

POLITECNICO DI TORINO

Collegio di Ingegneria Informatica, del Cinema e Meccatronica
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria del Cinema e dei mezzi di
comunicazione



Tesi di Laurea di II livello

**Prototipo sperimentale
di un'interfaccia per fornire feedback termico
come strategia per ridurre la FOMO
nel cinema immersivo**

Relatore:
Alberto Cannavò

Candidato:
Cristiano Santalucia

Correlatore:
Fabrizio Lamberti

Sessione di ottobre 2025

Abstract

Il presente lavoro di tesi si inserisce nell'ambito del cinema a 360°, in cui lo spettatore è libero di orientare lo sguardo all'interno di un panorama sferico e di immergersi in un ambiente virtuale (VR). Tale libertà, tuttavia, comporta il rischio specifico della possibile mancata visione di eventi narrativi rilevanti che avvengono al di fuori del campo visivo dell'utente. Questa dinamica viene ricondotta al fenomeno della fear of missing out (FOMO), associato a stati di ansia, distrazione dalla trama e dagli eventi principali, nonché a una potenziale riduzione del senso di presenza e immersione.

Ad oggi, la letteratura propone diverse strategie per mitigare il problema, tra cui sovrapposizioni grafiche e minimappe, indizi diegetici e audiovisivi, tecniche di viewport steering e rotazioni guidate, oppure segnali aptici vibrotattili. Questi approcci, tuttavia, presentano limiti significativi, come l'interruzione dell'immersione, la riduzione dell'agency dello spettatore, o l'insorgere di effetti indesiderati di discomfort e intrusività.

Su queste basi, la tesi introduce e sviluppa un sistema di feedback termico direzionale per la fruizione di video a 360°. Il prototipo utilizza pad riscaldanti indossabili, controllati in tempo reale da Unity e pilotati da Arduino, per fornire lievi segnali di calore provenienti dalla direzione in cui si svolgono eventi narrativamente importanti ma fuori campo. Il segnale, graduale e non invasivo, è concepito per non aggiungere elementi visivi, non imporre movimenti forzati e preservare così sia l'immersione sia l'agency dello spettatore.

Dal punto di vista metodologico, il lavoro andrà a definire operativamente la FOMO nel contesto dei contenuti immersivi, si deriveranno ipotesi riguardanti presenza, immersione e controllo percepito, e si tradurranno tali ipotesi in requisiti di progetto e in misure di valutazione. Il fine è quello di poter condurre dei test sperimentali con utenti per verificare l'efficacia del sistema rispetto a condizioni senza feedback, analizzando gli effetti su FOMO percepita, presenza e prestazioni attentive, tramite l'elaborazione di dati oggettivi e soggettivi.

Il contributo di questo lavoro si inserisce in un'area finora non indagata, perché, dall'impiego di stimoli termici con funzione direzionale per direzionare l'attenzione in contesti narrativi VR, l'esito atteso è una caratterizzazione empirica di un metodo e indicazioni progettuali, che fungano da linee guida utili per l'integrazione di feedback termici per mitigare la FOMO in prodotti di storytelling immersivi.

Indice

1. Introduzione e Background	4
1.1 Contesto e motivazioni: la FOMO nel cinema VR a 360°	4
1.2 Realtà Virtuale e video a 360°: caratteristiche, potenzialità e limiti.....	6
1.3 Concetti chiave: immersione, presenza, agency	8
1.4 FOMO e JOMO nei media immersivi: definizioni, impatti e metodi di misurazione	10
1.5 Linguaggi narrativi e tecniche registiche nel cinema immersivo	13
1.6 Feedback multisensoriale: visivo, sonoro, tattile e termico	19
1.7 Obiettivi	24
1.8 Domande dello studio e ipotesi.....	26
1.9 Research gap e posizionamento dello studio	28
1.10 Struttura del documento	32
2. Proposta progettuale	35
2.1 Dal problema della FOMO alle prospettive di nuove soluzioni	35
2.2 Obiettivo: ridurre la FOMO mantenendo immersione e agency	35
2.3 Scenario d'uso e requisiti funzionali.....	37
2.4 Architettura di alto livello (hardware e software).....	40
3. Progettazione	44
3.1 Definizione dei requisiti.....	44
3.2 Componenti hardware	50
3.3 Integrazione software: Unity, tracking, trigger termici, misurazioni tecniche	54
3.4 Mappatura tra orientamento utente e attivazione dei pad	58
3.5 Logiche di attivazione (timer, trigger, override).....	61
3.6 Messa in sicurezza del prototipo.....	63
3.7 Test pre-sperimentazione	66
4. Implementazione	71
4.1 Assemblaggio hardware.....	71
4.2 Configurazione e calibrazione dei sensori termici.....	74
4.3 Sviluppo del codice (Arduino e Unity).....	76
4.4 Pipeline di raccolta dati.....	77
5. Metodologia sperimentale	80
5.1 Obiettivi e ipotesi del test	80
5.2 Design sperimentale.....	81
5.3 Procedura di test.....	86

5.4 Raccolta dei dati (soggettivi e oggettivi)	91
6. Analisi e discussione dei risultati sperimentali	94
6.1 Immersione	95
6.2 Agency	96
6.3 FOMO	97
6.4 Comfort & Coerenza	101
6.5 Presenza	103
6.6 Accettabilità	105
6.7 Percezione del Feedback Termico	106
6.8 Cybersickness	107
6.9 Immagini Specifiche e Dettagli Notati	108
6.10 Usabilità (SUS)	110
6.12 Considerazioni finali sui risultati	114
7. Sviluppi futuri e Conclusioni	117
7.1 Risultati principali	117
7.2 Proposte di miglioramento del sistema	120
7.3 Possibili applicazioni della guida termica	123
Ringraziamenti	127
Bibliografia & Riferimenti	129
Sitografia	133
Appendice	135

1. Introduzione e Background

Negli ultimi anni la realtà virtuale (VR, Virtual Reality) si è affermata come mezzo narrativo efficace per dare vita al cosiddetto *cinema immersivo* o *video a 360°*. Durante queste esperienze, lo spettatore indossa un visore (Head-Mounted Display) ed è libero di guardarsi intorno a 360 gradi, vivendo la storia “dall’interno” anziché attraverso il solo rettangolo dello schermo convenzionale. Questa libertà di esplorazione visiva comporta un livello di coinvolgimento sensoriale senza precedenti, generando un forte senso di immersione e presenza nell’osservatore. Allo stesso tempo, però, introduce nuove sfide narrative. Questo perché, mentre l’utente concentra lo sguardo su una sola parte della scena, inevitabilmente si perde ciò che accade altrove nello spazio virtuale. Ne consegue una particolare forma di ansia chiamata *Fear of Missing Out* (FOMO), ossia la “paura di perdersi qualcosa di importante” della storia perché avviene al di fuori del proprio campo visivo. Questo fenomeno, ben noto nell’ambito dei *social media*, sta emergendo come un fattore critico anche nelle esperienze VR narrative. Studiare la FOMO nel cinema immersivo è quindi importante per capire come progettare esperienze a 360° che siano al tempo stesso coinvolgenti e fruibili, senza frustrazioni per lo spettatore. In questa sezione introduttiva verranno presentati il contesto e le motivazioni della ricerca, cioè il perché sia fondamentale affrontare il problema della FOMO nei video immersivi, i concetti teorici chiave (immersione, presenza, agency) e lo stato dell’arte su media immersivi, FOMO/JOMO (Joy of Missing Out), linguaggi narrativi e tecniche registiche VR, feedback multisensoriale e relative opportunità e limiti. Infine, si delinearanno gli obiettivi le domande di ricerca, con le relative ipotesi e il posizionamento del lavoro proposto rispetto ai precedenti studi, evidenziando il *gap* che questo lavoro di tesi intende colmare.

1.1 Contesto e motivazioni: la FOMO nel cinema VR a 360°

Il cinema immersivo (spesso indicato come *Cinematic VR* o video a 360°) si distingue dal cinema tradizionale perché offre allo spettatore un ruolo attivo nel determinare dove guardare durante la visione. In un film convenzionale, il regista controlla ogni inquadratura e dirige l’attenzione del pubblico verso ciò che ritiene più importante, relativamente alle scelte narrative, tramite campi e piani precisi. Nel video a 360°, invece, la “macchina da presa” virtuale coincide con la direzione della testa dello spettatore, che può ruotare liberamente lo sguardo a 360° nella scena. Questo cambio di paradigma offre nuove opportunità espressive ma introduce anche notevoli difficoltà: lo spettatore potrebbe non seguire le intenzioni del regista e “mancare” dettagli narrativi cruciali semplicemente

perché stava dirigendo il proprio sguardo altrove. In altre parole, elementi fondamentali della storia rischiano di non essere percepiti, compromettendo la comprensione narrativa.

Dal punto di vista dell'utente, questa situazione può generare quindi la FOMO, ovvero la preoccupazione di perdersi eventi significativi dello storyline. Si tratta di un sentimento di ansia e frustrazione che nasce dal sapere che "altro sta accadendo" simultaneamente in zone non visibili e dal timore di star facendo la scelta sbagliata su dove guardare. La FOMO nei media immersivi è stata descritta come un fattore negativo che distrae l'utente e potenzialmente compromette il senso di presenza nella storia. In contesti educativi, documentaristici o di addestramento in VR, questo problema può ridurre l'efficacia dell'esperienza: per esempio, in un addestramento immersivo l'utente potrebbe temere di non aver visto un pericolo alle proprie spalle, generando stress. Analogamente, in un documentario a 360° l'ansia di aver saltato una scena o un elemento narrativo chiave può diminuire il coinvolgimento emotivo e la soddisfazione. Affrontare la FOMO è dunque fondamentale per rendere il cinema VR un medium maturo e affidabile. Se trascurata, la FOMO potrebbe limitare la diffusione di esperienze narrative immersive in ambiti chiave, come nelle scuole, nei musei o nelle applicazioni terapeutiche – ambito in cui è essenziale che l'utente colga tutti i contenuti rilevanti senza sentirsi sopraffatto o distratto. In particolare, lo studio di Gao W. [1] sottolinea che il sovraccarico informativo a 360° *“può far sentire lo spettatore spaesato, senza sapere dove guardare”*, e che mitigare la FOMO è cruciale non solo per i film VR odierni ma anche per future applicazioni educative e sanitarie della realtà virtuale.

Inoltre, dal punto di vista dei creatori e registi, risolvere la FOMO significa anche aprire nuove possibilità di narrazione: eliminare la paura di perdersi eventi permetterebbe di intrecciare trame parallele o arricchire le scene con dettagli periferici senza rischiare di confondere lo spettatore. In altri termini, trovare soluzioni a questo problema fornisce una nuova dimensione creativa ai filmmaker VR, dando loro strumenti per guidare l'attenzione pur mantenendo la libertà dello spettatore. Le motivazioni di questa ricerca risiedono quindi nella duplice esigenza di migliorare l'esperienza utente (riducendo ansia e distrazione da FOMO) e potenziare il linguaggio cinematografico immersivo (consentendo narrazioni più ricche e ramificate grazie a efficaci meccanismi di guida dell'attenzione). In sintesi, studiare la FOMO nel cinema a 360° è un passo necessario per coniugare libertà interattiva e coerenza narrativa, aumentando la qualità e l'appeal delle esperienze immersive.

1.2 Realtà Virtuale e video a 360°: caratteristiche, potenzialità e limiti

La Realtà Virtuale moderna si basa su dispositivi (Head-Mounted Display, controller di tracking, ecc.) indossabili in grado di proiettare l'utente in un ambiente tridimensionale virtuale simulato, aggiornando la prospettiva visiva in tempo reale in base ai movimenti della testa. Nel caso dei video a 360° (o *Cinematic VR*), l'ambiente virtuale è costituito da filmati sferici panoramici, infatti, l'utente può guardare in qualsiasi direzione all'interno della scena filmata, come se si trovasse al centro di essa. A differenza delle esperienze VR interattive basate su grafica computerizzata, dove l'utente può spesso muoversi nello spazio virtuale e interagire con elementi contenuti in esso, i video 360° solitamente offrono posizione fissa ma rotazione libera dello sguardo (3DOF: Three Degrees of Freedom). Questo formato, pur limitando l'interazione rispetto a un videogioco VR, massimizza l'accessibilità: basta un visore e un video preregistrato per vivere un'esperienza immersiva, senza la complessità di un motore grafico in tempo reale. Non a caso, il cinema VR è stato abbracciato in ambiti come il giornalismo immersivo e il documentario, per trasportare il pubblico in luoghi ed eventi reali con forte impatto empatico.

Infatti, le maggiori potenzialità dei video a 360° risiedono nella capacità di generare un alto senso di *immersività e presenza* (concetti chiariti meglio in seguito). Lo spettatore “si sente sul posto”, circondato dalla scena, e questo può aumentare il coinvolgimento emotivo e la memoria dell'esperienza. Studi recenti indicano che contenuti immersivi possono accrescere l'empatia e l'attenzione degli utenti rispetto ai media tradizionali, risultando utili per esempio per sensibilizzare su temi sociali o favorire l'apprendimento esperienziale [2]. Inoltre, il campo visivo panoramico permette narrazioni più “ampie” e non lineari, in cui diverse azioni possono svolgersi contemporaneamente in punti diversi dell'ambiente, offrendo molteplici percorsi di fruizione. Lo spettatore diventa una sorta di “regista di se stesso”, scegliendo dove indirizzare la propria attenzione momento per momento.

Accanto a queste potenzialità, vi sono tuttavia limiti e sfide specifiche. In primis, come già accennato, vi è la perdita del controllo registico tradizionale: il regista VR non può sapere a priori cosa lo spettatore guarderà esattamente in ogni istante. Ciò complica l'applicazione di tecniche filmiche consolidate, tradizionali (composizione dell'inquadratura, montaggio alternato, campi e controcampi, ecc.), che richiedendo una rielaborazione del linguaggio visivo. Mentre in oltre un secolo di cinema si è sviluppata una grammatica ben definita, nel VR narrativo “*siamo ancora in fase sperimentale iniziale*”, alla ricerca di nuove regole espressive efficaci.

