



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea triennale in Ingegneria Gestionale

**Misure di comfort visivo in ambienti reali e virtuali: analisi
multidimensionale e metodologie di valutazione**

Visual comfort measurements in real and virtual environments: a
multidimensional analysis and evaluation methodologies

Relatore:

Prof.ssa **Casaccia Sara**

Tesi di Laurea di:

Vallorani Andrea

Correlatore:

Ing. **Sartini Gianluca**

A.A. 2025 / 2026

INDICE

1. Introduzione	1
1.1 Stato dell'arte	2
1.1.1 Comfort visivo e qualità dell'ambiente interno.....	2
1.1.2 Realtà virtuale per lo studio del comfort visivo	3
1.1.3 Confronto tra ambiente reale e ambiente virtuale	4
1.1.4 Metodi di valutazione del comfort visivo	5
1.2 Obiettivi della ricerca.....	6
2. Materiali e Metodi.....	8
2.1 Ambiente sperimentale	8
2.2 Sviluppo dell'ambiente virtuale.....	8
2.3 Strumentazione utilizzata.....	13
2.4 Protocollo sperimentale.....	17
2.5 Questionari	22
2.6 Acquisizione ed elaborazione dati	25
2.7 Ottimizzazione del protocollo e test pilota	27
2.8 Filtraggio del segnale EDA e costruzione dei grafici.....	29
3. Risultati e Discussione	31
3.1 Evidenze emerse durante il test pilota	31
3.2 Analisi del segnale EDA di un partecipante	33
3.2.1 Valutazione soggettiva dell'esperienza	33
3.2.2 Analisi statistica del singolo partecipante.....	34

3.3 Analisi complessiva sul totale dei partecipanti.....	35
3.3.1 Andamento medio delle feature eda	35
3.3.2 Analisi statistica del campione totale sugli 8 partecipanti.....	38
3.4 Discussione dei risultati	41
4. Conclusioni e sviluppi futuri.....	44
Bibliografia.....	46

Abstract

La realtà virtuale rappresenta uno strumento sempre più utilizzato per la progettazione e la valutazione degli ambienti indoor, consentendo di simulare differenti condizioni di illuminazione prima della loro realizzazione. Affinché tali simulazioni possano essere impiegate in modo affidabile, è necessario verificare quanto le risposte degli utenti in ambiente virtuale siano confrontabili con quelle osservate in ambiente reale. Per questo motivo, la misura del comfort visivo rappresenta un passaggio fondamentale per valutare l'affidabilità degli ambienti virtuali e il loro possibile impiego nella progettazione e nella valutazione degli spazi indoor. Il presente lavoro analizza il comfort visivo confrontando due ambienti, uno reale e uno virtuale, caratterizzati da tre differenti livelli di illuminazione (100%, 50% dell'illuminazione totale e 0% dell'illuminazione totale). Lo studio ha coinvolto otto partecipanti, sottoposti a tre attività sperimentali in entrambe le modalità. Durante le prove sono stati acquisiti segnali di attività elettrodermica (Electrodermal Activity, EDA) mediante un dispositivo wearable Empatica, sincronizzati con il protocollo sperimentale e successivamente sottoposti a filtraggio e analisi. Per ciascun evento fisiologico sono state estratte le principali caratteristiche descrittive, quali numero di eventi, durata, ampiezza e pendenza, utilizzate per il confronto tra le diverse condizioni sperimentali. Parallelamente sono stati raccolti questionari soggettivi relativi alla percezione della luce, al comfort visivo e all'esperienza dell'utente. I risultati mostrano una sostanziale coerenza tra ambiente reale e realtà virtuale sia nelle misure fisiologiche sia nelle valutazioni soggettive, pur evidenziando alcune differenze statisticamente significative in specifiche combinazioni di attività e livello di illuminazione. L'analisi complessiva del campione conferma che la realtà virtuale è in grado

di riprodurre in modo soddisfacente le risposte osservate nell'ambiente reale, mentre le differenze rilevate sembrano essere influenzate principalmente dalla variabilità individuale dei partecipanti.

1. Introduzione

Nel corso degli ultimi decenni, c'è stata una crescente attenzione alla qualità degli ambienti interni, il che ha portato a un progressivo sviluppo di ricerche e tecniche volte a comprendere il benessere delle persone negli ambienti costruiti. Tale interesse è giustificato dal fatto che le persone trascorrono la maggior parte del proprio tempo in ambienti chiusi, come uffici, aule universitarie e case, dove il clima è direttamente correlato alla salute e alle prestazioni cognitive. Il comfort visivo è tra i numerosi fattori che contribuiscono alla qualità dell'ambiente interno, e riveste un ruolo fondamentale. La sua misura rappresenta un aspetto centrale sia nella ricerca sia nella progettazione degli ambienti indoor, poiché consente di valutare in parte l'influenza delle condizioni ambientali sul benessere e sulle prestazioni degli utenti. Non riguarda la sola capacità di vedere correttamente gli oggetti, ma anche il benessere percettivo, la riduzione dell'affaticamento visivo e la capacità di svolgere attività in modo efficiente. In effetti, un ambiente adeguatamente illuminato può aumentare la produttività e la concentrazione, riducendo gli errori. Alcuni aspetti energetici sono correlati al comfort visivo, anche il consumo energetico degli edifici è fortemente influenzato dalla progettazione e dalla gestione dell'illuminazione. L'ottimizzazione dei sistemi di illuminazione può migliorare il comfort degli occupanti e ridurre il fabbisogno energetico complessivo utilizzando strategie di controllo della luce naturale e artificiale [1]. Il comfort visivo è quindi strategicamente importante perché è correlato all'efficienza dei sistemi e alla sostenibilità delle risorse. Nonostante l'importanza della misura del comfort visivo, la sua valutazione presenta ancora molte criticità. In primo luogo, il comfort visivo è un fenomeno complesso e multidimensionale che è influenzato sia da variabili fisiche come illuminazione, luminanza e colore, sia da fattori

soggettivi relativi alle proprie percezioni. È difficile stabilire parametri universali validi per tutti gli utenti a causa di ciò. In secondo luogo, ci sono limiti significativi agli approcci tradizionali all'analisi del comfort visivo che si basano su studi in ambienti reali o su modelli fisici. Spesso, queste metodologie sono costose, difficili da replicare e hanno un basso controllo delle variabili sperimentali. Di conseguenza, è difficile distinguere l'impatto di determinati fattori ambientali e valutare come hanno influenzato le prestazioni e il benessere degli utenti. La difficoltà di integrare dati oggettivi e soggettivi è un altro problema. Sebbene i questionari siano utili per raccogliere informazioni sulle percezioni degli utenti, la formulazione delle domande e il bias cognitivo possono avere un notevole impatto [2][3]. I parametri fisiologici, invece, forniscono informazioni oggettive ma richiedono strumenti adeguati e protocolli sperimentali ben organizzati per essere interpretati correttamente. È necessario creare approcci innovativi in grado di superare i limiti degli studi tradizionali e fornire una valutazione più completa e affidabile del comfort visivo alla luce di questi problemi.

1.1 Stato dell'arte

1.1.1 Comfort visivo e qualità dell'ambiente interno

Il benessere, l'efficienza e la capacità di concentrazione sono tutti influenzati dall'esperienza percettiva. Nella letteratura, il comfort visivo è la condizione in cui qualcuno vede un ambiente luminoso come adatto alle attività che sta svolgendo. La qualità visiva negli ambienti virtuali sottolinea che il comfort è dovuto all'interazione tra le caratteristiche dello spazio e le percezioni dell'utente piuttosto che ai soli fattori fisici dell'ambiente [4]. È importante integrare le opinioni soggettive degli utenti con i tradizionali parametri illuminotecnici quando si valuta il comfort visivo [5]. Inoltre, i questionari

basati sulle preferenze individuali mostrano un aspetto soggettivo del comfort visivo, in cui la percezione dell'ambiente dipende non solo dalle caratteristiche fisiche dell'utente, ma anche dalla sua esperienza, abitudini e sensibilità personale [6]. Di conseguenza, individui in condizioni simili possono avere opinioni diverse sul livello di comfort percepito. Il comfort visivo ha acquisito rilevanza negli ultimi anni a causa della crescente attenzione alla qualità degli ambienti costruiti. In questo senso, il comfort visivo assume una duplice rilevanza, da un lato incide sull'esperienza dell'utente, dall'altro rappresenta un elemento importante nei processi di progettazione e gestione degli spazi. Un ambiente inadeguato può aumentare il carico cognitivo, causare affaticamento visivo e ridurre la capacità di mantenere un alto livello di attenzione durante attività lunghe. Per questo motivo, il comfort visivo è oggi considerato un indicatore essenziale per valutare la qualità generale degli ambienti interni. La sua valutazione richiede metodi in grado di integrare vari tipi di informazioni e di considerare sia le caratteristiche ambientali che le risposte degli utenti. In questa prospettiva, l'utilizzo della realtà virtuale per l'analisi del comfort indoor risulta coerente con approcci recenti che impiegano ambienti immersivi per valutare la risposta degli utenti in condizioni controllate [7].

1.1.2 Realtà virtuale per lo studio del comfort visivo

Il comfort visivo ha un impatto diretto sulle capacità di una persona di svolgere le attività quotidiane e costituisce una parte importante del benessere percepito. In effetti, la capacità di concentrazione, la velocità di elaborazione delle informazioni e l'accuratezza nello svolgimento dei compiti possono essere influenzate dalle condizioni di luminosità dell'ambiente. La lettura è una delle attività maggiormente influenzate dalle condizioni visive dell'ambiente. La qualità della visualizzazione può

influenzare la velocità di lettura e la comprensione del contenuto in ambienti VR e AR [8]. Questo è dovuto al fatto che la lettura è particolarmente dipendente dalle caratteristiche dell'ambiente perché richiede un'integrazione costante dell'elaborazione visiva e cognitiva. Nonostante ciò, l'impatto delle circostanze ambientali non riguarda solo la lettura. Le configurazioni di illuminazione diverse possono influenzare i risultati in attività che richiedono una grande quantità di concentrazione e attenzione [9]. La qualità dell'illuminazione può quindi avere un impatto sulla capacità dell'utente di mantenere elevati livelli di attenzione durante l'esecuzione dei compiti. Le caratteristiche dell'ambiente hanno un impatto significativo anche sulle attività di discriminazione visiva. I compiti che richiedono un'analisi approfondita di colori, contrasti e livelli di luminanza nella realtà virtuale mostrano maggiormente le differenze rispetto all'ambiente reale [10]. La resa cromatica dei dispositivi immersivi può anche influenzare la capacità degli utenti di identificare stimoli con piccole differenze [11].

