio del banco prova. In particolare, si concentra l'attenzione sugli elementi del sistema che richiedono un'interazione diretta durante l'esecuzione delle procedure antincendio. Inoltre, si evidenziano le relazioni tra i vari componenti e la loro disposizione all'interno dell'impianto, già riportata schematicamente in figura 4.1.

4.2.1 Centralina antincendio

La **centralina antincendio** è il principale strumento di comando e controllo dell'impianto elettrico antincendio. E' situata in *Control Room* e consente all'operatore di monitorare lo stato di funzionamento dell'impianto.



(a) Foto reale

(b) Modello 3D

Figura 4.2: Centralina Antincendio

In figura 4.2 si osserva una foto reale della centralina (fig.4.2a) e la resa ottenuta con il modello 3D (fig.4.2b), realizzato per la simulazione VR.

Nel **quadro superiore** della centralina si hanno le seguenti caratteristiche e funzioni:

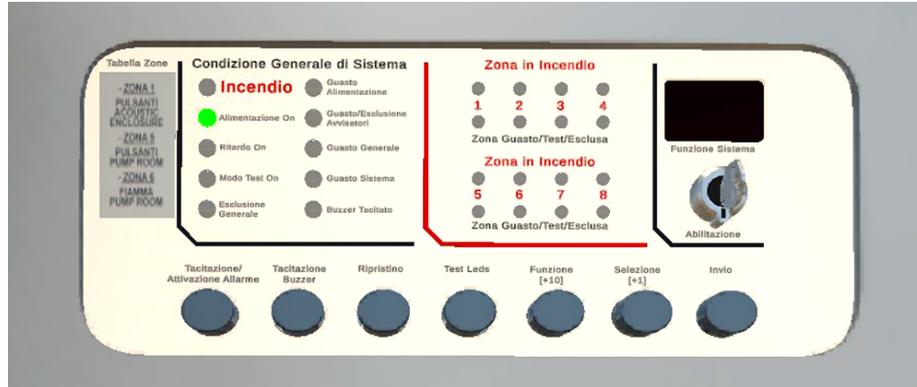


Figura 4.3: Dettaglio del quadro superiore della Centralina Antincendio

- **Tabella Zone:** sono indicate le diverse aree della sala prova, ognuna associata ad un rispettivo numero;
- **Zona In Incendio:** contiene diverse spie associate ad un relativo numero in modo che, la loro accensione, unita a quanto riportato nella Tabella Zone, avverte della presenza di un incendio in una determinata area dell'impianto. L'attivazione delle spie è comandata dai sensori di fiamma, disposti nei vari locali del banco prova motori;
- **Condizione Generale di Sistema:** presenta diverse spie che informano sullo stato di funzionamento del sistema. Tra queste, si evidenziano la spia rossa *Incendio*, che si attiva una volta scattato l'Allarme Antincendio, la spia verde *Alimentazione ON* che indica se la centrale è accesa e funzionante, e la spia gialla *Tacetazione Buzzer* che informa della tacitazione del segnale acustico di attivazione della scarica;
- **Selettore Abilitazione Funzione Sistema:** abilita l'utilizzo dei pulsanti della centralina e il display *Funzione Sistema*;
- **Pulsanti di comando:** tra questi, assumono particolare importanza il pulsante di *Tacetazione/Attivazione Allarme* che consente di attivare o disattivare l'Allarme Antincendio, il pulsante di *Tacetazione Buzzer* attraverso il quale si tacita la segnalazione acustica di attivazione della scarica, e il pulsante *Ripristino* che consente di ripristinare l'impianto antincendio in seguito all'attivazione e al rilascio della scarica estinguente.

Per quanto riguarda il **quadro inferiore** della centralina, si osserva innanzitutto la divisione in due pannelli di controllo analoghi, uno destinato al comando e alla gestione dell'impianto antincendio relativo all'*Acoustic Enclosure* (Area 1), l'altro alla *Fuel Pump Room* (Area 2).

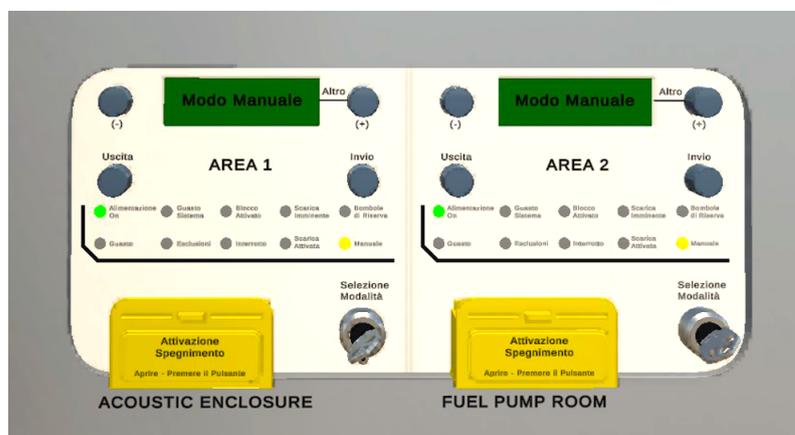


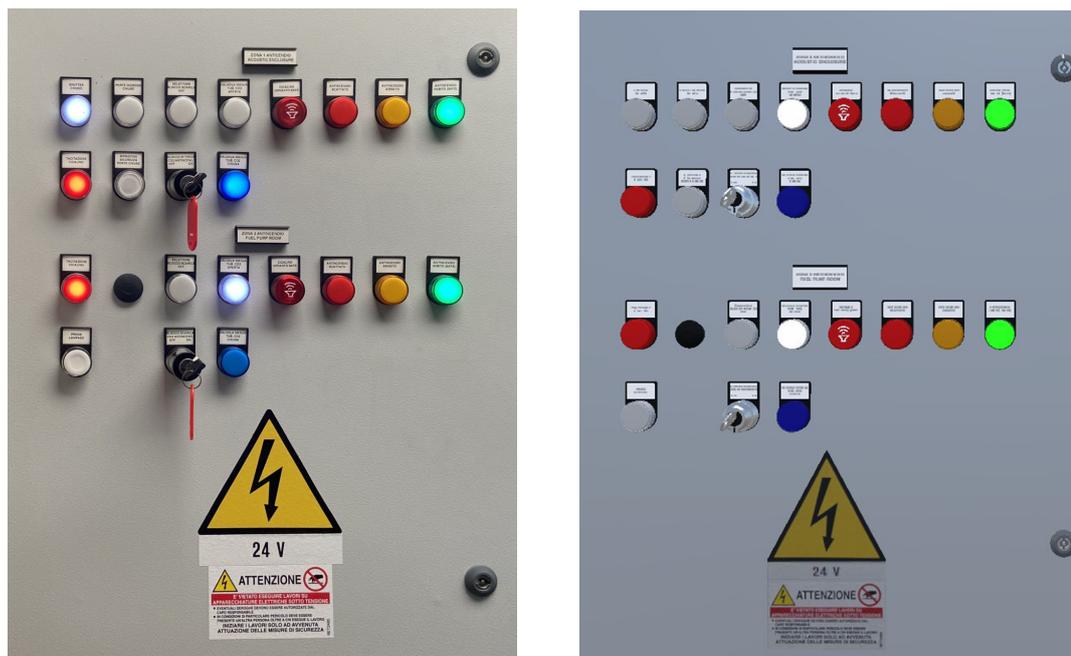
Figura 4.4: Dettaglio del quadro inferiore della Centralina Antincendio

I principali elementi del pannello di controllo relativo ad una determinata area sono:

- **Pulsante di Attivazione Spegnimento:** consente l'attivazione della scarica di agente estinguente nell'area interessata;
- **Selettore Selezione Modalità:** permette di selezionare la modalità di funzionamento dell'impianto antincendio;
- **Display:** riporta informazioni sullo stato di funzionamento dell'impianto antincendio nell'area interessata. In particolare, una volta attivata la scarica di agente estinguente, compare sul display un countdown di 30 secondi che precede l'effettivo rilascio della scarica. Terminato il countdown, viene indicato a schermo lo stato di rilascio della scarica;
- **Spie di avvertimento:** si evidenziano la spia verde *Alimentazione ON* che indica se il pannello è acceso e funzionante, e la spia gialla *Manuale* che riporta la modalità di utilizzo manuale del sistema. In seguito all'attivazione di Allarme Incendio, si ha invece l'accensione della spia rossa di *Scarica Imminente*, mentre il led rosso di *Scarica Attivata* si attiva solamente in prossimità del rilascio della scarica, quando l'agente estinguente comincia ad affluire nelle tubazioni. Infine, si sottolinea la presenza della spia gialla *Blocco Attivato* che avverte quando il sistema è portato in stand-by, in seguito all'attivazione del blocco della scarica di agente estinguente.

4.2.2 Pulsantiera ausiliaria della Centralina antincendio

La **pulsantiera ausiliaria** è collegata alla centralina antincendio e consente il comando e il controllo di alcune funzioni dell'impianto non gestibili per l'appunto dalla centralina principale. E' posizionata in *Control Room*, accanto alla centralina antincendio, e come quest'ultima è anch'essa divisa in due sezioni, una relativa al controllo dell'impianto antincendio in *Acoustic Enclosure* (Area 1), l'altra in *Fuel Pump Room* (Area 2).



(a) Foto reale

(b) Modello 3D

Figura 4.5: Pulsantiera ausiliaria

Si descrivono in dettaglio le funzioni delle spie e dei pulsanti della pulsantiera ausiliaria, partendo dalla sezione superiore relativa all'*Acoustic Enclosure* (Area 1). Come si può osservare in figura 4.6, si hanno:

- **Spia bianca 'Shutter Chiuso'**: accesa quando lo shutter dell'*Acoustic Enclosure* è chiuso;
- **Spia bianca 'Porte Ingressi Chiuse'**: accesa quando le porte d'ingresso dell'*Acoustic Enclosure* sono chiuse ed è stato premuto il pulsante di *Ripristino Sicurezza Porte Chiuse*;

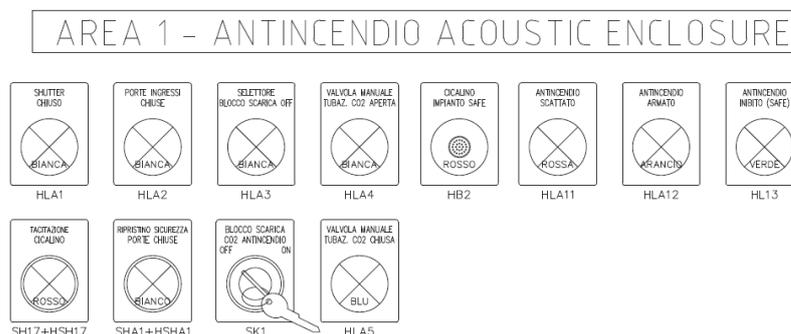


Figura 4.6: Elementi della pulsantiera ausiliaria relativa all'Area 1

- **Spia bianca 'Selettore Blocco Scarica OFF'**: accesa quando il selettore *Blocco Scarica CO2 Antincendio* è in posizione OFF, ed è quindi disattivato il blocco della scarica di agente estinguente;
- **Spia bianca 'Valvola Manuale Tubazione CO2 Aperta'**: accesa quando la valvola manuale sulla tubazione di scarica CO2 dell'Acoustic Enclosure è aperta e consente quindi il passaggio dell'agente estinguente;
- **Spia blu 'Valvola Manuale Tubazione CO2 Chiusa'**: accesa quando la valvola manuale sulla tubazione di scarica CO2 dell'Acoustic Enclosure è chiusa e blocca quindi il passaggio dell'agente estinguente;
- **Spia lampeggiante rossa 'Cicalino Impianto Safe'**: accesa quando, una volta inserito il blocco della scarica, si attiva il relativo cicalino di avviso;
- **Pulsante rosso 'Tacitazione Cicalino'**: consente di disattivare il cicalino che avvisa dell'attivazione del blocco della scarica e, contestualmente, spegne la spia lampeggiante *Cicalino Impianto Safe*;
- **Pulsante bianco 'Ripristino Sicurezza Porte Chiuse'**: una volta chiuse le porte d'ingresso dell'Acoustic Enclosure, consente di confermare lo stato di chiusura delle porte, ripristinando la sicurezza e attivando la spia *Porte Ingressi Chiuse*;
- **Selettore 'Blocco Scarica CO2 Antincendio'**: se ruotato in posizione ON, attiva il blocco della scarica di agente estinguente nell'area interessata, portando in stand-by l'impianto antincendio e disattivando la spia *Selettore Blocco Scarica OFF*.

Inoltre, sono presenti sulla pulsantiera le spie che indicano lo stato di funzionamento dell'impianto antincendio nell'area interessata:

- **Spia rossa 'Antincendio Scattato'**: accesa quando, nell'area interessata, è stato attivato l'Allarme Antincendio;
- **Spia arancione 'Antincendio Armato'**: accesa quando l'impianto antincendio relativo all'area interessata è armato;
- **Spia verde 'Antincendio Inibito (Safe)'**: accesa quando l'impianto antincendio relativo all'area interessata non è armato ed è quindi in condizione safe.

Per quanto riguarda la sezione inferiore della pulsantiera, relativa alla *Fuel Pump Room (Area 2)*, si ha la seguente disposizione:

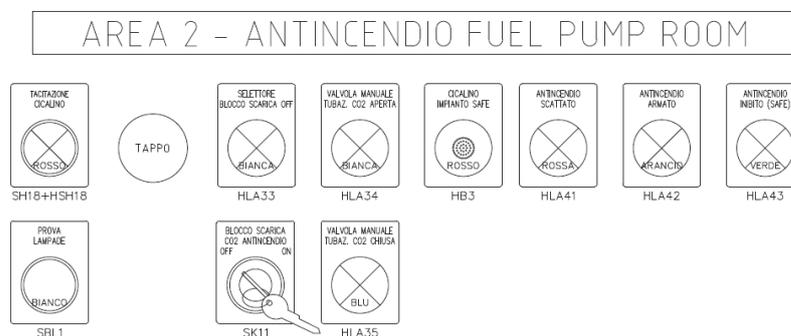


Figura 4.7: Elementi della pulsantiera ausiliaria relativa all'Area 2

Come evidenziato in figura 4.7, le spie e i pulsanti sono analoghi a quelli descritti per il controllo dell'impianto antincendio in Acoustic Enclosure, a parte le seguenti eccezioni:

- Non è presente la spia *Shutter Chiuso* in quanto la Fuel Pump Room non è dotata di shutter;
- Non sono presenti la spia *Porte Ingressi Chiuse* e il pulsante *Ripristino Sicurezza Porte Chiuse* in quanto, durante le prove al banco, non sono previsti l'ingresso e la presenza di personale all'interno della Fuel Pump Room;
- E' presente il pulsante bianco *Prova Lampade*, che consente di testare il funzionamento delle lampade delle spie di tutta la pulsantiera, sia per la sezione relativa all'Area 1 che per quella relativa all'Area 2.

4.2.3 Pulsanti di Attivazione Allarme Antincendio e di Attivazione Scarica Estinguente

Il **pulsante rosso di Allarme Antincendio** consente di attivare l'Allarme Antincendio, portando l'impianto alla condizione di 'Antincendio Scattato'. A livello procedurale, è il primo componente del sistema antincendio su cui interagire non appena si avverte la presenza di un incendio. Premendo il pulsante si attivano infatti le segnalazioni luminose e acustiche di Allarme Antincendio nell'area interessata, in modo da avvertire tempestivamente il personale e sospendere le prove al banco del motore.

L'impianto antincendio è dotato di due pulsanti rossi di Attivazione Allarme Antincendio relativi all'*Acoustic Enclosure*, uno situato all'interno di quest'ultima, l'altro in Control Room. Per quanto riguarda la *Fuel Pump Room*, invece, si dispone di un terzo pulsante, analogo ai precedenti ed installato all'esterno del locale, in prossimità delle porte di accesso. Una volta attivato l'Allarme Antincendio, l'impianto antincendio relativo all'area interessata passa alla stato di funzionamento di 'Antincendio Scattato', caratterizzato dall'accensione delle relative spie e semafori rossi.



(a) Foto reale



(b) Modello 3D

Figura 4.8: Pulsanti di Allarme Antincendio e di Attivazione Scarica Estinguente

Accanto ad ogni pulsante rosso di Attivazione Allarme Antincendio è situato un **pulsante giallo di Attivazione Scarica Estinguente**. Analogamente a quanto visto in precedenza, sono quindi presenti tre pulsanti: due per l'attivazione della scarica estinguente in *Acoustic Enclosure* e uno per la *Fuel Pump Room*. Premuto il pulsante si attiva un countdown di 30 secondi al termine del quale, in assenza di guasti e malfunzionamenti, e/o necessità di interruzione, si aziona l'elettrovalvola che permette il rilascio della scarica di agente estinguente nell'area interessata.

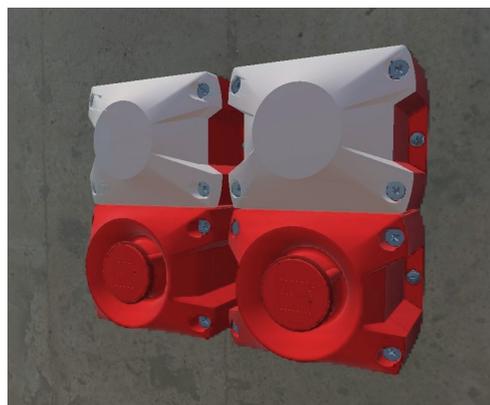
4.2.4 Avvisatori acustici e luminosi di Antincendio Scattato e di Scarica Attivata

L'**avvisatore acustico e luminoso di Antincendio Scattato** si attiva una volta premuto il pulsante rosso di Allarme Antincendio, e resta attivo fin quando l'impianto antincendio rimane in condizione di 'Antincendio Scattato'. Si compone di una luce lampeggiante rossa e di una sirena antincendio, e avverte il personale dell'attivazione dell'allarme. E' installato all'esterno dei locali, in corrispondenza delle porte d'ingresso, in modo da indicare a chi si trova al di fuori dell'area lo stato di allarme.

Sono presenti due avvisatori acustici e luminosi relativi all'*Acoustic Enclosure*, uno installato in corrispondenza dell'ingresso alla *Service Enclosure*, sulla parete esterna della *Control Room*, l'altro sulla parete esterna dell'*Acoustic Enclosure*, in prossimità della porta di accesso. Per quanto riguarda la *Fuel Pump Room*, si ha un ulteriore avvisatore dedicato all'Allarme Antincendio relativo a quest'area. Per meglio visualizzare la disposizione dei componenti si rimanda alla planimetria in figura 4.1.



(a) Foto reale



(b) Modello 3D

Figura 4.9: Avvisatori acustici e luminosi di Antincendio Scattato e di Scarica Attivata

L'avvisatore acustico e luminoso di Scarica Attivata è posizionato accanto ad ogni avvisatore di Antincendio Scattato ed è identico a quest'ultimo. Presenta dunque anch'esso una luce lampeggiante rossa ed è dotato di una sirena che, una volta premuto il pulsante giallo di Attivazione Scarica Estinguente, si attiva emettendo un suono analogo alla segnalazione acustica antincendio. In corrispondenza del rilascio della scarica, quando l'agente estinguente inizia ad affluire nelle tubazioni e raggiunge il pressostato, la sirena emette invece un suono velocizzato che si distingue dal precedente, avvertendo dell'imminente scarica. Si evidenzia che, il modello 3D rappresentato in figura 4.9b, non è presente nella scena VR, dal momento che il componente è installato all'esterno dei locali.

4.2.5 Semaforo Antincendio

Il **semaforo antincendio** è una segnalazione ottica che indica lo stato di funzionamento dell'impianto antincendio nell'area interessata. Riprende quanto segnalato dalle spie con analoga funzione situate sulla pulsantiera ausiliara in Control Room, e presenta quindi una luce rossa di 'Antincendio Scattato', una luce arancione di 'Antincendio Armato' e una luce verde di 'Antincendio Inibito (Safe)'.
L'antincendio scattato è una segnalazione ottica che indica lo stato di funzionamento dell'impianto antincendio nell'area interessata. Riprende quanto segnalato dalle spie con analoga funzione situate sulla pulsantiera ausiliara in Control Room, e presenta quindi una luce rossa di 'Antincendio Scattato', una luce arancione di 'Antincendio Armato' e una luce verde di 'Antincendio Inibito (Safe)'.
L'antincendio armato è una segnalazione ottica che indica lo stato di funzionamento dell'impianto antincendio nell'area interessata. Riprende quanto segnalato dalle spie con analoga funzione situate sulla pulsantiera ausiliara in Control Room, e presenta quindi una luce rossa di 'Antincendio Scattato', una luce arancione di 'Antincendio Armato' e una luce verde di 'Antincendio Inibito (Safe)'.
L'antincendio inibito (safe) è una segnalazione ottica che indica lo stato di funzionamento dell'impianto antincendio nell'area interessata. Riprende quanto segnalato dalle spie con analoga funzione situate sulla pulsantiera ausiliara in Control Room, e presenta quindi una luce rossa di 'Antincendio Scattato', una luce arancione di 'Antincendio Armato' e una luce verde di 'Antincendio Inibito (Safe)'.



(a) Foto reale



(b) Modello 3D

Figura 4.10: Semaforo Antincendio e Microinterruttore porte

Sono presenti due semafori antincendio per l'*Acoustic Enclosure*, installati all'esterno del locale sopra alle due porte di accesso, in modo da segnalare lo stato di funzionamento dell'impianto antincendio relativo a quell'area. Analogamente, un ulteriore semaforo è collocato all'esterno della *Fuel Pump Room*, in corrispondenza della porta di accesso.

4.2.6 Microinterruttore porte

In figura 4.10, oltre al semaforo antincendio si può osservare il **microinterruttore di sicurezza** delle porte di accesso. Sono presenti nell'impianto antincendio 3 microinterruttori di sicurezza, ognuno destinato ad una porta di accesso all'*Acoustic Enclosure*. La Fuel Pump Room, infatti, non prevede la presenza e l'accesso di personale al suo interno durante le prove al banco, per cui non è dotata di questo componente. Se tutte le porte di accesso dell'*Acoustic Enclosure* sono chiuse, il microinterruttore rileva questa condizione e permette l'armamento e l'eventuale attivazione dell'impianto antincendio. Se una o più porte di accesso risultano aperte, invece, il microinterruttore impedisce di poter armare il sistema antincendio o lo riporta in condizione di 'Impianto Inibito (Safe)' nel caso in cui si dovesse aprire una porta ad Allarme Antincendio già scattato. In questo modo, si mette in sicurezza l'*Acoustic Enclosure* impedendo l'attivazione della scarica in caso di ingresso di personale.

4.2.7 Valvola Manuale tubazione di scarica CO2

La **Valvola Manuale** è installata sulle tubazioni di scarica CO2 ed è dotata di una leva attraverso la quale è possibile aprire o chiudere manualmente il passaggio dell'agente estinguente.