Un'altra sfida tecnica è la risoluzione e qualità video, poiché i video 360° attuali hanno spesso una risoluzione percepita inferiore rispetto ai video tradizionali, poiché i pixel devono coprire l'intera sfera visiva (ad esempio, un video considerato ad alta risoluzione in 4K con un supporto video tradizionale, in 360° risulta meno nitido, dovendo distribuire i 3840×2160 pixel su 360 gradi di panorama visivo sferico). Ciò può ridurre la nitidezza dei dettagli periferici e affaticare la visione. Inoltre, i video sferici catturati dal vivo soffrono di problemi come punti di giunzione visibili tra le videocamere che inquadrano porzioni di spazio diverse e distorsioni ottiche, che possono disturbare l'immersione.

Un limite ulteriore è la locomozione: nei video 360° l'utente di solito non può muoversi nello spazio (niente spostamenti in avanti o indietro), il che evita la necessità di complicate interazioni ma toglie all'utente la, cosiddetta, agency spaziale per esplorare ambienti: si è "bloccati" al punto di ripresa (punto di posizionamento della camera durante le riprese). Se, d'altro canto, questo aspetto riduce il rischio di *motion sickness* (l'assenza di movimento fisico dell'utente mentre la visuale si sposta può causare chinetosi, nausea da movimenti percepiti dal nostro cervello ma non corrisposti nella realtà reale), è anche vero che implica minor interattività.

Infine, va considerata la questione della sovrastimolazione informativa: offrire 360° di contenuto significa caricare la scena di molteplici stimoli visivi e uditivi; ciò può sopraffare l'utente, soprattutto se non vi è alcuna guida su cosa sia importante. Senza adeguati accorgimenti di regia, lo spettatore può sentirsi disorientato o incerto, trascorrendo troppo tempo a esplorare casualmente la scena anziché seguire la narrazione principale, intesa dal regista.



Figura 1.2.1 Proiezione equirettangolare di un panorama sferico di un film a 360°

In sintesi, la VR e i video a 360° offrono un potenziale narrativo ed esperienziale enorme, ma richiedono di affrontare problemi inediti di fruizione. La FOMO ne è un esempio emblematico: è direttamente correlata alla libertà di esplorazione, caratteristica distintiva e al contempo *arma a doppio taglio* del cinema immersivo. Nel prossimo paragrafo si definiranno meglio i concetti teorici

fondamentali per studiare queste esperienze (immersione, presenza, agency), prima di approfondire la natura di FOMO e JOMO e le soluzioni finora proposte.

1.3 Concetti chiave: immersione, presenza, agency

Prima dell'analisi della FOMO e delle tecniche per mitigarla, è utile chiarire il significato di alcuni concetti chiave spesso citati in relazione alla VR: immersione, presenza e agency. Ognuno di questi termini descrive un aspetto diverso dell'esperienza dell'utente in un ambiente virtuale immersivo.

In termini generali, *immersione* indica il livello di profondità entro cui un sistema VR è in grado di coinvolgere i sensi dell'utente simulando un ambiente convincente e coinvolgente. Si può distinguere tra immersione tecnologica/oggettiva e immersione soggettiva. L'immersione tecnologica dipende dalle caratteristiche del sistema: per esempio, un ampio campo visivo, un audio tridimensionale, una grafica realistica in alta risoluzione e un tracking accurato della posizione (che sia quindi molto responsivo, senza latenza percepibile rispetto ai movimenti dell'utente) aumentano l'immersività oggettiva del dispositivo. Un sistema altamente immersivo fornisce all'utente molti stimoli coerenti con il mondo virtuale, saturando i canali sensoriali e riducendo i segnali del mondo reale (es: occlusione visiva dell'ambiente esterno tramite il visore, isolamento acustico con cuffie, e altro ancora). L'immersione soggettiva è invece la sensazione personale di essere avvolti e coinvolti nell'esperienza. Spesso nel parlato comune “sentirsi immersi” coincide con sentirsi concentrati e trascinati dalla scena virtuale. Un alto grado di immersione tecnologica solitamente favorisce l'immersione percepita, ma fattori individuali (interesse, comfort, familiarità col medium) giocano anch'essi un ruolo. Ad esempio, un utente potrebbe trovarsi in un ambiente VR graficamente modesto ma sentirsi comunque immerso grazie alla trama avvincente, o viceversa trovarsi in un mondo ultra-realistico ma non provare immersione a causa di distrazioni o disagi.

Il concetto di *presenza* è strettamente legato e correlato, ma non identico, all'immersione. La presenza viene definita in letteratura come lo stato psicologico in cui una persona sperimenta l'ambiente virtuale come se fosse reale, cioè, prova la sensazione soggettiva di “essere lì” dentro lo scenario simulato [3]. In altre parole, la presenza è il sentirsi effettivamente presenti fisicamente nel mondo virtuale, dimenticandosi (fino a un certo punto) di trovarsi invece nel mondo reale. Uno dei primi studiosi a parlare di presenza fu Marvin Minsky nel 1980, la chiamò “telepresenza” riferendosi ai sistemi di teleoperazione remota [3]; successivamente Steuer (1992) e altri formalizzarono il termine nel contesto VR [4]. La presenza include diverse sfaccettature: si parla infatti di presenza spaziale (o *fisica*), la sensazione di trovarsi nello spazio virtuale circostante; di presenza sociale, ossia il percepire

gli altri personaggi virtuali come entità reali con cui si condivide l'ambiente; e anche di *self-presence* o *embodiment*, ovvero il riconoscere il proprio corpo o avatar virtuale come parte di sé (sentirlo come il proprio corpo nel mondo virtuale). Nel contesto di un film VR non interattivo, la presenza è prevalentemente spaziale: lo spettatore sente di “essere dentro” la scena del film, magari al centro degli eventi mostrati. È importante notare che un alto livello di immersione tecnologica facilita la presenza, ma non la garantisce: la presenza è un fenomeno soggettivo influenzato anche dalla coesione narrativa e dalla coerenza dell'esperienza. Ad esempio, se accade qualcosa di fortemente innaturale o incoerente nella scena, la presenza può rompersi (l'utente “torna a percepirsi in una simulazione”). La presenza è considerata una misura cruciale della qualità di un'esperienza VR: maggiore presenza in genere corrisponde a maggiore coinvolgimento emotivo e sospensione dell'incredulità. In questo lavoro sarà fondamentale assicurare che le soluzioni anti-FOMO non riducano il senso di presenza – anzi, idealmente potrebbero anche arricchirlo – poiché perdere presenza significa perdere gran parte del valore aggiunto della VR rispetto ai media tradizionali.

Il termine *agency* in ambito virtuale indica la capacità d'azione e di controllo che l'utente percepisce di avere all'interno dell'esperienza. Janet Murray, nel suo lavoro pionieristico “*Hamlet on the Holodeck*” (1997) [5], definisce l'*agency* come “*il potere soddisfacente di compiere azioni significative e vedere i risultati di queste azioni*” all'interno di un ambiente narrativo interattivo. In un contesto VR, l'*agency* può manifestarsi nella possibilità di influenzare direttamente lo svolgimento della storia (ad esempio scegliendo percorsi narrativi, interagendo con oggetti, dialogando con personaggi virtuali). Nel caso specifico dei video narrativi a 360°, che tipicamente non offrono scelte di trama allo spettatore, l'*agency* si esprime soprattutto tramite la libertà di esplorazione visiva: l'utente ha il controllo su dove guardare, decidendo autonomamente a quali dettagli prestare attenzione in ogni momento. Anche se non può cambiare gli eventi della storia, il semplice fatto di poter volgere lo sguardo liberamente conferisce un senso di partecipazione attiva (seppur limitata) all'esperienza. Si parla a tal proposito di “interattività debole” nel cinema VR, il contenuto è preregistrato e non ramificato, ma l'utente interagisce tramite il proprio punto di vista, costruendo un percorso di osservazione personale. L'*agency* percepita è quindi un aspetto fondamentale in questo ambito, perché contribuisce alla soddisfazione dell'utente: sentirsi in controllo evita la sensazione di passività completa e aumenta l'engagement. Tuttavia, va bilanciata con la necessità di raccontare una storia coerente: troppa libertà senza guida può portare a dispersione dell'attenzione (da qui nasce il problema FOMO), mentre troppe restrizioni possono far sentire “incatenato” lo spettatore. Un eccesso di controllo da parte del sistema – ad esempio forzare il punto di vista dello spettatore senza il suo consenso o motivazione o prevedibilità – rischia di ridurre la sua *agency* e quindi il suo coinvolgimento attivo. Nel design di esperienze immersive è quindi cruciale trovare un equilibrio:

guidare l'attenzione e garantire che i momenti chiave siano visti, pur mantenendo l'agency dell'utente, ovvero la sensazione di essere lui a decidere di volgere lo sguardo. Su questo equilibrio si gioca la sfida centrale di questo lavoro di tesi: ridurre la FOMO (quindi guidare in qualche misura l'attenzione) senza ricadere in soluzioni intrusive che compromettano presenza o agency.

Riassumendo, immersione è la capacità tecnica di un'esperienza di circondare i sensi dell'utente; presenza è il risultato soggettivo per cui l'utente si sente "dentro" al mondo virtuale; agency è la percezione di poter agire o esplorare liberamente.

Nel progettare e valutare soluzioni per la FOMO si dovrà tenere a mente questi tre fattori: si vuole mantenere alta l'immersione e la presenza e non ridurre l'agency, si interviene sul modo in cui l'utente esplora il contenuto. Ogni nuovo elemento introdotto (che sia un indicatore visivo, un suono guida o un feedback termico) andrà valutato rispetto a come influenza la presenza e il senso di controllo dell'utente.

1.4 FOMO e JOMO nei media immersivi: definizioni, impatti e metodi di misurazione

Come anticipato, l'acronimo FOMO descrive la particolare sensazione d'ansia di star perdendosi qualcosa di importante. Il termine nasce in ambito psicologico-sociale per indicare la preoccupazione che altre persone stiano vivendo esperienze gratificanti dalle quali si è esclusi, tipicamente alimentata dai social network dove si è continuamente esposti ai "*momenti migliori*" altrui. Nel contesto dei media immersivi, la FOMO assume una connotazione leggermente diversa ma concettualmente analoga: si tratta dell'ansia per cui, mentre si guarda una certa parte, porzione, della scena a 360°, possano star accadendo eventi importanti in un'altra direzione, e dunque di perdersi informazioni rilevanti all'interno del contenuto di cui si sta fruendo. Nello studio di Aitamurto et al. (2021) [6] viene definita la FOMO in un'esperienza VR come "*la preoccupazione dello spettatore di mancare parti importanti della trama*" dovuta alla natura simultanea e omnidirezionale del video a 360°. Questa situazione di mutua esclusività (guardare A implica non vedere B nello stesso istante) è intrinseca al medium: avendo libertà di scelta sul campo visivo, si devono accettare le conseguenze di quella scelta. In un certo senso, ogni taglio o inquadratura non vista in un video 360° è un bivio narrativo perso. Da ciò derivano sentimenti di frustrazione, indecisione e talvolta rimpianto: l'utente può chiedersi se ha guardato "dalla parte giusta", oppure avvertire la necessità di tornare indietro o riguardare l'esperienza per scoprire cosa si è perso.

In contrapposizione alla FOMO, è stato coniato più di recente l'acronimo *JOMO* (Joy of Missing Out) [6], che indica invece la gioia nel perdersi qualcosa. Può sembrare paradossale, ma nel contesto immersivo JOMO si riferisce alle sensazioni positive – sollievo, soddisfazione, libertà – che l'utente può provare sapendo di avere varie opzioni a disposizione e scegliendo deliberatamente di ignorarne alcune, senza ansia o dispiaceri. In altre parole, lo spettatore *accetta con gioia* di perdersi certi dettagli perché ciò significa che ha avuto la libertà di decidere cosa guardare (il “piacere di scegliere cosa *non* seguire”). Per esempio, un utente particolarmente coinvolto nella storyline principale potrebbe provare JOMO nel sapere che esistono altri punti di vista nella scena: queste opzioni non generano ansia, bensì un senso di eccitazione per la possibilità di rivivere l'esperienza in futuro esplorando percorsi diversi. La JOMO in pratica trasforma la potenziale frustrazione in un valore aggiunto: “*che bello, c'era così tanto nel mondo virtuale che posso tornarci e scoprire nuove cose*”. Nel loro studio [6] hanno rilevato che durante visioni ripetute di un film VR gli utenti riportavano sia FOMO sia JOMO: la FOMO tendeva a diminuire alla seconda visione (quando ormai si conosceva la storia globale), mentre la JOMO restava costante. Questo suggerisce che, una volta rassicurato sull'aver colto i punti fondamentali, lo spettatore può godersi maggiormente la libertà di perdersi volontariamente dettagli minori, concentrandosi su aspetti differenti a ogni visione.

Dal punto di vista degli impatti sull'esperienza, la FOMO è generalmente considerata dannosa se eccessiva: può ridurre il divertimento, aumentare lo stress e soprattutto distrarre dalla storia principale. Diversi autori avevano ipotizzato che l'ansia di perdersi qualcosa potesse intaccare anche la presenza, facendo “uscire” mentalmente l'utente dal flusso narrativo. In effetti, è intuitivo pensare che, se uno spettatore in VR passa tempo a considerare a cosa succede dietro di sé invece di vivere appieno la scena davanti a sé, il suo livello di immersione psicologica può diminuire. Tuttavia, le ricerche empiriche finora svolte offrono un quadro più sfumato. Sempre in questo studio [6] su FOMO/JOMO con un film narrativo a 360°, hanno riscontrato un dato interessante: nonostante la FOMO fosse presente, non ha compromesso il senso di presenza degli spettatori durante la visione. In altri termini, anche se gli utenti erano consapevoli di potersi perdere eventi, ciò non li ha fatti sentire meno “dentro” il mondo virtuale. Questo risultato è incoraggiante, poiché indica che un certo livello di FOMO *non distrugge* automaticamente la magia immersiva. Inoltre, come anticipato, la FOMO tende a ridursi man mano che l'utente diventa più familiare con il contenuto: già al secondo replay del film nello studio citato, l'intensità di FOMO riportata era significativamente inferiore rispetto alla prima volta. Ciò è logico: conoscendo già la storia, lo spettatore sa cosa aspettarsi e può esplorare altre angolazioni senza paura di perdere snodi narrativi fondamentali. La JOMO, parallelamente, può essere vista come un effetto positivo, che può addirittura contribuire a un atteggiamento più rilassato e ricettivo durante la fruizione.