1.1.3 Confronto tra ambiente reale e ambiente virtuale

Affinché si voglia utilizzare la realtà virtuale come strumento di analisi affidabile è necessario verificare che le risposte degli utenti osservate in ambienti virtuali siano equivalenti a quelle registrate nel reale. Il confronto tra le reazioni fisiche e mentali degli utenti in ambienti virtuali e reali [12] indica una notevole corrispondenza tra le due condizioni sperimentali, il che indica che gli ambienti immersivi possono essere un valido strumento per valutare l'esperienza umana. Inoltre, è stato condotto un confronto tra realtà fisica e virtuale in ambienti di lavoro, dove le risposte degli utenti hanno mostrato una forte correlazione tra le due condizioni sperimentali [13]. Questo risultato sottolinea la possibilità di utilizzare la realtà virtuale come strumento per aiutare i processi di progettazione e valutazione ambientale.

Tuttavia, ci sono alcune differenze che possono persistere tra l'ambiente reale e quello virtuale, in particolare quando si tratta di compiti che richiedono una percezione precisa di colori, contrasti e condizioni luminose. Per questo motivo, è fondamentale verificare sperimentalmente il grado di corrispondenza tra le due modalità negli studi sul comfort visivo.

1.1.4 Metodi di valutazione del comfort visivo

La valutazione del comfort visivo è un ambito di ricerca complesso poiché coinvolge elementi fisiologici, cognitivi e percettivi. In effetti, nessun indicatore è sufficiente per descrivere completamente l'esperienza dell'utente. Di conseguenza, la letteratura suggerisce approcci multidimensionali che integrano una varietà di strumenti di valutazione, utilizzando sia misure oggettive che soggettive. Uno degli strumenti più utilizzati negli studi sul comfort visivo vi sono i questionari, che consentono di raccogliere informazioni direttamente dalle percezioni degli utenti. L'affaticamento degli occhi, le difficoltà di messa a fuoco, la sensibilità alla luce e la percezione di abbagliamento sono sintomi che sono importanti per la valutazione del discomfort visivo [2]. Tuttavia, l'affidabilità dei sondaggi dipende anche dal modo in cui vengono formulati. Infatti, le formulazioni e le strutture diverse possono influenzare le risposte ottenute, il che significa che gli strumenti utilizzati per raccogliere dati soggettivi devono essere progettati con cura [3]. L'utilizzo di parametri fisiologici ha assunto un ruolo sempre più importante negli studi relativi al comfort ambientale negli ultimi anni. Gli indicatori oggettivi vengono misurati in modo non invasivo da smartwatch [14]. L'utilizzo di sensori indossabili per monitorare i parametri fisiologici durante esperienze di realtà virtuale è anche in linea con le strategie più recenti nelle ricerche immersive [15]. L'attività elettrodermica (EDA) è uno dei segnali più utilizzati per valutare le variazioni nello stato

psicofisiologico degli utenti. Questa misura è particolarmente sensibile alle variazioni dello stato emotivo che si verificano durante esperienze in realtà virtuale [16]. Viene anche dimostrato che gli stimoli ambientali e le variazioni dei parametri fisiologici sono significativamente correlati, confermando l'utilità di questi metodi per studiare il comportamento umano [17]. La letteratura sottolinea l'importanza dell'EDA, che risulta essere uno dei migliori indicatori per valutare le risposte degli utenti in realtà virtuale [18]. In base a questi risultati, il riferimento metodologico utilizzato nel presente lavoro è la combinazione di questionari e misurazioni fisiologiche.

1.2 Obiettivi della ricerca

Il lavoro attuale si inserisce in questo contesto proponendo un metodo sperimentale basato sull'utilizzo della realtà virtuale e sull'integrazione di dati fisiologici e soggettivi. L'obiettivo principale del presente lavoro è quello di esaminare l'impatto delle condizioni di illuminazione sul comfort visivo e sulle prestazioni degli utenti, confrontando i risultati in ambienti virtuali e reali. In particolare, l'obiettivo è determinare la possibilità di utilizzare la realtà virtuale come mezzo affidabile per lo studio della percezione visiva e del comportamento umano. Per raggiungere tale obiettivo, sono stati definiti i seguenti sotto-obiettivi:

- valutare l'impatto di diversi livelli di illuminazione sulle prestazioni cognitive, durante lo svolgimento di attività specifiche;
- analizzare la percezione soggettiva del comfort visivo mediante questionari strutturati;
- misurare le risposte fisiologiche degli utenti attraverso l'elettrodermal activity (EDA), come indicatore del carico cognitivo e dello stato di attivazione;

- confrontare i risultati ottenuti in ambiente virtuale e reale, al fine di verificare la validità della simulazione.

2. Materiali e Metodi

2.1 Ambiente sperimentale

Il Living Lab (FANDLAB) del Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche dell'Università Politecnica delle Marche ha ospitato la sperimentazione. Il Living Lab, visibile in **Figura 1**, è stato utilizzato come punto di riferimento sia per le prove in ambiente reale che per le versioni virtuali che sono state utilizzate nel presente studio. Il modello è stato modificato e adattato alle esigenze dello studio in modo da poter utilizzare le configurazioni sperimentali necessarie per l'analisi del comfort visivo.



Figura 1: Living Lab

2.2 Sviluppo dell'ambiente virtuale

Implementazione in Unity

Il programma utilizzato per modificare l'ambiente virtuale è Unity, software che è stato sviluppato da Unity Technologies ed è un motore di gioco (game engine) multiplatforma e un ambiente di sviluppo integrato (IDE) progettato per la creazione, la gestione e l'esecuzione di applicazioni interattive bidimensionali (2D), tridimensionali (3D), di realtà virtuale (VR)

e di realtà aumentata (AR). Le modifiche introdotte nel presente lavoro hanno riguardato principalmente la gestione delle condizioni di illuminazione, l'organizzazione delle attività sperimentali e l'implementazione delle logiche di interazione necessarie per guidare il partecipante durante l'esecuzione delle prove. La progettazione delle varie configurazioni sperimentali è stata la prima fase del lavoro. L'obiettivo era quello di consentire la variazione controllata delle condizioni di illuminazione senza alterare il contesto generale dell'esperienza. Nel virtuale sono stati inseriti otto pulsanti nel muro che consentivano di cambiare sia l'attività che la condizione di illuminazione toccandoli, come si vede in **Figura 2**, mentre nel reale durante il test un operatore modificava manualmente le condizioni di illuminazione. In Unity sono stati modificati diversi elementi della scena virtuale, tra cui le luci, le attività sperimentali e la posizione di queste ultime nello spazio. Questi interventi hanno permesso di costruire un ambiente virtuale il più possibile coerente con quello reale.



Figura 2 : Bottoni per modificare le condizioni di illuminazione nel virtuale

Sviluppo della Web Application

È stata creata una piattaforma web dedicata alla gestione dell'intero protocollo di prova per supportare lo svolgimento delle attività sperimentali. L'applicazione è stata sviluppata utilizzando il linguaggio HTML con lo scopo di automatizzare le diverse fasi dell'esperimento e garantire che tutti i partecipanti seguissero una procedura standard. La necessità di ridurre al minimo l'intervento dell'operatore durante le prove è emersa durante le fasi iniziali della progettazione. Infatti, una gestione manuale delle attività avrebbe potuto influenzare la durata delle attività e la successiva sincronizzazione con i dati fisiologici. Di conseguenza, la web app è stata sviluppata come un sistema in grado di gestire automaticamente la sequenza degli esperimenti. L'applicazione fornisce continuamente informazioni sullo stato del test al partecipante una volta avviata la sessione e controlla in modo automatico l'alternanza tra transizioni, compiti e questionari, rispettando le durate stabilite nel protocollo. Inoltre, l'interfaccia, visibile in **Figura 3**, consente l'inserimento delle informazioni identificative del partecipante e della sessione sperimentale, il che consente una gestione ordinata dei dati raccolti. È possibile registrare direttamente la propria risposta per ogni attività utilizzando i controlli specifici presenti nella schermata. La gestione temporale delle prove è una delle funzionalità più importanti dell'applicazione. Durante l'esperimento, è sempre visibile un timer centrale che mostra la fase attuale e il tempo residuo disponibile.

Figura 3 : Interfaccia della web app

Tale soluzione è stata introdotta per consentire al partecipante di orientarsi facilmente durante l'esecuzione delle attività. Al termine di ciascuna attività, al partecipante viene chiesto di esprimere una valutazione soggettiva riguardante la condizione di illuminazione chiedendogli nello specifico se è stata sufficiente per eseguire il compito. Per consentire la raccolta di dati soggettivi direttamente correlati alla configurazione luminosa specifica appena osservata, le risposte vengono registrate utilizzando una scala Likert a sette livelli. Il sistema include una serie di istruzioni vocali automatiche che guidano il partecipante attraverso le diverse fasi dell'esperimento, rendendo l'esperimento più facile da completare. Questa soluzione ha permesso di mantenere una maggiore uniformità procedurale tra i diversi test e di ridurre l'interazione diretta con l'operatore. In effetti, gli istanti di inizio e fine di ogni compito, questionario e fase di transizione vengono memorizzati, generando un file CSV esportabile al termine della sessione. Questo file funge da riferimento temporale utilizzato per sincronizzare le

attività del partecipante con i segnali fisiologici. Questa procedura ha consentito l'associazione di ogni componente del segnale EDA alla fase corrispondente del protocollo sperimentale.

Integrazione dell'ambiente virtuale in Spatial

Per rendere usufruibile l'ambiente virtuale costruito è stata utilizzata la piattaforma Spatial, un ambiente collaborativo immersivo che consente di pubblicare e rendere accessibili mondi virtuali sviluppati esternamente attraverso dispositivi VR compatibili. La necessità di avere una piattaforma facilmente accessibile e compatibile con il visore Meta Quest 3 utilizzato durante la sperimentazione è stata la principale motivazione alla scelta di utilizzare Spatial. Successivamente, l'ambiente virtuale creato in Unity è stato esportato e caricato all'interno di Spatial, rendendolo direttamente accessibile dal visore. Poiché il protocollo sperimentale era gestito dalla web app in HTML, era necessario che questa interfaccia fosse visibile anche con il visore. Per raggiungere questo obiettivo, è stata utilizzata la funzionalità di condivisione dello schermo che è presente sulla piattaforma Spatial. Attraverso questa funzione, il contenuto della web app veniva proiettato sullo schermo fisso all'interno dell'ambiente virtuale, posizionato in un punto specifico della scena e sempre visibile al partecipante. Quindi, il partecipante poteva osservare contemporaneamente sia l'ambiente virtuale che il pannello di controllo con il timer e le istruzioni operative durante l'esecuzione delle prove.