(a) Foto reale



(b) Modello 3D

Figura 4.11: Valvola Manuale tubazione di scarica CO2

L'impianto antincendio presenta due tubazioni di scarica CO₂: entrambe partono necessariamente dal *CO₂ Enclosure Store* (Impianto Bombole) e portano l'agente estinguente, l'una all'*Acoustic Enclosure* e l'altra alla *Fuel Pump Room*. Per aprire o chiudere il passaggio di CO₂ verso i locali, l'impianto è dotato dunque di due valvole manuali. In particolare, la valvola relativa all'*Acoustic Enclosure* è installata in *Service Enclosure*, in corrispondenza della porta d'accesso alla sala prova. Per quanto riguarda la tubazione diretta alla *Fuel Pump Room*, invece, la valvola si trova all'esterno del locale, in vicinanza delle porte d'ingresso. Affinchè si possa armare l'impianto antincendio in un'area, è necessario che la valvola manuale sulla tubazione di scarica CO₂ diretta verso quella determinata area sia *aperta*, e dunque in posizione parallela rispetto al tubo.

4.2.8 Elettrovalvola e Leva Manuale della bombola di scarica CO₂

Nel *CO₂ Enclosure Store* (Impianto Bombole), le bombole destinate alla scarica di CO₂ in una determinata area, sono collegate in serie tra loro. Il rilascio di tutta la serie è quindi determinato dalla valvola installata su un'apposita bombola (figura 4.12), anch'essa collegata alle altre.



(a) Foto reale



(b) Modello 3D

Figura 4.12: Elettrovalvola e Leva di apertura manuale della bombola di scarica CO₂

In assenza di guasti o malfunzionamenti dell'elettrovalvola, una volta armato l'impianto antincendio ed attivata la scarica di agente estinguente, quando sulla centralina viene indicato lo stato di attivazione e rilascio della scarica si apre automaticamente la valvola e l'agente estinguente inizia ad affluire nelle tubazioni per il rilascio in ambiente. In caso di malfunzionamenti dell'elettrovalvola, invece, è possibile aprire manualmente la valvola di rilascio grazie alla leva di apertura manuale predisposta sulla bombola. In particolare, è necessario dapprima armare l'impianto e attivare la scarica tramite l'apposito pulsante; dopodichè, rimuovendo il pin di sicurezza e ruotando manualmente la leva, si apre la valvola di rilascio. In entrambi i casi, l'apertura della valvola determina la scarica dell'intera serie di bombole.

Capitolo 5

Sviluppo e Programmazione della simulazione VR

La fase di sviluppo e programmazione della simulazione VR, risultato finale del lavoro di tesi, è stata eseguita presso l'azienda *A.M.B. Engineering* con il supporto tecnico di *FireTech*, azienda di riferimento per l'ottenimento delle informazioni riguardanti caratteristiche, funzionamento e procedure di utilizzo dell'impianto antincendio riprodotto in realtà virtuale e descritto al capitolo precedente.

La demo VR è stata realizzata con l'obiettivo di ottenere un prodotto adeguato ed efficace per l'addestramento del personale addetto all'utilizzo dell'impianto antincendio. Pur trattandosi di una versione demo, lo sviluppo è stato guidato dalla ricerca dei giusti compromessi tra realismo e finalità didattiche e addestrative della simulazione. E' stato quindi curato dettagliatamente l'aspetto grafico, in modo da riprodurre fedelmente l'ambiente in cui si svolgono le procedure, consentendo all'operatore di familiarizzare con i componenti dell'impianto antincendio e con la loro disposizione all'interno dei locali. Per la parte interattiva, si è invece privilegiata una simulazione a mani libere, senza l'utilizzo dei controller, impostando spostamenti automatici all'interno della scena. Questa scelta, resa possibile dai limitati spostamenti richiesti all'operatore e dalla semplicità delle singole azioni da eseguire, ha consentito di ottenere un'interazione più realistica, intuitiva ed immediata, importante per consentire una familiarizzazione rapida e agevole con il prodotto, sia in caso di addestramento che di esposizione a potenziali clienti. Inoltre, ciò ha concesso di migliorare e rendere più efficace la simulazione VR da un punto di vista addestrativo, consentendo all'operatore di concentrarsi totalmente sull'apprendimento della procedura e sull'esecuzione degli step. Altra caratteristica della demo VR sviluppata, legata al conseguimento degli obiettivi didattici e di addestramento, è stata la scelta di inserire nella scena un tablet di supporto dotato di grafica adattiva, con cui l'utente può interagire e attraverso il quale viene guidato

nello svolgimento delle procedure e nell'esecuzione della simulazione. Infine, un importante obiettivo che ha guidato lo sviluppo della demo VR è stato l'ottenimento di una simulazione stand-alone, in grado quindi di essere processata interamente dal visore, senza la necessità di collegamento con un computer. Questo risultato è particolarmente rilevante in quanto rende il prodotto più accessibile, portatile e pronto all'uso, consentendo l'erogazione dell'addestramento VR in molteplici ambienti e contesti, con il solo requisito di disporre di un visore compatibile. Per contro, ciò ha richiesto un lavoro di ottimizzazione e semplificazione grafica, necessaria per raggiungere il giusto compromesso tra il realismo della simulazione VR e la volontà di conseguire la portabilità di un prodotto stand-alone.

Questi aspetti verranno approfonditi in dettaglio in questo capitolo, partendo dallo sviluppo dell'ambiente virtuale e dei modelli 3D, per arrivare infine alla programmazione della simulazione VR, eseguita in Unity.

5.1 Realizzazione del modello 3D

Il primo step per lo sviluppo della simulazione VR è stato la realizzazione dell'ambiente virtuale in cui si svolgono le procedure, comprensivo dei modelli 3D dei componenti dell'impianto antincendio.

Anche in questa fase, il processo di sviluppo è stato affiancato dal supporto di *FireTech*, così da ottenere un modello 3D virtuale fedele e realistico. L'azienda ha fornito la planimetria dei locali dell'impianto antincendio del banco prova motori, una lista dei principali componenti dell'impianto e la loro disposizione all'interno dell'ambiente, come già approfondito in dettaglio al *Capitolo 4*.

La realizzazione dell'ambiente virtuale ha quindi richiesto i seguenti passaggi:

- **Ricerca dei file BIM dei componenti:** partendo dalla lista dei principali componenti dell'impianto antincendio, sono stati recuperati i file BIM (*Building Information Modeling*) messi a disposizione dai siti dei produttori. Questo ha permesso di inserire nella simulazione modelli 3D fedeli e dettagliati, del tutto analoghi ai componenti realmente presenti nell'impianto. Questo aspetto contribuisce ad aumentare il realismo dell'esperienza VR e consente di familiarizzare con gli elementi che richiedono interazioni durante lo svolgimento delle procedure antincendio. Si evidenzia che, a partire dalla lista iniziale, è stata eseguita una scrematura in modo da includere nella demo VR solamente i componenti necessari ai fini della simulazione e utili a renderla completa e realistica. Ciò ha consentito di risparmiare tempo e risorse e, soprattutto, ha permesso di non appesantire eccessivamente la simulazione, aspetto fondamentale dato lo sviluppo di un prodotto stand-alone.

- **Visualizzazione dei file BIM:** i file recuperati sono stati importati in un visualizzatore 3D. Il modello 3D di ogni componente è stato quindi predisposto all'esportazione nei formati *.fbx* e *.OBJ*, adeguati alla successiva reimportazione nei software di modellazione 3D utilizzati e in Unity. In questa fase, si è anche effettuata una prima scalatura dei modelli di grandi dimensioni.
- **Realizzazione dei modelli 3D dei componenti:** i modelli 3D, precedentemente esportati nei formati *.fbx* e *.OBJ*, sono stati importati nei software di modellazione 3D *Blender* e *3ds Max*. Qui sono state eseguite eventuali modifiche e, in caso di pezzi unici, è stato diviso il componente in più parti quando richiesto. Questa operazione è necessaria dal momento che, in Unity, è possibile spostare i modelli importati, ridimensionarli o attribuire loro dei materiali, ma non si possono compiere ulteriori modifiche. Per questo motivo, in caso di attribuzione di due o più materiali differenti ad uno stesso oggetto 3D, è opportuno dividere precedentemente il componente in più parti attraverso il software di modellazione 3D, ed importarlo successivamente già frazionato. Stessa cosa se, durante la simulazione VR, è richiesto di spostare o movimentare parti di uno stesso oggetto. Per i componenti dell'impianto antincendio di cui non è stato possibile recuperare file BIM, invece, è stato creato da zero il modello 3D, sfruttando caratteristiche e dimensioni riportate nei disegni tecnici.
Una volta ottenuti tutti i modelli definitivi, ogni componente è stato dunque nuovamente esportato nei formati *.fbx* e *.OBJ*, per essere successivamente inserito nell'ambiente virtuale e, quindi, predisposto all'importazione finale in Unity.
- **Realizzazione dell'ambiente virtuale completo:** lo sviluppo dell'ambiente 3D in cui si svolge la simulazione VR è stato eseguito interamente tramite il software *Blender*. Quest'ultimo, infatti, presenta lo stesso sistema di riferimento che si ritroverà in Unity, caratteristica che consente di agevolare la successiva fase di programmazione. L'ambiente virtuale è stato realizzato partendo dalla planimetria delle varie aree che accolgono l'impianto antincendio del banco prova motori, descritte dettagliatamente al *Capitolo 4*. Dapprima, attraverso un confronto con l'azienda di riferimento, sono stati definiti i principali locali in cui si svolgono le procedure oggetto dell'addestramento VR, in modo da sviluppare un modello 3D funzionale alla simulazione, semplificando o omettendo le zone superflue. Dopo aver realizzato le varie stanze e averle connesse tra loro attraverso le porte d'accesso, come indicato nella planimetria, sono stati dunque importati i modelli 3D dei componenti dell'impianto antincendio. Questi ultimi, sono stati collocati e disposti fedelmente all'interno dei locali, ricreando così un ambiente virtuale realistico ed immersivo.

Al termine del processo di realizzazione del modello 3D dell'impianto antincendio del banco prova motori, si è ottenuto dunque l'ambiente virtuale completo, comprensivo di tutti i componenti funzionali alla programmazione VR, e predisposto all'importazione in Unity.

In particolare, in figura 5.1 si mostra la **Control Room**, comprensiva di centralina antincendio e relativa pulsantiera ausiliaria, pulsanti di attivazione allarme antincendio e attivazione scarica estinguente. Inoltre, si nota la finestra di controllo che permette all'operatore di monitorare l'interno dell'*Acoustic Enclosure*:



Figura 5.1: Modello 3D della Control Room

La Control Room è il principale locale dove si svolgono gran parte delle procedure implementate nell'addestramento VR, come anticipato al *Capitolo 4*. Qui l'operatore dispone della centralina antincendio da cui è possibile comandare e controllare l'intero impianto antincendio. Inoltre, attraverso la finestra di controllo, viene monitorato lo svolgimento delle prove al banco del motore. Per queste ragioni, come si può osservare, il modello 3D sviluppato è stato quindi curato particolarmente nei dettagli, inserendo nella scena anche gli oggetti non strettamente funzionali all'esecuzione delle procedure, in modo da riprodurre fedelmente la configurazione reale della stanza e consentire quindi all'operatore di familiarizzare con l'ambiente e con la sua disposizione interna.

Il modello 3D dell'**Acoustic Enclosure**, riportato in figura 5.2, è stato realizzato dettagliando la zona adibita alla prova al banco del motore e visibile attraverso la finestra di controllo. Il resto del locale è stato invece semplificato, in quanto

non visibile nella simulazione VR e non funzionale alle procedure di addestramento. Ciò ha permesso quindi di alleggerire il modello e semplificarne l'elaborazione da parte del visore.



Figura 5.2: Modello 3D dell'Acoustic Enclosure

Durante la demo VR non è previsto che l'operatore si trovi all'interno del locale, e quest'ultimo verrà osservato solamente dalla Control Room, attraverso la finestra di controllo. Per tali ragioni, la resa grafica ottenuta è comunque soddisfacente e sono presenti tutti gli elementi necessari a rendere la simulazione completa e funzionale all'addestramento: si osserva il motore installato ed allestito per la prova al banco, le tubazioni con gli ugelli di rilascio della scarica di agente estinguente e gli operatori addetti al banco prova, figure richieste all'interno del locale per aumentare il realismo della simulazione e riprodurre fedelmente le procedure. Si precisa che il motore, poichè assume solamente un ruolo visivo all'interno scena, è stato riprodotto attraverso un modello 3D semplificato. Ciò ha permesso inoltre di ovviare a ragioni di privacy e riservatezza, dal momento che è stato sviluppato un prodotto in versione demo.

A collegare i due locali appena descritti vi è la **Service Enclosure**, il cui modello 3D è raffigurato in figura 5.3. Sono state riprodotti dettagliatamente tutti i componenti funzionali all'esecuzione delle procedure. Si osservano quindi le porte di accesso alla Control Room e all'Acoustic Enclosure, quest'ultima equipaggiata con il microinterruttore di sicurezza, nonchè il semaforo antincendio e la valvola manuale della tubazione di scarica CO2 diretta all'Acoustic Enclosure. Infine, per completezza, è stato inserito nella scena il quadro elettrico dell'impianto antincendio,

elemento che non richiede interazioni durante lo svolgimento delle procedure ma contribuisce ad incrementare il realismo della simulazione VR.



Figura 5.3: Modello 3D della Service Enclosure

Tenendo presente la planimetria dell'impianto riportata precedentemente in figura 4.1, come anticipato i tre locali descritti sono comunicanti tra loro. Inoltre, ai fini della successiva programmazione della simulazione VR, è opportuno che si trovino all'interno di una stessa scena in cui l'operatore opera e si sposta durante lo svolgimento delle procedure. Per tali ragioni, è stato sviluppato un unico modello 3D che rappresenta l'ambiente virtuale composto da tali stanze e che verrà importato interamente in Unity in una singola scena.

Un ulteriore locale dell'impianto in cui si svolge parte della procedura è il **CO2 Enclosure Store**. Come si può osservare nella planimetria, quest'ultimo è separato dalla struttura descritta precedentemente. Inoltre, è richiesto all'operatore uno spostamento in quest'area solamente durante uno step della procedura che si esegue in presenza di malfunzionamenti. Per questi motivi, è stato creato un modello 3D del locale separato dai precedenti, che sarà importato singolarmente in Unity in una scena a parte dedicata. Ciò contribuisce ad alleggerire la simulazione e a semplificare il processamento da parte del visore, in ottica di ottenimento di un prodotto stand-alone.

In figura 5.4 si riporta una vista del modello 3D del CO2 Enclosure Store. Sono state rappresentate le bombole adibite allo stoccaggio della CO2, predisposte a riprodurre la configurazione reale e collegate in serie tra loro attraverso le apposite tubazioni. Particolare attenzione è stata rivolta alla prima bombola, dotata di

rilevatore elettrico e valvola con leva di apertura manuale per il rilascio della scarica di agente estinguente. Questi componenti sono stati realizzati in modo molto realistico e fedele alla realtà, in quanto oggetto di interazione da parte dell'operatore durante lo svolgimento della procedura.



Figura 5.4: Modello 3D del CO2 Enclosure Store

A conclusione della fase di realizzazione dell'ambiente virtuale, il risultato ottenuto ha soddisfatto abbondantemente gli obiettivi prefissati inizialmente. È stato sviluppato un modello 3D dei locali realistico, accurato e funzionale allo svolgimento e all'apprendimento delle procedure. Inoltre, per i componenti dell'impianto antincendio su cui è richiesta l'interazione dell'operatore, la resa grafica ha dimostrato una notevole somiglianza con l'oggetto reale, fondamentale nell'accrescere il ruolo addestrativo della simulazione sviluppata. Tale aspetto è evidenziato dalle immagini comparative riportate al *Capitolo 4*. Ciò nonostante, grazie ad un'attenta semplificazione delle parti poco funzionali e all'omissione di aree ed elementi dell'impianto non visibili durante l'esecuzione delle procedure, è stato ottenuto un modello 3D che può essere processato e supportato interamente dal visore VR, senza la necessità di collegamento con un computer esterno.

L'ambiente virtuale realizzato è stato quindi importato in *Unity*, dove è stata eseguita tutta la fase di sviluppo e programmazione della demo VR, descritta nei paragrafi seguenti.

5.2 Caratteristiche della simulazione VR

Una volta importato in Unity l'ambiente virtuale in cui si svolgono le procedure oggetto d'addestramento, prima di procedere con la programmazione della demo VR è stato necessario definire e valutare le caratteristiche da attribuire alla simulazione in fase di sviluppo. Partendo quindi da un'analisi delle procedure antincendio, fornite dall'azienda *FireTech* e descritte in dettaglio al *Capitolo 6*, sono state effettuate le opportune scelte, in modo da ottenere un prodotto valido ed efficace ai fini dell'addestramento.

Si riportano di seguito i principali aspetti della demo VR sviluppata:

- **Simulazione a mani libere:** l'hardware utilizzato per lo sviluppo della simulazione VR integra l'*hand tracking*, il che permette di interagire con l'ambiente virtuale senza il bisogno di utilizzare alcun tipo di controller. Come anticipato, questo aspetto è stato sfruttato ed utilizzato per aumentare il realismo della demo VR e per rendere le interazioni più intuitive, naturali ed immediate. Ciò contribuisce a migliorare l'addestramento VR e ne semplifica l'utilizzo in caso di primo approccio con tale tecnologia.
- **Divisione in scene:** la simulazione VR prevede la possibilità di eseguire una procedura di *armamento* dell'impianto antincendio, una procedura antincendio *standard* e una procedura antincendio *manuale*, che verranno approfondite al *Capitolo 6*. Ai fini dell'addestramento, si è quindi optato per una divisione della simulazione in più scene, in modo da consentire all'utente di eseguire separatamente ogni singola procedura, con possibilità di ripetizione e di scelta tra i diversi scenari. Inoltre, tale aspetto consente di alleggerire la gestione da parte del visore e semplifica il lavoro di sviluppo e programmazione. Così facendo, infatti, si procede programmando e simulando le varie scene singolarmente, il che limita la propagazione degli errori e la loro ricerca, in fase di sviluppo. Il collegamento tra le varie scene viene impostato tramite script, descritti in seguito, che consentono il passaggio da una scena all'altra. In questo modo, viene richiesto al visore di processare un'unica scena per volta.
- **Spostamento automatico nella scena:** all'interno di ogni singola scena, lo spostamento dell'operatore nell'ambiente virtuale non è comandato dall'utente, ma bensì preimpostato in fase di sviluppo ed eseguito automaticamente nella simulazione. In particolare, durante lo svolgimento delle procedure, l'operatore viene posizionato ad ogni step nel punto della scena in cui deve essere eseguita l'azione richiesta, senza il bisogno di spostarsi nell'ambiente virtuale manualmente. Questa scelta è utile ai fini dell'addestramento, in quanto consente all'utente di concentrarsi esclusivamente sull'esecuzione

dei singoli step. Inoltre, ciò permette di seguire il flusso di azioni richieste dalla procedura senza interruzioni e distrazioni tra un passaggio e l'altro, contribuendo a facilitare ed assimilare le procedure, familiarizzando con esse. Ad avvalorare le motivazioni che hanno portato all'implementazione di tale caratteristica simulativa, vi è il fatto di aver sviluppato una simulazione a mani libere. Il movimento dell'operatore all'interno della scena, sarebbe infatti più semplice ed intuitivo qualora si dotasse l'utente di un joystick o di un controller, anzichè impostare comandi impartiti con il solo utilizzo della mani. Date le motivazioni precedenti e i limitati spostamenti richiesti all'operatore durante lo svolgimento delle procedure, si è quindi optato per programmare spostamenti automatici all'interno della scena, guadagnando in realismo e immersività portate dalla simulazione a mani libere e focalizzando l'attenzione sui singoli step e sul loro ordine all'interno della procedura.

- **Simulazione in modalità stand-alone:** la demo VR viene supportata e processata interamente dal visore, senza la necessità di collegamento con un computer esterno. Questa caratteristica è stata ottenuta attraverso opportune scelte ed accortezze adottate in fase di sviluppo. Innanzitutto, durante la realizzazione dell'ambiente virtuale, i modelli 3D sono stati semplificati ed ottimizzati, dove possibile, in modo da alleggerire la gestione da parte del visore. Inoltre, come già anticipato, sono stati omessi elementi e aree dell'impianto antincendio non funzionali allo svolgimento delle procedure e irrilevanti per il realismo della simulazione VR. La scelta di sviluppare la demo in più scene, collegate opportunamente tra loro, ha poi consentito al visore di processare un'unica scena per volta, sgravandone il lavoro computazionale. Così facendo si è ottenuta una simulazione realistica e funzionale all'addestramento, fluida durante l'esecuzione in modo da diminuire eventuali sintomi di disagio e *cybersickness*, il tutto senza rinunciare alla possibilità di esecuzione in modalità stand-alone. Questo aspetto è infatti molto rilevante in quanto consente al personale di usufruire dell'addestramento VR in molteplici ambienti e situazioni, con il solo requisito di avere in dotazione un visore compatibile con l'applicazione sviluppata. Ciò contribuisce a rendere il prodotto portatile, versatile ed accessibile.
- **Supporti didattici e addestrativi:** la simulazione VR è stata sviluppata con il principale obiettivo di fornire un valido ed innovativo strumento per il training del personale, capace di migliorare ed affiancare i tradizionali metodi di addestramento. Durante lo sviluppo non ci si è quindi solamente limitati a riprodurre e simulare le procedure in realtà virtuale, ma è stato anche curato l'aspetto didattico e addestrativo, in modo da guidare l'utente durante l'esecuzione e facilitare l'apprendimento. In particolare, è stato inserito nella scena un tablet di supporto dotato di grafica adattiva, sul

quale vengono riportati i vari step da eseguire ed altre informazioni utili allo svolgimento della simulazione. Il tablet, che verrà descritto più in dettaglio in seguito, affianca l'operatore durante tutto lo svolgimento delle procedure e rappresenta il principale strumento a cui far riferimento sia per la spiegazione degli step da eseguire, che per la gestione dell'applicazione stessa. Inoltre, per suggerire all'utente le azioni da compiere e la posizione di spie, pulsanti e componenti su cui agire, sono state predisposte nella scena delle frecce di aiuto. Questi elementi sfavoriscono il realismo della simulazione, ma sono essenziali e determinanti per l'ottenimento di un addestramento VR valido ed efficace. Infine, come ultimo supporto, la demo VR è stata sviluppata in maniera tale da forzare l'operatore ad eseguire gli step nell'esatto ordine indicato dalla procedura, con l'obbligo di completare lo step corrente prima di poter passare a quello successivo. Per i passaggi che non prevedono azioni operative, si richiede comunque all'utente di premere un pulsante di check inserito sul tablet. In questo modo, si favorisce la memorizzazione e l'apprendimento delle procedure.

- **Audio ed effetti visivi:** per aumentare il realismo e l'immersività della simulazione VR, in fase di sviluppo è stato curato anche l'aspetto audio-visivo. In particolare, basandosi su materiale videografico fornito dall'azienda *FireTech*, sono stati inseriti nella demo VR effetti audio reali in corrispondenza dell'attivazione di pulsanti, segnali acustici emessi dalla centralina antincendio, e sirene antincendio di cui è equipaggiato l'impianto. Per quanto riguarda la parte visiva, oltre alla riproduzione fedele di spie, semafori e segnalazioni lampeggianti, sono stati ricreati effetti visivi per simulare la presenza di fiamme e fumo, il rilascio della scarica di agente estinguente e il conseguente processo di estinzione dell'incendio. Il processo di realizzazione e programmazione di tali dettagli sarà approfondito in seguito.