Bisogna comunque sottolineare che la FOMO non va minimizzata, se diventa troppo intensa può indurre comportamenti deleteri. Ad esempio, l'utente potrebbe ruotare compulsivamente la testa a destra e sinistra per controllare continuamente tutte le direzioni, perdendo il filo della narrazione principale e aumentando l'affaticamento (sia mentale che fisico). In casi peggiori, la frustrazione per la FOMO potrebbe portare l'utente ad abbandonare l'esperienza prima della fine, oppure a valutarla negativamente. Per questo, gli autori di esperienze immersive desiderano ridurre la FOMO negativa il più possibile, incoraggiando una "JOMO sana" che invogli a rivivere l'esperienza. Il confine è sottile: idealmente lo spettatore dovrebbe sentirsi libero di esplorare ma allo stesso tempo sicuro di non essersi perso nulla di fondamentale, in modo da potersi abbandonare al flusso narrativo.

Per misurare la FOMO (e la JOMO) in un contesto VR, trattandosi di uno stato in buona parte psicologico, la misurazione avviene principalmente tramite metodi soggettivi. Ancora gli stessi autori [6] per esempio, hanno impiegato questionari post-esperienza in cui agli utenti venivano poste domande sul loro grado di accordo con affermazioni tipo *"mi sentivo preoccupato di perdermi qualcosa di importante durante la visione"* per valutare la FOMO, oppure *"ho provato soddisfazione nel sapere che avrei potuto rivedere la scena da un altro punto di vista"* per la JOMO. Tali item permettono di costruire scale quantitative (es. scala Likert 1-7) della paura e gioia di perdersi qualcosa. E, nel citato studio, gli autori hanno validato le scale verificando coerenza interna e analizzando differenze tra condizioni sperimentali, trovando effettivamente variazioni significative in presenza di diversi gradi di controllo sul campo visivo. Oltre ai questionari, esistono indicatori comportamentali utili a inferire la FOMO: uno di questi è, come accennato, la frequenza di movimento della testa. Se un utente durante il video 360° continua a girarsi rapidamente in varie direzioni, questo può indicare il tentativo di scansionare l'ambiente alla ricerca di eventi (un segnale di FOMO elevata) che si ha paura di perdere. Viceversa, una persona con JOMO potrebbe restare più ferma sul suo punto di interesse, soddisfatta della propria scelta. Alcuni lavori hanno utilizzato eye-tracking e/o head-tracking data per analizzare quanto gli utenti esplorano l'ambiente e se tengono d'occhio costantemente gli indicatori di evento fuori campo. Ad esempio, Yamaguchi et al. (2022) [7] hanno osservato, nei log di utilizzo della loro mini-mappa panoramica, che gli utenti la consultavano attivamente per cercare elementi fuori dal loro campo visivo. Questo comportamento conferma sia la presenza di FOMO (gli utenti sospettavano vi fosse qualcosa fuori scena e infatti controllavano) sia l'utilità dello strumento nel mitigare l'ansia (controllando la miniatura, placavano il timore).

Un'altra possibile misura è l'auto-rapporto qualitativo: chiedere agli utenti di descrivere a parole la loro esperienza può far emergere commenti spontanei del tipo *"avevo paura di essermi perso la scena"*

X” oppure “mi sono accorto dopo che c’era anche Y sullo sfondo”. Questi feedback, se analizzati, aiutano a comprendere quali aspetti generano più FOMO (es: eventi sonori alle spalle, personaggi che compiono azioni fuori vista, ecc.) e come gli utenti vi reagiscono emotivamente. Nella fase di valutazione della nostra ricerca utilizzeremo un mix di approcci: questionari strutturati per FOMO/JOMO/presenza, analisi dei movimenti di testa per vedere se i partecipanti si comportano in modo più calmo o più “ansioso” a seconda delle condizioni, e anche raccolta di impressioni soggettive aperte.

Per concludere questo punto, è utile ribadire il doppio volto di FOMO e JOMO nei media immersivi. Da un lato FOMO è un problema da risolvere per rendere l’esperienza confortevole e narrativa; dall’altro, la consapevolezza di possibilità parallele (se ben gestita) può arricchire l’esperienza stessa, spingendo l’utente a esplorare attivamente e magari a rivivere la storia più volte da prospettive diverse. Obiettivo di questa tesi sarà quindi ridurre la FOMO (quella che distrae e genera ansia) mantenendo o sfruttando la JOMO, ovvero lasciando intatta la sensazione di libertà di scelta e di potenziale ri-esplorazione. A tal fine, passiamo ora in rassegna i metodi narrativi e le tecniche registiche sviluppate nel cinema immersivo per guidare l’attenzione dell’utente, che rappresentano gli strumenti a oggi disponibili per mitigare il rischio di *missing out*.

1.5 Linguaggi narrativi e tecniche registiche nel cinema immersivo

Il linguaggio cinematografico tradizionale si basa su convenzioni e tecniche (inquadrature, movimenti di camera, montaggio, ecc.) affinate in decenni di cinema 2D lineare. Con l’avvento del VR narrativo, i creatori di questi contenuti artistici si sono trovati a chiedersi quali di queste regole valgono ancora e quali vanno adattate o reinventate.

Come visto, la principale differenza è la perdita del controllo assoluto sul quadro: in VR non esiste un “bordo dello schermo” fisso entro cui racchiudere l’azione, perché lo schermo è tutto intorno, a 360°. Inoltre, l’utente può guardare in qualsiasi direzione, potenzialmente ignorando ciò che il regista ritiene importante. Questa libertà rende difficile applicare il montaggio di continuità tipico del cinema. Questo tipo di montaggio cerca di far percepire i tagli tra scene come naturali, mantenendo coerenza spaziale e temporale, oltre che di composizione della scena; Un esempio fra tanti è che, nel cinema classico, si usano raccordi sul movimento o sullo sguardo per guidare lo spettatore inconsciamente da un’inquadratura alla successiva, seguendo il flusso narrativo senza disorientarlo. In VR, se l’utente non sta guardando il punto giusto al momento di un taglio, potrebbe perdersi il *raccordo* ed essere confuso dal cambio di scena.

Nonostante queste sfide, la ricerca suggerisce che alcune tecniche tradizionali possono ancora funzionare in VR con i dovuti accorgimenti. Serrano et al. (2017) [8] hanno dimostrato che gli spettatori di video 360° reagiscono in modo consistente a certi *pattern* cognitivi di segmentazione degli eventi, il che significa che il principio del montaggio di continuità può supportare anche scenari VR, se applicato correttamente. In particolare, si è visto che effettuare i tagli in corrispondenza di “*event boundaries*” (momenti di chiusura naturale di un’azione o micro-evento) aiuta gli utenti a ricomporre mentalmente la sequenza anche nel passaggio a una nuova inquadratura. Serrano et al. hanno condotto esperimenti controllati con scene semplici appositamente progettate e introdotto metriche per valutare la percezione di continuità dei tagli nei contenuti 360°. Hanno trovato che, per esempio, mantenere la posizione relativa degli oggetti salienti tra il pre-cut e il post-cut (entro limiti ragionevoli) può evitare che lo spettatore debba cercare da zero il focus della scena successiva dopo un taglio.

Successivamente, è stata estesa questa analisi a contenuti più complessi, studiando come gli utenti esplorano film 360° montati da professionisti [9]. Analizzando dati di head-tracking di migliaia di spettatori su scene tratte da *The People’s House* (un film VR documentario) [10], hanno confermato alcune intuizioni precedenti e derivato nuove linee guida. A dimostrazione di ciò, il loro studio rivela che il comportamento dello spettatore subito dopo un taglio dipende molto dalla natura della scena precedente: se la scena *A* prima del cut aveva un chiaro soggetto di interesse (alta *Inter-Observer Congruency*: molti utenti guardavano nello stesso punto), allora nel passaggio alla scena *B* gli utenti tenderanno più facilmente a trovare il nuovo soggetto principale; viceversa, se la scena *A* era esplorativa senza un ROI (*Region of Interest*) evidente, dopo il taglio, gli sguardi degli utenti in *B* saranno più dispersi. Questo implica che il montaggio in VR deve tener conto di quanto “coerente” possa essere il cambio di ROI da una scena precedente a quella successiva: tagliare da una scena confusa a una scena densa di azioni o valore narrativo rilevante rischia di lasciare indietro molti spettatori che magari erano semplicemente distratti. Marañes et al. [9] hanno introdotto metriche come l’*Inter-Observer Congruency (IOC)* e analizzato la dispersione degli sguardi per classificare scene e transizioni. I risultati informano i content creator su come i diversi tipi di tagli impattano il comportamento del pubblico. In definitiva, il montaggio per contenuti audiovisivi in 360° è possibile, ma va progettato con estrema attenzione alle dinamiche di attenzione: probabilmente con tagli più lenti, transizioni “soft” o inserendo segnali pre-cut per attirare lo sguardo dove avverrà qualcosa prima che venga introdotta la scena successiva.

Oltre al montaggio, occorre considerare le tecniche registiche intrinseche alla singola scena per guidare l’attenzione dello spettatore all’interno del panorama 360°. Qui si distingue spesso tra *cue*

diegetici e non-diegetici. I cue diegetici sono elementi interni alla storia e all'ambiente che orientano lo sguardo in modo naturale: un personaggio che si muove o punta il dito verso qualcosa, una luce che si accende in una parte della stanza, un suono proveniente da una direzione specifica nell'ambiente (come un telefono che squilla alle nostre spalle), ecc. Questi segnali appartengono al mondo narrativo stesso e idealmente non rompono l'immersione, anzi la arricchiscono. Per esempio, il corto immersivo *Dear Angelica* (Oculus Story Studio, 2017) [11] utilizza animazioni di linee disegnate a mano in digitale che appaiono nell'ambiente per condurre lo sguardo dello spettatore da un punto all'altro come fossero parte della scena onirica. Un altro esempio è il film VR *The Limit* (2018) [12], in cui un personaggio interpretato da Michelle Rodriguez guarda direttamente lo spettatore (fissando lo sguardo in camera) e poi si volta correndo: l'utente istintivamente la segue con lo sguardo, attraversando così il punto in cui comparirà l'azione successiva. Usare lo sguardo o il movimento dei personaggi per trascinare l'attenzione dello spettatore è quindi un trucco diegetico.

I cue non-diegetici, invece, sono indicatori o interfacce che non fanno parte della scena narrata, ma sono sovrapposti al piano di visione con il puro scopo di segnalare qualcosa allo spettatore. Nel contesto 360° rientrano in questa categoria, per esempio, frecce o indicatori grafici ai bordi del campo visivo che puntano verso un evento fuori scena, icone o radar 2D che mostrano la posizione di elementi importanti nella sfera di visuale (come una minimappa), o anche segnali audiovisivi astratti (un suono "beep" non giustificato dalla storia, o un bagliore/perimetro colorato che evidenzia un oggetto). I cue non-diegetici possono essere molto efficaci nel catturare immediatamente l'attenzione, proprio perché estranei alla scena: un'icona che compare nella periferia del visore è difficile da ignorare. Tuttavia, il loro uso è controverso in termini di immersione. Gli approcci palesemente non-diegetici rischiano di "ricordare" allo spettatore che si trova in un ambiente virtuale, fungendo da elementi di un'interfaccia utente piuttosto che del mondo narrativo. Questo può infrangere la sottile sensazione di presenza (come i sottotitoli nei film o i menu a schermo nei videogiochi, che però nel cinema VR stonerebbero con l'illusione cinematografica che proprio si cerca di andare a creare). Inoltre, se troppo invadenti, tali indicatori possono risultare intrusivi e fastidiosi: come notano Marañes et al., "*soluzioni comuni come oscurare le aree non importanti interferiscono con l'immersione libera dello spettatore*", così come attivare eventi solo quando l'utente guarda nella direzione giusta "*può disturbare il flusso narrativo*". Immaginando di guardare un film immersivo e vedendo improvvisamente comparire una freccia lampeggiante sicuramente capiremo dove guardare, ma al costo di uscire momentaneamente dalla sospensione e finzione narrativa (diegesi).

La soluzione potrebbe allora trovarsi in approcci ibridi. Per esempio, alcuni ricercatori hanno proposto indicatori visivi meno intrusivi, come "halo" o auree ai margini: un alone semi-trasparente

colorato sul bordo del visore che suggerisce che “qualcosa da questo lato dello schermo è interessante” senza far apparire o disegnare un indicatore esplicito. Altri hanno esplorato l’uso di tecniche come il Picture-in-Picture (PiP) spatial: la tecnica Outside-In [13] inserisce nell’inquadratura principale piccoli pannelli fluttuanti che mostrano in anteprima cosa sta succedendo fuori dal campo visivo. Immaginando di guardare avanti, al limitare dello visuale disponibile a schermo, sui margini, compaiono in semi-trasparenza mini-finestre che mostrano la vista dietro di noi o di lato, così da sapere se c’è un evento significativo altrove. Lo studio citato ha confrontato questo metodo con le frecce tradizionali, trovando che le preview PiP permettono agli utenti di seguire meglio storie parallele a 360° riducendo sensibilmente gli eventi persi, e sono stati giudicati più utili dai partecipanti rispetto ai semplici indicatori direzionali. Outside-In rappresenta una soluzione per riportare gli elementi fuori vista dal campo visivo all’interno della vista dell’utente, evitando di costringerlo a girarsi continuamente alla cieca alla ricerca del ROI di riferimento. Dal punto di vista dell’esperienza, i partecipanti hanno percepito questo metodo come meno invasivo di frecce o highlight forzati, poiché si integra nella visione stessa (un *espediente* cinematografico, che ricorda l’idea di uno split-screen dinamico, proveniente dal mondo dei videogiochi).