2.3 Strumentazione utilizzata

Gli strumenti principali utilizzati sono tre, destinati rispettivamente alla fruizione dell'ambiente virtuale, all'acquisizione di dati fisiologici e alla verifica delle condizioni di illuminazione. In particolare, la tecnologia utilizzata include:

- il visore Meta Quest 3, che viene utilizzato per esplorare l'ambiente virtuale immersivo;
- il dispositivo indossabile Empatica Embrace Plus utilizzato per raccogliere dati fisiologici;
- il sensore Shelly Blu Motion, utilizzato per monitorare i livelli di illuminazione in varie configurazioni sperimentali;

I dati ambientali, soggettivi e fisiologici sono stati integrati in un unico protocollo sperimentale grazie all'uso combinato di questi strumenti.

Meta Quest 3

Il visore Meta Quest 3, visibile in **Figura 4**, è stato utilizzato per accedere all'ambiente virtuale. Il visore consente all'utente di interagire con l'ambiente virtuale mantenendo un elevato livello di presenza e coinvolgimento percettivo grazie alla risoluzione elevata dei display integrati e al sistema di tracciamento dei movimenti. Nel presente studio, il visore è stato utilizzato solo per visualizzare il Living Lab virtuale attraverso la piattaforma Spatial. Nel corso degli esperimenti, il partecipante come precedente specificato è rimasto seduto nella medesima posizione che è stata utilizzata anche nelle prove nell'ambiente reale, il che ha ridotto gli effetti relativi al movimento e ha migliorato la comparazione tra le due condizioni di test.



Figura 4 : Visore Meta Quest 3

Empatica Embrace Plus

La raccolta di dati fisiologici è stata effettuata attraverso l'uso del dispositivo Empatica Embrace Plus, mostrato in **Figura 5**. Le principali specifiche tecniche del dispositivo sono riportate in **Tabella 1**. Il sensore viene indossato al polso e utilizza sensori integrati per registrare continuamente molteplici segnali fisiologici. L'attività elettrodermica (EDA), la temperatura cutanea, il segnale fotopletismografico (PPG) e i parametri cardiovascolari derivati sono tutti parametri acquisibili. Nello studio attuale, l'attenzione è stata principalmente rivolta all'attività elettrodermica perché questo fattore è considerato uno degli indicatori fisiologici più sensibili alle variazioni dello stato di attivazione psicofisiologica [14]. L'EDA è una misurazione indiretta dell'attività del sistema nervoso simpatico e viene spesso utilizzata negli studi che analizzano stress, attenzione, coinvolgimento emotivo ed esperienza immersiva [16]. Il dispositivo veniva posizionato al polso del partecipante per circa 15 minuti prima che ogni sessione sperimentale potesse iniziare. Tale intervallo è stato introdotto per facilitare la stabilizzazione del segnale fisiologico e ridurre le modifiche che derivano dal primo posizionamento del sensore. Al termine delle prove, i dati ottenuti

dalla piattaforma Empatica venivano esportati ed elaborati per l'analisi delle varie fasi sperimentali.



Figura 5 : Empatica Embrace Plus

Tabella 1: Specifiche Empatica Embrace Plus

Categoria	Specifiche del Dispositivo
Sensori Principali	EDA (Attività Elettrodermica), PPG (Fotopletismografia), Accelerometro 3D, Giroscopio, Sensore di Temperatura cutanea
Biomarker Digitali	Frequenza cardiaca (PR), Variabilità del PR, SpO2, Frequenza respiratoria, Sonno, Attività fisica, Arousal autonomo
Display	E-Ink always-on a basso consumo con vetro protettivo Corning Gorilla Glass 3
Connettività	Bluetooth 5.0 (BLE) per sincronizzazione con app dedicata e piattaforma cloud

Autonomia Batteria	Fino a 7 giorni di utilizzo continuo (ricarica completa in circa 90 minuti)
Dimensioni & Peso	Cassa: 40 mm x 38,5 mm x 11 mm - Peso: 40 grammi
Impermeabilità	Grado di protezione certificato IP67 (resistente ad acqua e polvere)
Certificazioni Mediche	Approvazione FDA (Classe II) e marcatura CE (Classe IIa) come dispositivo medico

Shelly Blu Motion

Il sensore Shelly Blu Motion, visibile in **Figura 6**, è stato utilizzato per monitorare le condizioni di illuminazione. Il dispositivo è stato utilizzato nel presente lavoro per verificare le condizioni luminose relative alle varie configurazioni sperimentali che sono state implementate all'interno del Living Lab. Il dispositivo ha consentito di quantificare le variazioni delle condizioni di illuminazione mediante la misurazione dell'illuminamento espresso in lux. Il lux è l'unità di misura dell'illuminamento definita dal Sistema Internazionale (SI). Rappresenta la quantità di flusso luminoso che colpisce una determinata superficie, equivalente a un lumen per metro quadrato ($1 \text{ lx} = 1 \text{ lm/m}^2$). A differenza di altre unità che misurano l'energia pura della luce (come i Watt), il lux è tarato sulla percezione visiva dell'occhio umano. Di conseguenza, permette di quantificare scientificamente quanto un ambiente (come il Living Lab) risulti effettivamente illuminato o buio nelle diverse configurazioni sperimentali.



Figura 6 : Shelly Blu Motion

2.4 Protocollo sperimentale

Disegno dello studio

L'obiettivo dello studio era quello di confrontare le risposte degli utenti durante l'esecuzione di attività in ambienti virtuali e reali in base a varie condizioni di illuminazione. Sono state assegnate due modalità sperimentali a ciascun partecipante:

- un ambiente di vita reale (Living Lab);
- un ambiente virtuale che è una replica immersiva del Living Lab.

La struttura sperimentale, le attività e le configurazioni luminose erano identiche per entrambe le modalità. Questa scelta è stata fatta per garantire la massima comparabilità tra le due condizioni e per ridurre l'impatto di variabili esterne che non hanno alcun rapporto diretto con l'obiettivo dello studio.

Configurazioni di illuminazione

L'esperimento è stato strutturato utilizzando tre diversi livelli di illuminazione modificando l'intensità luminosa dell'ambiente. Le configurazioni prese in considerazione sono state le seguenti:

- illuminazione completa, 147 lux
- un'illuminazione del 50% rispetto all'illuminazione totale, 125 lux
- nessuna illuminazione, 0 lux

L'obiettivo era esaminare come le varie condizioni luminose potessero influenzare le prestazioni degli utenti, la percezione soggettiva del comfort visivo e le risposte fisiologiche registrate durante l'esecuzione delle attività. Per evitare che l'effetto osservato fosse legato esclusivamente alla tipologia di compito svolto, i livelli di illuminazione sono stati distribuiti in modo rotazionale in modo che ciascuna attività fosse esposta a tutte le condizioni di luce, le configurazioni luminose sono mostrate in **Tabella 2**.

Tabella 2 : Configurazioni Luminose

Configurazioni	Task 1	Task 2	Task 3
Sessione 1	100%	50%	0%
Sessione 2	50%	0%	100%
Sessione 3	0%	100%	50%

Questa struttura ha permesso di monitorare la risposta dei partecipanti in base alle combinazioni tra compiti e livelli di illuminazione al fine di ridurre gli effetti di apprendimento o di affaticamento correlati a un'attività particolare.

Attività sperimentali

Sono state progettate tre attività per valutare il comfort visivo in varie condizioni di illuminazione. L'obiettivo della selezione delle attività era

quello di includere una varietà di processi visivi che consentissero di osservare eventuali variazioni nelle prestazioni e nelle risposte fisiologiche al cambiamento dell'illuminazione.

Attività 1 – Lettura e comprensione del testo

La prima attività prevedeva la lettura di un breve testo, mostrato in **Figura 7**. Successivamente, veniva posta una domanda di comprensione che richiedeva risposte multiple. L'obiettivo era quello di valutare la capacità del partecipante di elaborare informazioni scritte in vari ambienti illuminati [8]. Per ridurre gli effetti di apprendimento tra una prova e l'altra, per ciascuna sessione sono stati utilizzati testi diversi ma con un livello di difficoltà simile.

Comprensione del testo

Vuoi migliorare la qualità del tuo sonno? Scegliere il momento giusto per dormire può fare la differenza. Alcuni studi suggeriscono che addormentarsi tra le 21:00 e le 23:00, oppure durante brevi periodi di riposo nel pomeriggio, può aiutare il corpo a recuperare più facilmente. Durante questi momenti della giornata, le persone tendono ad avere livelli di energia più bassi e uno stato mentale più rilassato. Queste condizioni rendono più facile addormentarsi e possono contribuire a migliorare la qualità del sonno.

Scegli l'affermazione coerente con il testo.

- A. Dormire nel pomeriggio è sempre dannoso.
- B. La qualità del sonno può dipendere dal momento in cui ci si addormenta.
- C. Tutte le persone devono dormire almeno otto ore ogni giorno.
- D. Dormire solo di notte è l'unico modo per riposare bene.

Figura 7: Attività di lettura e comprensione del testo

Attività 2 – Individuazione del quadratino più scuro

La seconda attività richiedeva ai partecipanti di osservare una sequenza di quadrati che avevano diverse tonalità di grigio, mostrati in **Figura 8**, e di determinare quale quadratino fosse il più scuro. Questo compito ha l'obiettivo di esaminare questioni relative alla percezione visiva e alla discriminazione cromatica in diversi tipi di illuminazione. Infatti, la ricerca

ha sottolineato come la percezione dei colori e delle differenze cromatiche possa cambiare significativamente negli ambienti virtuali [10].



Figura 8: Attività sulla scelta dei colori in scala di grigi

Attività 3 – Individuazione del simbolo differente

La terza attività prevedeva l'individuazione di un simbolo diverso all'interno di un gruppo di elementi geometrici simili, mostrati in **Figura 9**. In questo compito sono necessari processi di riconoscimento rapido delle differenze percettive, ricerca visiva e attenzione selettiva. L'attività è stata scelta per introdurre una componente orientata all'analisi visiva immediata, al fine di osservare gli effetti delle condizioni luminose sulla rapidità e sull'accuratezza dell'elaborazione percettiva; la qualità dell'illuminazione, infatti, modifica la sensibilità al contrasto visivo e il carico cognitivo richiesto per discriminare le forme geometriche.