Dopo aver definito e valutato i requisiti e le caratteristiche della simulazione VR da realizzare, si è quindi passati alla fase di sviluppo e programmazione eseguita in *Unity*.

5.3 Sviluppo e programmazione in Unity

Una volta realizzato l'ambiente virtuale e definite le caratteristiche e le funzionalità da attribuire alla demo VR, si andranno a descrivere in dettaglio la programmazione e lo sviluppo in *Unity*, soffermandosi sugli aspetti tecnici legati all'utilizzo del software e sulla creazione degli script eseguita attraverso l'ambiente di sviluppo integrato *Visual Studio*.

5.3.1 Creazione del progetto ed installazione di pacchetti e plug-in

La fase di sviluppo in *Unity* inizia con la creazione di un nuovo progetto di tipo **3D URP** (Universal Render Pipeline). Così facendo, si usufruisce di una pipeline di rendering disponibile sul software, che offre buone prestazioni e flessibilità nella personalizzazione del rendering, ed è ottimizzata per lo sviluppo di progetti VR. Dopodichè, si procede con l'importazione dei pacchetti e plug-in necessari, che possono essere aggiunti già in fase di creazione del progetto. Alcuni di questi sono preinstallati in Unity, altri possono essere selezionati e scaricati dall'*Unity Asset Store*. E' comunque possibile importare pacchetti anche in un secondo momento, aggiungendoli alla sezione *Assets*.

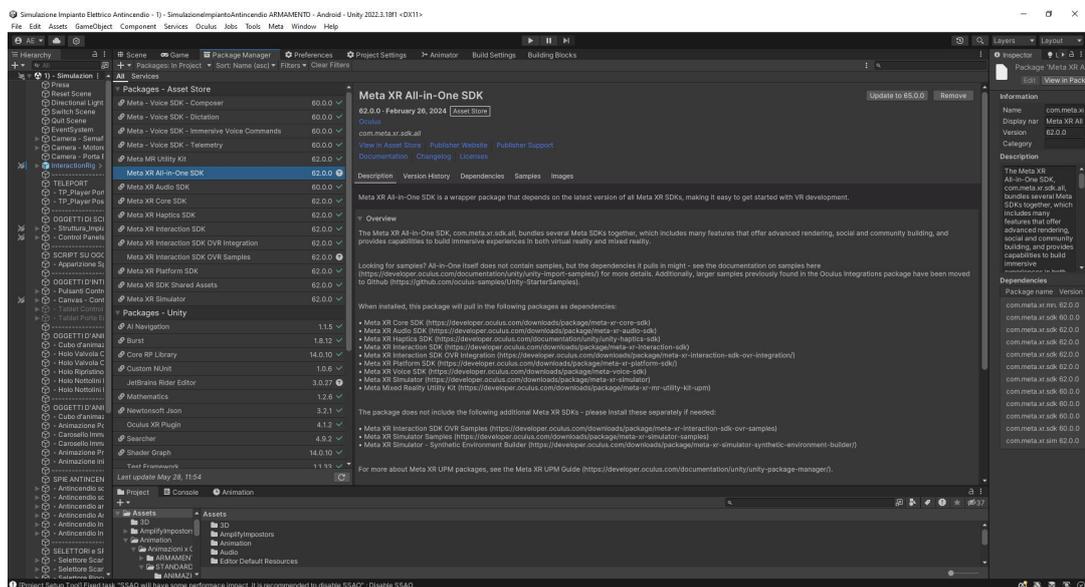


Figura 5.5: Schermata di Unity relativa alla gestione ed installazione dei pacchetti

Tra tutti i pacchetti e plug-in necessari allo sviluppo della simulazione, si evidenziano quelli che consentono la compatibilità e l'interazione tra il progetto e il visore:

- **XR Plug-in Management:** pacchetto che fornisce una gestione semplice dei plug-in XR. Deve essere installato sul PC, sul server e sul visore per poter ottenere la compatibilità tra questi;
- **Meta XR All-In-One SDK:** pacchetto che consente l'interazione con il visore *Meta Quest 2* utilizzato, e contiene diversi Meta SDK;
- **Meta XR Interaction SDK OVR Samples:** pacchetto che consente la gestione delle interazioni con mani e controller, e il rilevamento della posa del corpo.

I pacchetti importati vengono quindi visualizzati nel *Package Manager*, come riportato in figura 5.5, e da qui si procede con la loro installazione all'interno del progetto. In fase di salvataggio, verrà creata una cartella contenente tutto ciò che è stato sviluppato ed inserito nel progetto, come gli asset, gli script e le texture.

5.3.2 Ambiente virtuale e player

Come anticipato, la simulazione VR sarà sviluppata in più scene, che verranno opportunamente collegate tra loro tramite appositi script, come verrà descritto in dettaglio in seguito. Per ogni scena, sviluppata singolarmente, si procede creando l'ambiente virtuale e importando al suo interno il player.

Per il progetto di tesi, come visto in precedenza, i **modelli 3D** dei locali comprensivi dei componenti relativi all'impianto antincendio, sono stati realizzati su software esterni, e vengono quindi importati in un'apposita cartella all'interno degli *Assets* di Unity. Il software, permette di spostare i modelli all'interno della *Scene*, ruotarli e scalarne le dimensioni, ma non consente ulteriori modifiche e trasformazioni. Per questo motivo, l'ambiente virtuale in cui si sviluppa ogni singola scena è stato precedentemente realizzato e predisposto all'importazione. Durante lo sviluppo, qualora si abbia la necessità di inserire un nuovo elemento all'interno della scena, tale azione può essere effettuata importando il relativo file all'interno degli *Assets* e trascinandolo poi nell'ambiente *Scene*.

Nel caso in cui, durante la fase di realizzazione dei modelli 3D, non siano stati attribuiti materiali e proprietà ai vari elementi, ciò può essere eseguito in Unity. Si definiscono e si creano quindi dei **materiali**, che vengono inseriti nuovamente all'interno degli *Assets*, e da qui trascinati nella scena in corrispondenza dell'elemento a cui si vogliono associare. Nel caso in cui si desiderino applicare materiali e proprietà differenti ai diversi componenti di uno stesso oggetto 3D, quest'ultimo

dovrà essere opportunamente diviso in quelle rispettive parti precedentemente, e poi il tutto dovrà essere importato nella scena. La stessa cosa deve essere effettuata qualora si vogliano spostare più parti di uno stesso modello 3D. Questi aspetti sono stato infatti considerati durante la realizzazione dell'ambiente virtuale, eseguita in precedenza tramite i software di modellazione 3D.

Ogni elemento presente nella scena rappresenta un **GameObject**. Si possono avere GameObject visibili, invisibili, interattivi, e ad ognuno di questi sono associati un nome e diverse proprietà. Queste ultime sono definite dai *componenti*, che possono essere aggiunti o rimossi dall'elemento a piacimento, e consentono di modificare ed impostare le proprietà del GameObject e le sue interazioni con altri elementi della scena. Ciò viene effettuato selezionando il GameObject e agendo sulla finestra *Inspector* di Unity.

Per gestire i vari *GameObject* importati nella scena, facilitando anche le trasformazioni (spostamento, rotazione, scalatura) di oggetti divisi in più parti, si sfruttano gerarchie di tipo **parent-children**, definite attraverso la *Hierarchy*, e che consentono di creare collegamenti tra due o più oggetti. Si ottengono così i seguenti vantaggi:

- spostando, ruotando o scalando l'oggetto *parent*, anche i relativi oggetti *children* subiscono la stessa trasformazione;
- quando un oggetto *parent* viene disattivato, anche i relativi oggetti *children* diventano inattivi;
- quando un oggetto *parent* viene cancellato dagli script, anche i relativi oggetti *children* vengono eliminati.

Una volta importato l'ambiente virtuale, prima di iniziare la programmazione e gestire le interazioni tra i vari GameObject, si inserisce nella scena il **player**.

In particolare, per il progetto di tesi, si accede al pacchetto *Meta XR Interaction SDK OVR Samples* installato in precedenza, si seleziona il pacchetto **Interaction Rig OVR-FullSynthetic** e lo si importa nella scena. Così facendo, è stato scelto un player caratterizzato da mani libere e fisicità realistica alle mani, il che soddisfa le caratteristiche e i requisiti che si è deciso di attribuire alla simulazione VR in fase iniziale. Il player viene posizionato alle coordinate (0,0,0) dell'ambiente creato. A questo punto, collegando il visore via cavo (in fase di sviluppo non è possibile utilizzare la modalità stand-alone), si osserva l'ambiente virtuale importato e si valutano le proporzioni rispetto all'ambiente reale. Se necessario, è conveniente modificare e dimensionare gli oggetti presenti nella scena rispetto al player, scalato di default (1,1,1).

5.3.3 Animazioni

Lo sviluppo della simulazione VR prevede la programmazione di diverse azioni automatiche che si devono verificare durante la scena, in determinati istanti. Infatti, ogni qual volta si verifichi una dinamica non innescata da interazioni con l'utente, quest'ultima è risultato di un'animazione preimpostata in fase di sviluppo. L'inserimento di animazioni è dunque funzionale ad attribuire azioni automatiche ad oggetti ed elementi presenti nella scena, e consente inoltre di connettere i vari eventi, fornendo continuità alla simulazione. La demo VR è stata infatti sviluppata seguendo una logica di tipo **causa-effetto** per cui, le azioni e gli eventi che si susseguono nella scena, sono concatenati tra loro tramite interazioni dirette con l'utente oppure, in alternativa, tramite appunto animazioni.

In generale, per programmare un'**animazione**:

- si isola e si seleziona nella scena l'elemento da animare;
- dalla sezione *Animation*, si crea una nuova animazione. Contestualmente compaiono automaticamente l'*Animation Clip*, gestore dell'animazione e l'*Animation Controller*, controllore dell'animazione, dai quali è possibile impostare e modificare diversi aspetti e caratteristiche;
- nella sezione *Animation*, si apre la timeline;
- si procede a registrare l'animazione:
 - si copia la posizione di partenza dell'oggetto, a registrazione spenta;
 - si avvia la registrazione e si riporta la posizione di partenza copiata precedentemente;
 - ci si sposta sulla timeline in modo da impostare la durata dell'animazione;
 - si sposta l'oggetto sulla scena e, una volta rilasciato, viene salvata automaticamente la posizione finale e si attiva l'animazione;
 - si arresta quindi la registrazione.

Nel caso in cui si vogliano impostare eventi all'inizio, alla fine o in determinati istanti dell'animazione, ci si sposta nella timeline in corrispondenza del punto desiderato e si inserisce un nuovo **evento**. Si crea quindi uno script *C#*, in cui viene programmato nello specifico l'evento che si deve verificare a quel preciso istante temporale, e dopodichè si richiama quest'ultimo nella timeline.

Questa logica è stata seguita nello sviluppo delle varie animazioni inserite nella demo VR, utilizzando il software *Visual Studio* per la programmazione degli script.

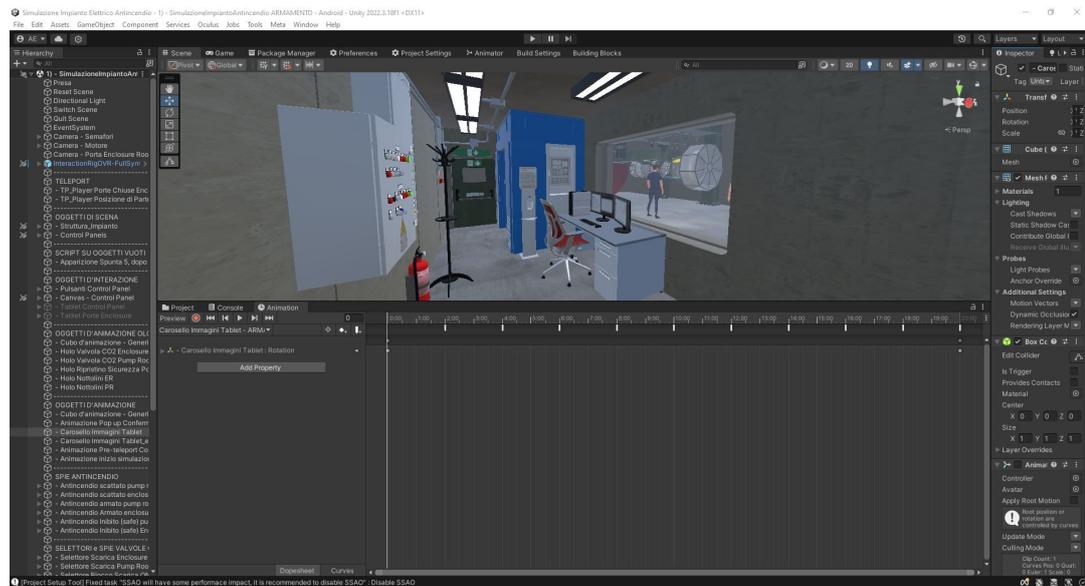


Figura 5.6: Animation di Unity con relativa timeline

Come anticipato, sono state introdotte nella simulazioni varie animazioni applicate ad oggetti visibili nella scena. Tra queste si evidenziano la chiusura delle porte, la rotazione dei selettori a chiave, animazioni per la gestione della grafica dinamica del tablet di supporto e per la movimentazione di frecce e ologrammi d'aiuto, necessari per migliorare le caratteristiche addestrative della demo VR. Oltre a questo, le animazioni sono state anche utilizzate per gestire i **tempi della simulazione** che intercorrono tra un evento e l'altro. In particolare, all'inizio di una nuova scena o durante determinati istanti della procedura, è stata introdotta un'animazione applicata ad un cubo fittizio, collocato all'interno della scena in modo da non essere visibile nell'ambiente virtuale. Così facendo, è stato impostato nei vari casi un periodo di tempo necessario all'animazione del cubo, irrilevante agli occhi dell'utente durante l'esecuzione, ma funzionale a consentire a quest'ultimo di ambientarsi nella scena o di leggere e comprendere le indicazioni relative agli step da eseguire, assimilando le procedure. Anche questo aspetto contribuisce a soddisfare gli obiettivi della demo VR, favorendo l'apprendimento e la familiarizzazione con le procedure e migliorando l'esecuzione della simulazione, in modo da ridurre potenziali sintomi dovuti a *cybersickness*.

5.3.4 Teleport

Prima di procedere con lo sviluppo della simulazione VR, sono state valutate e selezionate attentamente le varie caratteristiche da attribuire in fase di programmazione. Come visto in precedenza, una di queste prevede lo **spostamento automatico** dell'operatore nelle zone dove sono richieste interazioni. Questo aspetto viene sviluppato in *Unity* con l'implementazione dei cosiddetti eventi di teleport.

Per programmare un evento di **teleport** che, ad un definito istante, determina lo spostamento automatico del player da una posizione di partenza ad una posizione di arrivo nella scena, si procede come segue:

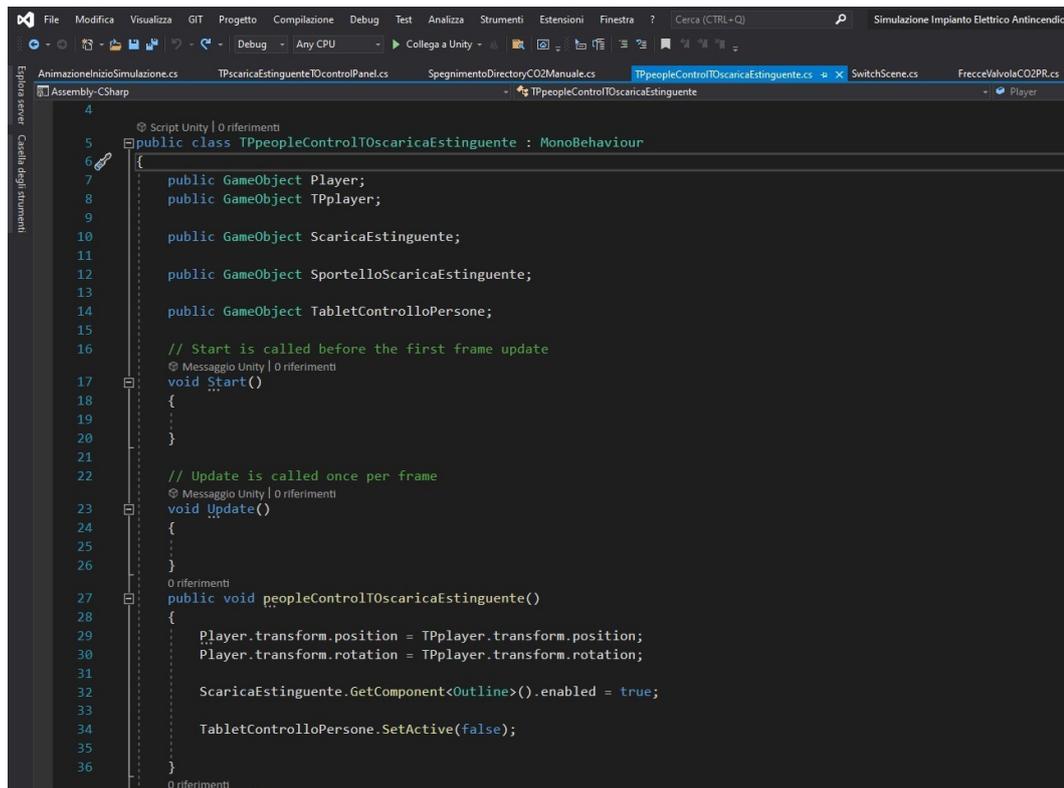
- si crea un oggetto vuoto nel punto di arrivo desiderato, in modo da ottenere le rispettive coordinate;
- si crea un cubo d'animazione a cui viene assegnata un'animazione pre-teleport. Questo passaggio è *facoltativo* e non funzionale all'esecuzione del teleport, ma consente di far trascorrere qualche istante tra l'azione che attiva l'evento di teleport e l'evento stesso. Così facendo, l'utente può comprendere e realizzare più facilmente ciò che sta avvenendo, senza perdere di vista la successione degli eventi determinata dalla procedura.
- si programma quindi l'animazione come visto in precedenza, impostando la durata desiderata;
- a fine animazione si inserisce un evento, a cui verrà associato lo script che implementa l'azione di teleport;
- si crea quindi lo *script di teleport* da inserire nell'evento di fine animazione.

Una volta impostata l'**animazione pre-teleport**, funzionale ad introdurre ed attivare l'evento stesso, si programma quindi il teleport attraverso uno script *C#*. Come anticipato, tale passaggio è eseguito nell'ambiente di sviluppo integrato *Visual Studio*.

Lo **script di teleport** viene implementato attraverso semplici comandi. Si riporta in figura 5.7, a scopo esemplificativo, uno degli script sviluppati durante la programmazione della demo VR.

Come si può osservare, innanzitutto è necessario creare l'evento di teleport, in questo specifico caso *TPpeopleControlTOscaricaEstinguente*. Quest'ultimo sarà appunto richiamato a fine animazione. Dopodichè, si procede con la programmazione dell'evento, dichiarando le variabili che riportano la posizione iniziale (*player*) e finale (*TPplayer*) del player. A queste ultime verrà successivamente

assegnato l'oggetto vuoto inserito nella scena alle posizioni desiderate, e riportante le rispettive coordinate. Infine, si esplicita l'azione di teleport, dichiarando che la posizione e la rotazione iniziale del player deve trasformarsi nella rispettiva posizione e rotazione finale (le altre variabili presenti in figura 5.7 sono invece riferite all'attivazione e disattivazione di altri elementi presenti nella scena).



```
4
5 public class TPpeopleControlTOscaricaEstinguente : MonoBehaviour
6 {
7     public GameObject Player;
8     public GameObject TPplayer;
9
10    public GameObject ScaricaEstinguente;
11
12    public GameObject SportelloScaricaEstinguente;
13
14    public GameObject TabletControlloPersone;
15
16    // Start is called before the first frame update
17    void Start()
18    {
19    }
20
21
22    // Update is called once per frame
23    void Update()
24    {
25    }
26
27    0 riferimenti
28    public void peopleControlTOscaricaEstinguente()
29    {
30        Player.transform.position = TPplayer.transform.position;
31        Player.transform.rotation = TPplayer.transform.rotation;
32
33        ScaricaEstinguente.GetComponent<Outline>().enabled = true;
34
35        TabletControlloPersone.SetActive(false);
36    }
37
38    0 riferimenti
```

Figura 5.7: Esempio di script di teleport implementato nella simulazione VR

Allo stesso modo sono stati programmati tutti gli spostamenti automatici del player, previsti durante la simulazione VR.

5.3.5 Pulsanti

Durante lo svolgimento delle procedure, in diverse occasioni l'operatore deve compiere step che richiedono di interagire con specifici pulsanti. Inoltre, come anticipato, la simulazione VR prevede l'inserimento di un tablet di supporto che, tra le altre cose, è provvisto di pulsanti di interazione. In tutti questi casi, è necessario dunque predisporre nella scena dei GameObject programmati in modo da consentire l'interazione con l'utente, e in grado di simulare il funzionamento di un pulsante.

Nel caso generico, un **pulsante** viene simulato attraverso due oggetti 3D: spostando uno dei due rispetto all'altro entro un certo limite, si riproduce la funzione di un pulsante. Un elemento della scena a cui è associato uno specifico script rileva il passaggio del dito e fornisce l'input di azionare il movimento. In particolare, durante la programmazione, si procede come segue:

- si isola l'elemento 3D a cui si vuole attribuire la funzione di *pulsante*;
- si posiziona sull'oggetto una superficie planare che rileva il punto di arrivo del dito. A questo elemento *Surface* è attribuito uno script già predisposto che permette di implementare questa funzione;
- si aggiunge all'*Inspector* dell'oggetto lo script *Poke Interactable*, che consente di implementare lo schiacciamento del pulsante;
- attraverso l'*Interactable Unity Event Wrapper* che compare nella sezione *Inspector*, è ora possibile impostare azioni, suoni, script e, in generale, eventi di vario tipo, che si desidera vengano attivati o disattivati una volta premuto (*When Select*) o rilasciato (*When Unselect*) il pulsante;
- impostato correttamente il pulsante, in modo che una volta azionato vengano simulate le opportune dinamiche, è necessario predisporre il player per permettere che le mani possano interagire con il *Poke Interactable*. Nella finestra relativa alla mano destra e alla mano sinistra del player, si aggiunge dunque lo script *Hand Poke Interactor*, che implementa la funzione di spingere e premere oggetti;
- nella finestra relativa alla mano destra e alla mano sinistra del player, si aggiunge inoltre lo script *Hand Synthetic*, che consente di simulare le collisioni della mano con gli oggetti presenti nella scena.

Così facendo, si implementa nella simulazione VR la presenza dei pulsanti e la loro interazione con l'operatore. Inoltre, vengono impostati e programmati gli eventi che devono verificarsi in seguito all'attivazione di essi. Nel caso in cui, testando la resa con il visore, si riscontrano difficoltà nell'azionamento dei pulsanti,

ad esempio per pulsanti di piccole dimensioni, si va ad aumentare quanto basta la superficie di contatto, scegliendo una dimensione opportuna a facilitare l'utente e a garantire comunque il realismo della simulazione.