Un’altra tecnica non-diegetica, particolarmente interessante e correlata, è presentare una mini-mappa panoramica: Yamaguchi et al. [7] l’hanno implementata come una piccola sfera 360° visualizzata vicino all’utente (nel loro caso fissata al controller, utilizzato durante la fruizione di contenuti immersivi) che mostra l’intera scena in cui si trova l’utente, in miniatura. L’utente può visualizzare e usufruire di questa miniatura per avere un colpo d’occhio su tutto ciò che gli avviene attorno, per quindi decidere consapevolmente in che direzione voltarsi. Nei loro esperimenti, questa soluzione ha ridotto la FOMO senza effetti negativi sull’esperienza utente. Inoltre, i dati comportamentali hanno confermato che, gli utenti che hanno adoperato la mini-mappa, la usavano attivamente per “*cercare fuori dal loro campo visivo*” durante video a carattere esplorativo. Ciò suggerisce che, se forniti degli strumenti giusti, gli spettatori sono in grado di autogestire l’attenzione in modo efficace: un *empowerment* che trasforma l’ansia in azione guidata (qui vediamo come FOMO possa stimolare una partecipazione attiva invece che rimanere uno stress passivo).

Accanto a questi approcci visivi, non vanno dimenticate le tecniche uditive e di messa in scena proprie del linguaggio cinematografico, in particolare nel contesto VR. L’audio spaziale ha un ruolo influente in questo ambito: l’orecchio umano è molto abile a localizzare la provenienza dei suoni e a rivolgere l’attenzione verso di essi. Un suono diegetico forte in una certa direzione (come il rombo di un’auto in arrivo da sinistra, o una voce che chiama) farà quasi sicuramente voltare l’utente verso la fonte. Nella progettazione audio di film VR, questa tecnica è ben sfruttata, posizionando accuratamente le

sorgenti sonore rilevanti in modo che attirino lo sguardo verso gli eventi chiave. Speicher et al. (2020) [14] hanno studiato cue audio diegetici vs non-diegetici nel guidare l'attenzione, confrontando un suono naturale della scena (delle risate di bambini da una parte) con un segnale acustico artificiale (un "beep") per indicare la direzione di interesse. I risultati hanno mostrato che gli indizi sonori migliorano l'orientamento dell'utente, ma esiste un compromesso tra precisione e intrusività. I suoni non-diegetici (come "beep" direzionali) erano molto precisi nel far voltare rapidamente lo spettatore, ma percepiti come più invadenti e distraenti, un distacco dall'esperienza narrativa. I suoni diegetici (es. rumori ambientali coerenti) erano maggiormente integrati e meno fastidiosi, anche se talvolta meno efficaci nel caso in cui lo spettatore non li riconosceva subito come segnali da seguire. In generale, lo studio evidenzia l'importanza di un bilanciamento, poiché un buon design audio può guidare l'attenzione senza essere invasivo, per esempio, aumentando leggermente il volume o la chiarezza di un suono diegetico in modo che spicchi all'orecchio senza sembrare innaturale. Una strategia comune, sempre legata ai feedback audio nei film VR, è il *pre-suggerimento*: prima che entri in scena un personaggio alle spalle dello spettatore, si fanno sentire i suoi passi o la sua voce provenire da quella direzione, cosicché l'utente d'istinto possa voltarsi in quella direzione proprio mentre il personaggio compare nella regione di interesse. Questo sincronismo mantiene l'illusione narrativa ed evita che l'utente si perda elementi chiave della narrazione.

Un caso distintivo di guida narrativa immersiva è presente nel film sperimentale *The Moment* (2018) di Richard Ramchurn [15], che integra feedback biometrici dello spettatore (onde cerebrali, EEG) per adattare il montaggio audio-visivo in tempo reale. L'idea è che il film cambi ritmo e scene in base al livello di attenzione dello spettatore, e l'audio gioca un ruolo nel modulare l'esperienza. Pur non essendo un sistema di guida esplicita dell'attenzione, *The Moment* rappresenta un tentativo di adattare la narrazione allo spettatore, invertendo la prospettiva (non più guidare lo sguardo alla storia, ma il viceversa, reagendo a dove lo spettatore guarda o a quanto è attento). Si tratta di un approccio ancora più avanzato e fuori dagli schemi tradizionali, che però evidenzia quanto sia attivo il settore nel cercare soluzioni per mantenere l'utente coinvolto, pur senza perdersi elementi: in questo caso se l'utente distratto guarda altrove, il sistema può rallentare o ripetere informazioni per assicurarsi che le colga e restare in "stallo" finché alcuni eventi non stati osservati.

Infine, sul fronte registico puro, molti autori VR sfruttano la messa in scena panoramica: poiché non si può stringere il campo con un primo piano (lo sguardo è deciso dall'utente), si usano altri mezzi per dare enfasi a un evento. Luci e colori possono suggerire che un elemento importante può essere più o meno illuminato e colorato rispetto allo sfondo, a seconda di che cosa vuole trasmettere l'autore, attirando naturalmente l'occhio dello spettatore. Anche la coreografia dei movimenti è ben studiata e

ragionata, perché in un film VR, elementi salienti spesso non sono statici ma in movimento, considerando che il nostro sistema visivo è molto sensibile al movimento periferico. Se un oggetto inizia a muoversi alla nostra destra, anche senza guardarlo direttamente percepiamo un cambiamento al margine della nostra visione periferica e l'attenzione viene catturata, inducendoci a girarci. Questa è una forma di *attentional cue* sfruttata in modo organico. Nello studio di Serrano et al. [8], oltre al montaggio, discutevano anche di tecniche di regia continua: ad esempio mantenere una linea d'azione consistente (la direzione in cui avvengono le azioni principali resta entro un certo arco di gradi) così che l'utente impari dove aspettarsi eventi importanti e non debba continuamente cercarli a tutto intorno. Un altro concetto da prendere in considerazione è il “*director's cut vs user's cut*”: alcuni sistemi sperimentali permettono al regista di specificare le ROI, aree di interesse, nella scena e, se l'utente le ignora per un tempo minimo specificato, si può decidere di intervenire con un cue o addirittura un'auto-rotazione graduale della camera (come vedremo nel punto successivo).

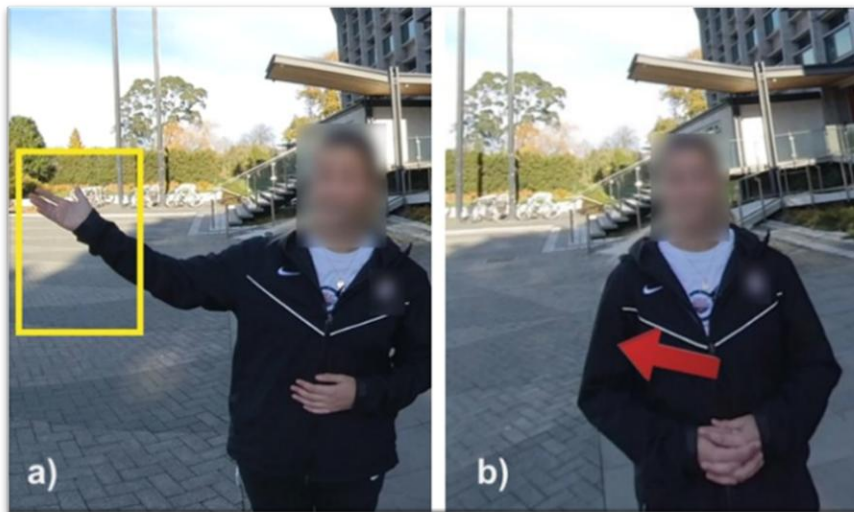


Figura 1.5.1 Esempio di feedback diegetico (movimento della mano) e non (freccia)



Figura 1.5.2 Esempio di PiP (picture in picture)

Pertanto, è chiaro come il cinema VR stia sviluppando, in questi ultimi anni, un nuovo linguaggio che fonde regole classiche e d'innovazione. L'obiettivo rimane quello di raccontare una storia coerente e coinvolgente, pur concedendo allo spettatore una parte di regia. Guidare l'attenzione è un atto di equilibrio: nel VR, anche lo spettatore diventa in parte regista di se stesso e le tecniche registiche immersive cercano di collaborare con lo spettatore in questa co-regia dell'attenzione, mediante segnali visivi, auditivi e interattivi.

Nella prossima sezione vedremo come l'aggiunta di stimoli su altri sensi (tatto e temperatura) può offrire nuove opportunità per questa guida sottile all'interno dell'esperienza virtuale, ampliando il ventaglio multisensoriale a disposizione dei creatori di opere immersive.

1.6 Feedback multisensoriale: visivo, sonoro, tattile e termico

In questo contesto, uno dei punti di forza della realtà virtuale è la possibilità di coinvolgere più sensi contemporaneamente, creando un'esperienza che va oltre la sola visione e ascolto tipico del cinema tradizionale. Si parla infatti di esperienze VR multisensoriali quando, oltre alla stimolazione visiva e uditiva, vengono forniti all'utente feedback tattili, propriocettivi, vestibolari, olfattivi o termici. L'aggiunta di ulteriori canali sensoriali può servire a due scopi principali: aumentare il realismo e la presenza (per esempio simulando il calore del sole in una scena estiva o la vibrazione di un motore sotto i piedi) e comunicare informazioni in modo più efficace (come segnalare un oggetto alle spalle tramite una vibrazione sulla schiena).

In questo paragrafo esaminiamo i principali tipi di feedback multisensoriale usati o studiati nel contesto immersivo – visivo, sonoro, tattile e termico – con le rispettive potenzialità e limiti, soprattutto in ottica di guidare l’attenzione mantenendo l’utente immerso e presente.

Feedback visivo: il canale visivo è ovviamente preminente nelle esperienze VR, come è stato già discusso tra le molte tecniche visive nel paragrafo precedente (indicatori grafici, PiP, ecc.) che rientrano nell’ambito del feedback visivo. Dal punto di vista multisensoriale, potremmo includere in questo ambito anche gli stimoli visivi periferici e quelli destinati alla visione notturna o stereoscopica, come per esempio luci lampeggianti percepibili con visione periferica per attirare l’occhio senza distogliere da ciò che si vede centralmente. Il limite del feedback visivo è che la sua efficacia dipende comunque dalla linea di sguardo dell’utente: se sta guardando altrove, un segnale visivo posto fuori dal suo attuale FOV (field of view) non verrà notato (a meno di usare indicatori sempre a margine). Inoltre, caricando eccessivamente l’interfaccia visiva si rischia di distrarre l’utente dall’azione narrativa principale. Pertanto, siccome spesso i cue visivi sono fondamentali e diretti, intuitivi, conviene spesso integrarli con altri sensi che possano richiamare lo sguardo nella direzione giusta, che siano quindi complementari.

Feedback sonoro: come accennato, l’audio 3D è uno strumento potentissimo per indicare direzioni e avvertire di eventi fuori vista. Un design sonoro sicuramente efficace in VR posiziona le fonti sonore coerentemente nell’ambiente virtuale: se dietro di noi qualcuno parla, grazie all’audio binaurale lo percepiremo provenire da dietro, e ciò ci spingerà a voltarci. Il suono ha un raggio d’azione a 360° indipendente dalla vista. Questo lo rende, come accennato, perfettamente complementare al feedback visivo. Alcuni studi (e prassi di produzione VR) confermano che combinare stimoli visivi e sonori aumenta significativamente la percentuale di utenti che notano un evento rispetto a usare solo uno dei due canali [16] [17]. Ad esempio, immaginando un film 360° in cui un oggetto cade dietro lo spettatore: se mostriamo solo l’oggetto cadere (rumorosamente ma senza audio), magari metà degli utenti non lo vedrà; se mettiamo solo il suono del tonfo senza rappresentarlo visivamente, chi non si gira lo sentirà ma potrebbe non capire cosa è successo; combinando il rumore improvviso dietro e l’oggetto visibile cadere, otteniamo sia l’attenzione immediata (dato dal suono) sia la comprensione di cosa è accaduto (il feedback visivo una volta che l’utente si gira). L’audio può anche dare *tocco emozionale*: suoni intensi aumentano l’urgenza (es. un allarme, un ruggito) e spingono l’attenzione con più enfasi, mentre suoni più tenui possono suggerire dove guardare senza rompere la quiete di una scena. Un limite dell’audio è che dev’essere calibrato attentamente: troppi suoni direzionali simultanei creano caos (il famoso “rumore” che confonde invece di guidare). Inoltre, l’efficacia dipende dall’acuità uditiva direzionale dell’utente, che varia: non tutti localizzano i suoni con la stessa

precisione, specie in presenza di riverbero o se il visore non ha un ottimo audio spaziale. Bisogna anche considerare che, a differenza di un videogioco dove l'utente può girarsi immediatamente verso un suono, in un film VR lineare gli eventi proseguono: c'è dunque una finestra temporale breve in cui il suono deve far girare la testa affinché l'utente colga visivamente l'evento in tempo.