Figura 9: Attività sulla scelta del simbolo diverso

Struttura temporale delle sessioni

Tutte le sessioni sperimentali sono state organizzate in modo identico sia nell'ambiente reale che nell'ambiente virtuale. L'obiettivo della definizione di una sequenza temporale fissa era garantire la comparabilità tra le varie prove e facilitare la sincronizzazione successiva dei dati fisiologici acquisiti con Empatica Embrace Plus. Tre attività sperimentali, intervallate da fasi di transizione e da brevi questionari di valutazione soggettiva, si svolgevano in ogni sessione. Le transizioni aiutavano i partecipanti a prepararsi all'attività successiva e, nel caso dell'ambiente virtuale attraverso i bottoni, a caricare la nuova configurazione sperimentale. Il tempo totale di ciascuna sessione è stato di 240 secondi, quattro minuti. La prima attività, rispetto alle altre, richiedeva la lettura e la comprensione di un testo. Invece, le attività successive richiedevano operazioni percettive più veloci, quindi erano

limitate a 30 secondi. Con la presenza di una struttura temporale costante, mostrata in **Figura 10**, è stato possibile confrontare direttamente le risposte ottenute in varie condizioni di illuminazione.

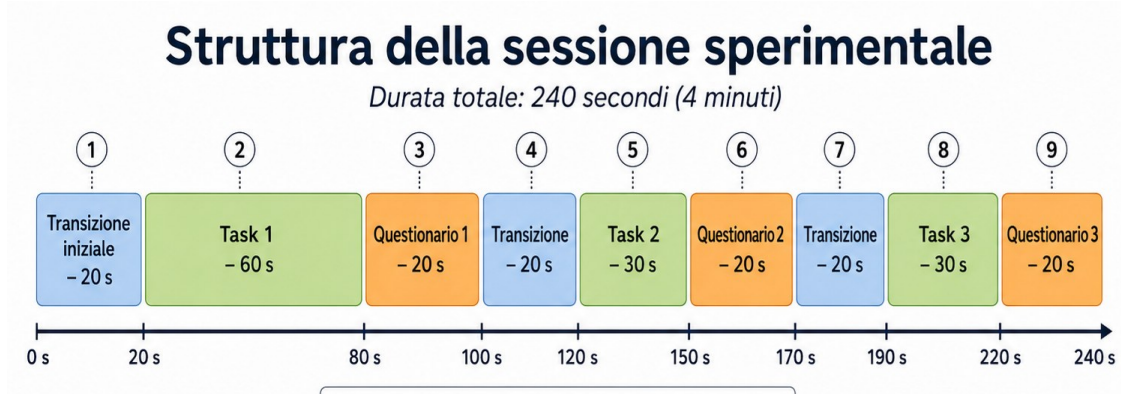


Figura 10: Struttura della sessione sperimentale

Inoltre, l'utilizzo della web app per registrare automaticamente i tempi di inizio e fine di ogni fase ha reso possibile l'associazione precisa tra il protocollo sperimentale e i dati fisiologici raccolti durante la prova. Le sessioni per ciascun ambiente (reale e virtuale) da ripetere 3 volte come precedentemente già detto per svolgere tutte le attività con tutte e 3 le condizioni di illuminazione.

2.5 Questionari

Struttura dei questionari

Nello studio è stato previsto di raccogliere dati soggettivi attraverso una serie di questionari distribuiti nelle varie fasi dell'esperimento, oltre alle misure fisiologiche. Nelle ricerche sul comfort visivo, i questionari sono una pratica comune per raccogliere dati direttamente legati alle percezioni degli utenti e alla qualità dell'esperienza vissuta [2]. Nel presente lavoro è stata utilizzata una struttura composta da tre distinte categorie di sondaggi:

- Questionario pre-test;
- Questionari intra-test;

- Questionari post-test;

È stato possibile attraverso questa organizzazione raccogliere informazioni relative alle caratteristiche iniziali del partecipante e alle valutazioni soggettive che sono state formulate al termine delle prove.

Questionario pre-test

Prima dell'inizio dell'esperimento ogni partecipante ha compilato un breve questionario preliminare finalizzato alla raccolta di informazioni anagrafiche e contestuali.

In particolare, sono state registrate informazioni relative a:

- età;
- occupazione;
- tempo medio trascorso quotidianamente davanti a dispositivi elettronici;
- precedenti esperienze con sistemi di realtà virtuale.

Sono inoltre state inserite alcune domande volte a verificare lo stato psicofisico del partecipante immediatamente prima dell'esperimento, con particolare attenzione alla presenza di affaticamento visivo o mal di testa. La raccolta di queste informazioni ha consentito di identificare eventuali fattori che avrebbero potuto influenzare le risposte soggettive o fisiologiche osservate durante la prova.

Questionari intra-test

Durante il test subito dopo l'attività veniva ogni volta richiesto all'utente se reputava sufficiente l'illuminazione per poter svolgere l'attività che aveva appena eseguito. Considerata la durata del test, si è scelto di somministrare questa domanda immediatamente al termine dell'attività, così da raccogliere

risposte il più possibile accurate, riducendo il rischio di imprecisioni dovute al tempo trascorso. Queste risposte venivano salvate direttamente nel file csv della web app html così da avere queste ultime collegate all'attività appena svolta.

Questionari post-test

Al termine di ciascuna modalità sperimentale, [virtuale](#) e [reale](#), è stato somministrato un questionario finalizzato alla valutazione dell'esperienza percepita dal partecipante. La struttura generale è stata definita prendendo come riferimento le dimensioni maggiormente utilizzate negli studi dedicati alla valutazione dell'esperienza utente in ambienti immersivi e delle condizioni di illuminazione indoor [2]. Le domande sono state organizzate attorno a tre principali dimensioni:

- comfort visivo;
- coinvolgimento percepito durante l'esperienza;
- livello di attenzione e concentrazione.

Questa suddivisione consente una valutazione più completa dell'esperienza sperimentata dal soggetto, distinguendo la componente percettiva da quella cognitiva ed emotiva. Oltre alle valutazioni generali, ai partecipanti è stato chiesto di indicare quante configurazioni luminose fossero state viste durante il test e quanto di queste configurazioni fossero state ritenute visivamente confortevoli. Inoltre, sono state inserite domande relative all'eventuale comparsa di sintomi di disagio, come vertigini, nausea, affaticamento visivo o mal di testa [19]. Questi sintomi sono stati spesso presi in considerazione negli studi che prevedono l'utilizzo di visori immersivi.

Scala di valutazione

La necessità di aumentare la sensibilità nell'identificazione delle differenze percettive tra le varie condizioni sperimentali ha portato alla scelta di utilizzare sette categorie di risposte. Infatti, la ricerca ha sottolineato come il formato della scala possa avere un impatto sulla qualità delle informazioni raccolte e sulla capacità di distinguere tra diversi livelli di comfort percepito [3]. L'utilizzo di una scala da 1 a 7 ha consentito di mantenere una struttura semplice per il partecipante. Successivamente, le valutazioni ottenute dai questionari sono state utilizzate per confrontare le percezioni soggettive dei partecipanti con i dati fisiologici registrati durante le varie fasi del protocollo sperimentale.

2.6 Acquisizione ed elaborazione dei dati

Acquisizione dei dati fisiologici

I partecipanti al test hanno indossato il dispositivo Empatica Embrace Plus per registrare continuamente i loro segnali fisiologici. Al completamento delle prove, i dati registrati sono stati esportati dalla piattaforma Empatica. Sebbene il dispositivo registri molti parametri fisiologici, questo studio si è concentrato esclusivamente sull'attività elettrodermica (EDA). L'attività elettrodermica è riconosciuta in molti studi come uno dei biomarcatori più sensibili alle variazioni dello stato di attivazione psicofisiologica e al comfort che le persone percepiscono in ambienti virtuali [16].

Conversione ed esportazione dei dati

Inizialmente, i file creati dal dispositivo Empatica sono stati esportati in formato .avro. Per consentire la successiva elaborazione con strumenti di analisi dati, questi file sono stati convertiti in formato CSV mantenendo i timestamp originali associati a ciascuna misurazione. Grazie a questa

procedura, è stato possibile creare una struttura dati facilmente integrabile con le informazioni temporali prodotte dall'applicazione Web progettata per gestire il protocollo sperimentale.

Sincronizzazione con il protocollo sperimentale

Parallelamente ai dati fisiologici, la web app registrava automaticamente gli istanti di inizio e fine di ogni fase sperimentale. Per ciascuna sessione veniva generato un file CSV contenente:

- identificativo del partecipante;
- modalità sperimentale;
- sessione;
- fase del protocollo;
- timestamp di inizio;
- timestamp di fine;
- durata.

La disponibilità di tali informazioni ha consentito di sincronizzare il segnale EDA con le attività svolte dal partecipante durante l'esperimento. Questa procedura ha permesso di collegare ogni campione fisiologico alla fase sperimentale corrispondente, distinguendo tra transizioni, compiti e questionari. La sincronizzazione è una fase importante dell'analisi perché consente di separare le porzioni di segnale che sono effettivamente correlate alle attività dello studio.

2.7 Ottimizzazione del protocollo e test pilota

Una fase preliminare di test e validazione è seguita dalla definizione della configurazione finale del protocollo sperimentale. Le prime attività dell'esperimento hanno richiesto ai partecipanti di muoversi tra varie aree del

Living Lab, il percorso è visibile in **Figura 11**, sia nella condizione reale che nella versione virtuale corrispondente.

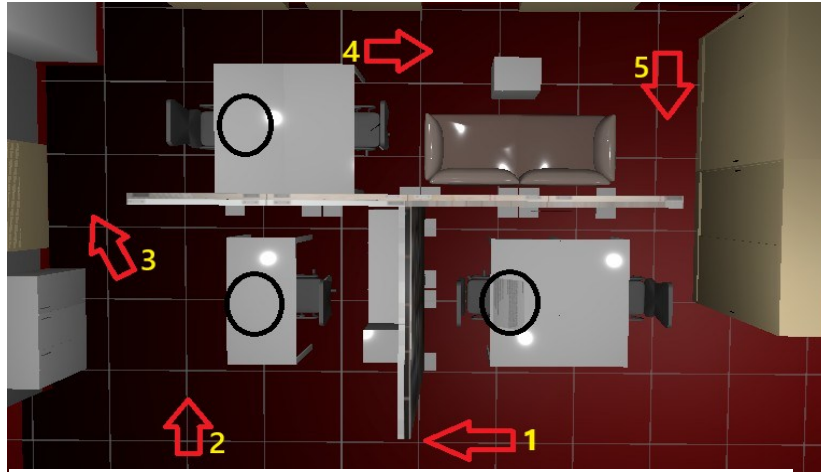


Figura 11: Living lab con test in movimento

Il partecipante si trovava davanti alla prima attività di lettura nella zona studio. Una volta conclusa, rispondeva al questionario e poi aveva 30 secondi di transizione per spostarsi seguendo il tracciato 1-2. Una volta trovatosi davanti alla seconda attività, finita quest'ultima rispondeva alla domanda per il questionario e poi aveva 30 secondi per spostarsi all'attività 3 seguendo il tracciato 2-3. Svoltata quest'ultima, doveva rispondere alla domanda per il questionario e poi successivamente procedere in senso orario seguendo il percorso 4-5 e tornare nel punto della prima attività. Tutto questo per 3 giri completi in modo da svolgere tutte le attività con condizioni di illuminamento differenti. Le luci e le attività nel virtuale venivano cambiate automaticamente attraverso dei box trigger in corrispondenza dei muri divisorii che una volta attraversati le facevano cambiare. Un box trigger in Unity è un'area invisibile, solitamente a forma di cubo, che rileva quando il personaggio o altri oggetti vi entrano dentro. Funziona come un interruttore, non blocca il movimento, ma fa scattare un evento o un'azione nell'ambiente nel momento esatto del contatto. L'obiettivo di questa soluzione era simulare