I pulsanti presenti nella demo VR sono stati simulati e programmati come descritto. In particolare, è stato necessario predisporre le seguenti tipologie di pulsanti:

- **Pulsanti centralina antincendio e pulsantiera ausiliaria:** sono stati programmati come descritto in precedenza, isolando opportunamente tutti i singoli oggetti 3D con funzione di pulsante, e attribuendo ad essi funzioni e script necessari;
- **Pulsanti di Allarme Antincendio e Attivazione Scarica:** poichè risulta difficile ricreare e rendere interattivo questo tipo di pulsante con una mesh 3D, è stato inserito nella scena un pulsante semplice, preimpostato analogamente a quanto visto in precedenza, in corrispondenza dei modelli 3D dei due pulsanti. Dopodichè, dalla finestra *Inspector* del pulsante semplice è stato disattivato il *Mesh Renderer*. In questo modo, l'oggetto è scomparso dalla scena, ma solamente da un punto di vista grafico, lasciando dunque visibili i modelli 3D dei due pulsanti. Così facendo, si abilita l'interazione con il pulsante semplice, pur mantenendo a livello grafico i pulsanti realmente installati all'interno dell'impianto antincendio, contribuendo dunque al realismo e alla fedeltà della simulazione VR;
- **Pulsanti di 'Quit Scene' e 'Reset Scene' del tablet:** dal punto di vista della programmazione e dell'interazione con essi, sono pulsanti semplici impostati come descritto in precedenza;
- **Pulsante di 'Check' del tablet:** è collocato sullo schermo del tablet di supporto e deve quindi simulare ciò che nella realtà corrisponde a premere un pulsante touch. E' stato quindi inserito nella scena, in corrispondenza dello schermo, un pulsante 2D preimpostato come visto in precedenza, e dalle impostazioni di questo GameObject è stata ridotta al minimo l'area di escursione, in modo da restituire la sensazione data da un pulsante touch. Inoltre, l'oggetto è stato programmato per illuminarsi quando premuto, così da fornire un feedback all'user, data l'impossibilità di avere un feedback tattile. Ciò consente di rendere l'interazione più intuitiva e semplice, soprattutto nel caso di utenti inesperti o non avvezzi all'utilizzo della tecnologia VR.

5.3.6 Selettori a chiave

Le procedure simulate nella demo VR prevedono che l'operatore interagisca, in diversi step, con selettori a chiave situati sulla centralina antincendio e sulla pulsantiera ausiliaria. Per riprodurre questi passaggi, ai fini dell'addestramento VR, è opportuno programmare gli oggetti 3D raffiguranti i vari selettori presenti nella scena, in modo da consentire l'interazione con essi e simulare il funzionamento reale.

Rispetto alla programmazione dei pulsanti, in questo caso è richiesta maggiore accortezza. Date le dimensioni ridotte della chiave, infatti, risulta difficoltoso simulare l'azione che prevede di afferrare l'oggetto ed imporre una rotazione, soprattutto dal momento che si sta sviluppando una simulazione a mani libere. Per semplificare questo aspetto, si agisce quindi per **collisione**: quando il dito del player si avvicina all'elemento chiave entro una determinata zona, si attiva un'animazione di rotazione della chiave. Ciò va a svantaggio del realismo della simulazione, ma permette un'interazione più diretta e intuitiva, che altrimenti risulterebbe troppo macchinosa. Ai fini dell'addestramento VR, si focalizza quindi l'attenzione dell'operatore sull'apprendimento della procedura, semplificando e sgravando l'attenzione sullo svolgimento della singola azione, di per sé semplice ed elementare da eseguire.

Con queste premesse, per implementare quanto descritto, la programmazione dei **selettori a chiave** segue i seguenti passaggi:

- si isolano e si raggruppano tutti gli elementi che compongono l'oggetto 3D rappresentante il *selettore a chiave*;
- utilizzando la gerarchia parent-children, si imposta l'elemento 'chiave' come *child* dell'elemento 'nottolino' del selettore, in modo da vincolare i due oggetti tra loro;
- si imposta il selettore nella posizione di partenza desiderata, selezionando l'elemento 'nottolino' dalla scena e ruotandolo (la chiave subirà la rotazione di conseguenza, grazie alla gerarchia parent-children attribuita in precedenza nella *Hierarchy*);
- si aggiunge all'oggetto 'nottolino' un *Box Collider* e lo si ingrandisce in modo che contenga tutto l'ingombro della chiave. Questo elemento consentirà di interagire con il selettore, rilevando la presenza della mano dell'operatore entro il suo ingombro;
- si applica all'oggetto 'nottolino' il componente *Rigidbody*, che attribuisce all'oggetto caratteristiche di massa, gravità e fisicità, e gli consente di ricevere urti da altri *collider* (ad esempio le mani del player);

- si aggiunge all'oggetto 'nottolino' il componente *Grabbable*, che consente al componente di ruotare qualora il player interagisca con esso;
- nella finestra relativa alla mano destra e alla mano sinistra del player, si aggiunge lo script *Hand Grab Interactor*, che implementa la funzione di presa sugli oggetti;
- a questo punto, attraverso l'*Interactable Unity Event Wrapper* che compare nella sezione *Inspector*, è possibile impostare azioni, suoni, script e, in generale, eventi di vario tipo, che si desidera vengano attivati o disattivati una volta ruotato (*When Unhover*) il selettore;
- in particolare, tra gli eventi impostati in corrispondenza della condizione *When Unhover* del nottolino (sta a significare che l'evento accade una volta che la mano del player ha afferrato e poi rilasciato l'oggetto), si attiva l'animazione di rotazione del selettore, dalla posizione di partenza a quella di arrivo.

E' stata così simulata nella demo VR l'interazione con i selettori a chiave in modo che, quando l'operatore tocca il relativo oggetto 3D presente nella scena, si attivano gli eventi che da procedura accadrebbero nell'impianto antincendio in una situazione reale, ed inoltre con un'animazione viene riprodotta la rotazione del componente. Con questo metodo sono stati programmati i **Selettori di Blocco Scarica CO2** dell'Acoustic Enclosure e della Fuel Pump Room, situati sulla pulsantiera ausiliaria, nonché il **Selettore Abilitazione Funzione Sistema**, collocato sulla centralina antincendio.

Analogamente, è stata gestita l'interazione con la **leva di apertura manuale** della valvola di scarica CO2, situata sulla relativa bombola all'interno del *CO2 Enclosure Store*. Infatti, come i selettori, anche su questo componente deve essere applicata una rotazione da parte dell'operatore e le ridotte dimensioni complicano l'interazione, come descritto in precedenza. L'apertura della leva è stata quindi simulata in maniera analoga a quanto visto per i selettori a chiave.

5.3.7 Spie, led e semafori

L'impianto antincendio è dotato di spie, led e semafori antincendio che informano l'operatore sullo stato di funzionamento dell'impianto, permettono di monitorare diversi aspetti del sistema e, in alcune circostanze, forniscono segnali di avvertimento. Ai fini della simulazione VR, per riprodurre fedelmente le procedure, è quindi necessario programmare questi componenti in modo che si accendano e si spengano quando richiesto, simulando quanto di fatto si verifica a livello reale.

Per restituire all'user il feedback visivo dell'accensione di spie, led e semafori, si procede creando ed importando all'interno degli *Assets*, due **materiali differenti**. In particolare, modificando il livello di **alpha** del materiale, si va a selezionare la percentuale di trasparenza e di opacità dello stesso. Così facendo, si creano un materiale con livello di alpha **basso** che rappresenta lo stato *Spento*, e uno con livello di alpha **alto** che identifica lo stato *Acceso*.

A questo punto, è possibile assegnare i materiali agli elementi presenti nella scena, trascinandoli dalla finestra degli *Assets* fino in corrispondenza dell'oggetto. All'istante della procedura in cui è richiesto di simulare l'accensione o lo spegnimento di un oggetto della scena, si programma uno script che disattiva il materiale *Spento* (o *Acceso*) attribuito all'oggetto, e attiva il materiale *Acceso* (o *Spento*).

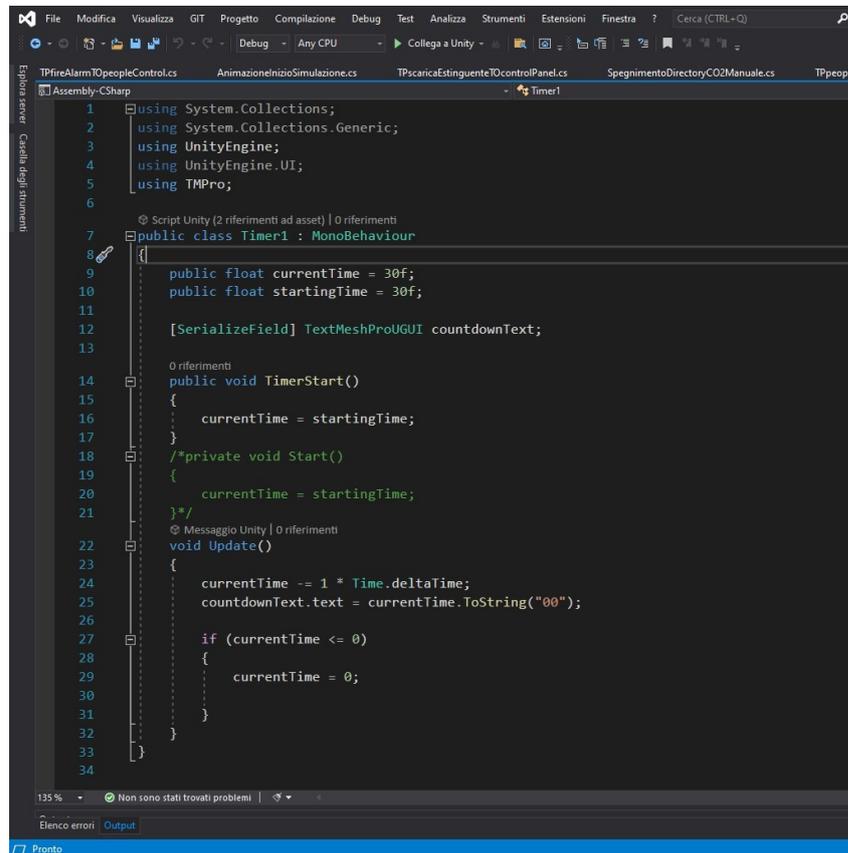
Analogamente, in alcuni casi, si può optare per duplicare l'elemento della scena, ottenendo due identici oggetti ai quali verranno assegnati i due diversi materiali. Si procede dunque come in precedenza, attivando o disattivando a livello di script l'intero oggetto, anziché il solo materiale.

5.3.8 Timer della centralina antincendio

La centralina antincendio è provvista di due display, uno relativo all'Acoustic Enclosure, l'altro alla Fuel Pump Room, come descritto in dettaglio al paragrafo 4.2.1. In seguito all'attivazione della scarica di agente estinguente nell'area interessata, sul rispettivo display si attiva un countdown di 30 secondi, al termine del quale avviene il rilascio di CO₂. Nel caso della simulazione VR sviluppata, si simula un incendio in Acoustic Enclosure, per cui sul display relativo all'area 1 dovrà essere implementato un timer che simuli quanto appena descritto.

Per riprodurre il **timer** della centralina antincendio, in fase di programmazione, dapprima si predispose nella scena il GameObject *Canvas*, sul quale è possibile riportare testi e label, e lo si fa coincidere con i display delle due aree. A questo punto, si possono dunque scrivere e riportare sui due Canvas i testi presenti nella situazione reale che, in questo caso, verranno inseriti sottoforma di TMP (*TextMesh Pro*).

In particolare, per quanto riguarda il timer, quest'ultimo viene scritto automaticamente all'interno del Canvas, richiamando un apposito script che implementa il countdown di 30 secondi. Lo script in questione, analogamente agli altri, viene programmato in *C#* all'interno dell'ambiente di sviluppo integrato *Visual Studio*, ed è riportato in figura:



```
1 using System.Collections;
2 using System.Collections.Generic;
3 using UnityEngine;
4 using UnityEngine.UI;
5 using TMPro;
6
7 public class Timer1 : MonoBehaviour
8 {
9     public float currentTime = 30f;
10    public float startingTime = 30f;
11
12    [SerializeField] TextMeshProUGUI countdownText;
13
14    public void TimerStart()
15    {
16        currentTime = startingTime;
17    }
18    /*private void Start()
19    {
20        currentTime = startingTime;
21    }*/
22    void Update()
23    {
24        currentTime -= 1 * Time.deltaTime;
25        countdownText.text = currentTime.ToString("00");
26
27        if (currentTime <= 0)
28        {
29            currentTime = 0;
30        }
31    }
32 }
33
34
```

Figura 5.8: Script attraverso il quale viene implementato il countdown che precede il rilascio

5.3.9 Effetti sonori

In fase di definizione delle caratteristiche da attribuire alla simulazione VR, si è deciso di introdurre audio ed effetti sonori reali, così da accrescere il realismo dell'addestramento VR e aumentare l'immersività dell'esperienza.

Per inserire **audio ed effetti sonori** all'interno della scena, innanzitutto si importano i file audio nella sezione *Assets*. Dopodichè, si crea un oggetto vuoto

nella scena, e si attribuisce a quest'ultimo lo script *Audio Source*, già predisposto in Unity. Dalla finestra *Inspector* dell'oggetto è possibile dunque assegnare a quest'ultimo l'*Audio Clip*, ovvero il file audio importato in precedenza, nonché controllare e gestire la riproduzione del suono e i vari effetti ad esso associati. Per ultimo, si inserisce lo script *Audio Listener*, attribuito al player o alla camera principale, che consente di ascoltare e riprodurre i suoni emessi dall'oggetto dotato di *Audio Source*.

L'attivazione e la disattivazione dei file audio sono state impostate tramite script che, in specifici istanti della simulazione, accendono o spengono, a seconda dei casi, l'*Audio Source* dell'oggetto.

In questo modo sono stati programmati e riprodotti fedelmente suoni emessi dai **pulsanti**, segnalazioni acustiche della **centralina antincendio**, nonché le sirene di **Antincendio Scattato** e di **Scarica Attivata**, contribuendo ad accrescere il realismo della simulazione VR.

5.3.10 Sistemi particellari

Tra i diversi vantaggi dell'utilizzo di realtà virtuale per l'addestramento, vi è la possibilità di simulare e riprodurre situazioni di emergenza non replicabili nell'ambiente reale per ovvie ragioni di sicurezza. In particolare, nella simulazione VR sviluppata, si prevede l'implementazione di procedure volte all'attivazione dell'impianto antincendio in seguito ad un incendio del motore durante i test al banco. Per accrescere il realismo dell'esperienza VR, si prevede quindi di introdurre effetti visivi che possano simulare fiamme e fumo, nonché l'emissione di CO₂ nell'ambiente e il conseguente spegnimento dell'incendio.

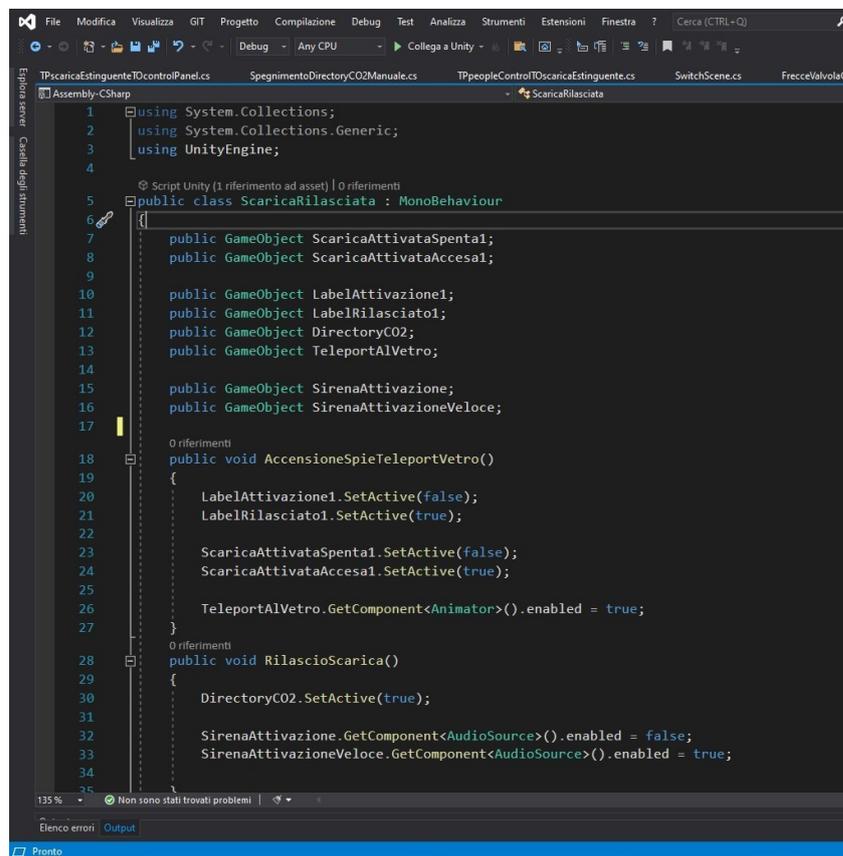
Per riprodurre in realtà virtuale elementi non rappresentabili attraverso mesh 3D, come fluidi e gas, si ricorre a **sistemi particellari** che consentono di generare particelle, modificarne dimensione, colore, tempi di emissione e altre caratteristiche [96]. In *Unity* tali sistemi sono implementati all'interno del **Particle System**. Si procede quindi come segue:

- si scarica un'immagine di texture che rappresenti una singola particella dell'elemento da simulare, come ad esempio fuoco o fumo;
- attraverso le impostazioni del *Particle System* si accede alla sezione *Additive*, contenuta all'interno della finestra *Particle*, la quale consente di assegnare alle particelle il materiale desiderato;
- l'immagine di texture precedentemente scaricata viene dunque importata ed inserita come materiale da assegnare alle particelle. In questo modo, ogni singola particella presenterà come texture tale immagine;

- dalle impostazioni del *Particle System* vengono poi apportate le varie modifiche agendo su più parametri, in modo da ottenere l'effetto visivo desiderato.

Attraverso questo sistema particellare implementato in Unity, sono stati quindi riprodotti e simulati all'interno della demo VR i seguenti eventi:

- **Incendio del motore:** nella timeline dell'animazione che precede la comparsa dell'incendio, sono stati predisposti due eventi, a due diversi istanti temporali. In particolare, dapprima è stato attivato il Particle System del *fuoco* e, qualche istante dopo, quello del conseguente *fumo nero*. Inoltre, i due GameObject sono stati impostati attraverso il menù relativo al sistema particellare, e collocati opportunamente nella scena in corrispondenza del motore. In questo modo è stato ottenuto un risultato soddisfacente, con la comparsa dapprima delle fiamme che crescono a partire dal motore, seguite dalla presenza di fumo nero che diventa via via più fitto;



```
1 using System.Collections;
2 using System.Collections.Generic;
3 using UnityEngine;
4
5 public class ScaricaRilasciata : MonoBehaviour
6 {
7     public GameObject ScaricaAttivataSpenta1;
8     public GameObject ScaricaAttivataAccesa1;
9
10    public GameObject LabelAttivazione1;
11    public GameObject LabelRilasciato1;
12    public GameObject DirectoryCO2;
13    public GameObject TeleportAlVetro;
14
15    public GameObject SirenaAttivazione;
16    public GameObject SirenaAttivazioneVeloce;
17
18    0 riferimenti
19    public void AccensioneSpieTeleportVetro()
20    {
21        LabelAttivazione1.SetActive(false);
22        LabelRilasciato1.SetActive(true);
23
24        ScaricaAttivataSpenta1.SetActive(false);
25        ScaricaAttivataAccesa1.SetActive(true);
26
27        TeleportAlVetro.GetComponent<Animator>().enabled = true;
28    }
29
30    0 riferimenti
31    public void RilascioScarica()
32    {
33        DirectoryCO2.SetActive(true);
34
35        SirenaAttivazione.GetComponent<AudioSource>().enabled = false;
36        SirenaAttivazioneVeloce.GetComponent<AudioSource>().enabled = true;
37    }
38 }
```

Figura 5.9: Script di Scarica Rilasciata in cui viene attivata l'animazione di rilascio della CO2

- **Rilascio della scarica di CO2 ed estinzione dell'incendio:** si simula l'emissione di *CO2* attraverso un'immagine di texture rappresentante del fumo bianco, inserita nel Particle System. Agendo sulle impostazioni di quest'ultimo relative a durata e ritardo dell'emissione, e attivando tramite appositi script (come riportato ad esempio in figura 5.9) i vari GameObject situati nella scena, si avvia l'animazione di rilascio della scarica dai 4 ugelli situati in *Acoustic Enclosure*. Dopodichè, mentre prosegue l'emissione, si aziona un secondo sistema particellare che simula la presenza di una nube bianca (rappresentante la CO2) diffusa nell'ambiente, che sale a partire dal basso e si infittisce fino a saturare l'intero locale. A questo punto, viene simulata l'estinzione dell'incendio per soffocamento attraverso animazioni di riduzione del *fumo nero* e del *fuoco*, attivate tramite script e gestite dai relativi Particle System. Per ultimo, allo stesso modo, si riducono e si disattivano dapprima la CO2 diffusa nell'ambiente ed infine i getti emessi dagli ugelli di rilascio.

5.3.11 Tablet di supporto

La simulazione VR, come visto in precedenza, ha il principale obiettivo di fornire un valido strumento per l'addestramento del personale riguardo all'esecuzione di procedure operative. Per conseguire questo risultato è necessario dunque inserire all'interno della scena elementi di supporto ai fini della didattica e del training. Tra questi, assume principale importanza il **tablet di supporto**.



Figura 5.10: Tablet di supporto

In particolare, quest'ultimo è stato implementato in fase di sviluppo in modo da essere sempre presente durante l'esecuzione della simulazione, e collocato in punti facilmente accessibili e visibili all'operatore. Il tablet è dotato di una **grafica adattiva** che, in determinati istanti della simulazione, fornisce all'utente segnali di avviso e comandi che consentono di eseguire specifiche azioni, spostamenti, e gestire lo svolgimento della demo VR. Inoltre, come si può osservare in figura 5.10, lo schermo presenta una divisione in diversi screen, con le seguenti caratteristiche:

- **Checklist:** screen del tablet di supporto dove vengono riportati, passo dopo passo, i vari step da eseguire per lo svolgimento della procedura. Ogni istruzione presenta al suo fianco un relativo riquadro per il check nel quale, una volta completato correttamente il passaggio e premuto il *pulsante di check* predisposto nella parte inferiore dello screen, compare una spunta verde. L'operatore riceve così le istruzioni necessarie allo svolgimento della procedura e, attraverso la checklist, ha un resoconto delle azioni che sono state correttamente eseguite. Ai fini dell'addestramento, si prevede inoltre la possibilità di passare allo step successivo solamente dopo aver completato lo step corrente e aver spuntato l'apposito riquadro per il check;
- **Camere di controllo:** screen del tablet dove viene riportato quanto ripreso da alcune *telecamere* collocate all'interno della scena in fase di sviluppo della simulazione VR. Le telecamere non sono realmente presenti all'interno dei locali dell'impianto antincendio, ma sono state inseriti al fine di mostrare all'operatore, tramite il tablet, aree significative dell'impianto. In alcuni passaggi della procedura, questo strumento torna infatti utile, ai fini dell'addestramento, per mostrare zone e dettagli altrimenti non visibili direttamente;
- **Carosello di immagini:** screen del tablet, posto al di sotto delle camere di controllo in cui, durante tutta la durata della simulazione, vengono visualizzate in sequenza immagini riportanti informazioni relative ai componenti principali, caratteristiche dell'impianto antincendio, planimetria e altri dettagli utili.