Feedback tattile (aptico): il senso del tatto è meno immediato da coinvolgere in VR, perché richiede dispositivi dedicati. Tuttavia, sta crescendo l'uso di controller con vibrazione e di *wearable haptics* (giacche, guanti, sedili vibranti) che possono fornire sensazioni tattili sincronizzate con la scena. Il feedback tattile *locale* (ad esempio la vibrazione di un controller tenuto in mano) è comunemente usato nei videogiochi VR per dare conferma di azioni o simulare interazioni (es: una scossa quando si spara con una pistola virtuale). In ambito cinematografico immersivo, l'uso è meno diffuso, ma immaginabile: per esempio, in una scena di esplosione, oltre al lampo e al boato sonoro, far vibrare leggermente il visore o un dispositivo sul corpo può far percepire l'onda d'urto, aumentando la *sensazione fisica* dell'evento. Riguardo alla guida dell'attenzione, il tatto può essere utilizzato in modo *direzionale*: alcuni sistemi aptici includono array di attuatori attorno al corpo (es. cintura con vibro-motori a 8 posizioni attorno alla vita). Se accade qualcosa alla sinistra dell'utente, il motore sul lato sinistro vibra per segnalare “guarda di qua”. Questo approccio è stato sperimentato in prototipi di ricerca, per esempio, Biocca et al. (2003) [18] con il concetto di *Attention Funnel* in AR indicavano la direzione di un oggetto anche attraverso un feedback vibro-tattile nell'aria (come una “corrente” che spingeva la mano dell'utente verso l'oggetto target). In VR, una vibrazione direzionale su una giacca aptica potrebbe ottenere un effetto simile. Il vantaggio del tatto è che non dipende dalla linea di vista né dall'udito, è un canale parallelo aggiuntivo – possiamo essere toccati su una spalla “virtualmente” e immediatamente volgeremo lo sguardo in quella direzione, per riflesso. Inoltre, il tatto può essere molto silenzioso come segnale (non introduce elementi visivi o sonori estranei per gli altri, colpisce solo l'utente fisicamente). Lo svantaggio è la disponibilità di hardware: al momento non tutti gli utenti VR hanno giacche aptiche o sistemi avanzati; spesso si dispone solo dei controller in mano. Vibrarli per indicare qualcosa può funzionare (es: il controller sinistro vibra a indicare “c'è qualcosa alla tua sinistra”), ma occorre che l'utente associ quell'impulso alla direzione – non è così intuitivo come un suono o un segnale visivo se non opportunamente spiegato o se non viene dall'area del corpo corrispondente alla direzione (il controller in mano non ha una direzione spaziale evidente rispetto al campo visivo). Nonostante ciò, la ricerca su feedback tattili è in crescita: si stanno sperimentando poltrone che simulano movimenti e vibrazioni, pavimenti vibranti per passi, e interfacce come corde retrattili che danno il senso del contatto con oggetti virtuali.

Feedback termico: il senso del caldo/freddo è uno dei canali più recenti ed esplorativi nel design multisensoriale VR. Simulare la temperatura in VR significa aggiungere un livello di realismo ambientale: immagina di trovarti in una scena artica e sentire realmente freddo sul viso, o al contrario essere accanto a un fuoco virtuale e percepire il tepore sulle mani. Dal punto di vista della *presenza*, aggiungere feedback termici può aumentare notevolmente l'illusione di trovarsi nell'ambiente simulato. Ad esempio, un sistema come Ambiotherm (Nus et al., 2017) [19] fornisce vento e calore: due piccoli ventilatori frontali imitano il vento sul volto, mentre un modulo termico posto sulla nuca riproduce la sensazione di calore del sole o di una brezza calda. I test su Ambiotherm hanno mostrato che gli utenti con questi stimoli aggiuntivi riferivano un aumento della sensazione di presenza e un maggior coinvolgimento, rispetto alla sola visione e audio. Ciò è coerente con altri studi che evidenziano come coinvolgere più sensi promuova la presenza. Il feedback termico può essere fornito tramite elementi riscaldanti/raffreddanti: ad esempio resistenze elettriche o elementi Peltier (dispositivi a semiconduttore che possono generare caldo da un lato e freddo dall'altro quando attraversati da corrente). Questi elementi possono essere inseriti in giacche, caschetti o oggetti da tenere in mano. Ad esempio, è stato creato un prototipo di spada VR riscaldata in cui la lama virtuale calda si sente calda al tatto grazie a una resistenza integrata. In questo contesto, si è interessati a sfruttare il termico in maniera direzionale: l'idea è di avere magari quattro piccoli moduli termici attorno alla testa o al tronco dell'utente (avanti, dietro, sinistra, destra). Quando qualcosa di importante accade in una certa direzione, il modulo corrispondente emette calore (o fresco) localizzato, cosicché l'utente possa "sentire" da che parte proviene uno stimolo. Ad esempio, se nel film VR scoppia un incendio dietro di noi, il sistema potrebbe riscaldare leggermente la nuca: l'utente inconsciamente percepisce calore alle spalle e sarà portato a voltarsi, trovando il fuoco virtuale – un effetto sia realistico (ci sarebbe realmente calore in presenza di fuoco) sia utile a non far perdere quell'evento. Oppure, in una scena horror in un freezer, un colpo di freddo improvviso sul collo può suggerire "attenzione, c'è qualcosa di freddo dietro di te" (magari la porta del freezer aperta, o un fantasma). Un *vantaggio unico* del termico è che è uno stimolo relativamente lento e persistente: a differenza di un flash visivo o di un "beep" che durano un istante, il calore cresce gradualmente e rimane finché attivo. Ciò può essere usato per mantenere l'attenzione orientata: es., finché l'evento dietro non è concluso, si può tenere un leggero calore sulla nuca dell'utente, e spegnerlo quando l'evento è finito – questo feedback continuo "ricorda" allo spettatore di dare un'occhiata dietro se non l'ha ancora fatto. Inoltre, il termico può essere meno distraente in termini cognitivi: sentir caldo o freddo è una sensazione che non richiede di distogliere gli occhi immediatamente, agisce più a livello subconscio e di *mood* (il caldo/freddo cambia anche l'emozione percepita di una scena – caldo

può dare tensione, freddo isolamento, ecc.). Dunque, può arricchire la narrativa emotiva oltre che funzionale.

Naturalmente ci sono sfide tecniche: i moduli termici hanno inerzia (ci vuole qualche secondo per avvertire chiaramente il calore, e altrettanto per dissiparlo), inoltre c'è un tema di sicurezza e comfort – il calore non deve mai essere troppo intenso da dar fastidio o, peggio, causare dolore/bruciore. Soluzioni come Peltier e lampade di calore devono essere calibrate attentamente e isolate dove toccano la pelle per non superare soglie sgradevoli. Un altro aspetto è la variabilità individuale: c'è chi tollera di più il caldo, chi il freddo, e c'è chi potrebbe non notare subito piccole variazioni termiche, specie in presenza di adrenalina o distrazione. Nonostante ciò, gli studi recenti mostrano che integrare il senso termico è fattibile e può aprire nuove strade sperimentali. Ad esempio Lyu et al. [20] presentano un workflow completo per aggiungere dispositivi termici (lampade riscaldanti, ventole) in simulazioni VR di ambienti architettonici, trovando che ciò migliora la *validità ecologica* degli esperimenti e la *performance* degli utenti in compiti immersivi.

Riassumendo: visivo e sonoro sono i canali tradizionali e fondamentali; tatto e termico sono canali aggiuntivi emergenti che possono aumentare la presenza e fornire nuove modalità di comunicazione con l'utente. Un approccio *multisensoriale integrato* – dove magari un evento è segnalato con un mix di luce, suono, vibrazione e calore coerenti – può offrire un'esperienza davvero ricca e chiara, sebbene vada progettato con cautela per non sovraccaricare o confondere. Per esempio, si potrebbe avere una *gerarchia*: il primo richiamo è un suono diegetico, se non basta una vibrazione leggera, infine un flash visivo; oppure usare ogni canale per uno scopo diverso (il suono per dire “guarda dietro”, il termico per trasmettere l'atmosfera/emozione di ciò che c'è dietro, etc.).

Nel contesto di questa tesi, l'idea innovativa è proprio di sfruttare il feedback termico in chiave direzionale come strumento per ridurre la FOMO. Questa scelta nasce dall'intuizione che un segnale termico, se integrato narrativamente (es. corrispondendo a elementi caldi/freddi della scena), possa guidare l'attenzione in modo invisibile – lo spettatore percepisce un cambiamento nell'ambiente virtuale, non un'istruzione esplicita, mantenendo così immersività e agency. Nel prossimo paragrafo sugli obiettivi di ricerca chiariremo meglio come intendiamo impiegare concretamente questa tecnica, ma è importante sottolineare che – ad oggi – nessuno studio ha ancora combinato feedback termico e guida dell'attenzione anti-FOMO. Ci troviamo quindi in territorio pionieristico, che unisce fili di ricerca finora paralleli: da un lato la mitigazione della FOMO, dall'altro l'uso di canali sensoriali non convenzionali (termici) in VR. I risultati attesi potrebbero aprire nuove direzioni per progettare esperienze immersive più confortevoli e avvolgenti.

1.7 Obiettivi

Alla luce di quanto esposto finora, possiamo ora approfondire chiaramente gli obiettivi che questo lavoro di tesi si propone di raggiungere. Lo scopo è di progettare, implementare e valutare una strategia innovativa per ridurre la FOMO negli utenti di cinema VR a 360°, mantenendo elevati il loro senso di presenza e l'agency durante la visione. Questo macro-obiettivo può essere articolato in vari sotto-argomenti specifici.

1) Ridurre efficacemente la FOMO: sviluppare un sistema o insieme di tecniche che minimizzino la sensazione di “paura di perdersi eventi” durante la prima visione di un contenuto narrativo a 360°. In pratica, che lo spettatore riesca a seguire tutte le parti importanti della storia senza provare eccessiva ansia o frustrazione per possibili contenuti persi. Ciò dovrebbe riflettersi sia in misure soggettive (punteggi di FOMO più bassi rispetto a una condizione di visione tradizionale) sia oggettive (meno eventi narrativi rilevanti persi di visti dallo spettatore).

2) Mantenere (o migliorare) la presenza: qualsiasi soluzione anti-FOMO proposta dovrà preservare il senso di presenza dell'utente nell'ambiente virtuale. L'utente non dovrà sentirsi estraniato o percepire di trovarsi in una simulazione a causa della tecnica proposta; idealmente, infatti, l'obiettivo è che possa sentirsi maggiormente immerso, proprio grazie a quest'ultima. Questo significa progettare un sistema equilibrato, ben integrato e non troppo invasivo. Sarà misurata la presenza percepita per assicurare che non vi siano cali significativi di quest'ultima e confrontata con studi precedenti: l'aspettativa è che i nostri accorgimenti non compromettano la presenza, in linea con quanto emerso in soluzioni precedenti ben concepite (per es. Yamaguchi 2022 ha ridotto FOMO “*senza impatti negativi sull'esperienza*” [7]).

3) Preservare l'agency e il piacere dell'esplorazione: l'utente dovrà continuare a sentirsi libero e in controllo della propria esperienza visiva. Questo obiettivo è infatti cruciale: non si vuole imporre l'attenzione in modo tale che lo spettatore avverta di essere eccessivamente guidato e diretto. Al contrario, l'auspicio è che la nostra tecnica sia principalmente di supporto nelle scelte condotte dall'utente. In concreto, ci proponiamo di evitare approcci che portino a togliere all'utente il controllo, come la rotazione automatica vincolante della visuale, e di privilegiare segnali informativi più che coercitivi. L'agency percepita sarà valutata con domande mirate (es. “mi sono sentito libero di esplorare la scena a mio piacimento”), e l'obiettivo è non rilevare differenze negative rispetto a una condizione standard di visione libera. Un buon esito sarebbe costituito da utenti che dichiarano di

aver apprezzato l'aiuto fornito dalla nostra soluzione, ma di aver comunque vissuto l'esperienza a modo proprio.

4) Integrare il feedback multisensoriale termico come nuova dimensione: un obiettivo innovativo è l'implementazione di un prototipo di sistema termico direzionale da impiegare nella fruizione del film 360°. Si vuole dimostrare la fattibilità di utilizzare stimoli termici per scopi di storytelling immersivo. Più specificamente, il sistema dovrebbe poter generare localmente del calore su diversi lati del corpo o della testa dell'utente in sincronia con gli eventi del film. Un sotto-obiettivo sarà quindi progettare l'hardware (ad esempio con piastre termoelettriche controllate da Arduino) e il software per pilotare in tempo reale il dispositivo durante la visione. In sintesi, si intende costruire una "bussola termica" intorno all'utente, che indichi, attraverso variazioni di temperatura, dove sta accadendo qualcosa di rilevante per la narrazione. Questo rappresenta un contributo all'ambito cinematografico immersivo, poiché finora (come vedremo nei paragrafi successivi) poche ricerche hanno esplorato il canale termico in esperienze narrative, e nessuna in particolare per mitigare la FOMO.

5) Valutare l'efficacia del sistema e raccogliere linee guida: obiettivo fondamentale è sperimentare in modo rigoroso la soluzione proposta con utenti e test reali, per poter trarne conclusioni di carattere generali. Condurremo uno studio utente comparativo per vedere se effettivamente la FOMO si riduce e gli altri parametri (presenza, agency, comfort) restano elevati. Oltre ai dati quantitativi, saranno raccolti feedback qualitativi per capire come gli spettatori hanno vissuto e percepito l'esperienza: sarà valutato se, per esempio, noteranno consapevolmente i segnali termici, se li interpreteranno correttamente per girarsi, se li troveranno piacevoli, neutri o fastidiosi. L'obiettivo è ricavare linee guida progettuali; se la soluzione funziona, come affinare l'uso del termico direzionale in futuri lavori (intensità ideale, durata, se associarlo sempre a un elemento diegetico per coerenza oppure no, ecc.); capire cosa potrebbe non funzionare o essere migliorabile (es. se gli utenti non notassero abbastanza il caldo, significherebbe che va reso più evidente o combinato con altre tecniche, per esempio aptiche). In ogni caso, lo studio fornirà conoscenze utili sul design multisensoriale per l'attenzione in VR, delineando best practice e linee guida utili per creare contenuti immersivi più coinvolgenti e testare nuovi sistemi di feedback per mitigare la FOMO.

Nel prossimo paragrafo, saranno formulate le domande di questo studio specifiche e le relative ipotesi che guideranno il lavoro sperimentale, direttamente indotte dagli obiettivi sopra esposti.