una situazione più simile all'esperienza quotidiana e aumentare il livello di interazione con l'ambiente. Tuttavia, alcune criticità sono emerse durante le prove preliminari, rendendo necessaria una revisione della procedura. Un partecipante ha espresso un forte disagio durante l'utilizzo dell'ambiente virtuale durante una sessione pilota, i dati dell'Empatica Embrace Plus hanno mostrato un aumento notevole dell'attività elettrodermica. La quantità di risposta fisiologica osservata era notevolmente superiore alle variazioni previste e sembrava essere principalmente correlata al fattore di movimento all'interno dello scenario immersivo. Questo comportamento corrisponde a ricerche in letteratura che sottolineano come gli spostamenti in ambienti virtuali possano causare cybersickness e avere un impatto significativo sui parametri fisiologici degli utenti [19]. Il protocollo sperimentale doveva essere modificato perché l'obiettivo dello studio era analizzare il comfort visivo piuttosto che gli effetti dello spostamento in realtà virtuale. Pertanto, nella versione definitiva, tutte le operazioni vengono eseguite da una posizione fissa sia nell'ambiente reale che nell'ambiente virtuale. La posizione scelta è quella dello studio, mostrata in **Figura 12**.

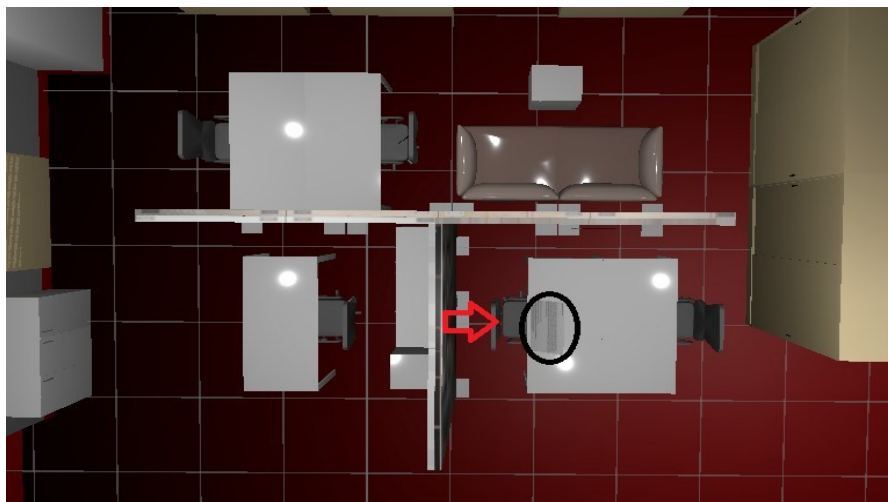


Figura 12: Living Lab con test da fermo

Questa scelta ha migliorato la comparabilità delle misurazioni fisiologiche raccolte durante le prove e ha ridotto l'influenza di variabili non direttamente correlate all'oggetto della ricerca.

2.8 Filtraggio del segnale EDA e costruzione dei grafici

Dopo la sincronizzazione, il segnale EDA è stato sottoposto a una fase di pre-processing per ridurre il rumore e le fluttuazioni ad alta frequenza. L'approccio dello studio di riferimento [20] è stato utilizzato per creare la procedura di elaborazione e da lì sono state derivate le principali decisioni metodologiche per il trattamento del segnale. In particolare, è stato utilizzato un filtro passa-basso Butterworth di primo ordine con frequenza di taglio pari a 1.5 Hz, al fine di mantenere l'andamento fisiologico generale del segnale ed eliminare le oscillazioni ad alta frequenza dovute al rumore di misura. Ciò è stato fatto eliminando contemporaneamente le oscillazioni rapide causate dal rumore di misura o da piccole perturbazioni non rilevanti per l'esame. Un filtro Butterworth consente una rappresentazione più stabile e comprensibile dell'attività elettrodermica mantenendo le variazioni lente associate alle modifiche dello stato psicofisico del soggetto. Successivamente è stata calcolata la derivata del segnale filtrato, utilizzata per evidenziare le variazioni della pendenza dell'EDA. Attraverso un algoritmo di rilevamento degli attraversamenti dello zero (zero-crossing detection) sono stati identificati l'inizio (onset) e la fine (offset) di ciascun evento elettrodermico, corrispondenti rispettivamente ai minimi e ai massimi locali del segnale. Una volta individuati tali punti, per ogni evento sono state estratte tre caratteristiche principali [20], adottate anche nel presente lavoro, Event Duration, definita come l'intervallo temporale tra offset e onset; Event Amplitude, definita come la differenza tra il valore di conducibilità cutanea all'offset e quello all'onset; Event Slope, calcolata come rapporto tra

ampiezza e durata dell'evento (Amplitude/Duration), rappresentando quindi la velocità media di variazione della risposta elettrodermica. Queste tre grandezze, mostrate in **Figura 13** sono state successivamente utilizzate per confrontare le diverse condizioni sperimentali e calcolare i valori medi relativi a ciascuna attività e condizione di illuminazione. Una volta terminate le operazioni di filtraggio e sincronizzazione, il segnale EDA è stato suddiviso in diverse sessioni sperimentali previste dal protocollo. Sono stati creati grafici separati per ogni partecipante che mostravano le prove svolte sia nell'ambiente virtuale che nell'ambiente reale. All'interno di ciascun grafico sono state evidenziate le varie fasi del protocollo, distinguendo le transizioni, le attività e i questionari attraverso aree colorate specifiche. Con questa rappresentazione, è stato possibile osservare l'evoluzione temporale dell'attività elettrodermica durante l'intero svolgimento della sessione e trovare eventuali variazioni correlate alle varie condizioni di illuminazione e alle attività suggerite. I grafici che sono stati realizzati fungono da base per le analisi che verranno presentate nel capitolo successivo dedicato ai risultati.

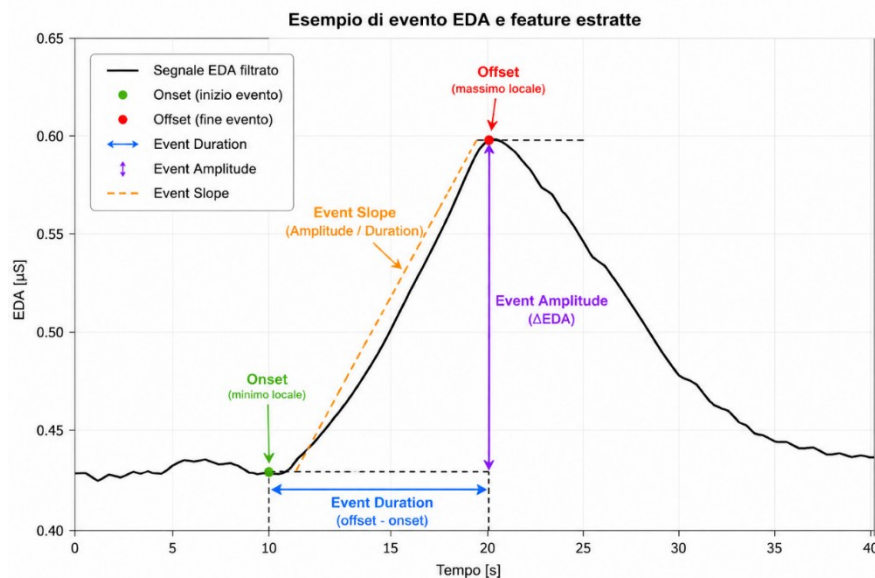


Figura 13: Schema di estrazione delle feature di un evento EDA utilizzate nell'analisi.

3. Risultati e Discussione

3.1 Evidenze emerse durante il test pilota

Il segnale EDA acquisito durante la sessione 2 in ambiente reale è rappresentato nella Figura 14. Il segnale varia tra $0,125 \mu\text{S}$ e $0,170 \mu\text{S}$ durante tutte e tre le attività, senza mostrare incrementi improvvisi o interruzioni della registrazione. Le oscillazioni che sono state osservate corrispondono alle varie fasi del protocollo sperimentale.

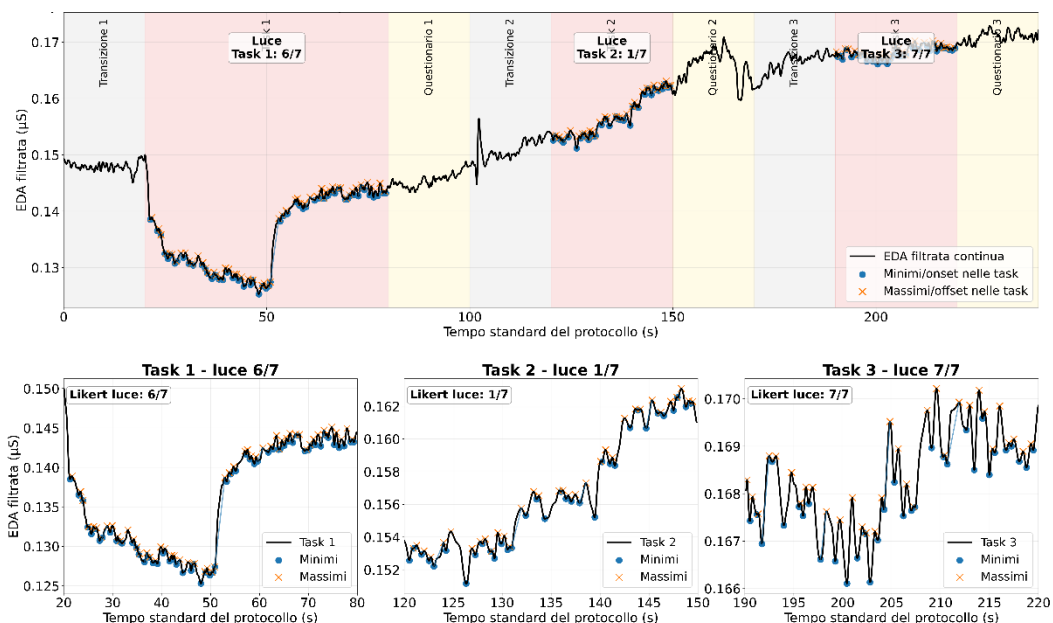


Figura 14: Segnale EDA della sessione 2 nel reale del test pilota

Il segnale EDA registrato durante una sessione in realtà virtuale è mostrato nella **Figura 15**. Il segnale rimane tra circa $0,209 \mu\text{S}$ e $0,236 \mu\text{S}$; nella parte finale della sessione si vede un aumento della conducibilità cutanea di circa $0,012 \mu\text{S}$, che viene riportato come osservazione qualitativa ma non ha alcun significato statistico. La sessione sperimentale è stata interrotta, come mostrato nella **Figura 16**. Il partecipante ha chiesto di interrompere la prova dopo la fase iniziale dell'acquisizione perché ha avvertito molta nausea

durante l'utilizzo del visore. È per questo motivo che le tre attività sperimentali non sono state completate.