Oltre al *pulsante touch* dello screen *Checklist*, necessario per fare il check degli step eseguiti, sul bordo dello schermo del tablet sono stati predisposti due *pulsanti fisici*, con le seguenti funzioni:

- **Pulsante 'Quit Scene':** consente all'utente di interrompere la simulazione e di chiudere l'applicazione;
- **Pulsante 'Reset Scene':** consente all'utente di ripetere dall'inizio l'esecuzione della procedura corrente, ripristinando da capo la scena.

Tramite la grafica adattiva implementata in fase di sviluppo, in alcuni istanti della simulazione compaiono poi a schermo ulteriori screen riportanti segnali di

warning da mostrare all'utente, inquadrature di specifiche camere situate nella scena, pulsanti touch che permettono il trasferimento ad altre zone dell'impianto, o ancora pulsanti touch attraverso i quali è possibile selezionare quali procedure si vogliono eseguire durante l'addestramento VR.

Si andrà ora a descrivere in dettaglio lo sviluppo e la programmazione del tablet di supporto all'interno della scena.

Creazione dell'oggetto 'tablet' nella scena

Per predisporre il **tablet di supporto** all'interno della scena, si importa innanzitutto il *modello 3D* di un tablet. Per fare in modo che l'utente disponga in ogni istante della simulazione del tablet di supporto, si andranno ad inserire nelle varie scene più GameObject 'tablet'. Come anticipato, infatti, la simulazione prevede lo spostamento automatico dell'operatore all'interno della scena per cui, ogni qual volta venga effettuato un *teleport*, si programma in modo da disattivare il tablet situato in corrispondenza della posizione di partenza e attivare quello collocato in prossimità della nuova posizione impostata nel teleport (vedi 5.3.4).

A questo punto, per rendere lo schermo dinamico e interattivo, si importa nella scena il Gameobject '**Canvas**', UI (*User Interface*) implementato in Unity, e lo si fa coincidere con lo schermo dell'oggetto 3D 'tablet'. Così facendo, sarà ora possibile scrivere testi e disporre i vari screen all'interno del Canvas. Si noti che, per praticità, dalla sezione *Hierarchy* è opportuno disporre l'oggetto 'Canvas' come *figlio* dell'oggetto 'tablet', in modo da vincolarlo a quest'ultimo attraverso la gerarchia parent-children (vedi 5.3.2).

Screen 'Checklist'

Per realizzare questa schermata del tablet si scrivono le label riportanti i testi che descrivono i vari step da eseguire durante lo svolgimento delle procedure, e si collocano all'interno del *Canvas*. Si dispone dunque, a fianco ad ogni label, il relativo riquadro per il check. In fase di programmazione, si imposta quindi in modo da far comparire a schermo la label e il riquadro relativi allo step successivo, solo dopo aver completato il passaggio corrente ed aver effettuato il check. Per quest'ultima azione, in particolare, si dispone nella parte inferiore dello screen un *pulsante di check* (vedi 5.3.5) e si programma in modo da attivare la spunta verde nell'apposito riquadro, una volta premuto.

Screen 'Camere di controllo'

In questa schermata del tablet vengono visualizzate le inquadrature di diverse **camere** collocate nella scena. Per ognuna di esse si procede quindi come segue:

- si posiziona nella scena l'oggetto *Camera* implementato in Unity, impostandolo e direzionandolo in modo da inquadrare quanto desiderato;
- si crea un oggetto 'screen' dove si vuole che venga visualizzato quanto inquadrato dal GameObject *Camera*;
- si posiziona l'oggetto 'screen' sul *Canvas* del tablet, disponendolo dove desiderato;
- per poter implementare la funzione richiesta, è necessario applicare all'oggetto 'screen' la texture *Camera Texture*. Si accede quindi agli *Assets* nella sezione *Render Texture*, e si seleziona tale texture da applicare.

Così facendo sono state predisposte camere che permettono all'operatore di visualizzare sul tablet, ad ogni istante, un'inquadratura del motore installato al banco prova, i semafori antincendio relativi all'Acoustic Enclosure, e la relativa porta di accesso.

Screen 'Carosello di immagini'

Il carosello di immagini viene implementato attraverso la creazione di un'animazione (vedi 5.3.3). Dapprima si importano le immagini da inserire all'interno della cartella *Images*, situata nella sezione *Textures* degli *Assets*. Dopodichè, si procede programmando l'animazione:

- si crea un'cubo d'animazione, nascosto nella scena, a cui assegnare l'animazione che permette di far scorrere le immagini;
- si scrive uno script (vedi fig. 5.11) che contiene 10 eventi (da fig.0 a fig.1, da fig.1 a fig.2, ...) che implementano il passaggio da un'immagine alla seguente, dal momento che vengono importate 10 immagini;
- nella timeline del cubo d'animazione si inseriscono quindi i 10 eventi in successione, a distanza di qualche secondo uno dall'altro, e si imposta l'animazione in modo che venga ripetuta in loop;
- si imposta in modo da attivare l'animazione ogni volta in cui viene attivato il GameObject '*tablet*' nella scena.

Di seguito si mostra lo script che contiene gli eventi richiamati nella timeline del cubo di animazione. Ogni evento è programmato in modo tale da *disattivare* l'immagine corrente e *attivare* l'immagine successiva del carosello di immagini.

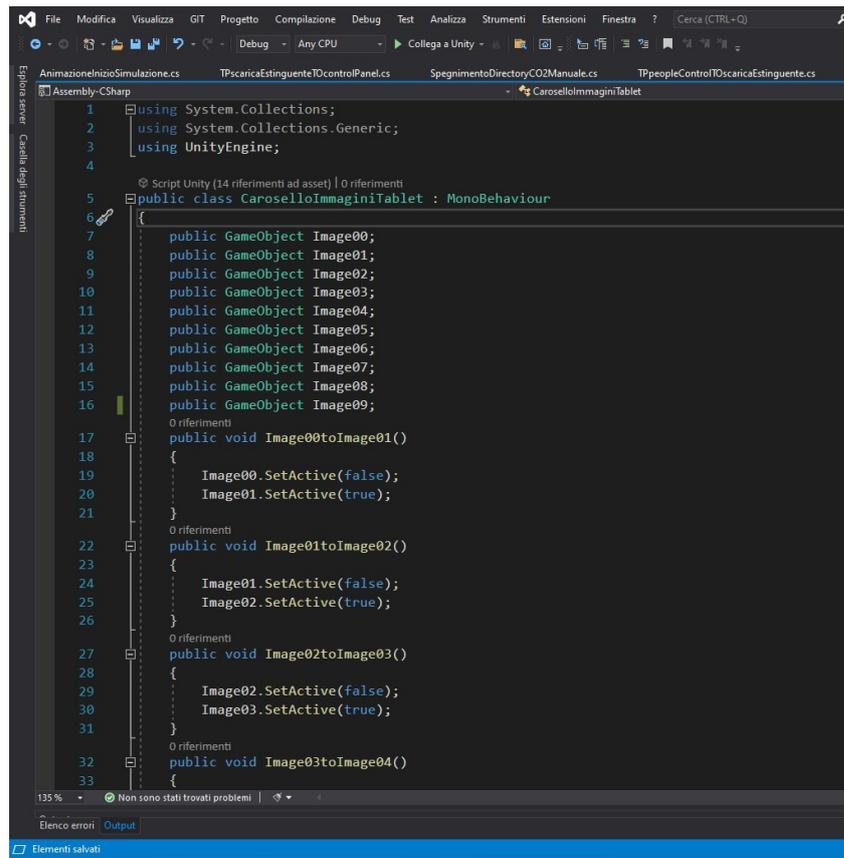


Figura 5.11: Script attraverso il quale viene implementato il carosello di immagini

Grafica adattiva

Come anticipato, il tablet di supporto è dotato di una *grafica adattiva* per cui, in determinati istanti della simulazione, la schermata principale descritta fino ad ora e riportata in figura 5.10, viene sostituita temporaneamente dalla comparsa di un **pop-up**. Anche in questo caso, tale risultato è ottenuto mediante lo sviluppo di un'animazione.

Si crea dunque la nuova schermata che si vuol fare apparire a schermo e si realizza un'animazione, come visto in precedenza, in modo tale da ingrandire lo screen fino ad occupare tutto lo schermo del tablet, così da rendere l'idea di un pop-up. Si programma, quindi, affinché l'animazione venga attivata all'istante opportuno della simulazione. Analogamente, è possibile realizzare una seconda animazione in cui si rimpicciolisce il nuovo screen fino a farlo scomparire, ripristinando quindi nuovamente la schermata principale. Quest'ultimo passaggio può anche essere omesso, andando a disattivare direttamente la finestra di pop-up.

Effetti visivi dei pulsanti touch

Oltre al pulsante touch per il check, situato nello screen 'Checklist', il tablet di supporto presenta ulteriori pulsanti di questo tipo, che compaiono in determinati istanti della simulazione grazie alla *grafica adattiva*. Per guidare l'operatore, si aggiunge al **pulsante di check** un frame di contorno, *nero* quando il pulsante è neutro, *verde* quando si deve eseguire il check. Inoltre, una volta premuto il pulsante, quest'ultimo si illumina completamente di verde fino a che non viene rilasciato. Analogamente vengono implementati i **pulsanti di conferma**, mentre per i **pulsanti di negazione** si utilizza il colore *rosso* e per i **pulsanti neutri** il colore *grigio*.

5.3.12 Freccie di aiuto

Oltre al tablet di supporto, un'altra caratteristica della simulazione VR, sviluppata ai fini dell'addestramento, è l'inserimento nella scena di frecce d'aiuto che guidano l'utente durante lo svolgimento delle procedure, indicando spie, pulsanti ed elementi dell'impianto antincendio su cui è richiesta interazione. Questo aspetto consente dunque all'operatore di familiarizzare con i diversi componenti e con la loro disposizione all'interno dell'ambiente, rendendo più efficace l'addestramento VR anche durante le sue prime fasi.

Per implementare nella scena le **freccie di aiuto**, è stato scaricato un modello 3D di freccia generica ed è stato importato in Unity. Alla freccia è stato attribuito un materiale trasparente arancione, in modo da renderla visibile all'operatore. L'oggetto 3D così ottenuto è stato quindi dimensionato opportunamente ed inserito nella scena. In particolare, per fornire ulteriore supporto e indicare quali interazioni sono richieste sui vari componenti dell'impianto, sono state inoltre programmate *animazioni* delle frecce, con le seguenti caratteristiche:

- per le **spie**: si inseriscono nella scena *4 frecce*, disposte a X attorno alla spia da indicare, con la punta rivolta verso quest'ultima. Si programma poi l'animazione in modo da far lampeggiare le frecce (si attivano e si disattivano in loop);
- per i **pulsanti**: si dispone *1 freccia* nella direzione e nel verso in cui si deve premere il pulsante. Si crea quindi l'animazione in modo che la freccia si allontani e si avvicini al pulsante, ad indicare l'azione da svolgere;
- per i **selettori**: si dispone *1 freccia curva* attorno al selettore, nel verso in cui si deve ruotare. Si crea dunque l'animazione in modo che la freccia ruoti nel verso di rotazione richiesto, a indicare l'azione da svolgere.

5.3.13 Divisione in scene

La simulazione VR è stata sviluppata in più scene distinte tra loro, anche se opportunamente connesse reciprocamente. Le motivazioni e i vantaggi che hanno portato a tale scelta sono stati approfonditi al paragrafo 5.2 tuttavia, di seguito, si andrà a descrivere in dettaglio quante e quali scene sono state sviluppate, nonché i collegamenti che sono stati predisposti tra di esse.

Per meglio comprendere la divisione in scene, è opportuno conoscere le **procedure operative** da riprodurre per l'addestramento VR. Sebbene queste ultime siano descritte in dettaglio al capitolo 6, si rammenta che la demo VR sviluppata prevede una *Procedura di Armamento*, una *Procedura Standard* e una *Procedura Manuale*. In particolare, all'inizio della simulazione viene eseguito l'armamento dell'impianto antincendio e, dopodichè, l'utente può scegliere quale delle altre due procedure eseguire. Entrambe sono analoghe fino all'istante in cui si attiva il rilascio della scarica di agente estinguente. Alla fine di questo step, infatti, nella Procedura Manuale viene simulata la presenza di un malfunzionamento dell'elettrovalvola di rilascio della scarica di agente estinguente, per cui si richiede all'operatore uno spostamento all'Impianto Bombole per azionare manualmente la leva di apertura della valvola manuale di rilascio. Una volta terminato il rilascio di CO₂, le due procedure tornano ad essere nuovamente equivalenti. Si evidenzia inoltre che, terminata una delle due procedure, l'utente può scegliere se ripetere dall'inizio quella appena completata o se eseguire la seconda.

La simulazione VR è stata sviluppata avendo come riferimento quanto appena descritto e considerando che, in Unity, le varie scene vengono programmate *separatamente*. Dopodichè, in una seconda fase, si impostano script che, una volta importata la simulazione nel visore, implementano il cambio di scena automaticamente o tramite scelta dell'user. Si ricorda inoltre che, in fase di realizzazione dell'ambiente virtuale, l'Impianto Bombole (*CO₂ Enclosure Store*) è stato sviluppato in un modello 3D a parte rispetto agli altri locali. Per questo motivo, quindi, gli step della procedura che richiedono la presenza dell'operatore in quest'area dovranno essere necessariamente riprodotti in una scena separata dalle altre, dal momento che l'ambiente virtuale dell'Impianto Bombole viene importato in Unity singolarmente, così da alleggerire la simulazione VR e il successivo processamento da parte del visore.

Sulla base di ciò, la demo VR è stata divisa e sviluppata in **5 diverse scene**:

1. Armamento
2. Procedura Standard
3. Procedura Manuale Pre-apertura valvola

4. Apertura valvola nell'Impianto Bombole
5. Procedura Manuale Post-apertura valvola

Collegamenti tra le scene

Come anticipato, una volta sviluppate le varie scene singolarmente, è necessario predisporre gli opportuni collegamenti tra esse, così da ottenere un'esperienza VR completa e valida per l'addestramento. Infatti, nel fare ciò, si tiene conto della possibilità di scelta offerta all'utente per quanto riguarda la procedura che desidera simulare, nonché la possibilità di reset delle varie procedure. Considerando tutti questi aspetti, i **collegamenti** tra le scene sono stati sviluppati secondo il seguente schema:

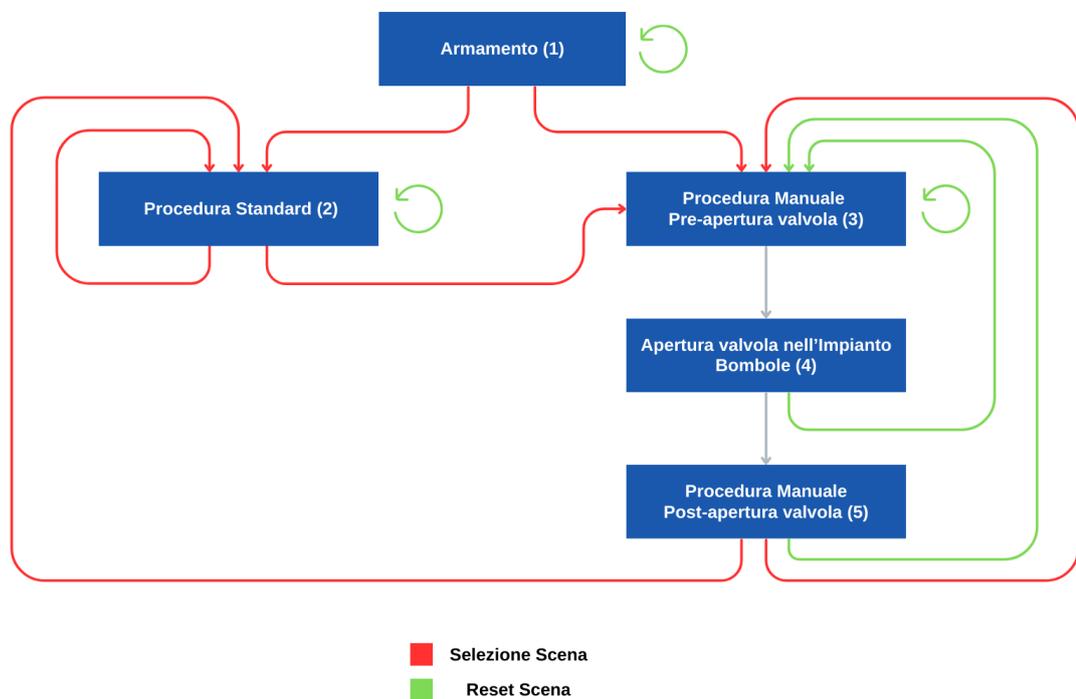


Figura 5.12: Schema riportante i collegamenti predisposti tra le 5 scene

Per meglio comprendere quanto raffigurato in figura 5.12, si evidenzia innanzitutto che le scene **3**, **4** e **5** a livello *visivo* e *operativo* possono essere considerate come un'**unica scena** durante lo svolgimento della simulazione VR. Tuttavia, è necessaria la divisione a livello di programmazione e sviluppo dal momento che, come anticipato, l'ambiente virtuale che rappresenta l'Impianto Bombole è stato

realizzato separatamente.

Come indicato in *legenda*, le frecce di collegamento seguono la seguente logica:

- **Freccia rossa:** indica il collegamento implementato in seguito alla *scelta volontaria* effettuata dall'utente alla fine della scena;
- **Freccia verde:** indica il collegamento implementato in seguito al *reset* effettuato dall'utente durante lo svolgimento della scena;
- **Freccia grigia:** indica il collegamento tra le scene predisposto *automaticamente* durante lo svolgimento della simulazione. L'utente attiva il collegamento tramite un'interazione, ma è forzato nell'eseguire l'azione in quanto richiesta da procedura, senza possibilità di scelta ulteriore.

Per quanto riguarda la possibilità di **selezione delle procedure** da eseguire, fornita all'utente, da un punto di vista operativo si ha quindi che:

- al termine della scena di *Armamento*, l'utente può scegliere se eseguire la *Procedura Standard* o la *Procedura Manuale*;
- al termine della *Procedura Standard*, l'utente può scegliere se eseguire la *Procedura Manuale* o ripetere la *Procedura Standard*;
- al termine della *Procedura Manuale*, l'utente può scegliere se eseguire la *Procedura Standard* o ripetere la *Procedura Manuale*.

La selezione viene effettuata tramite due appositi pulsanti predisposti sul *tablet di supporto* grazie alla comparsa di una grafica adattiva.

Attraverso il pulsante **Reset Scene** del *tablet di supporto*, l'operatore può invece ripetere dall'inizio la scena corrente, in qualsiasi momento della simulazione.

Inoltre, tramite il pulsante **Quit Scene** del *tablet di supporto*, l'operatore può, in qualsiasi istante, terminare la simulazione ed uscire dall'applicazione.

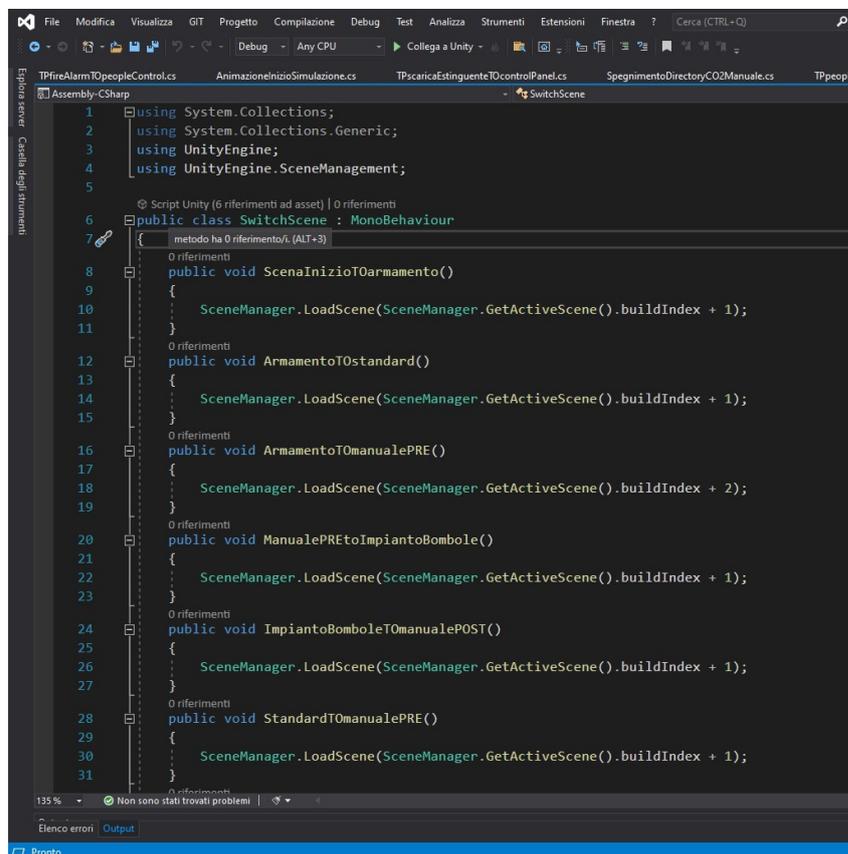
Quanto descritto è stato implementato tramite appositi script, seguendo lo schema in figura 5.12. Si andrà quindi ad approfondire come è stato sviluppato il collegamento tra le varie scene, a livello di programmazione.

Script per il collegamento delle scene

- **Switch Scene**

Per implementare gli *switch* tra una scena e l'altra, si scrive uno script *C#* che contiene tutti i vari eventi che effettuano il cambio scena. Questi ultimi, devono essere programmati secondo un ordine ben preciso, che dipende da come vengono disposte le scene nel *folder* di Unity. In particolare, durante lo sviluppo della simulazione VR, le scene sono state ordinate secondo la numerazione da 1 a 5 riportata in precedenza.

Tenendo conto di quest'ordine, per programmare il cambio da una scena ad un'altra è necessario richiamare nello script la scena corrente, aggiungendo alla fine un $+$ o un $-$, seguito da un numero che indica a quale scena si vuole passare (ad es. da *Armamento* a *Procedura Manuale Pre-apertura valvola* si avrà '+2').



```
1 using System.Collections;
2 using System.Collections.Generic;
3 using UnityEngine;
4 using UnityEngine.SceneManagement;
5
6 public class SwitchScene : MonoBehaviour
7 {
8     public void ScenaInizioTOarmamento()
9     {
10         SceneManager.LoadScene(SceneManager.GetActiveScene().buildIndex + 1);
11     }
12     public void ArmamentoTOstandard()
13     {
14         SceneManager.LoadScene(SceneManager.GetActiveScene().buildIndex + 1);
15     }
16     public void ArmamentoTOmanualePRE()
17     {
18         SceneManager.LoadScene(SceneManager.GetActiveScene().buildIndex + 2);
19     }
20     public void ManualePREtoImpiantoBombole()
21     {
22         SceneManager.LoadScene(SceneManager.GetActiveScene().buildIndex + 1);
23     }
24     public void ImpiantoBomboleTOmanualePOST()
25     {
26         SceneManager.LoadScene(SceneManager.GetActiveScene().buildIndex + 1);
27     }
28     public void StandardTOmanualePRE()
29     {
30         SceneManager.LoadScene(SceneManager.GetActiveScene().buildIndex + 1);
31     }
32 }
```

Figura 5.13: Script che contiene gli eventi di switch tra le varie scene

Dunque, per come è stata sviluppata la simulazione e considerando lo schema in figura 5.12, si predispongono all'interno dello script di switch, con il rispettivo

indice numerico, i seguenti eventi:

- da Armamento a Procedura Standard → +1
- da Armamento a Procedura Manuale Pre-apertura valvola → +2
- da Procedura Manuale Pre-apertura valvola a Impianto Bombole → +1
- da Impianto Bombole a Procedura Manuale Post-apertura valvola → +1
- da Procedura Manuale Post-apertura valvola a Procedura Standard → -3
- da Procedura Standard a Procedura Manuale Pre-apertura valvola → +1

In figura 5.13 si può osservare più nello specifico il codice implementato nell'ambiente di sviluppo *Visual Studio* e contenente i vari eventi di switch.