1.8 Domande dello studio e ipotesi

Dagli obiettivi identificati, possiamo derivare tre principali *Research Question* (RQ) che questa tesi intende indagare, ciascuna accompagnata da una ipotesi formulata in base allo stato dell'arte e alle aspettative ragionate:

RQ1: L'utilizzo di un feedback termico direzionale durante la visione di un video immersivo a 360° consente di ridurre la FOMO rispetto a una visione priva di tale feedback?

Ci si aspetta che i partecipanti che fruiscono dell'esperienza con il sistema di cue termici riportino un livello di FOMO significativamente più basso e/o si perdano meno eventi importanti, rispetto ai partecipanti senza tale assistenza dotata. Questa ipotesi è supportata dall'evidenza che fornire all'utente un "quadro completo" o un segnale aggiuntivo per le porzioni di panorama sferico non viste aiuta a placare l'ansia di perdere contenuti. Per esempio, Yamaguchi et al. hanno dimostrato che dare una panoramica visiva riduce la FOMO senza effetti negativi [7]; analogamente, si ipotizza che un segnale termico possa indirizzare l'attenzione in modo da evitare che l'utente percepisca di essersi perso qualcosa. Infatti, si prevede che il gruppo di utenti a cui verrà somministrato il test di visione con feedback termico indossato avrà punteggi medi inferiori nei questionari FOMO e identificherà un maggior numero di eventi chiave (meno *missing out*) rispetto al gruppo senza dispositivo equipaggiato.

RQ2: L'introduzione di stimoli termici direzionali influisce sul senso di presenza e sull'agency dello spettatore nell'esperienza VR?

Si prevede che non vi sarà un impatto negativo significativo né sulla presenza né sull'agency, e anzi la presenza potrebbe risultare lievemente maggiore grazie alla multisensorialità che si adotterà. Questa ipotesi si basa su due considerazioni: studi multisensoriali mostrano che aggiungere canali di feedback, come il termico, tende a rafforzare la presenza dell'utente, immergendolo più profondamente nell'ambiente simulato; e, inoltre, il design farà uso di stimoli termici diegeticamente giustificati (es. caldo associato a un fuoco nella scena oppure elementi che riconducano, anche inconsciamente, al calore come strumento narrativo ad hoc), evitando elementi estranei e che quindi l'illusione narrativa non sia compromessa. Inoltre, contrariamente a metodi invasivi come la rotazione forzata, i cue termici non sottraggono controllo all'utente, che resta libero di reagire come e se vuole al segnale; pertanto, non dovrebbero ridurre l'agency percepita.

In letteratura, persino un approccio di *forced guiding* meccanico è stato tollerato senza decrementi di presenza o soddisfazione quando ben calibrato [1]. Ci si aspetta dunque che un metodo molto meno

invasivo come quello in esame non intacchi questi aspetti. Questo presupposto sarà confermato se i punteggi di presenza rimangono pari (o superiori) a quello base (visione tradizionale) e le valutazioni di agency/libertà non mostrano differenze significative negative. Potremmo anche verificare se la presenza aumenta leggermente con stimoli termici, il che sarebbe un valore aggiunto.

RQ3: I partecipanti sono in grado di percepire e interpretare correttamente i segnali termici direzionali come indicazione di dove volgere lo sguardo, trovandoli integrati nell'esperienza (non distraenti)?

Si ipotizza che la maggior parte degli utenti noterà i cambiamenti di temperatura e li assocerà spontaneamente a elementi della scena, senza considerarli una distrazione esterna. In altri termini, ci si aspetta che i cue termici risultino sufficientemente salienti da essere percepiti, ma anche altrettanto naturali da essere accettati come parte integrante dell'esperienza. Questa ipotesi è più esplorativa e sarà verificata attraverso osservazioni qualitative e parametri quantitativi (per esempio, misurando il tempo di reazione medio: dal momento in cui attiviamo un segnale termico al momento in cui l'utente sposta lo sguardo verso la direzione indicata – un delay di pochi secondi, compatibile con l'inerzia termica). L'interpretabilità del segnale termico potrebbe non essere immediata al primo istante di utilizzo, per questo bisogna progettare un dispositivo che per cui gli utenti possano capirne il meccanismo dopo 1-2 occorrenze durante l'esperienza, soprattutto se il segnale è ben collegato a un evento evidente. In più, considerato il feedback dei test raccolto da Gao W. [1] sul suo sistema multi-cue integrato evidenzia, per cui i partecipanti hanno apprezzato poter essere guidati senza perdere il piacere della visione libera, analogamente, ipotizziamo che i gli utenti dei test descriveranno i cue termici come un aiuto “trasparente” e non come un fastidio. Invece, nell'eventualità che alcuni utenti li trovassero poco percepibili, l'ipotesi di questo paragrafo verrebbe falsificata parzialmente e ciò indicherebbe la necessità di rendere il segnale più marcato o combinato con altri canali.

In sintesi, le ipotesi prevedono esiti positivi, tra cui riduzione del FOMO, mantenimento di presenza, agency e buona accoglienza e/o usabilità dei segnali termici.

Naturalmente, si considerano anche possibili risultati alternativi. Per esempio, è possibile che il feedback termico da solo non riduca drasticamente la FOMO ma necessiti di essere affiancato da un segnale visivo/sonoro da essere associato (in tal caso la prima ipotesi verrebbe solo parzialmente confermata, evidenziando che il termico funziona meglio in multimodalità). Oppure taluni utenti potrebbero non notare le variazioni termiche in situazioni di forte concentrazione visiva, portando a rivedere il design del dispositivo per aumentare l'intensità o la rapidità del segnale termico. Tutte queste eventualità saranno discusse alla luce dei dati raccolti (vedi Capitolo 6).

Le domande delineate guideranno la progettazione dell'esperimento descritto nei capitoli successivi. A seconda dei risultati, saranno confermate o rifiutate le ipotesi, contribuendo così a chiarire se il feedback termico direzionale possa entrare efficacemente nel set di strumenti disponibili per creatori di contenuti immersivi a 360° per combattere la FOMO senza sacrificare immersione e libertà dello spettatore.

1.9 Research gap e posizionamento dello studio

Dopo aver esaminato la letteratura e definito gli obiettivi, è importante individuare con precisione il *gap* di ricerca che questo lavoro intende colmare, posizionandolo correttamente in questo ambito rispetto ai contributi esistenti. Diversi studi recenti hanno affrontato, da prospettive complementari, il problema della guida dell'attenzione e della FOMO nei media immersivi. E, in questo contesto, è possibile tracciare una linea che lega le ricerche chiave, per le quali ciascuna ha portato un contributo e un avanzamento, ma lasciando aperti nuovi interrogativi e proposte, fino ad arrivare a una proposta che mira a integrare elementi finora non congiunti.

Il lavoro condotto da Aitamurto et al. [6] costituisce di fatto uno dei primi studi empirici ad esplorare esplicitamente la FOMO nel contesto VR, confermando che durante la visione di film a 360° gli utenti sperimentano effettivamente FOMO, ma anche JOMO, e – sorprendentemente – che la presenza non viene compromessa dalla FOMO stessa. Inoltre, ha osservato che la FOMO tende a ridursi alla seconda visione, suggerendo che la familiarità con il contenuto allevia l'ansia di perdita.

Questo lavoro, però, non propone soluzioni pratiche al problema della FOMO; si limita a misurarlo e a discuterne l'impatto. Gli autori stessi nelle conclusioni raccomandano ai *content creator* di considerare la FOMO e incentivare visioni multiple, ma non esplorano tecniche di regia o strumenti per mitigare la FOMO durante la prima visione. Inoltre, lo studio di Aitamurto ha usato un singolo film 360° con sceneggiatura specifica e condizioni sperimentali controllate – scenario utile per verificare alcune ipotesi, ma lontano dalla fruizione libera reale di un ambiente comune (come quello domestico, per esempio).

Il lavoro di Yamaguchi et al [7] colma in parte il gap precedente proponendo una tecnica concreta anti-FOMO: una miniatura panoramica interattiva dell'intero video, visualizzabile dall'utente durante la visione.



Figura 1.9.1 Illustrazione del sistema *panoramic thumbnail*

I principali risultati hanno dimostrato sperimentalmente che fornire questo *tool* panoramico riduce in modo significativo la FOMO senza introdurre effetti negativi sull'esperienza utente. Gli utenti che fruivano di questa *thumbnail* potevano infatti vedere “in piccolo” cosa accadeva fuori dal loro attuale sguardo e quindi sentirsi più sereni e in controllo; i dati comportamentali confermano che questa interfaccia veniva usata attivamente per esplorare le aree fuori dal campo di visuale dell'utente.

La soluzione proposta è efficace ma focalizzata su un singolo aspetto visivo e lascia aperti alcuni spunti di riflessione: (a) si affida a un elemento UI aggiuntivo (la mini-mappa) che, se pur integrato, è comunque un componente 2D non diegetico; (b) non coinvolge altri sensi: è un approccio puramente visivo. Non considera, per esempio, l'uso di suoni o altri *cue* che potessero potenziare la segnalazione; (c) la miniatura richiede che l'utente vi presti attenzione attivamente: non guida automaticamente lo sguardo, dà solo un punto di vista in più. Se un utente dimentica di guardare la mini-mappa, la FOMO non viene mitigata. Quindi rimane spazio per soluzioni che guidino più direttamente l'attenzione senza tuttavia togliere agency. Inoltre, la tecnica non considera feedback aptici o termici (inesplorati all'epoca). Dunque, dopo questo lavoro, ci si potrebbe chiedere come combinare questa efficacia anti-FOMO con un'esperienza ancora più immersiva e multisensoriale.

Gao, W. [1] rappresenta ad oggi lo sforzo più completo e integrato per affrontare la FOMO. In questo studio hanno sviluppato un intero sistema di *guided viewing* che combina diverse tecniche: una piattaforma motorizzata ruota gradualmente lo spettatore (rotazione forzata) per assicurare che veda le parti principali, abbinata a cue audiovisivi diegetici, indicazioni picture-in-picture (PiP) e persino monitoraggio biometrico dell'attenzione. In pratica, si tratta di un *framework multi-soluzione*, che riduce l'ampiezza di video (offrendo opzioni 360° e 180°), introduce preview panoramiche e suoni per segnalare eventi, oltre che ruotare fisicamente o virtualmente l'utente quando necessario.



Figura 1.9.2 Sistema motorizzato di *guided viewing*

Il sistema di Gao ha mostrato di poter eliminare gran parte della FOMO senza influire negativamente sull'esperienza complessiva, sulla presenza o sul comfort. I test indicano che gli utenti con *forced guiding* percepiscono meno paura di perdersi contenuti, ma non riportano una diminuzione nel piacere di visione libera né un aumento di *motion sickness* (che era una preoccupazione potenziale)⁴⁸. Questo è un risultato importante: significa che con la giusta calibrazione si può guidare anche in modo relativamente intenso (rotazione forzata) senza compromettere l'esperienza utente.

Nonostante la sua completezza, il lavoro di Gao non ha esplorato alcuni aspetti che restano dunque aperti. In primo luogo, il focus è sulla vista (rotazioni, PiP) e ascolto, con un accenno all'aptico (inteso solo come rotazione fisica). Il senso del calore/freddo non viene considerato, per cui il potenziale di quell'approccio rimane inesplorato. In secondo luogo, l'approccio di questo studio, pur efficace, potrebbe risultare complesso e costoso da implementare nella pratica (richiede pedane motorizzate, sensori speciali, ecc.). Infine, il forced guiding per quanto ben tollerato potrebbe non essere adatto a tutti i contesti: in contenuti artistici potrebbe essere percepito come troppa "ingerenza" registica. Rimane quindi aperta la ricerca di strategie alternative, possibilmente meno invasive fisicamente ma

sempre efficaci. Il lavoro di Gao W. [1] affronta molti dei limiti precedenti (integra più soluzioni, valida presenza, etc.), però lascia in sospeso l'idea di guidare senza meccanicamente spostare lo spettatore.

Sulla scia di questi studi, questo lavoro si colloca come un ulteriore passo per poter mitigare la FOMO e portare per la prima volta il feedback termico direzionale in quest'ambito, con un approccio che punta ad essere non invasivo e narrativamente integrato.

Si può considerare che questa soluzione possa stare a metà strada tra la miniatura passiva di Yamaguchi e la guida attiva di Gao: non si vuole costringere l'utente a girarsi forzatamente, ma nemmeno lasciarlo completamente da solo (seppure con una mappa a disposizione). Ciò, rispettando le aspettative illustrate, garantirà un'esperienza in cui l'utente non si sente controllato o passivo (agency intatta, a differenza di possibili critiche al forced guiding) ma nemmeno spaesato (senza aiuti).

Più in generale, poi, mancano conoscenza e studi su come il canale dei feedback termici direzionali influisca su presenza e comfort in questo contesto. Inoltre, si fornisce una soluzione anti-FOMO che potrebbe essere implementata con hardware relativamente semplice (moduli termici e un microcontrollore, potenzialmente economici e aggiungibili a un visore esistente), offrendo così un'alternativa a sistemi più complessi.

Dal punto di vista accademico, il lavoro di tesi si posiziona all'incrocio di due filoni: quello dell'attentional guidance in VR (finora dominato da visivo, sonoro e aptico) e quello della VR multisensoriale (in cui, però, pochi hanno applicato sensi differenti dal visivo e uditivo a problemi narrativi specifici come la FOMO). Ci si aspetta che i risultati arricchiranno entrambi i campi e saranno fornite indicazioni sia a chi studia come ridurre i *missing out* nelle storie immersive, sia a chi esplora nuovi dispositivi multisensoriali e di come valutarne l'impatto sull'esperienza utente.

Se si riuscirà a dimostrare che un tale approccio funziona – ovvero che gli utenti percepiscono meno FOMO e continuano a sentirsi presenti e liberi di fare scelte – si sarà apportato un nuovo contributo, aprendo la strada a nuove modalità di regia immersiva dove anche elementi legati ai feedback termici possano guidare lo spettatore attraverso una storia.