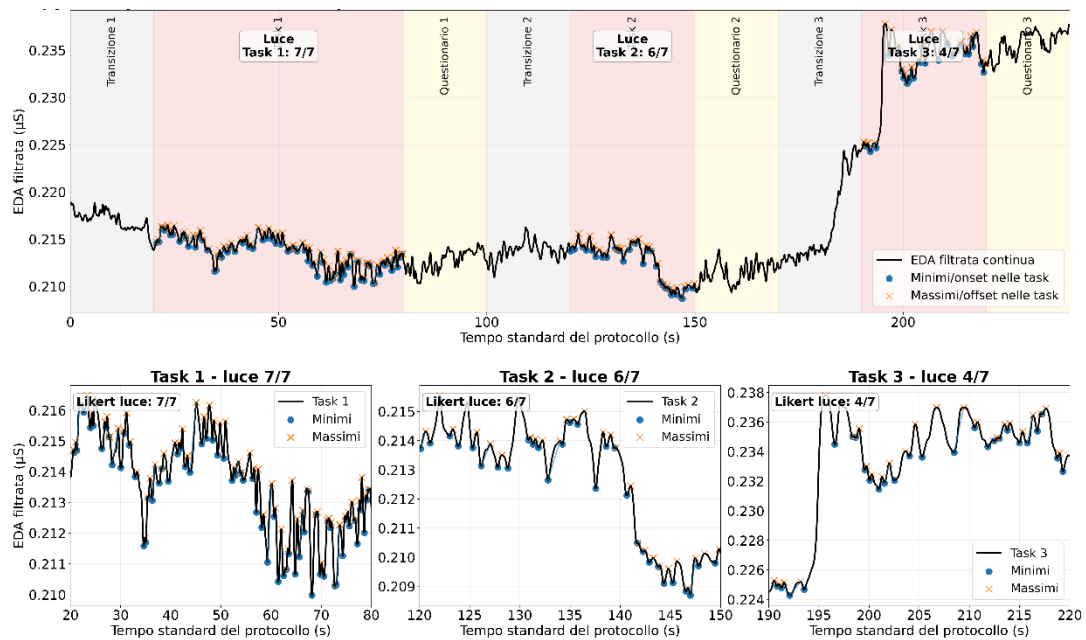


Figura 15: Segnale EDA della sessione 2 nel virtuale del test pilota

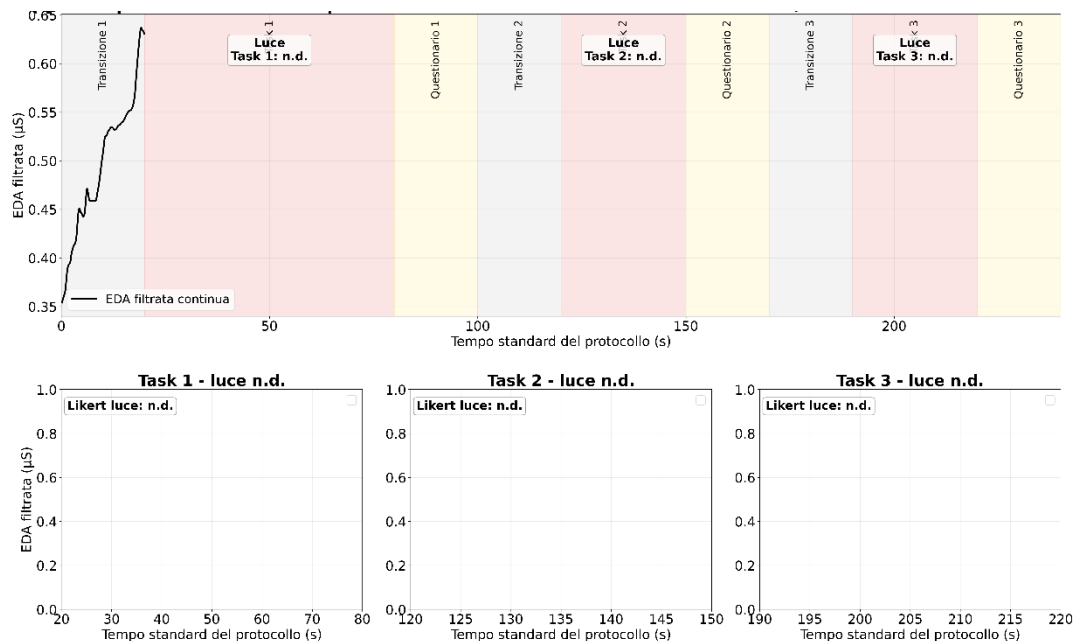


Figura 16: Segnale EDA della sessione 3 nel virtuale del test pilota interrotto
Al termine della prova, seppur il partecipante non abbia concluso il test, è stato deciso comunque di fargli compilare il questionario, alla domanda sui

sintomi osservati durante l'esperienza in realtà virtuale è stato assegnato il punteggio massimo della scala Likert (7/7), indicando una condizione di forte disagio.

3.2 Analisi del segnale EDA di un partecipante

3.2.1 Valutazione soggettiva dell'esperienza

Non solo l'analisi fisiologica del segnale EDA è stata presa in considerazione, ma anche le risposte dei partecipanti ai questionari compilati dopo la prova sperimentale [21]. L'obiettivo era confrontare la risposta fisiologica con la percezione soggettiva dell'esperienza. Il questionario pre-test ha mostrato che il partecipante utilizza dispositivi con schermi per 2–5 ore al giorno e aveva già sperimentato la realtà virtuale solo occasionalmente. Il partecipante ha indicato condizioni iniziali favorevoli allo svolgimento dell'esperimento riportando un livello molto contenuto di affaticamento visivo (2/7) e nessun mal di testa prima dell'inizio della prova. Nella VR l'esperienza è stata valutata dall'utente positivamente, con un punteggio di 6/7 sia per la piacevolezza che per il coinvolgimento, e un punteggio di 7/7 per il livello di concentrazione. È stato assegnato un punteggio di 2/7 per quanto riguarda l'eventuale insorgenza di sintomi da cybersickness o affaticamento, specificando di non aver avvertito alcun disturbo. Nel reale l'esperienza è stata valutata dall'utente ancora più positivamente rispetto alla modalità virtuale, ottenendo 7/7 per la piacevolezza e il coinvolgimento e 6/7 per il livello di concentrazione. Anche in questo caso, non sono stati riportati sintomi significativi (1/7). Infine, il partecipante ha dato un punteggio di 6/7 alla domanda sulla comparabilità delle due modalità sperimentali, indicando che l'esperienza in realtà virtuale e quella in ambiente reale sono molto simili.

3.2.2 Analisi statistica del singolo partecipante

È stato effettuato un confronto tra le caratteristiche estratte dalle risposte elettrodermiche utilizzando il test di Mann-Whitney U [23], considerando separatamente ogni compito e livello di illuminamento, allo scopo di determinare se le discrepanze osservate nei grafici tra ambiente reale e realtà virtuale fossero supportate da prove statistiche. Nel complesso, i confronti non hanno mostrato differenze statisticamente significative ($p > 0,05$), i risultati sono visibili nella **Tabella 3**, suggerendo che per il partecipante analizzato, le risposte fisiologiche risultano sostanzialmente simili tra l'ambiente reale e quello virtuale. L'unica eccezione è stata osservata durante l'attività 1 nella condizione di illuminamento al 100%. L'ampiezza media degli eventi elettrodermici (Event Amplitude) e la pendenza media della fase ascendente (Event Slope) hanno mostrato differenze statisticamente significative tra le due modalità sperimentali.

Tabella 3: Analisi dei p-value del singolo partecipante

Task	Illuminamento	Event Duration	Event Amplitude	Event Slope
Task 1	100%	> 0,05	< 0,05	< 0,05
Task 1	50%	> 0,05	> 0,05	> 0,05
Task 1	0%	> 0,05	> 0,05	> 0,05
Task 2	100%	> 0,05	> 0,05	> 0,05
Task 2	50%	> 0,05	> 0,05	> 0,05
Task 2	0%	> 0,05	> 0,05	> 0,05

Task	Illuminamento	Event Duration	Event Amplitude	Event Slope
Task 3	100%	> 0,05	> 0,05	> 0,05
Task 3	50%	> 0,05	> 0,05	> 0,05
Task 3	0%	> 0,05	> 0,05	> 0,05

3.3 Analisi complessiva sul totale dei partecipanti

Dopo l'analisi del singolo partecipante, è stata eseguita una valutazione aggregata che ha preso in considerazione l'intero campione sperimentale di otto partecipanti. L'obiettivo di questa analisi è determinare se le tendenze individuali osservate siano confermate utilizzando la media dei soggetti e valutare la presenza di eventuali differenze sistematiche tra gli ambienti virtuali e reali. Per questo motivo, sono stati trovati il numero medio di eventi, la durata media degli eventi, l'ampiezza media e la pendenza media della risposta elettrodermica dal segnale EDA per ciascuna combinazione tra compito e livello di illuminamento. I valori sono stati calcolati sia per gli ambienti virtuali che per quelli reali. Le **Figure 16-17-18** seguenti mostrano il confronto generale tra gli ambienti reali e virtuali prendendo in considerazione tutte le combinazioni sperimentali.