- **Reset Scene**

Per il *reset* della scena, si scrive uno script *C#* che contiene tutti gli eventi necessari a resettare le varie scene. Questi ultimi, verranno poi richiamati nei relativi pulsanti *Reset Scene* del tablet di supporto, prestando attenzione nell'associare ogni evento alla relativa scena.

Come anticipato, si dà all'operatore la possibilità di ripetere dall'inizio la scena corrente in qualsiasi istante della simulazione. Tuttavia, dal momento che le scene 3, 4 e 5 sono considerate a livello visivo, pratico ed operativo come un'unica scena, si programmerà all'interno dello script quanto rappresentato dalle frecce di colore verde in figura 5.12. Quindi, per le scene **1**, **2** e **3**, si imposta l'evento di reset in modo da ripetere dall'inizio la scena stessa, mentre per le scene **4** e **5**, si implementa lo script in modo da riavviare dall'inizio la scena numero **3**. Chiarito questo aspetto, considerando nuovamente l'ordine numerico precedente, determinato dalla disposizione delle scene nel *folder* di Unity, si sviluppano all'interno dello script di reset i seguenti eventi, con il rispettivo indice numerico:

- reset Armamento → **0**
- reset Procedura Standard → **0**
- reset Procedura Manuale Pre-apertura valvola → **0**
- reset Impianto Bombole → **-1**
- reset Procedura Manuale Post-apertura valvola → **-2**

Per quanto riguarda la forma del codice implementato, si programma analogamente a quanto visto per lo script di *Switch Scene*, riportato in figura 5.13.

- **Quit Scene**

Durante l'esecuzione della demo VR, l'utente ha la possibilità di interrompere la simulazione ed uscire dall'applicazione in qualsiasi istante, premendo il pulsante *Quit Scene* del tablet di supporto. Per programmare questa azione, si crea uno script *C#* contenente un *evento unico* di *Quit*, valido per ogni istante della simulazione e richiamato quindi nel relativo pulsante in tutte le scene sviluppate.

Il codice utilizzato, che consente di implementare il *Quit* della scena, è il seguente:

```
public void QuitGame() {  
    Application.Quit();  
}
```

Capitolo 6

Procedure Operative

La simulazione VR sviluppata durante il progetto di tesi propone, con le sue caratteristiche, un metodo di addestramento alternativo per il personale addetto all'impianto antincendio della sala prova motori. Oltre ai vantaggi e agli aspetti già analizzati nei precedenti capitoli, si evidenzia come, in questo specifico caso, la tecnologia VR consenta di ricreare situazioni e procedure di emergenza altrimenti non replicabili durante esercitazioni pratiche, per ovvie ragioni di sicurezza. In questo capitolo, si andranno dunque a descrivere in dettaglio le **Procedure Operative** oggetto di training, che sono state simulate ed implementate nella demo VR ai fini dell'addestramento. Anche in questa fase, il lavoro è stato svolto con costante cooperazione tra le aziende *A.M.B. Engineering* e *FireTech*, così da verificare passo dopo passo la correttezza delle procedure riprodotte in realtà virtuale, nonché la loro attinenza con la situazione reale.

6.1 Procedura di Armamento

La prima procedura operativa da eseguire, una volta avviata la simulazione VR, è finalizzata all'**armamento** dell'impianto antincendio. Nel diagramma di flusso rappresentato in figura 6.1 sono riportate, in sequenza, le operazioni da svolgere per il completamento della procedura.

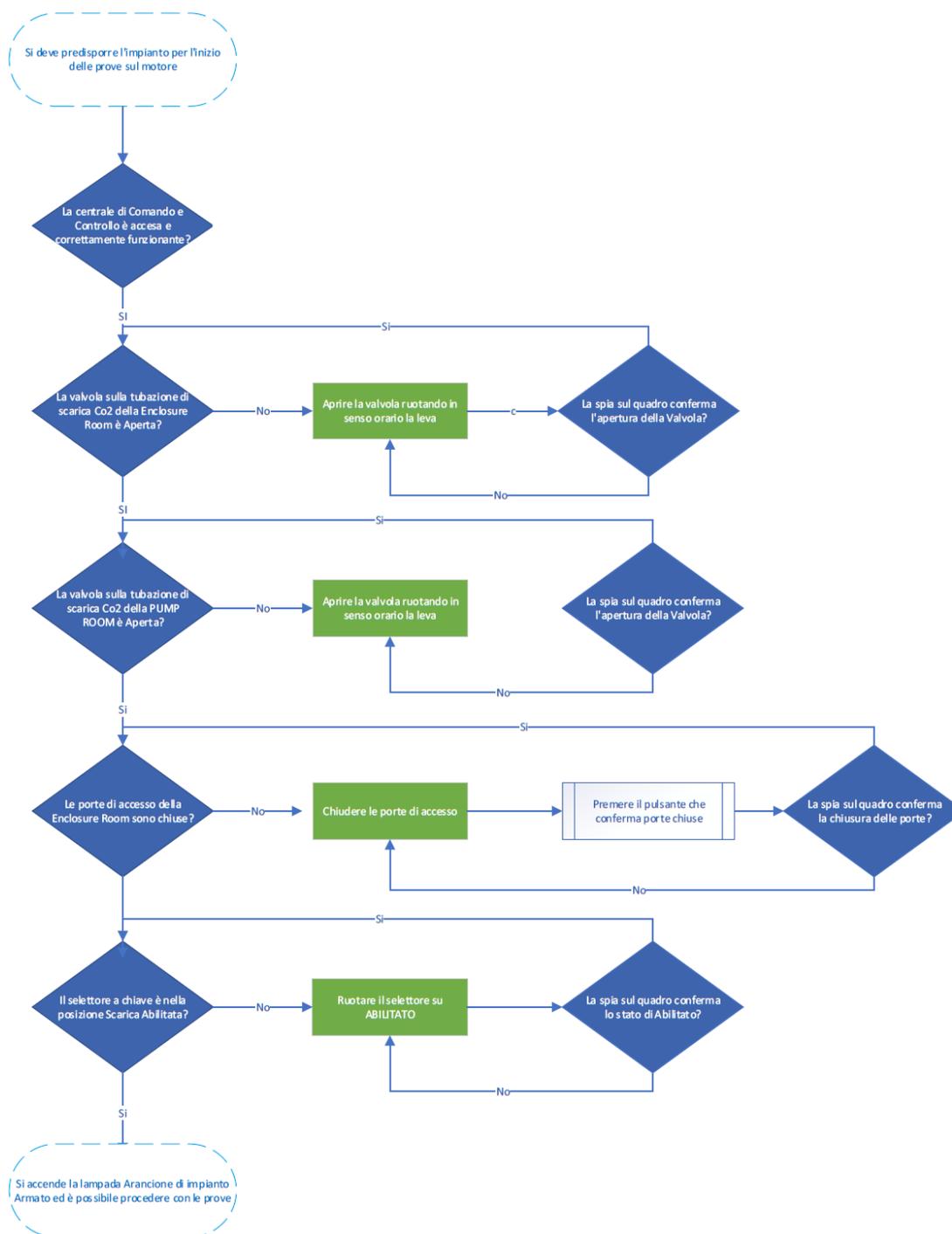
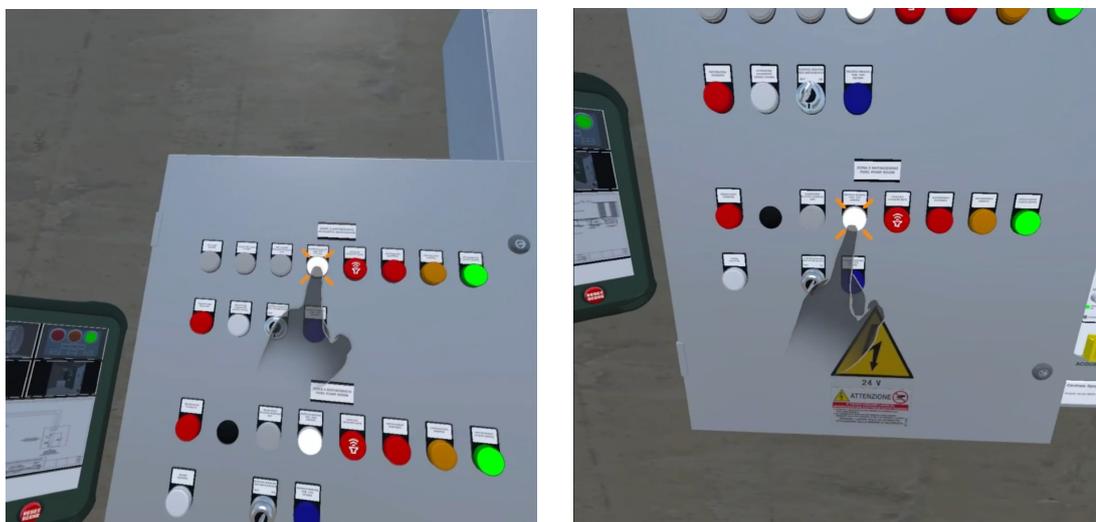


Figura 6.1: Diagramma di flusso della Procedura di Armamento

In particolare, l'operatore si trova in *Control Room* e attraverso la finestra di controllo si osserva il motore installato sugli appositi supporti ed allestito per la prova al banco. Si deve dunque predisporre l'impianto antincendio per l'inizio delle prove sul motore, andando ad eseguire la procedura di armamento. Si specifica che, in condizione iniziale, si è assunto che la centrale di Comando e Controllo sia *accesa e correttamente funzionante*.

6.1.1 Step 1 e Step 2: verifica apertura valvola sulla tubazione dell'Acoustic Enclosure e della Fuel Pump Room

Il primo step della procedura richiede di verificare che la valvola sulla tubazione di scarica CO₂ dell'*Acoustic Enclosure* sia **aperta**. Questa condizione è verificata dall'accensione della relativa spia, situata sulla pulsantiera ausiliaria della centralina antincendio. Come rappresentato nel diagramma di flusso in figura 6.1, qualora la valvola risulti chiusa, è necessario recarsi in *Service Enclosure* ed agire manualmente sull'apposita leva, ruotandola in senso orario. Tuttavia, nella simulazione VR, si tralascia questo passaggio ipotizzando che la valvola sia già stata aperta, e si richiede all'operatore la sola **verifica** (figura 6.2a). Appurato che la spia sia *accesa*, si procede dunque analogamente anche per quanto riguarda la valvola sulla tubazione di scarica CO₂ della *Fuel Pump Room* (figura 6.2b).



(a) Spia valvola dell'Acoustic Enclosure

(b) Spia valvola della Fuel Pump Room

Figura 6.2: Verifica apertura valvola sulla tubazione di scarica CO₂

Si precisa che, una volta completata la verifica, in entrambi i casi è richiesto

all'operatore di eseguire un *check* sul tablet, tramite l'apposito pulsante, per poter spuntare lo step effettuato e passare a quello successivo.

6.1.2 Step 3: chiusura porte di accesso all'Acoustic Enclosure

Per procedere con l'armamento del sistema, è necessario assicurarsi che le porte di accesso dell'*Acoustic Enclosure* siano **chiuse**. Questo può essere verificato visivamente, voltandosi verso la porta di accesso visibile dalla *Control Room*, oppure tramite la relativa spia sul pannello, che deve risultare *accesa*. Nella simulazione VR si simula una situazione in cui le porte sono ancora aperte, e si richiede quindi all'operatore di recarsi in *Service Enclosure* per chiudere la porta di accesso.

Per guidare l'utente in questo passaggio, compare sul tablet di supporto una *grafica dinamica* che interroga l'operatore sulla condizione della porta di accesso in modo che, rispondendo negativamente, viene attivato automaticamente lo spostamento in *Service Enclosure* (figura 6.3a).



(a) Grafica dinamica del tablet di supporto (b) Automatismo per la chiusura della porta

Figura 6.3: Chiusura della porta di accesso

Per semplicità di simulazione, in questo caso è stato introdotto un **automatismo** per la chiusura della porta in quanto, ai fini dell'addestramento, lo scopo principale è quello di apprendere ed assimilare le procedure, mentre le singole azioni sono di per sé di semplice esecuzione. Implementare un'interazione per la chiusura della porta avrebbe quindi complicato l'esecuzione della demo VR, distogliendo l'attenzione dal flusso di azioni richiesto dalla procedura (figura 6.3b).

Ad operazione conclusa, l'operatore torna nuovamente al pannello di controllo e, tramite un ulteriore automatismo, viene chiusa anche la porta d'ingresso della *Control Room*. A questo punto, è dunque possibile rispondere affermativamente alla domanda posta sul tablet di supporto (figura 6.4a) e, da procedura, si richiede di premere il **pulsante 'Ripristino Sicurezza Porte Chiuse'** che conferma la chiusura delle porte (figura 6.4b), verificando l'accensione della relativa spia.

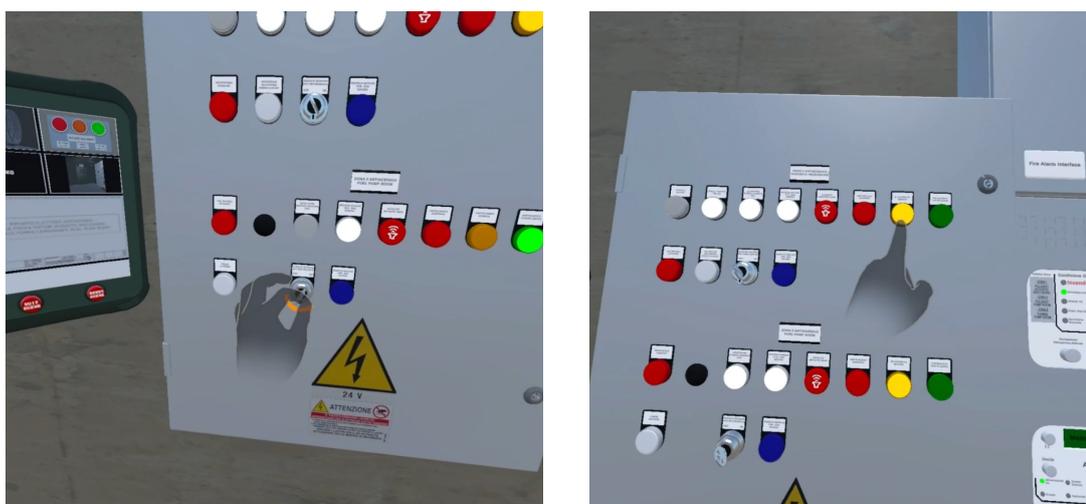


(a) Grafica dinamica del tablet di supporto (b) Pulsante di conferma chiusura

Figura 6.4: Conferma chiusura delle porte di accesso

6.1.3 Step 4: selettori di 'Blocco Scarica CO2 Antincendio' in posizione OFF

Per concludere la procedura di armamento, è richiesto di ruotare i selettori di 'Blocco Scarica CO2 Antincendio' in posizione **OFF**, in modo da abilitare la scarica di agente estinguente sia in *Acoustic Enclosure* che in *Fuel Pump Room*. L'operatore agisce quindi sul primo selettore a chiave della pulsantiera ausiliaria e, dopo averlo portato in posizione OFF, osserva l'accensione della relativa spia (figura 6.5a). Infine, ruotato anche il secondo selettore, l'impianto antincendio è **armato** in entrambi i locali. Ciò viene verificato osservando le spie sul pannello di controllo che riportano lo stato di funzionamento del sistema, nonché i relativi semafori: si evidenzia quindi lo *spegnimento* della luce verde di **Antincendio Inibito (Safe)** e l'*accensione* della luce arancione di **Antincendio Armato** (figura 6.5b).



(a) Rotazione dei selettori

(b) Configurazione del pannello

Figura 6.5: Conclusione della Procedura di Armamento

In figura 6.5b, si osserva la configurazione delle spie e dei selettori in condizione di Antincendio Armato. Oltre alla spia arancione, per entrambi i locali sono inoltre attive le spie che indicano l'apertura della valvola sulla tubazione di scarica CO₂, verificata allo *Step 1* della procedura, nonché le spie che avvertono della posizione OFF dei selettori. Inoltre, nella sezione del pannello relativa all'*Acoustic Enclosure*, si evidenzia l'accensione della spia che conferma la chiusura delle porte d'ingresso, attivata e verificata allo *Step 3*.

Arrivati a questo punto, la Procedura di Armamento è dunque **completata** ed è possibile procedere con le prove al banco del motore.

Tramite una grafica dinamica che compare sul tablet, l'operatore può quindi scegliere se proseguire nella simulazione eseguendo la *Procedura Standard* o la *Procedura Manuale*, che simula la presenza di un malfunzionamento dell'elettrovalvola di rilascio della scarica estinguente.

6.2 Procedura Standard e Procedura Manuale

Come anticipato, la simulazione VR sviluppata consente l'addestramento su due procedure d'emergenza da eseguire in seguito alla presenza di un incendio in sala prova. A livello procedurale, queste ultime sono molto simili e possono essere schematizzate con il diagramma di flusso riportato in figura 6.6:

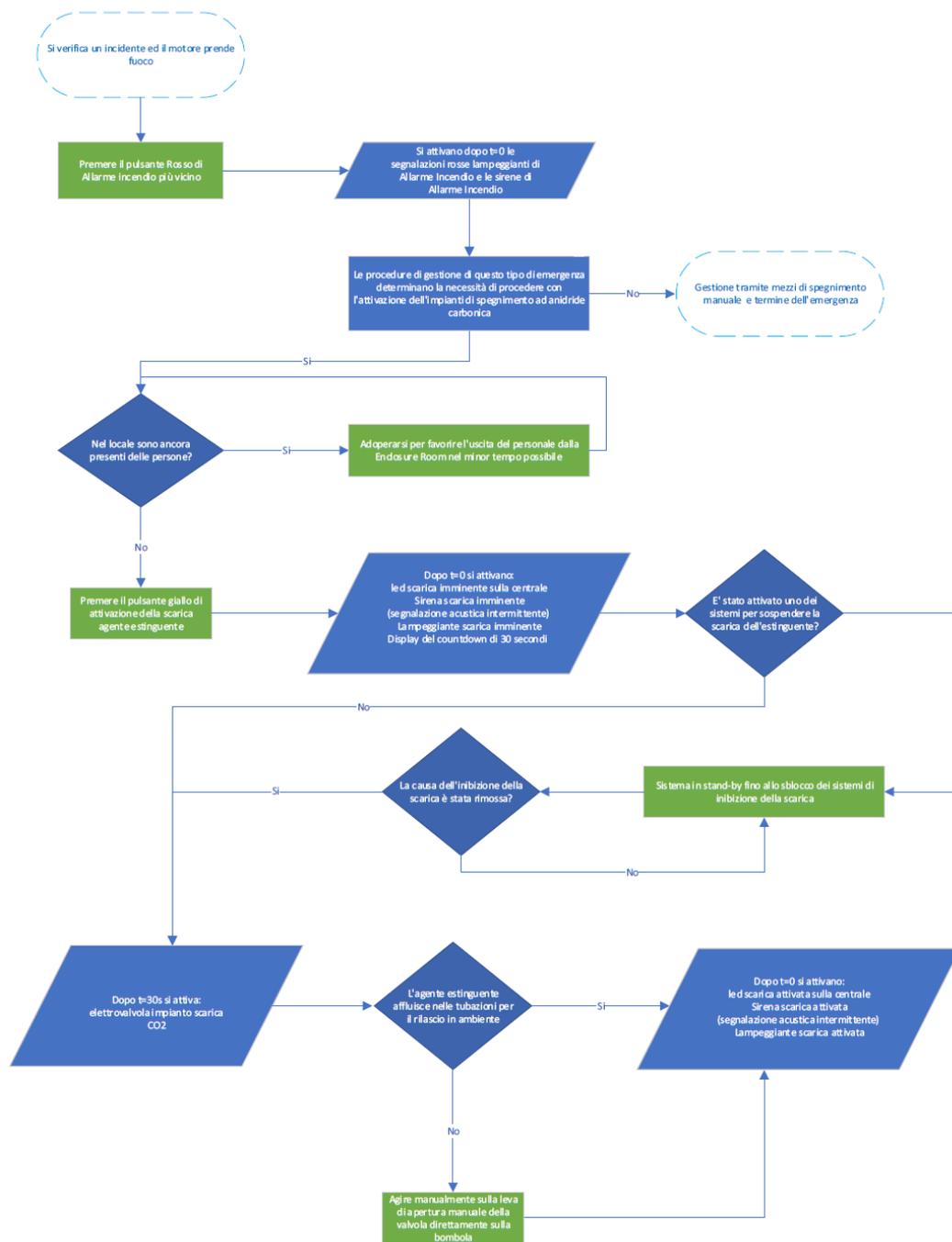


Figura 6.6: Diagramma di flusso della Procedura Standard e della Procedura Manuale

In particolare, con riferimento al diagramma, la *Procedura Standard* e la *Procedura Manuale* sono analoghe fino all'ultimo blocco decisionale, in cui si richiede se l'agente estinguente affluisca o meno nelle tubazioni per il rilascio in ambiente. In questo istante, infatti, mentre durante la *Procedura Standard* si attiva automaticamente il rilascio di CO₂ in Acoustic Enclosure, nella *Procedura Manuale* viene invece simulato un malfunzionamento dell'elettrovalvola di rilascio della scarica. A livello di procedura, si aggiungono dunque gli step che richiedono all'operatore uno spostamento in *Impianto Bombole* per aprire manualmente la valvola di rilascio dell'agente estinguente. Terminata la scarica ed estinto l'incendio, le due procedure tornano ad essere analoghe per la fase finale di ripristino del sistema antincendio.

Di seguito, si andranno a descrivere in dettaglio i vari step riprodotti nella simulazione VR, analizzando per completezza dimostrativa la *Procedura Manuale*.

6.2.1 Step 1: attivazione Allarme Antincendio e Scarica Estinguente

Una volta conclusa la *Procedura di Armamento*, selezionata una delle due procedure d'emergenza, si è nella condizione iniziale in cui l'impianto antincendio è armato e si stanno eseguendo le prove al banco del motore.

Ad un certo istante, si verifica un incidente che porta all'**incendio** del motore, visibile attraverso la finestra di controllo. Come visto in precedenza, quest'ultimo è stato simulato sfruttando il *sistema particellare* di Unity.