1.10 Struttura del documento

Per guidare il lettore attraverso il percorso logico di questo lavoro, di seguito un elenco di contenuti che sono stati e saranno presentati nel corso di questo del lavoro di tesi, a seconda degli obiettivi preposti.

Introduzione e background: offre il contesto generale e le motivazioni dello studio, introduce i concetti teorici chiave (immersività, presenza, agency), descrive la FOMO/JOMO nei media immersivi e riporta lo stato dell'arte su tecniche narrative immersive e feedback multisensoriali. Sono definiti gli obiettivi dello studio, formulate le domande di ricerca con relative ipotesi, e identificato il *research gap*, posizionando il contributo della tesi rispetto ai lavori esistenti.

Progettazione del sistema proposto: descrive nel dettaglio la soluzione ideata per ridurre la FOMO. Viene presentato il prototipo sviluppato, sia nei suoi aspetti hardware che software. In particolare, si illustrerà la realizzazione del sistema di feedback termico direzionale: la scelta dei moduli termici (es. peltier o resistenze) e del loro posizionamento sull'utente, l'elettronica di controllo basata su microcontrollore (Arduino o simili) e l'integrazione con l'ambiente VR software (implementazione in Unity o piattaforma equivalente, sincronizzazione degli eventi del film 360° con l'attivazione dei feedback termici). Verranno inoltre discusse le scelte progettuali in termini di intensità dei segnali, ritardi, durata, e come questi parametri sono stati calibrati (anche tramite test pilota) per garantire sicurezza e comfort. Infine, il capitolo dettaglierà come il sistema tiene conto della diegesi: come associare un segnale di calore a specifiche fonti calde nella scena del film, in modo che il feedback sia percepito come coerente dall'utente.

Metodologia sperimentale: sarà spiegato il protocollo di test condotti per valutare l'efficacia del sistema proposto. Verranno descritti i partecipanti reclutati e le loro caratteristiche demografiche; il setup sperimentale (ambientazione, apparecchiature utilizzate, configurazione del visore VR e del dispositivo termico); il materiale di test, il contenuto video immersivo scelto per l'esperimento e le ragioni della sua scelta: durata, presenza di eventi paralleli adatti a generare FOMO, ecc. Si illustreranno le condizioni sperimentali a confronto – ad esempio: gruppo di controllo con visione 360° standard vs gruppo sperimentale con feedback termici attivi (e potenzialmente ulteriori varianti, come un gruppo con soli cue visivi per confrontare multimodalità vs unimodalità). Saranno delineate le misure raccolte: questionari post-visione per FOMO, presenza (usando item adattati da studi precedenti, opportunamente adattati); questionari sull'esperienza e l'usabilità dei cue (come comfort o livello di distrazione); metriche oggettive, come la percentuale di momenti salienti non visti, il tempo di reazione ai segnali, i dati di head-tracking (traiettorie di sguardo). Si discuterà l'approccio

di analisi statistica previsto. Inoltre, sarà descritta la procedura passo-passo seguita durante l'esperimento: briefing iniziale, svolgimento della visione, raccolta dati, debriefing.

Risultati: si presenterà in maniera organizzata i dati raccolti durante gli esperimenti, fornendo sia visualizzazioni (grafici, tabelle) sia descrizioni testuali dei risultati. Saranno presentati i dati relativi alla FOMO: differenze medie dei punteggi tra condizioni diversi, percentuale di eventi chiave notati e persi nei due gruppi. Si proseguirà con i risultati sulla presenza (confronto punteggi di *presence questionnaire*) e sull'agency/soddisfazione. Poi verranno riportati i dati riguardanti la capacità di interpretazione dei segnali termici, ad esempio quanti utenti hanno spontaneamente riferito di aver percepito caldo e di aver capito cosa significasse, oppure la latenza media tra segnale ed orientamento corretto dello sguardo. Tutti i risultati saranno accompagnati da test statistici di significatività (ANOVA, t-test, Mann-Whitney a seconda dei casi, con livello di significatività prefissato). Oltre ai dati quantitativi, si includerà una sintesi dei feedback qualitativi più rilevanti raccolti: citazioni di commenti degli utenti ed eventuali criticità segnalate. Tali osservazioni aneddotiche saranno utili per arricchire l'interpretazione dei dati numerici.

Discussione: in questa sezione saranno analizzati in maniera critica i risultati esposti in precedenza, collegandoli alle domande di ricerca e al contesto teorico. Si discuterà se e come le ipotesi sono state confermate, esaminando la magnitudine dell'effetto e la sua rilevanza pratica. Se qualche ipotesi non sarà confermata, si cercherà di interpretare il perché, confrontando per esempio con osservazioni degli utenti. Verranno confrontati i risultati con quelli di studi precedenti. Questa sezione legata alla discussione toccherà, quindi, anche i limiti dello studio: questioni metodologiche (ad esempio dimensione campione limitata, possibili bias, uso di un solo scenario narrativo, ecc.), limiti tecnici del prototipo (come il ritardo termico, precisione di controllo della temperatura e altri) e aspetti migliorabili. Un punto cruciale sarà l'analisi di quando e per chi questa proposta di soluzione tecnica funziona meglio o peggio. Inoltre, rifletteremo su eventuali effetti collaterali inaspettati: per citarne uno ipotetico, se il feedback termico avesse aumentato troppo la JOMO al punto che alcuni utenti ignorino volontariamente parti di trama confidando di sentirle dal caldo più tardi (speculazione da verificare). Tutto ciò porterà a formulare delle raccomandazioni e linee guida da rispettare: sia per i progettisti di esperienze VR (sul come, cioè, integrare una guida termica, e quindi quali intensità usare, come spiegare all'utente, etc.) sia per futuri studi (ad esempio, suggerire di esplorare anche feedback di freddo oltre al caldo, o di testare la tecnica su film di generi diversi per verificare la variazione della sua efficacia). In sostanza la discussione mirerà a posizionare il contributo della tesi

in questo ambito, evidenziandone il valore aggiunto, ma anche collocandolo nei confini di validità individuati e proponendo interpretazioni e soluzioni alle eventuali criticità emerse.

Conclusioni e sviluppi futuri: si chiuderà il documento riepilogando brevemente gli scopi iniziali e di come e se sono stati raggiunti. Si richiameranno i punti salienti dei risultati, sottolineando il contributo originale dello studio. Si discuterà l'impatto potenziale di queste scoperte sul campo del cinematic VR: ad esempio, l'idea che l'uso di canali insoliti come il termico possa aprire nuove dimensioni narrative. Infine, verranno delineate alcune linee di lavoro futuro che emergono da questo lavoro: ad esempio, testare la combinazione di feedback termico e feedback olfattivo; oppure sviluppare versioni wireless e indossabili del dispositivo termico per facilitarne l'adozione; o ancora indagare come ottimizzare la sincronizzazione degli stimoli termici con il montaggio di scene VR più complesse. Si potrà suggerire altresì anche di esplorare popolazioni diverse (es. utenti con disabilità sensoriali – il termico potrebbe essere utile per chi ha deficit visivi/uditivi, come canale alternativo) o applicazioni in domini specifici (addestramento VR dove segnalare pericoli potrebbe aumentare l'attenzione di sicurezza).

Con queste prospettive, la tesi si concluderà enfatizzando come il lavoro svolto rappresenti un passo iniziale verso esperienze immersive sempre più multisensoriali e user-centriche, in cui la tecnologia si mette al servizio della narrazione per garantire che nessuno debba più temere di “perdere qualcosa” mentre vive una storia in prima persona.

2. Proposta progettuale

2.1 Dal problema della FOMO alle prospettive di nuove soluzioni

Come analizzato, diversi studi hanno indagato soluzioni per attenuare il problema della FOMO, collocandosi lungo un *continuum* che va dall'aggiunta di interfacce supplementari alla progettazione di segnali integrati nella scena. Le prime strategie si basano su indicatori visivi esterni, come mappe o miniature panoramiche, capaci di fornire una panoramica costante del contenuto. Tali strumenti, pur riducendo l'incertezza, introducono però elementi estranei alla diegesi e possono ridurre l'immedesimazione. Al contrario, approcci basati su segnali diegetici o indizi percettivi visivi e sonori mirano a mantenere la coerenza narrativa, ma non eliminano completamente il rischio che lo spettatore trascuri o ignori i suggerimenti offerti.

Accanto a queste strategie si collocano soluzioni più radicali, come i sistemi di guida forzata che adattano dinamicamente l'ambiente in funzione dell'orientamento dell'utente. Tali approcci hanno dimostrato di poter ridurre sensibilmente la FOMO senza effetti negativi sulla qualità dell'esperienza, ponendo però questioni rilevanti legate all'agency e al comfort, in quanto forma di controllo esterno sulla percezione visiva. Parallelamente, la ricerca ha iniziato a esplorare anche l'impiego di feedback tattili direzionali, potenzialità interessanti ma che risultano ancora poco indagati nel contesto cinematografico immersivo.

In sintesi, lo scenario attuale mostra un quadro di soluzioni eterogenee, ciascuna con vantaggi e limiti specifici. Se da un lato le interfacce aggiuntive rischiano di compromettere l'estetica dell'esperienza, dall'altro i sistemi di guida automatica possono ridurre la libertà dello spettatore. Rimane pertanto aperto lo spazio per approcci alternativi, capaci di mitigare la FOMO in modo discreto, non invasivo e rispettoso della libertà percettiva. È all'interno di questo orizzonte che si colloca la proposta qui sviluppata, volta a sperimentare l'impiego del feedback termico direzionale come strumento di guida dell'attenzione.

2.2 Obiettivo: ridurre la FOMO mantenendo immersione e agency

Scopo di questo progetto è quindi sviluppare e valutare un sistema innovativo che riduca il senso di "perdersi qualcosa" nei video immersivi, preservando al contempo l'immersione sensoriale e l'agency dello spettatore. In termini progettuali, l'obiettivo si traduce nel fornire allo spettatore uno strumento aggiuntivo, multisensoriale, che lo aiuti a individuare eventi significativi fuori dal proprio

campo visivo, senza alterare i canali audiovisivi del film né sottrarre il controllo su dove rivolgere lo sguardo.

La soluzione proposta consiste nell'integrare un feedback termico direzionale all'esperienza VR. In pratica, lo spettatore sarà dotato di pad termici indossabili che, opportunamente posizionati sul corpo, possono riscaldarsi per segnalare la presenza di un contenuto rilevante in una certa direzione (ad esempio alla propria sinistra o destra). L'idea è che un lieve stimolo caldo sulla pelle funzioni come "segnale tattile" verso quella porzione di panorama sferico: il calore percepito su un lato del corpo suggerirà all'utente di voltarsi da quella parte per non perdere un elemento importante della scena. Questo metodo agisce su un canale sensoriale differente – il tatto, o termoccezione – e non interferisce con la visione (nessun elemento estraneo appare nel visore) né con l'ascolto del film. Inoltre, il feedback termico è per sua natura lieve e graduale: a differenza di una vibrazione o di un segnale visivo lampeggiante, un aumento di calore si sviluppa in modo meno brusco, richiamando l'attenzione in modo più subliminale. Ci si aspetta che ciò aiuti a mantenere l'esperienza immersiva, evitando di ricordare esplicitamente all'utente che c'è un sistema artificiale che lo sta guidando.

Un punto cruciale per lo sviluppo di questo dispositivo è che il sistema si configura come un assistente non intrusivo: non sposta la telecamera al posto dell'utente e non "impone" la direzione verso cui rivolgere lo sguardo, ma dà solo un suggerimento. L'utente rimane libero di ignorare il segnale – mantenendo dunque piena agency – oppure di assecondarlo ruotando la testa. In ogni caso, la semplice presenza di questo feedback dovrebbe assicurare lo spettatore, diminuendo l'ansia di perdersi qualcosa, sapendo di disporre di un *hint* aggiuntivo e che, se qualcosa di rilevante accade fuori dalla sua vista, il sistema lo avvertirà. Questo può trasformare la FOMO in una sorta di "fiducia" nei confronti dell'interfaccia (in linea con il passaggio da FOMO a JOMO teorizzato da Aitamurto et al. [6], poiché l'utente può concedersi di godersi ciò che vede sapendo che non resterà completamente ignaro di eventuali sviluppi paralleli importanti).

Dal punto di vista esperienziale, mantenere l'immersione significa che il nuovo canale sensoriale non deve degradare la sensazione di "essere lì" nello scenario virtuale. Un calore coerente con la scena (come il tepore di un fuoco acceso in una scena notturna) può essere interpretato come parte dell'ambiente virtuale stesso, arricchendo la multisensorialità e dunque l'immersione. Il calore è quindi usato con funzione informativa più che realistica. Tuttavia, se ben calibrato, potrebbe comunque essere percepito come un elemento integrato, diegeticamente giustificato. In ogni caso, rimane fondamentale che l'intensità, la tempistica e l'inerzia del feedback termico siano tarate per non distrarre e non causare discomfort.

In modo parallelo, il sistema dovrà rispettare l'agency dell'utente, ossia la sua sensazione di avere controllo sul proprio punto di vista e sulle proprie scelte durante la visione. Questo implica che il feedback termico non deve dare l'impressione di "forzare" una risposta, ma solo fornire un'indicazione. Ad esempio, se l'utente volutamente esplora un dettaglio secondario, il sistema si limita a segnalare un altro più importante altrove, ma la decisione finale di spostare lo sguardo resta dell'utente. Ciò è in linea con il concetto espresso da Gao W. [1] secondo cui una soluzione anti-FOMO deve evitare di privare lo spettatore del *piacere della visione libera*. In questo approccio, anche qualora l'utente decidesse di ignorare il segnale termico, il film proseguirà normalmente (non ci sono pause forzate né contenuti bloccanti in attesa di un'azione da parte dell'utente) – accettando che in tal caso l'utente perderà quell'evento come in un film tradizionale, ma per scelta propria. La differenza è che avrà avuto consapevolezza che qualcosa stava accadendo.