3.3.1 Andamento medio delle feature EDA

I valori per la durata media degli eventi, mostrati in **Figura 17**, sono abbastanza omogenei tra reale e virtuale. Sebbene le barre di errore indichino un certo grado di variabilità tra i partecipanti, non sono evidenti distinzioni visibili tra le due modalità. Questo indica che il tipo di ambiente utilizzato non ha avuto un impatto significativo sulla durata delle risposte

elettrodermiche. L'ampiezza media degli eventi, visibile in **Figura 18**, mostra differenze più evidenti. Il valore medio è più elevato in ambiente virtuale in alcune circostanze, in particolare quando l'attività 2 è impostata al zero per cento e l'attività 3 è impostata al 100% e al 50%. Tuttavia, la presenza di intervalli di variabilità parzialmente sovrapposti indica che è necessario utilizzare l'analisi statistica per identificare tali differenze. La pendenza media degli eventi, rappresentata in **Figura 19**, mostra azioni simili. In particolare, nell'attività 3, la modalità virtuale presenta valori di slope superiori in tutte le condizioni di illuminazione rispetto all'ambiente reale. Questo metodo potrebbe indicare una maggiore rapidità di attivazione fisiologica nelle attività di discriminazione visiva in ambiente virtuale, ma anche in questo caso l'interpretazione richiede il supporto dei p-value. Nel complesso, l'analisi sottolinea la notevole somiglianza tra gli ambienti virtuali e reali. Le differenze che sono state osservate sembrano non essere distribuite uniformemente su tutte le attività, sembrano essere più evidenti nelle caratteristiche di ampiezza e pendenza, che sono le caratteristiche più sensibili alle variazioni tra le modalità sperimentali rispetto alla durata media degli eventi.

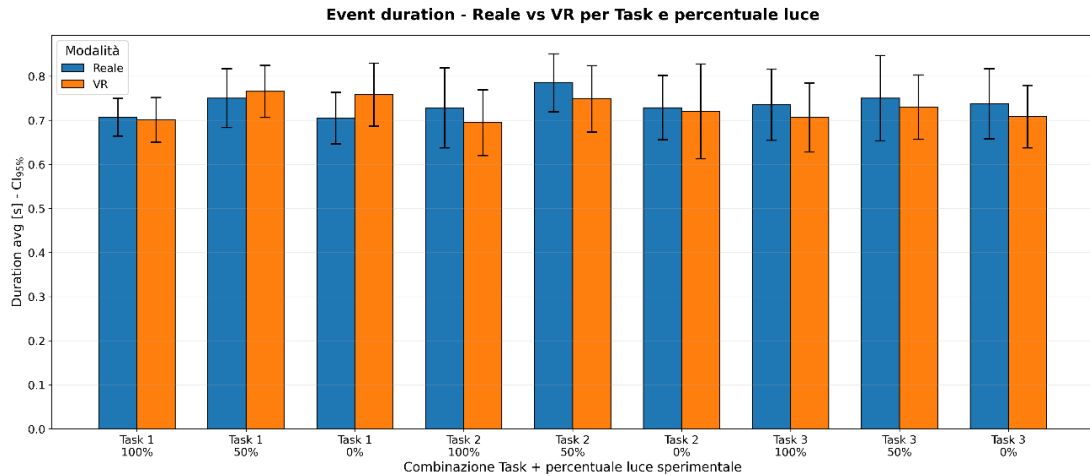


Figura 17: Durata degli eventi reale vs vr per attività e percentuale luce

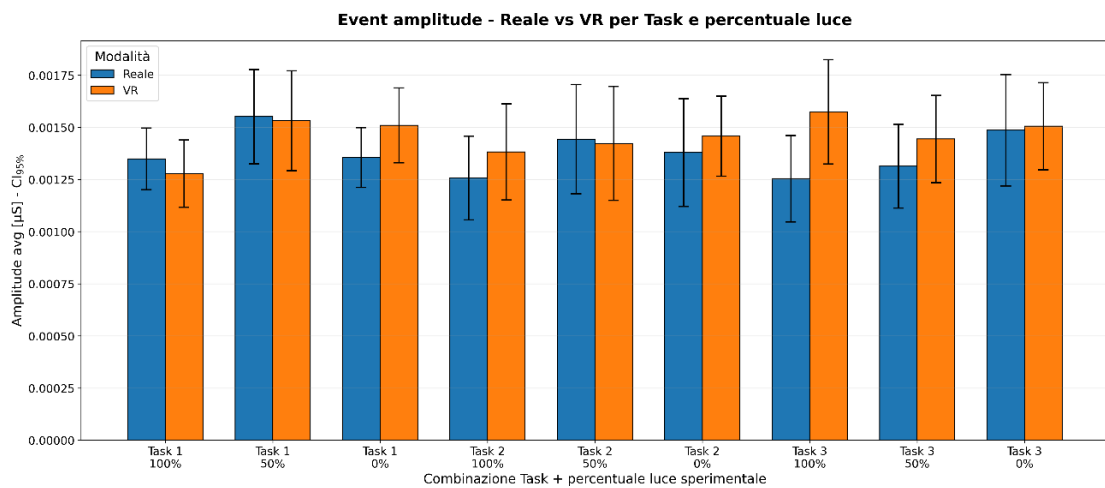


Figura 18: Ampiezza degli eventi reale vs vr per attività e percentuale luce

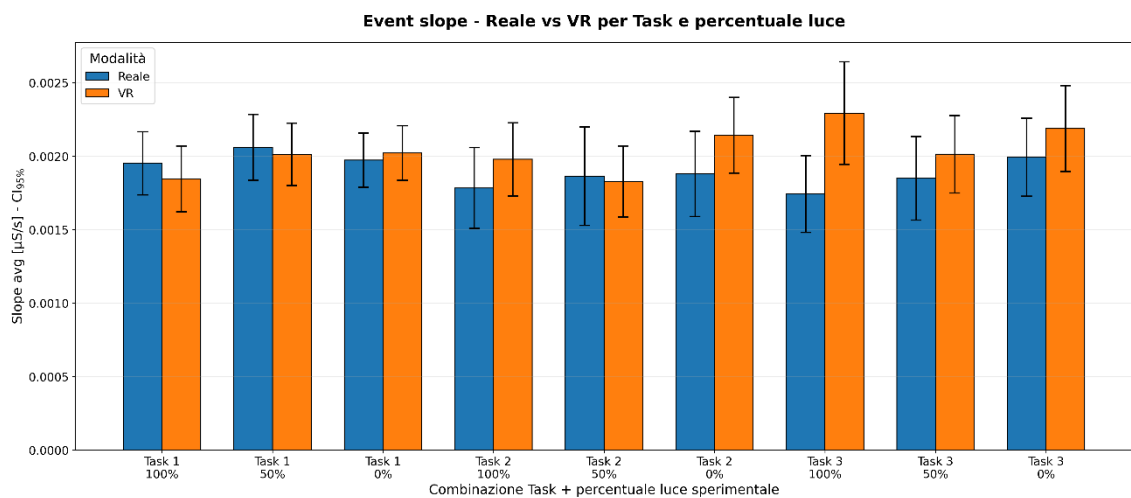


Figura 19: Pendenza degli eventi reale vs vr per attività e percentuale luce

3.3.2 Analisi statistica del campione totale sugli 8 partecipanti

È stato utilizzato il test di Wilcoxon [24] sul totale degli 8 partecipanti per confrontare l'ambiente reale con la realtà virtuale e per determinare se le variazioni osservate a livello descrittivo fossero statisticamente significative. La tabella seguente mostra come la maggior parte dei confronti non ha mostrato differenze statisticamente significative ($p > 0,05$). In nessuna delle condizioni sperimentali considerate, le caratteristiche Event Amplitude e Event Duration non hanno mostrato differenze significative. Solo l'attività 3 con illuminamento al 100% ha mostrato una differenza statisticamente significativa per la feature Event Slope ($p < 0,05$). La pendenza media delle risposte elettrodermiche in questa configurazione è stata maggiore nell'ambiente virtuale rispetto all'ambiente reale, indicando una risposta fisiologica che si manifesta con un'attivazione più rapida durante l'esecuzione delle attività in realtà virtuale. Nel complesso, i risultati riportati in **Tabella 4** mostrano che le risposte elettrodermiche del protocollo sperimentale erano generalmente simili tra gli ambienti reali e virtuali.

Tabella 4: Analisi dei p-value degli 8 partecipanti

Task	Illuminamento	Event Duration	Event Amplitude	Event Slope
Task 1	100%	> 0,05	> 0,05	> 0,05
Task 1	50%	> 0,05	> 0,05	> 0,05
Task 1	0%	> 0,05	> 0,05	> 0,05
Task 2	100%	> 0,05	> 0,05	> 0,05
Task 2	50%	> 0,05	> 0,05	> 0,05
Task 2	0%	> 0,05	> 0,05	> 0,05

Task	Illuminamento	Event Duration	Event Amplitude	Event Slope
Task 3	100%	> 0,05	> 0,05	< 0,05
Task 3	50%	> 0,05	> 0,05	> 0,05
Task 3	0%	> 0,05	> 0,05	> 0,05

Per l'analisi delle valutazioni soggettive, è stata determinata la media dei punteggi degli otto partecipanti per ciascuna domanda del questionario. Per confrontare l'andamento complessivo delle percezioni soggettive nelle due condizioni sperimentali, le medie sono state calcolate separatamente per le prove svolte in ambiente reale e in realtà virtuale. La domanda sulla somiglianza tra ambiente virtuale e ambiente reale è stata presentata solo al termine dell'esperienza in realtà virtuale quindi non è presente una risposta corrispondente per le circostanze reali. Tali valori sono stati riportati nella **Tabella 5**.

Tabella 5: Analisi della media di tutti i partecipanti delle risposte soggettive date ai questionari

Domanda	VR	Reale
Configurazioni di luce individuate	2,88	3,00
Configurazioni giudicate confortevoli	2,00	3,00
Esperienza piacevole (1–7)	5,75	6,25
Coinvolgimento (1–7)	6,50	6,75
Concentrazione (1–7)	6,38	6,13
Sintomi percepiti (1–7)	1,75	1,00

Domanda	VR	Reale
Somiglianza tra VR e reale (1–7)	5,25	—

La domanda sull'adeguatezza dell'illuminazione come precedentemente approfondito è stata richiesta intra-test. Successivamente sugli otto partecipanti è stata calcolata la media dei punteggi per ciascuna attività e livello di illuminazione. La **Tabella 6** presenta le medie che consentono di confrontare la percezione soggettiva dell'illuminazione tra l'ambiente reale e la realtà virtuale in vari contesti sperimentali.

Tabella 6: Media delle valutazioni soggettive relative all'adeguatezza dell'illuminazione per ciascuna attività e livello di illuminamento, confrontando ambiente reale e realtà virtuale (n = 8).