Presa visione dell'incendio, da procedura l'operatore deve immediatamente attivare il pulsante di Allarme Antincendio situato all'interno della *Control Room* per cui, nella simulazione VR, è stato implementato uno spostamento automatico in prossimità di quest'ultimo. In una situazione reale, però, sarebbe dapprima necessario adoperarsi per la **chiusura dello shutter** (vedi paragrafo 4.1), in modo da isolare il più possibile l'*Acoustic Enclosure*. Così facendo, si contribuisce infatti a rendere più efficace l'azione della scarica estinguente, portando alla saturazione dell'ambiente e al conseguente spegnimento dell'incendio in un tempo minore. Per comodità simulative e per evitare di distogliere l'attenzione dal flusso di azioni richiesto dalla procedura, è stato dunque predisposto nella scena, accanto al pulsante di Allarme Antincendio, un *pulsante fittizio* che consente di attivare la chiusura dello shutter (figura 6.7a). Ad azione compiuta, compare sul tablet una grafica dinamica che riporta l'inquadratura della spia di '*Shutter Chiuso*' presente sul pannello di controllo. In questo modo, si dà all'operatore la possibilità di verificare la corretta chiusura ed eseguire il check, una volta completato correttamente il passaggio (figura 6.7b).



(a) Pulsante 'Close Shutter'

(b) Verifica e check sul tablet

Figura 6.7: Chiusura dello shutter

A questo punto, si procede premendo il pulsante rosso di **Allarme Antincendio**, a seguito di cui si avverte immediatamente l'attivazione della *sirena di Allarme Scattato*. Dopodichè, tramite il pulsante giallo di **Attivazione Scarica Estinguente**, si attiva la scarica di CO2 in *Acoustic Enclosure*.



(a) Pulsante di 'Allarme Antincendio'

(b) Pulsante di 'Attivazione Scarica'

Figura 6.8: Attivazione pulsanti di emergenza

Tra l'attivazione della scarica e l'effettivo rilascio in ambiente, vi è però un

countdown di 30 secondi che compare sul display della centralina antincendio, così da consentire all'operatore il tempo necessario per verificare che non siano presenti persone all'interno del locale. Si provvede quindi, dapprima, a verificare questo ulteriore aspetto.

6.2.2 Step 2: verifica presenza persone in Acoustic Enclosure

Come anticipato, una volta attivata la scarica di agente estinguente è necessario assicurarsi che **non** vi siano persone all'interno dell'*Acoustic Enclosure*. E' stato quindi impostato uno spostamento automatico nella scena in modo che, una volta premuto il pulsante giallo, l'operatore possa recarsi alla finestra di controllo per visionare la sala prova. In questo caso, la simulazione VR prevede la **presenza di personale**, così da permettere l'addestramento su una situazione di emergenza articolata, e che richiede particolare attenzione sul corretto svolgimento delle procedure. Inoltre, ciò consente di sfruttare le caratteristiche della realtà virtuale per il training su una condizione particolarmente pericolosa e altrimenti impossibile da riprodurre con i tradizionali metodi di addestramento.

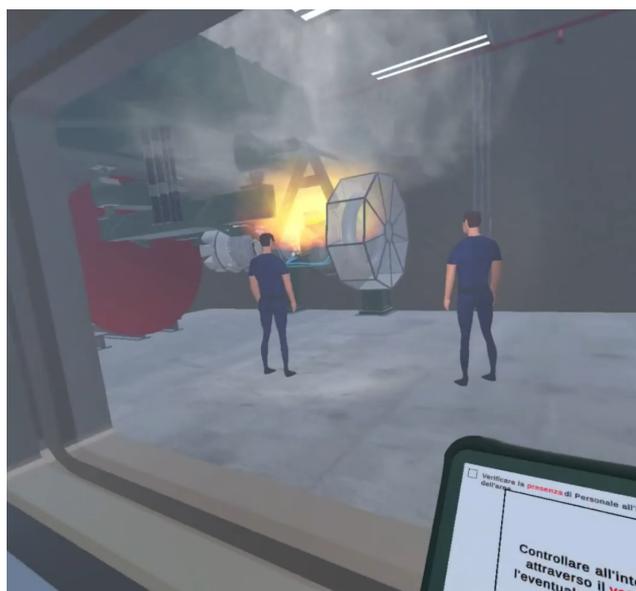


Figura 6.9: Verifica della presenza di persone attraverso la finestra di controllo

Come mostrato in figura 6.9, data la presenza di personale all'interno dell'*Acoustic Enclosure*, l'operatore deve sospendere immediatamente l'attivazione della scarica così da portare l'impianto in stand-by e consentire l'evacuazione. Segue dunque uno spostamento al pannello di controllo per l'esecuzione dei successivi step.

6.2.3 Step 3: blocco della scarica di agente estinguente

La simulazione VR è stata sviluppata riproducendo fedelmente la configurazione di spie e componenti dell'impianto antincendio reale. Sulla centralina antincendio si possono quindi notare, la spia che avvisa della presenza di *Incendio*, e il led che sta ad indicare che la *Zona in Incendio* è l'area 1, ovvero l'*Acoustic Enclosure*. Inoltre, sul display relativo appunto all'area 1, si osserva il countdown di 30 secondi che precede il rilascio della scarica.

L'operatore deve quindi agire tempestivamente sul selettore di '*Blocco Scarica CO2 Antincendio*' relativo all'*Acoustic Enclosure*, ruotandolo in posizione **ON**.

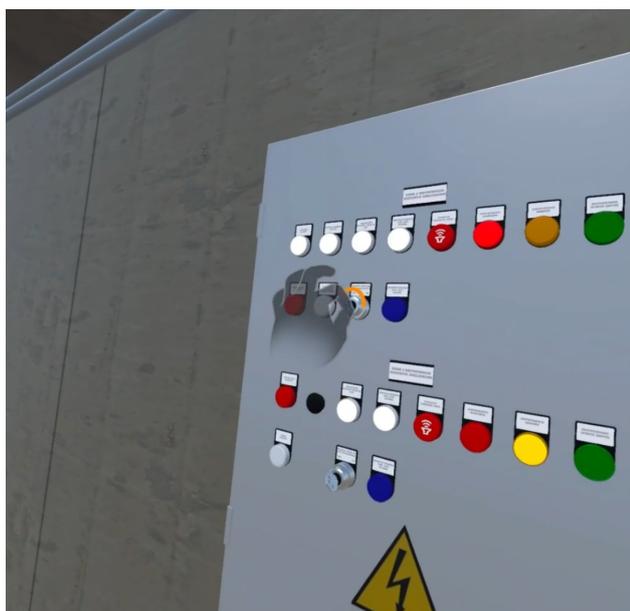


Figura 6.10: Rotazione del selettore in posizione ON

In questo modo, viene attivato il blocco della scarica di agente estinguente e si porta l'impianto in stand-by, sospendendo il countdown. Ad azione eseguita, si spegne la relativa spia sul pannello e si attiva il **cicalino di avviso** che avverte del blocco della scarica, oltre alla corrispondente *spia lampeggiante*. Si evidenzia inoltre osservando la figura 6.10 che, in seguito all'attivazione dell'allarme antincendio, nella sezione del pannello relativa all'*Acoustic Enclosure* si è attivata la spia rossa di **Antincendio Scattato** al posto di quella arancione di Antincendio Armato.

Una volta inserito il blocco della scarica, si provvede quindi alla **tacitazione del cicalino** di avviso premendo il relativo pulsante sul pannello di controllo (figura 6.11a). Così facendo, si disattiva la segnalazione acustica e si spegne la spia lampeggiante. Dopodichè, sulla centralina antincendio, si preme il pulsante

di **Tacitazione Buzzer**, in modo da interrompere anche l'avvisatore sonoro che segnala la precedente attivazione della scarica di agente estinguente (figura 6.11b). Contestualmente, si osserva l'accensione del relativo led giallo di '*Buzzer Tacitato*'.



(a) Pulsante di 'Tacitazione Cicalino'

(b) Pulsante di 'Tacitazione Buzzer'

Figura 6.11: Tacitazione segnalazioni acustiche

6.2.4 Step 4: verifica evacuazione del personale e rimozione del blocco della scarica

In seguito allo step eseguito precedentemente, osservando la centralina antincendio si nota che il countdown è stato correttamente *sospeso* e si è accesa, sempre nella sezione relativa all'area 1, la spia gialla di '*Blocco Attivato*'.

A questo punto, all'operatore è richiesto di verificare che il personale sia stato **evacuato**, così da rimuovere il blocco e riattivare quanto prima il rilascio della scarica per estinguere l'incendio. Questa azione viene effettuata servendosi della finestra di controllo e della camera presente sul tablet di supporto che riporta un'inquadratura dell'*Acoustic Enclosure*.

Appurato che non sono più presenti persone all'interno del locale, si riporta quindi il selettore di '*Blocco Scarica CO2 Antincendio*' relativo all'*Acoustic Enclosure* in posizione **OFF**, rimuovendo il blocco della scarica. Un segnale acustico avvisa l'operatore e sul display si *riattiva* il countdown. Si attende quindi il rilascio di CO2.

Terminato il countdown, sul display vengono indicate dapprima l'*Attivazione* della scarica e, subito dopo, il *Rilascio*. Dunque, qualora si stesse eseguendo la

Procedura Standard, si osserverebbe l'accensione della spia di '*Scarica Attivata*', assistendo qualche istante dopo alla scarica di CO2 in *Acoustic Enclosure*. Tuttavia, come anticipato, per completezza dimostrativa si andranno a descrivere in dettaglio i successivi step, che intercorrono prima del rilascio nel caso in cui si stia effettuando la *Procedura Manuale*.

6.2.5 Step 5 (solo MAN): spostamento all'Impianto Bombole

Nella **Procedura Manuale** viene simulato un malfunzionamento dell'elettrovalvola di rilascio della scarica. Terminato il countdown, in assenza di guasti (*Procedura Standard*), viene automaticamente inviato un segnale all'elettrovalvola che ne comporta l'apertura, consentendo così il passaggio dell'agente estinguente nelle tubazioni. La spia di '*Scarica Attivata*' si accende di conseguenza, avvisando l'operatore che si trova alla centralina antincendio in *Control Room*.

A causa del malfunzionamento dell'elettrovalvola, tuttavia, quest'ultima rimane *chiusa* una volta inviato il segnale, per cui non si osserva l'accensione della spia e visivamente non si assiste al rilascio di CO2 in ambiente. Da procedura, è quindi richiesto all'operatore uno spostamento all'**Impianto Bombole**, così da azionare **manualmente** la leva di apertura della valvola.



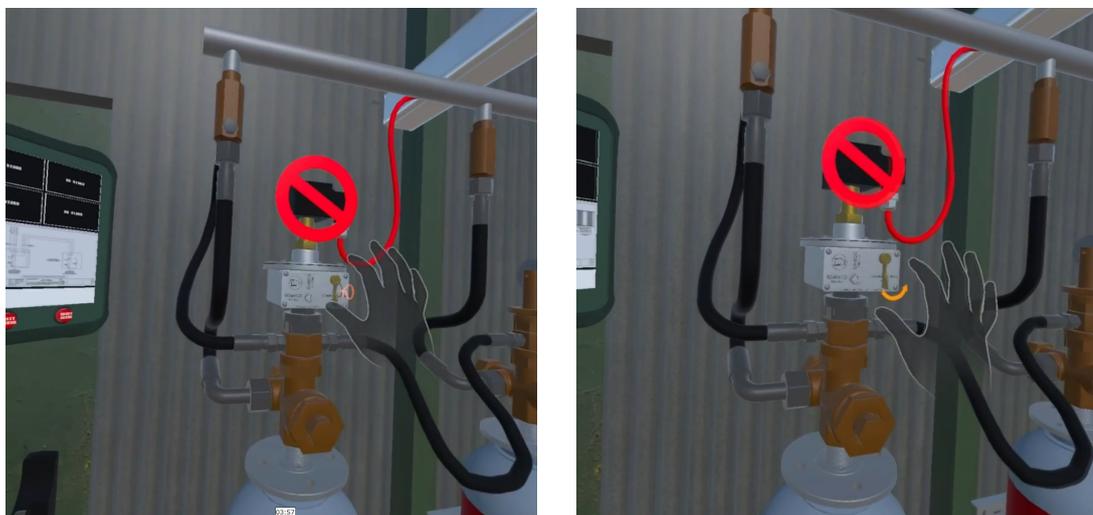
Figura 6.12: Schermata del tablet per spostamento all'Impianto Bombole

Nella simulazione VR, per semplicità simulative e ai fini dell'addestramento, l'operatore viene guidato in questo step da una grafica dinamica che compare

sul tablet, richiamando l'attenzione sull'anomalia del sistema e consentendo lo spostamento. In particolare, quest'ultimo viene implementato automaticamente in seguito all'attivazione del relativo pulsante (figura 6.12).

6.2.6 Step 6 (solo MAN): apertura manuale della valvola

All'*Impianto Bombe*, l'operatore si trova collocato in prossimità della bombola dotata dell'apposita valvola manuale. Un segnale di avvertimento dinamico, situato in corrispondenza dell'elettrovalvola, evidenzia all'utente il componente in guasto. Si procede quindi rimuovendo dapprima il **pin di sicurezza** che blocca la leva (figura 6.13a). In questo caso, per guidare l'operatore nello svolgimento dell'azione rendendo più efficace l'addestramento, è stato predisposto un *ologramma* animato dell'oggetto che mostra il movimento da eseguire.



(a) Rimozione del pin di sicurezza

(b) Rotazione della leva di apertura

Figura 6.13: Apertura manuale della valvola di rilascio

Dopodichè, si ruota la **leva di apertura manuale** della valvola nel verso indicato dalla freccia di aiuto inserita nella scena (figura 6.13b). Così facendo, è stata *aperta* manualmente la valvola per il rilascio della CO2 in *Acoustic Enclosure*, e l'agente estinguente inizia ad affluire nelle tubazioni.

Si ritorna quindi in *Control Room* per monitorare attraverso la finestra di controllo se sta avvenendo correttamente il rilascio in ambiente. Anche in questo caso, lo spostamento viene effettuato premendo un apposito pulsante predisposto sulla schermata del tablet di supporto.

Da questo istante in poi, *Procedura Standard* e *Procedura Manuale* tornano ad essere **corrispondenti**.

6.2.7 Step 7: rilascio della scarica di CO2 ed estinzione dell'incendio

In seguito allo spostamento in *Control Room*, l'operatore è situato davanti alla finestra di controllo e può osservare l'interno dell'*Acoustic Enclosure*. Si avverte il **suono velocizzato** della sirena antincendio, ad indicare la scarica imminente e, dopo qualche istante in cui la CO2 percorre le tubazioni e raggiunge gli ugelli, si osserva il **rilascio di agente estinguente** in ambiente.



Figura 6.14: Scarica di CO2 ed estinzione dell'incendio

Mentre prosegue la scarica, la CO2 va a *saturare* l'ambiente fino alla concentrazione tale da portare all'**estinzione dell'incendio**. Nella simulazione VR sviluppata, anche questa sequenza di eventi è stata riprodotta in maniera fedele con la realtà, ottenendo una resa grafica soddisfacente e realistica, come si può osservare nel frame riportato in figura 6.14. Questo risultato è stato ottenuto in fase di programmazione grazie all'implementazione del *sistema particellare* di Unity, come descritto in dettaglio al paragrafo 5.3.10.

Dopodichè, una volta scaricato tutto il contenuto delle bombole, l'operatore deve ritornare al pannello di controllo per l'ultimo step, che richiede il ripristino del sistema. Viene dunque predisposto uno spostamento automatico in prossimità della centralina antincendio.

6.2.8 Step 8: ripristino del sistema antincendio

Terminato il rilascio di CO2 in *Acoustic Enclosure* ed estinto l'incendio, a conclusione della procedura è richiesto all'operatore di disattivare la sirena antincendio e ripristinare il sistema.

Si procede quindi ruotando dapprima il **selettore 'Abilitazione Funziona Sistema'** che *abilita* il pannello (figura 6.15a). Dopodichè, attraverso il **pulsante 'Tacetazione Allarme'** si *disattiva* la sirena di Allarme Scattato (figura 6.15b).



(a) Selettore del pannello

(b) Pulsante di 'Tacetazione Allarme'

Figura 6.15: Abilitazione pannello e disattivazione allarme

Infine, premendo il **pulsante 'Ripristino'** (figura 6.16a), il sistema passa dalla condizione di *Antincendio Scattato* a quella di *Antincendio Inibito (Safe)*. Ciò viene verificato osservando le spie della centralina antincendio che riportano lo stato di funzionamento dell'impianto, nonché i relativi semafori visualizzabili dalla camera sul tablet. In particolare, per quanto riguarda l'*Acoustic Enclosure*, si spegne la luce *rossa* di Antincendio Scattato e si accende la spia *verde* di Antincendio Inibito. Per quanto riguarda la *Fuel Pump Room*, invece, resta attiva la spia *arancione* di Antincendio Armato. Infatti, la Procedura di Armamento ha previsto l'armamento dell'intero sistema ma, dopodichè, essendosi verificato un incendio che ha interessato solamente l'*Acoustic Enclosure*, è stato attivato l'impianto antincendio relativo esclusivamente a quest'ultima area (figura 6.16b).



(a) Pulsante di 'Ripristino'

(b) Configurazione post-ripristino

Figura 6.16: Ripristino del sistema antincendio

Si evidenzia inoltre che, una volta ripristinato il sistema, sulla centralina antincendio si sono *disattivati* i led rossi di 'Incendio' e 'Zona 1 in Incendio', oltre alle spie di 'Scarica Imminente' e 'Scarica Attivata' situate nel quadro relativo all'Area 1. Infine, sul display relativo a quest'ultima area, si è ripristinata la scritta che indica la modalità di utilizzo manuale del sistema.

La *Procedura Manuale* è quindi conclusa e l'utente può selezionare nuovamente, attraverso la grafica dinamica del tablet di supporto, se ripetere la procedura appena terminata o eseguire la *Procedura Standard*. Tale opzione viene fornita al termine di ognuna delle due procedure, senza limiti di ripetizione. Per concludere l'addestramento VR ed uscire dalla simulazione, è necessario premere il **pulsante 'Quit Scene'** del tablet di supporto.

Capitolo 7

Conclusioni

Il progetto di tesi è stato realizzato con l'intento di esaminare ed impiegare le caratteristiche della realtà virtuale per lo sviluppo di un metodo di addestramento alternativo, rivolto al personale aeronautico e manutentore. Questo tipo di training vuole sfruttare le potenzialità offerte dalla tecnologia VR, per fornire un'esperienza di addestramento efficace ed innovativa, che vada ad affiancare le tradizionali tecniche basate sull'insegnamento diretto e sul Computer Based Training (CBT). Nello specifico, la simulazione VR sviluppata è finalizzata all'addestramento del personale addetto all'impianto antincendio di una sala prova motori, il che ha inoltre consentito di ricorrere alle potenzialità della tecnologia VR per simulare situazioni di pericolose e di emergenza, altrimenti impossibili da riprodurre con tradizionali metodi di training sul campo.

A progetto terminato si può concludere che la demo VR, risultato del lavoro di tesi, ha soddisfatto tutti gli obiettivi prefissati all'inizio della fase di sviluppo, riproducendo in maniera realistica e fedele le procedure operative implementate per il training. Con le sue caratteristiche, la simulazione VR rappresenta una valida alternativa ai tradizionali metodi di addestramento, fornendo un'esperienza immersiva ed interattiva. Ciò consente di migliorare l'apprendimento e la corretta esecuzione delle procedure portando ad ottimi risultati, soprattutto nel lungo periodo, grazie allo sviluppo della memoria motoria. Inoltre, tale strumento può essere utilizzato per affiancare o sostituire il training sul campo, semplificando da un punto di vista logistico la fase di addestramento e portando ad un conseguente risparmio di tempo e di risorse economiche. A questo si aggiunge, come anticipato, la possibilità di ricreare situazioni pericolose senza compromettere la sicurezza del personale.

Tra i risultati ottenuti durante lo sviluppo della demo VR si evidenziano:

- *Ambiente virtuale realistico ed immersivo*: l'ambiente virtuale in cui si svolgono le procedure operative è stato sviluppato riproducendo fedelmente i locali, i componenti dell'impianto antincendio e la loro disposizione all'interno dell'ambiente. In questo modo, l'operatore può familiarizzare con lo spazio circostante e trovarsi preparato ed ambientato una volta inserito nel contesto operativo fisico e reale;
- *Simulazione a mani libere*: tale caratteristica conferisce maggior realismo alla simulazione, e consente un'interazione più naturale ed intuitiva. Questo aspetto semplifica l'esecuzione della demo VR, rendendola spontanea ed immediata anche in caso di primo approccio con la tecnologia VR;
- *Simulazione in modalità stand-alone*: in fase di sviluppo sono state valutate le opportune semplificazioni ed ottimizzazioni, al fine di ottenere un'applicazione supportata e processata interamente dal visore, senza necessità di collegamento con un computer. Questo aspetto conferisce innanzitutto maggior libertà di movimento e praticità durante l'esecuzione della simulazione, migliorando l'esperienza VR. Inoltre, ciò semplifica notevolmente l'accessibilità dell'addestramento VR, che può così essere erogato in molteplici circostanze e ambienti, con il solo requisito di disporre di un visore compatibile. Il prodotto ottenuto risulta così portatile e versatile.
- *Supporti addestrativi*: la simulazione è stata sviluppata in modo da guidare l'utente durante lo svolgimento delle procedure, consentendogli di apprendere, assimilare e memorizzare quest'ultime. A tal fine, è stata predisposta un'esecuzione per step, che consente di passare allo step successivo solamente dopo aver completato il passaggio corrente e senza possibilità di compiere errori. Inoltre, sono stati inseriti nella scena elementi con fini didattici e addestrativi, come un tablet di supporto e delle frecce di aiuto, che sfavoriscono il realismo della simulazione ma consentono di migliorare l'apprendimento delle procedure operative.
- *Selezione delle procedure e Reset Scene*: a simulazione avviata, una volta completata la Procedura di Armamento, viene fornita all'utente la possibilità di scelta tra l'esecuzione della Procedura Standard o di quella Manuale. Terminata una delle due, l'utente può ripeterla nuovamente, oppure eseguire la seconda. Viene così concesso, durante il training, di selezionare la procedura sulla quale ci si vuole esercitare, con la possibilità di ripetere più volte l'esecuzione. Inoltre, attraverso il pulsante di 'Reset Scene' l'utente può, in qualsiasi istante della simulazione, ripetere dall'inizio la scena corrente.

La realizzazione dell'ambiente virtuale e l'implementazione delle procedure operative sono state eseguite con il supporto tecnico di *FireTech*, azienda che ha

sviluppato l'impianto antincendio. Ad ogni step del lavoro, il risultato ottenuto è stato sottoposto a diretta verifica dell'azienda, in modo da apportare le eventuali modifiche ed ottenere un prodotto valido e fedele alla realtà.

La demo VR, risultato finale del progetto di tesi, è stata quindi testata e valutata da *FireTech*, che ha confermato il pieno soddisfacimento degli obiettivi, valutando positivamente il prodotto e approvandone le potenzialità e l'attinenza con la situazione reale. La simulazione può quindi essere considerata come una valida ed efficace alternativa ai tradizionali metodi di addestramento, capace inoltre di simulare situazioni pericolose ed emergenza, grazie alle potenzialità della tecnologia VR.

Tuttavia, è bene sottolineare che il prodotto realizzato ad ora rappresenta una versione *demo*, e sono ancora numerosi i miglioramenti che si possono apportare per ampliare il progetto ed esprimerne al meglio le potenzialità. In questo senso, si propongono i seguenti sviluppi futuri:

- *Integrazione di ulteriori funzionalità del pannello di controllo*: l'operatore gestisce e monitora l'impianto antincendio principalmente tramite la centralina antincendio e la relativa pulsantiera ausiliaria. Per la simulazione delle procedure implementate, è stata seguita una programmazione in serie che ha portato a riprodurre ed abilitare solo alcune delle funzionalità e dei pulsanti di cui dispongono tali pannelli di controllo. Con il supporto di *FireTech*, si potrebbero quindi simulare ulteriori modalità di utilizzo dell'impianto antincendio;
- *Integrazione di ulteriori procedure operative*: in relazione con il punto precedente, si potrebbero implementare ulteriori procedure operative, andando per esempio a simulare lo sviluppo di un incendio in Fuel Pump Room. Inoltre, per addestrare ulteriormente gli operatori a guasti ed imprevisti in situazioni di emergenza, potrebbero essere integrate nuove condizioni di guasto dell'impianto antincendio, come già realizzato nella Procedura Manuale;
- *Affinamento di alcune interazioni*: durante lo sviluppo della demo VR, l'esecuzione di alcuni step è stata semplificata attraverso l'inserimento di animazioni. Questa scelta è dovuta al fatto che, in fase di programmazione, risulta complicato affinare lo svolgimento di alcune azioni senza rendere macchinosa e complicata l'interazione dell'utente con la simulazione. E' questo il caso della rotazione dei selettori a chiave, delle leve di piccola dimensione, oppure della chiusura delle porte. Per non distogliere l'attenzione dalla memorizzazione e dall'apprendimento delle procedure, si è quindi deciso di semplificare l'esecuzione, ma questo aspetto potrebbe essere migliorato attraverso lo sviluppo di specifici codici e perfezionamenti in fase di programmazione;

- *Possibilità di errore*: le procedure operative sono state implementate in modo tale da eseguire i vari step nel corretto ordine, con la possibilità di passare al passaggio successivo solamente dopo aver completato quello corrente e aver effettuato un check. Tuttavia, ad ora, non è stata predisposta la possibilità di commettere errori, e l'esecuzione è stata guidata e forzata in modo da portare l'operatore al corretto svolgimento della procedura. Si potrebbe quindi implementare la possibilità di errore, così da migliorare ulteriormente la qualità dell'addestramento;
- *Tempo di esecuzione e conteggio degli errori*: un altro possibile sviluppo a fini addestrativi, potrebbe essere ottenuto implementando una modalità di test in modo da assegnare un punteggio, a completamento di ogni procedura operativa, basato sul tempo impiegato durante l'esecuzione e sul numero di errori commessi. Si potrebbe così perfezionare l'apprendimento delle procedure e velocizzarne lo svolgimento, date la lucidità e la tempestività richieste in una situazione di emergenza come può essere la presenza di un incendio;
- *Test di valutazione del risultato ottenuto*: come anticipato, la simulazione VR realizzata è stata valutata e testata direttamente da *FireTech*. Tuttavia, per procedere verso un effettivo e concreto utilizzo del prodotto per il training, sarebbe interessante sottoporlo agli operatori addetti all'impianto antincendio della sala prova motori, per valutarne l'efficacia e ricevere importanti feedback su cui basarsi per eventuali miglioramenti futuri.

Bibliografia

- [1] *EASA - EASA approves the first Virtual Reality (VR) based Flight Simulation Training Device*. URL: <https://www.easa.europa.eu/en/newsroom-and-events/press-releases/easa-approves-first-virtual-reality-vr-based-flight-simulation> (cit. alle pp. 2, 45).
- [2] *FSTD Special Conditions for the use of Head Mounted Displays (HMD) combined with a motion platform with reduced envelope*. Information Paper. EASA, mar. 2023 (cit. alle pp. 2, 46).
- [3] *FSTD Special Conditions development and assessment process*. Information Paper. EASA, mar. 2023 (cit. alle pp. 2, 46).
- [4] *Annex IV to ED Decision 2020/002/R - Acceptable Means of Compliance (AMC) and Guidance Material (GM) to Annex IV (Part-147) to Commission Regulation (EU) No 1321/2014 - Issue 2 — Amendment 2*. Information Paper. EASA, mar. 2020 (cit. alle pp. 2, 46).
- [5] L. Tremosa. *Beyond AR vs. VR: What is the Difference between AR vs. MR vs. VR vs. XR?* Interaction Design Foundation - IxDF. Ott. 2023. URL: <https://www.interaction-design.org/literature/article/beyond-ar-vs-vr-what-is-the-difference-between-ar-vs-mr-vs-vr-vs-xr> (cit. a p. 6).
- [6] *Extended Reality-DHL-Global*. URL: <https://www.dhl.com/global-en/home/insights-and-innovation/thought-leadership/trend-reports/augmented-and-extended-reality.html> (cit. a p. 6).
- [7] S. Primatesta. *Virtual, Augmented and Mixed Reality technologies in Flight Simulation for training*. Corso di Simulazione del Volo. 2023 (cit. alle pp. 6, 7, 36).
- [8] Tomasz Mazuryk. «Virtual Reality History , Applications , Technology and Future». In: 1999. URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:16772747> (cit. alle pp. 8, 9, 12).
- [9] *Introduction to the virtual reality world*. URL: <https://www.fortech.ro/introduction-virtual-reality-world/> (cit. a p. 9).

- [10] M. A. Muhanna. «Virtual reality and the CAVE: Taxonomy, interaction challenges and research directions». In: *Journal of King Saud University Computer and Information Sciences* 27 (2015), pp. 344–361 (cit. alle pp. 9, 12).
- [11] M. L. Lorusso, S. Travellini, M. Giorgetti, P. Negrini, G. Reni e E. Biff. «Semi-immersive virtual reality as a tool to improve cognitive and social abilities in preschool children». In: *Applied Sciences* 10 (2020) (cit. a p. 9).
- [12] Rositsa Radoeva, Emiliyan Petkov, Teodor Kalushkov, Donika Valcheva e Georgi Shipkovenski. «Overview On Hardware Characteristics Of Virtual Reality Systems». In: *2022 International Congress on Human-Computer Interaction, Optimization and Robotic Applications (HORA)*. 2022, pp. 01–05. DOI: **10.1109/HORA55278.2022.9799932** (cit. alle pp. 10, 11).
- [13] Christoph Anthes, Rubén Jesús García-Hernández, Markus Wiedemann e Dieter Kranzlmüller. «State of the art of virtual reality technology». In: *2016 IEEE Aerospace Conference*. 2016, pp. 1–19. DOI: **10.1109/AERO.2016.7500674** (cit. alle pp. 10, 11).
- [14] *CNN - Meta Quest 2*. URL: **<https://edition.cnn.com/cnn-under-scored/electronics/oculus-quest-2-tips-and-tricks-for-beginners>** (cit. a p. 11).
- [15] *Turbosquid 3D Models*. URL: **<https://www.turbosquid.com/3d-models/oculus-rift-s-3d-model-1402587>** (cit. a p. 12).
- [16] *Unbound XR*. URL: **<https://unboundxr.eu/vergelijk-vr-treadmills>** (cit. a p. 12).
- [17] Hamad Ayah e Bochen Jia. «How Virtual Reality Technology Has Changed Our Lives: An Overview of the Current and Potential Applications and Limitations.» In: *International journal of environmental research and public health* 19.18 11278 (2022). DOI: **10.3390/ijerph191811278** (cit. a p. 13).
- [18] Segura-Ortí E. e García-Testal A. «Intradialytic virtual reality exercise: Increasing physical activity through technology.» In: *Semin. Dial.* 32. 2019, pp. 331–335. DOI: **10.1111/sdi.12788** (cit. a p. 13).
- [19] *Virtual Reality Market - Global Industry Analysis, Size, Share, Growth, Trends, Regional Outlook, and Forecast 2023-2032*. URL: **<https://www.preceden ceresearch.com/virtual-reality-market>** (cit. a p. 14).
- [20] *Virtual Reality Market Analysis Report By Device, By Technology, By Component, By Application, By Region And Segment Forecasts From 2020 To 2027*. URL: **<https://www.millioninsights.com/industry-reports/virtual-reality-vr-market>** (cit. a p. 14).

- [21] *Cos'è il gaming VR?* URL: <https://www.lenovo.com/it/it/faqs/gaming/cosa-e-il-gaming-vr/?orgRef=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F> (cit. a p. 15).
- [22] *Meta Quest*. URL: <https://www.meta.com/it/quest/entertainment/> (cit. a p. 15).
- [23] *Digitalmosaik*. URL: <https://www.digitalmosaik.com/blog/la-vr-per-lintrattenimento> (cit. a p. 16).
- [24] *Google Earth VR*. URL: https://store.steampowered.com/app/348250/Google_Earth_VR/?l=italian (cit. a p. 16).
- [25] *L'impatto della realtà virtuale su architettura e design*. URL: <https://ts2.space/it/limpatto-della-realta-virtuale-su-architettura-e-design/> (cit. a p. 16).
- [26] *VR Sketch Helps you Create, Edit and View Models in Virtual Reality*. URL: <https://archipreneur.com/vr-sketch-plugin-for-sketch-up/> (cit. a p. 16).
- [27] *OutHere and Skanska: A Unity for AEC case story*. URL: <https://unity.com/case-study/outhere-and-skanska> (cit. a p. 17).
- [28] *Advanced Analytics-Thornton Tomasetti*. URL: <https://www.thorntontomasetti.com/capability/advanced-analytics> (cit. a p. 17).
- [29] *Applied R+D - Foster+Partners*. URL: <https://www.fosterandpartners.com/people/teams/applied-rplud> (cit. a p. 17).
- [30] *3D Virtual Tours for Real Estate*. URL: <https://matterport.com/it/industries/real-estate/virtual-tours> (cit. a p. 17).
- [31] *La realtà virtuale per la tua azienda*. URL: <https://gruppo-orange.it/la-realta-virtuale-per-la-tua-azienda/> (cit. a p. 18).
- [32] *Realmore - Events & Trade Fairs*. URL: <https://realmore.net/it/realta-aumentata-realta-virtuale-fiere-virtuali> (cit. alle pp. 18, 19).
- [33] *Bedeschi in fiera con la realtà virtuale*. URL: <https://airlapp.com/blog/bedeschi-in-fiera-con-la-realta-virtuale/> (cit. a p. 19).
- [34] *Officine Meccaniche BBM in fiera con la Realtà Virtuale*. URL: <https://airlapp.com/blog/officine-meccaniche-bbm-in-fiera-con-la-realta-virtuale/> (cit. a p. 20).
- [35] *Virtual Reality in the Automotive Industry: Market, Adoption, Use Cases*. URL: <https://www.scnsoft.com/virtual-reality/automotive> (cit. a p. 21).

- [36] *Innovation - McLaren Automotive*. URL: <http://www.mclarenautomotive.ru/en/about/Innovation.html> (cit. a p. 21).
- [37] *Virtual Reality for the car industry and automotive*. URL: <https://www.vrowl.io/virtual-reality-for-the-car-industry-and-automotive/> (cit. a p. 22).
- [38] *The automotive industry trains employees in virtual reality*. URL: <https://aidarsolutions.com/the-automotive-industry-trains-employees-in-virtual-reality/> (cit. a p. 22).
- [39] *Virtual Reality in the Automotive Industry*. URL: <https://www.toptal.com/virtual-reality/virtual-reality-in-the-automotive-industry> (cit. a p. 22).
- [40] *Volvo Reality - Framestore*. URL: <https://www.framestore.com/work/volvo-reality?language=en> (cit. a p. 23).
- [41] *Mazda: VR Experience*. URL: <https://demodern.com/projects/mazda-vr-experience> (cit. a p. 23).
- [42] *Realtà virtuale: tecnologie dirompenti al servizio della medicina*. URL: <https://www.osservatorioterapieavanzate.it/innovazioni-tecnologiche/digital-health/realta-virtuale-tecnologie-dirompenti-al-servizio-della-medicina> (cit. alle pp. 23, 24).
- [43] *Formazione dei Chirurghi: la VR batte i metodi tradizionali*. URL: <https://www.experenti.eu/realta-virtuale/training/formazione-dei-chirurghi-la-vr-batte-i-metodi-tradizionali/> (cit. a p. 23).
- [44] *Formazione chirurgica in realtà virtuale - Johnson & Johnson*. URL: https://business.oculus.com/case-studies/johnson-and-johnson/?locale=it_IT (cit. a p. 24).
- [45] *VR & Robotics Could Be The Future Of Medical Training*. URL: <https://vrscout.com/news/vr-robotics-could-be-the-future-of-medical-training/> (cit. a p. 24).
- [46] «Virtual reality in medicine: a brief overview and future research directions». In: *Human Movement* 20.3 (2019). ISSN: 1899-1955 (cit. alle pp. 24, 25).
- [47] Pensieri Claudio e Pennacchini Maddalena. «Overview: Virtual Reality in Medicine». In: *Journal of Virtual Worlds Research* 7 (gen. 2014). DOI: [10.1007/978-3-319-22041-3_14](https://doi.org/10.1007/978-3-319-22041-3_14) (cit. alle pp. 24, 25).
- [48] *Virtual reality training for space exploration - Department of Industry, Science and Resources*. URL: <https://www.industry.gov.au/news/virtual-reality-training-space-exploration> (cit. alle pp. 25, 26).

- [49] *Virtual Reality for Space Exploration and Astronaut Training*. URL: <https://skywell.software/blog/virtual-reality-for-space-exploration-astronaut-training/> (cit. a p. 26).
- [50] *Nine Ways We Use AR and VR on the International Space Station - NASA*. URL: <https://www.nasa.gov/missions/station/nine-ways-we-use-ar-and-vr-on-the-international-space-station/> (cit. alle pp. 26, 27).
- [51] *The important role Virtual Reality (VR) plays in astronaut training and exploration*. URL: <https://www.herox.com/blog/1021-the-important-role-virtual-reality-vr-plays-in-ast#:~:text=Doing%20simulated%20work%20ahead%20of,to%20build%20or%20repair%20anything>. (cit. a p. 26).
- [52] *Thales Alenia Space - Augmented and Virtual: A Reality Double Play at Thales Alenia Space*. URL: <https://www.thalesgroup.com/en/worldwide/space/news/augmented-and-virtual-reality-double-play-thales-alenia-space> (cit. a p. 27).
- [53] Valter Basso. *Ambiente Immersivo Collaborativo per la Progettazione Spaziale* (cit. a p. 27).
- [54] *Space Economy 360*. URL: <https://www.spaceeconomy360.it/cultura-dello-spazio/via-a-lunar-city-la-piattaforma-che-punta-a-500-milioni-di-ricavi-in-5-anni/> (cit. a p. 28).
- [55] *Virtual Reality in Aerospace and Defense Market Size, Share & Industry Analysis, By Component, By Application and Regional Forecast, 2019-2026*. URL: <https://www.fortunebusinessinsights.com/industry-reports/virtual-reality-vr-in-aerospace-and-defense-market-101703> (cit. alle pp. 28, 29, 33, 35).
- [56] *Potential of Virtual Reality in Aviation and Aerospace Industry*. URL: <https://www.ediie.com/blog/potential-of-vr-in-aviation-aerospace/> (cit. alle pp. 29, 33).
- [57] *Virtual reality applications in the aerospace industry - Vection Technologies*. URL: <https://vection-technologies.com/solutions/industries/aerospace/> (cit. alle pp. 29, 32, 34).
- [58] *Embraer - How virtual reality speeds up aircraft development*. URL: <https://journalofwonder.embraer.com/global/en/82-how-virtual-reality-speeds-up-aircraft-development%C3%B9> (cit. a p. 30).

- [59] *Boeing - Employees use virtual reality to figure out best way to build 737 MAX 10.* URL: <https://www.boeing.com/company/about-bca/washington/737-max10-virtual-reality-01-28-19.page> (cit. alle pp. 30, 31).
- [60] *Airbus - Virtual reality with real benefits.* URL: <https://www.airbus.com/en/newsroom/news/2017-09-virtual-reality-with-real-benefits> (cit. a p. 31).
- [61] *Lockheed Martin - CHIL.* URL: <https://www.lockheedmartin.com/en-us/products/chil.html> (cit. a p. 32).
- [62] *Bell - Using Virtual Reality to Design the Future of Flight.* URL: <https://news.bellflight.com/en-US/168853-using-virtual-reality-to-design-the-future-of-flight> (cit. a p. 32).
- [63] *Lockheed Is Using These Augmented Reality Glasses to Build Fighter Jets.* URL: <https://www.popularmechanics.com/flight/a13967/lockheed-martin-augmented-reality-f-35/> (cit. a p. 33).
- [64] *IATA Promotes Passenger Experience Benefits of Virtual Reality.* URL: <https://apex.aero/articles/iata-promotes-passenger-experience-benefits-virtual-reality/> (cit. a p. 33).
- [65] *Iberia - Iberia offers Virtual Reality on flights.* URL: <https://grupo.iberia.com/pressrelease/details/10753> (cit. a p. 33).
- [66] *Airports tap into virtual reality for passenger entertainment.* URL: <https://www.airport-technology.com/features/virtual-reality-passenger-entertainment/> (cit. a p. 33).
- [67] *Iberia offers Inflight VR's virtual reality content on board.* URL: <https://www.futuretravelexperience.com/2019/02/iberia-offers-inflight-vrs-virtual-reality-content-on-board/> (cit. a p. 34).
- [68] *Dead Pixels - Aerospace VR Configurator.* URL: <https://deadpixels.it/progetti/leonardo-3/> (cit. alle pp. 34, 35).
- [69] *TXT Group - Extended Reality - XR.* URL: <https://pace.txtgroup.com/products/extended-reality/> (cit. a p. 37).
- [70] E. Capello. *Flight Simulation.* Corso di Simulazione del Volo. 2023 (cit. a p. 37).
- [71] *Airbus - Airbus qualifies its second Level D - A320neo simulator in Denver.* URL: <https://aircraft.airbus.com/en/newsroom/press-releases/2019-07-airbus-qualifies-its-second-level-d-a320neo-simulator-in-denver> (cit. a p. 38).

- [72] *KLM - KLM Cityhopper introduces Virtual Reality training for pilots*. URL: <https://news.klm.com/klm-cityhopper-introduces-virtual-reality-training-for-pilots/> (cit. a p. 39).
- [73] *Airbus - Airbus Virtual Procedure Trainer offers an innovative way for pilots to learn procedures using Virtual Reality - Lufthansa Group becomes launch customer*. URL: <https://aircraft.airbus.com/en/newsroom/press-releases/2022-11-airbus-virtual-procedure-trainer-offers-an-innovative-way-for> (cit. a p. 39).
- [74] *Leonardo - Avanzata, virtuale e immersiva: la nuova frontiera dell'addestramento e della simulazione*. URL: <https://www.leonardo.com/it/focus-detail/-/detail/virtual-training-simulation> (cit. alle pp. 40, 43).
- [75] *Leonardo - Cutting-edge Virtual and Extended Reality (VxR) simulator unveiled at Heli-Expo*. URL: <https://helicopters.leonardo.com/it/focus-detail/-/detail/virtual-and-extended-reality> (cit. a p. 40).
- [76] Lee Hyeonju, Woo Donghyun e Yu Sunjin. «Virtual Reality Metaverse System Supplementing Remote Education Methods: Based on Aircraft Maintenance Simulation». In: *Applied Sciences* 12.5 (2022). ISSN: 2076-3417. URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/5/2667> (cit. a p. 41).
- [77] Wu Wen-Chung e Vu Van-Hoan. «Application of Virtual Reality Method in Aircraft Maintenance Service - Taking Dornier 228 as an Example». In: *Applied Sciences* 12.14 (2022). ISSN: 2076-3417. URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/14/7283> (cit. alle pp. 41, 42).
- [78] Gómez-Cambronero Á., Miralles I., Tonda A. e Remolar I. «Immersive Virtual-Reality System for Aircraft Maintenance Education: A Case Study». In: *Applied Sciences* 13.8 (2023). ISSN: 2076-3417. URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/13/8/5043> (cit. a p. 42).
- [79] *Rolls-Royce - AE 2100 Maintenance Training in an Immersive Virtual Reality Environment*. URL: <https://www.rolls-royce.com/~media/Files/R/Rolls-Royce/documents/defence/virtual-reality-maintenance-training-software.pdf> (cit. a p. 42).
- [80] *Rolls-Royce and Qatar Airways train with virtual reality*. URL: <https://trends.aeroexpo.online/project-75957.html> (cit. a p. 43).
- [81] *Leonardo - Formazione 4.0 con Leonardo*. URL: <https://www.leonardo.com/it/news-and-stories-detail/-/detail/training-40-with-leonardo> (cit. a p. 43).

- [82] *Leonardo - How technologies will transform the future of training*. URL: <https://helicopters.leonardo.com/it/focus-detail/-/detail/the-future-training> (cit. a p. 43).
- [83] *Leonardo - Sicurezza ed efficienza nelle operazioni di elisoccorso grazie all'addestramento combinato tra reale e virtuale*. URL: <https://www.leonardo.com/it/news-and-stories-detail/-/detail/leonardo-helicopter-rescue-digital-training> (cit. a p. 44).
- [84] *Aviation Report*. URL: <https://www.aviation-report.com/sistema-di-addestramento-all-uso-del-verricello-mithos-di-leonardo/> (cit. a p. 44).
- [85] *What Virtual Reality (VR) means for Ground Operations*. White Paper. IATA, 2019 (cit. alle pp. 44, 45).
- [86] Blender Foundation. *Blender*. Ver. 4.0 (cit. a p. 47).
- [87] Autodesk Inc. *Autodesk 3ds Max*. Ver. 2023 (cit. a p. 47).
- [88] *SideQuest*. URL: <https://sidequestvr.com/> (cit. a p. 47).
- [89] Unity Technologies. *Unity*. Ver. 2022.3.18f1. 2022 (cit. a p. 47).
- [90] *<geekandjob/> - Unity*. URL: <https://www.geekandjob.com/wiki/unity> (cit. a p. 48).
- [91] Microsoft. *Microsoft Visual Studio*. 2019 (cit. a p. 48).
- [92] *Digitalmosaik - Oculus Quest 2: cos'è e come funziona?* URL: <https://www.digitalmosaik.com/blog/oculus-quest-2> (cit. a p. 51).
- [93] *Meta - Meta Quest 2*. URL: <https://www.meta.com/it/quest/products/quest-2/tech-specs/#tech-specs> (cit. a p. 51).
- [94] *Aeroreport - A look inside an engine test cell*. URL: <https://aeroreport.de/en/good-to-know/a-look-inside-an-engine-test-cell> (cit. alle pp. 53, 54).
- [95] Vidyasagar Kotha. «Aircraft Gas Turbine Engine Test Bed and Module Change Workshop: Review for Education and Research». In: *International Journal of Advanced Research in Engineering and Technology (IJARET)* 14 (2023). ISSN: 0976-6499. URL: https://iaeme.com/MasterAdmin/Journal_uploads/IJARET/VOLUME_14_ISSUE_6/IJARET_14_06_003.pdf (cit. a p. 54).
- [96] *html.it - Guida Unity 3D*. URL: https://www.html.it/guide/guida-unity-3d/#google_vignette (cit. a p. 90).