Task	Illuminamento	VR	Reale
Task 1	100%	6,00	6,86
Task 1	50%	5,71	6,14
Task 1	0%	2,43	3,86
Task 2	100%	5,29	6,71
Task 2	50%	5,71	6,71
Task 2	0%	3,43	2,71
Task 3	100%	6,29	6,71
Task 3	50%	6,29	6,29
Task 3	0%	3,29	4,17

3.4 Discussione dei risultati

L'obiettivo del presente studio era esaminare la possibilità di utilizzare un ambiente virtuale immersivo come strumento per l'analisi del comfort visivo, confrontando le risposte fisiologiche e soggettive ottenute durante l'esecuzione di attività simili in un ambiente reale e nella loro replica virtuale. In fase preliminare dell'esperimento è già emersa una prima indicazione. Il test pilota ha dimostrato che il fattore di movimento nell'ambiente virtuale potesse essere una variabile confondente importante. La necessità di modificare il protocollo sperimentale è diventata evidente a causa dell'aumento dell'attività elettrodermica osservata durante questa prova, insieme alla comparsa di sintomi associati. Il movimento in ambienti immersivi è stato identificato come uno dei principali fattori associati all'insorgenza della cybersickness e all'aumento dell'attivazione fisiologica [19]. Il risultato è stato notevolmente ridotto con l'adozione del protocollo finale, che si basa sull'esecuzione di attività in posizione seduta e mantenendo la stessa postura sia nell'ambiente virtuale che reale. In effetti, i segnali EDA acquisiti durante le sessioni definitive mostrano un andamento regolare senza incrementi notevoli che sono stati osservati durante il test pilota. Ciò consente di attribuire le variazioni fisiologiche principalmente agli stimoli sperimentali piuttosto che agli effetti del movimento. L'analisi del singolo partecipante ha dimostrato che il comportamento generale del segnale EDA era sostanzialmente simile a quello in realtà virtuale. Sebbene alcune caratteristiche, in particolare l'ampiezza e la pendenza delle risposte fasiche, abbiano mostrato variazioni in determinate condizioni sperimentali, tali variazioni non si sono mantenute stabili nelle varie attività e livelli di illuminazione. Infatti, l'analisi statistica ha dimostrato che la significatività era limitata a una singola configurazione sperimentale. Ciò suggerisce che queste variazioni possono essere collegate anche alla variabilità fisiologica

naturale di ciascun individuo. L'analisi del campione completo degli 8 partecipanti ha confermato ulteriormente questa interpretazione. Nel complesso, le caratteristiche ottenute dal segnale EDA hanno avuto comportamenti sostanzialmente simili nelle due modalità sperimentali. Tale risultato indica che l'uso della realtà virtuale non ha alterato in modo significativo la risposta elettrodermica nelle condizioni studiate rispetto all'ambiente reale. La capacità del segnale EDA di distinguere tra diverse condizioni di illuminazione è un altro aspetto che è emerso dall'analisi. Il confronto tra ambiente reale e realtà virtuale ha mostrato una forte coerenza nelle risposte fisiologiche, ma l'EDA non è stata sufficientemente sensibile da distinguere in modo sistematico le tre condizioni di illuminamento (100%, 50% dell'illuminazione totale e 0% dell'illuminazione totale) all'interno della stessa attività. Le osservazioni fisiologiche e le valutazioni soggettive raccolte dal questionario sono coerenti. I partecipanti hanno dato un'impressione positiva di entrambe le modalità sperimentali; hanno dato punteggi elevati per piacevolezza, coinvolgimento e concentrazione. La realtà virtuale è stata considerata un'esperienza soddisfacente e ben tollerata, anche se l'ambiente reale è stato visto leggermente più comodo. Il punteggio medio attribuito alla somiglianza tra ambiente virtuale e ambiente reale è stato particolarmente significativo, con un punteggio di 5,25 su 7, che mostra che i partecipanti hanno percepito una buona corrispondenza tra le due modalità sperimentali. Nel complesso, questi risultati non si discostano da ricerche che hanno sottolineato come ambienti virtuali ben progettati possano simulare risposte percettive e fisiologiche simili a quelle che si verificano nella realtà [12][22]. Il confronto tra uffici reali e virtuali ha anche dimostrato che la modellazione ambientale di alta qualità e il controllo delle variabili sperimentali possono migliorare la corrispondenza tra le due esperienze [13]. Nella letteratura più recente, l'EDA è uno dei biomarcatori

più utilizzati negli studi in realtà virtuale [16], ciò conferma anche l'utilizzo dell'attività elettrodermica come indicatore oggettivo dello stato di attivazione psicofisiologica. Inoltre, il rapporto tra stimoli ambientali e risposta fisiologica che è stato osservato in questo studio è coerente con i risultati degli studi che analizzano le relazioni tra caratteristiche dell'ambiente virtuale e parametri fisiologici [17].

4. Conclusioni e sviluppi futuri

La creazione di una procedura sperimentale standardizzata e facilmente replicabile per confrontare il comfort visivo percepito in ambiente virtuale e reale è stata possibile grazie a questo lavoro. L'obiettivo era determinare se la realtà virtuale (VR) potesse essere utilizzata come mezzo affidabile per valutare il comfort visivo mantenendo una corrispondenza con ciò che viene osservato in un ambiente fisico. Secondo le analisi svolte, le risposte delle due condizioni sono quasi sempre molto simili. La capacità del segnale EDA di distinguere tra diverse condizioni di illuminazione è un limite che è emerso. Sebbene sia stato possibile confrontare in modo affidabile le risposte registrate in ambiente reale e virtuale, il solo segnale EDA non è stato sufficiente per distinguere in modo sistematico le tre condizioni di illuminamento durante la stessa attività. La realtà virtuale viene proposta come uno strumento sempre più utilizzato per la valutazione degli ambienti interni e del comfort percepito. Anche i questionari compilati dai partecipanti hanno restituito valutazioni coerenti tra le due modalità. Questi risultati sono in linea con quanto riportato nella letteratura analizzata nei capitoli iniziali. Il vantaggio principale della realtà virtuale è la possibilità di modificare rapidamente le condizioni di illuminazione, riprodurre diversi scenari e mantenere sotto controllo le variabili sperimentali. Ciò evita i limiti tipici delle prove svolte esclusivamente in ambienti reali. La valutazione del segnale EDA e delle risposte ai questionari ha consentito di osservare il fenomeno da due punti di vista, la risposta fisiologica del partecipante e la sua percezione dell'ambiente. Tuttavia, ci sono alcuni limiti nel lavoro svolto. In alcune condizioni sperimentali, la possibilità di rilevare differenze statisticamente significative potrebbe essere diminuita a causa del numero limitato di partecipanti. Inoltre, i segnali disponibili del dispositivo Empatica

Embrace Plus sono stati esaminati solo per il segnale EDA. Altri parametri fisiologici come la frequenza cardiaca o la temperatura cutanea potrebbero fornire ulteriori informazioni sullo stato psicofisico dei partecipanti. Per questo motivo, un possibile sviluppo futuro riguarda innanzitutto l'estensione della sperimentazione a un campione più ampio, includendo partecipanti con età ed esperienza nell'utilizzo della realtà virtuale differenti. Sarebbe inoltre interessante integrare l'analisi dell'EDA con gli altri segnali acquisiti dal dispositivo, così da ottenere una valutazione più completa delle risposte dell'utente alle diverse condizioni di illuminazione. Il lavoro svolto rappresenta un primo passo verso l'utilizzo della realtà virtuale come supporto alla progettazione illuminotecnica. I risultati ottenuti indicano che la VR può essere impiegata per eseguire valutazioni preliminari del comfort visivo in modo controllato e ripetibile, riducendo tempi e costi delle sperimentazioni e offrendo uno strumento utile per progettare ambienti indoor sempre più orientati al benessere delle persone.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Vanage, S., Improving energy use, demand and visual comfort in commercial buildings, 2023.
- [2] Vinkers, C.D.W. et al., A visual discomfort questionnaire for use in research and applied settings, Displays, 2024.
- [3] Giraldo Vasquez, N. et al., Analysis of a questionnaire for visual comfort assessments: Effects of question formats, 2022.
- [4] Bellazzi, A. et al., Virtual reality for assessing visual quality and lighting perception: A systematic review, Building and Environment, 2022.
- [5] Faraji, A. et al., Subjective and Simulation-Based Analysis of Discomfort Glare Metrics, Sustainability, 2023.
- [6] Ma, G. & Pan, X., Research on a Visual Comfort Model Based on Individual Preference, Sustainability, 2021.
- [7] Vittori, F. et al., Indoor comfort analysis through VR, 2024.
- [8] Rau, P.L.P. et al., Speed reading on virtual reality and augmented reality, Computers & Education, 2018.
- [9] Castilla, N. et al., Virtual reality-based study assessing the impact of lighting on attention, Journal of Building Engineering, 2024.
- [10] Namrouti, H. et al., Exploring measurement tools for color perception in virtual reality: A systematic review, Displays, 2025.
- [11] Febbraio, F. et al., Colour Perception in Immersive Virtual Reality, Virtual Worlds, 2025.

- [12] Llinares, C. et al., A Comparative Study of Real and Virtual Environment via Psychological and Physiological Responses, Applied Sciences, 2024.
- [13] Latini, A. et al., Immersive virtual vs real office environments, Building and Environment, 2023.
- [14] Campanella, S. et al., PPG and EDA dataset collected with Empatica E4 for stress assessment, Data in Brief, 2024.
- [15] Francia, C. et al., Real-Time Monitoring of Physiological Parameters in VR, Sensors, 2025.
- [16] Zabcikova, M. et al., Emotion Recognition in Virtual Reality: EEG and EDA-Based Analysis, IEEE Access, 2025.
- [17] Tao, Z. et al., Correlations between stimuli and physiological responses in VR, Computers & Graphics, 2025.
- [18] Hanshans, C. et al., Inducing and Measuring Acute Stress in Virtual Reality: Evaluation of Canonical Physiological Stress Markers and Measuring Methods, Journal of Environmental Psychology, 2024.
- [19] Long, Y. et al., Cybersickness Prediction in Virtual Reality, Sensors, 2025.
- [20] Pietroni, F. et al., Identification of Users' Well-Being Related to External Stimuli: A Preliminary Investigation, 2019.
- [21] Cai, H. et al., Recognition of Human Mood, Alertness and Comfort under the Influence of Indoor Lighting Using Physiological Features, Biomedical Signal Processing and Control, 2024.

[22] De Freitas, F.V. et al., Benefits and Challenges of Virtual-Reality-Based Industrial Usability Testing, *Applied Sciences*, 2022.

[23] H. B. Mann and D. R. Whitney, "On a Test of Whether One of Two Random Variables Is Stochastically Larger than the Other," *Annals of Mathematical Statistics*, vol. 18, no. 1, pp. 50–60, 1947.

[24] F. Wilcoxon, "Individual Comparisons by Ranking Methods," *Biometrics Bulletin*, vol. 1, no. 6, pp. 80–83, 1945.