Riassumendo, l'obiettivo progettuale è creare un sistema multisensoriale termico che funga da "sesto senso" per lo spettatore: una presenza trasparente che preserva l'immersione narrativa e la libertà di esplorazione, intervenendo solo per mitigare la FOMO. I criteri di successo attesi saranno duplici: da un lato una riduzione misurabile della FOMO (minor preoccupazione riferita dagli utenti, maggiore percentuale di contenuti chiave effettivamente visti), dall'altro l'assenza di effetti collaterali negativi su presenza, coinvolgimento e soddisfazione dell'utente rispetto a una visione standard. La sfida consiste nel bilanciare efficacia e discrezione del feedback.

2.3 Scenario d'uso e requisiti funzionali

Si consideri uno scenario tipico di fruizione: un utente sta fruendo, tramite visore VR, di un cortometraggio narrativo in 360°. È seduto su uno sgabello girevole, oppure in piedi in uno spazio libero, in modo da potersi voltare liberamente verso destra o sinistra. Sulle braccia ha applicato il dispositivo di feedback termico – per esempio due pad mantenuti in posizione da due fasce elastiche sugli avanbracci. All'avvio dell'esperienza, l'utente osserva la scena immersiva davanti a sé: il sistema traccia costantemente l'orientamento della testa (movimento del visore, quindi dello sguardo virtuale) tramite i sensori del dispositivo di VR. Durante un evento significativo della storia di cui si sta fruendo, sulla sinistra dello spettatore, per esempio, un secondo personaggio entra in scena. Normalmente, senza aiuti o sistemi di direzionamento, l'utente rischierebbe di non accorgersene in tempo, provando poi frustrazione al capire di aver perso quel dettaglio. Con il sistema attivo, invece, non appena l'evento ha luogo il sistema rileva che lo sguardo dell'utente non è rivolto verso di esso, quindi attiva il pad termico sinistro. Lo spettatore, dopo alcuni secondi, percepisce un tepore sul braccio sinistro: è una sensazione insolita ma non sgradevole, che lo induce a interrogarsi su cosa la

stia causando. Istantaneamente, volge lo sguardo verso sinistra, trovandosi così a inquadrare l'evento nella direzione “giusta” e potendo assistervi consapevolmente. A questo punto il sistema disattiva il pad (il calore tenderà a dissiparsi rapidamente) poiché il suo scopo è stato raggiunto: l'utente ha orientato l'attenzione dove necessario.

In questo scenario d'uso ideale, il sistema si comporta quindi come un “assistente silenzioso” durante tutta la visione. Gran parte del tempo rimane inattivo oppure a una temperatura nominale di base, in attesa, e lascia che l'utente esplori liberamente a 360°. Solo quando il comportamento dell'utente (il suo orientamento) e la situazione del filmato (presenza di un contenuto fuori vista) soddisfano certe condizioni di *trigger*, il sistema interviene con un feedback appropriato. Dalle interazioni descritte emergono già alcuni dei requisiti funzionali chiave che il sistema deve soddisfare:

- Rilevare la direzione dello sguardo dell'utente rispetto alla scena a 360° in tempo reale. In pratica, deve conoscere l'orientamento testa (*yaw/pitch/roll*) o almeno l'angolo orizzontale (*azimut*) verso cui l'utente guarda, e confrontarlo con le posizioni delle varie regioni di interesse (ROI, region of interest) del contenuto. Questo tracking dev'essere continuo e ad alta frequenza (aggiornamento per ogni frame), per avere un quadro accurato e preciso di dove sta guardando l'utente.
- Rappresentare o conoscere le posizioni degli eventi narrativi nello spazio a 360°. Ogni evento importante o elemento che il regista vuole assicurarsi non passi inosservato deve essere associato a una direzione nello spazio virtuale (ad esempio 60° a sinistra rispetto al fronte iniziale). Queste informazioni possono essere predefinite (definite in anticipo via codice, via script) oppure determinate dinamicamente se il contenuto è interattivo. Trattandosi di un video lineare a 360°, i ROI saranno impostati manualmente lungo la timeline: in ogni intervallo temporale si saprà se c'è un ROI attivo e la sua direzione.
- Determinare se l'utente sta guardando il ROI oppure no, in ogni momento rilevante. Questo implica calcolare la differenza angolare tra la direzione del ROI e la direzione di sguardo dell'utente: se tale differenza supera una certa soglia (indicativa di un ROI fuori dal campo visivo attuale), il sistema considera l'utente “non allineato” con il contenuto importante.
- Attivare il feedback termico appropriato quando serve. Il sistema deve essere in grado di accendere il pad termico corrispondente al lato (o alla zona) in cui si trova l'evento non visto. Nel caso più semplice di due pad (sinistra e destra). Estensioni con più pad devono essere potenzialmente configurabili, per esempio per distinguere anche eventi dietro di sé.

- Disattivare il feedback quando non è più necessario. Il sistema non deve lasciare il pad scaldato più a lungo del dovuto: non appena l'utente volge lo sguardo verso il ROI il segnale termico va interrotto. Ciò sia per evitare discomfort (il calore prolungato potrebbe divenire fastidioso), sia per non confondere l'utente una volta che ha reagito correttamente allo stimolo. Idealmente, se l'utente guarda spontaneamente verso un evento (e quindi non c'è più "mancata visione"), il sistema dovrebbe evitare di attivare il pad di base. Un'alternativa è quella di mantenere una temperatura nominale base a cui riportare il pad al momento dello spegnimento.
- Non interferire con la riproduzione del video. A livello funzionale, il sistema opera in parallelo al contenuto: non deve mettere in pausa il film né alterarne il flusso narrativo. Questo significa che tutte le azioni (rilevamento e feedback) devono avvenire in tempo reale, sincronizzate col video, senza introdurre latenza percepibile o interruzioni. Il filmato prosegue normalmente, indipendentemente dalle decisioni dell'utente di girarsi o meno; il ruolo del sistema è solo aggiungere un canale informativo.
- Garantire la sicurezza e il comfort dell'utente durante l'uso. Sebbene questo rientri nei requisiti non-funzionali, vale la pena esplicitare dal punto di vista dell'utilizzo che il sistema non deve causare danni o eccessivo ingombro. Lo scenario d'uso dà per assunto che l'utente possa muovere le braccia e il busto senza impedimenti: quindi i pad e i relativi cablaggi devono essere progettati in modo da non limitare i movimenti né creare pericoli o distrazioni.

In base a questo scenario, è possibile delineare alcuni casi d'uso fondamentali, come, per esempio *"Segnalazione di evento non visto"*, *"Cessazione del segnale dopo risposta dell'utente"*, *"Nessuna attivazione se utente già orientato correttamente"*. Tali casi d'uso guidano la definizione delle funzionalità del sistema. Si possono inoltre identificare delle condizioni limite. Se due eventi importanti accadono contemporaneamente in direzioni opposte (uno a sinistra e uno a destra fuori dal FOV, field of view), il sistema attualmente ideato non può fare percepire entrambi chiaramente tramite soli due pad – questo scenario dovrà essere evitato in fase di authoring del contenuto o gestito imponendo una priorità (uno dei due eventi è principale e viene arbitrariamente segnalato). Allo stesso modo, se un evento si verifica alle spalle dell'utente (180°), con due soli pad laterali il segnale termico potrebbe non indicare un lato preferenziale: occorrerà definire una convenzione (per esempio segnalare con il pad del lato in cui proseguirà l'azione, oppure attivarli entrambi per indicare lo specifico caso limite). Questi dettagli rientrano nei requisiti di progettazione da affrontare.

2.4 Architettura di alto livello (hardware e software)

Dal punto di vista dell'architettura, il sistema è composto da due sottosistemi principali:

(A) il modulo software in ambiente VR (implementato in Unity) che gestisce il tracciamento dei movimenti del visore indossato dall'utente e la logica di attivazione;

(B) il modulo hardware esterno (basato su microcontrollore Arduino e pad termici) che fornisce il feedback fisico all'utente. Di seguito descriviamo l'architettura integrata, evidenziando il flusso di informazioni e i componenti chiave coinvolti.

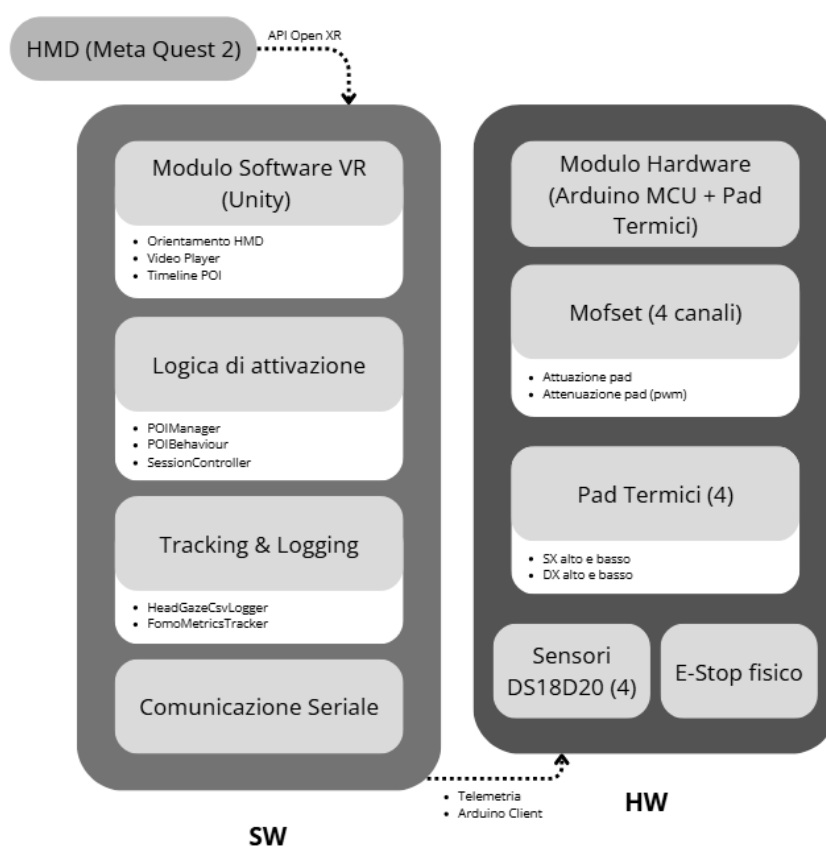


Figura 2.4.1 Schema a blocchi dell'architettura proposta

Sul fronte software, sarà utilizzata un'applicazione sviluppata con Unity 3D (versione 2020 LTS) con supporto VR, l'applicazione carica il video a 360° (o scena virtuale equivalente) tramite una componente *video player* (proiettando il filmato su un oggetto sferico) e traccia la posizione e orientamento della testa dell'utente tramite le API XR del visore. Il codice sviluppato in Unity funge da "cervello" logico: per ogni frame calcola l'eventuale disallineamento tra lo sguardo dell'utente e la direzione di interesse narrativa corrente. Quando l'applicativo in Unity rileva una condizione per

cui va attivato un cue termico, invia un comando al sottosistema hardware attraverso una comunicazione seriale.

Il sottosistema hardware consiste in un microcontrollore Arduino collegato al computer che funge da host via cavo USB. L'Arduino riceve i comandi seriali dal codice di Unity (ad es. stringhe o byte che codificano “accendi pad sinistro” o “spegni pad destro”) e controlla l'erogazione di corrente verso i pad termici indossati dall'utente. Ogni pad termico è connesso all'Arduino attraverso un circuito di pilotaggio con transistor MOSFET, ciò permette al microcontrollore di accendere o spegnere ciascun pad secondo necessità. L'Arduino svolge anche un ruolo di monitoraggio di sicurezza: ogni pad è infatti collegato a dei sensori di temperatura, così da leggere in tempo reale il valore raggiunto e assicurarsi che rimanga entro soglie sicure. In caso di temperatura eccessiva, l'Arduino può autonomamente disattivare il pad e segnalare la condizione al software.

Il flusso operativo tipico nell'architettura è il seguente: lo script di Unity invia un comando seriale, l'Arduino legge il comando e attiva l'uscita collegata al pad corretto, che inizia a riscaldarsi, trasferendo calore al braccio sinistro dell'utente. Poi lo script in loop su Unity continua a monitorare l'orientamento; non appena l'utente ruota la testa verso la direzione corretta (segno che ha visto l'evento), in Unity si invia un comando di spegnimento e l'Arduino disattiva il relativo pad; inoltre, se indipendentemente il sensore sul pad legge una temperatura troppo alta, l'Arduino spegnerà il pad anche senza attendere istruzioni (sovrascrivendo eventualmente il comando software, a tutela dell'utente). L'architettura, quindi, prevede sia un controllo guidato dall'evento (top-down, da Unity) sia un controllo reattivo di sicurezza (bottom-up, da Arduino).

Vale la pena notare che la comunicazione tra il software in Unity e Arduino è bidirezionale. Oltre ai comandi di attuazione, l'Arduino può inviare a Unity dei dati, ad esempio le letture dei sensori di temperatura o messaggi di conferma. Il codice in Unity potrebbe utilizzarli per registrare log (come l'andamento della temperatura di un pad durante una sessione, utile per analisi tecniche) o per verificare lo stato del dispositivo (es. ricevere conferma che un pad è acceso). In generale, però, il volume di dati scambiati è molto basso: pochi byte per comando, su un collegamento seriale tipicamente a 115200 baud; quindi, la comunicazione è rapida e in tempo reale rispetto alla scala temporale umana.

Sul fronte utente, l'architettura è pensata per minimizzare l'invasività, l'unico collegamento fisico è il cavo che va dall'Arduino (posizionato sullo sgabello girevole utilizzato dall'utente per fruire del contenuto immersivo) ai pad sulle braccia. Non sono richieste batterie indossate, né zainetti o simili, poiché l'Arduino può essere alimentato via USB dal PC stesso (anche se, come vedremo, l'alimentazione dei pad potrebbe richiedere una fonte di corrente separata più robusta). L'utente

indossa il visore VR come di consueto e in più le due fasce con i pad: queste possono essere messe e tolte facilmente con velcro o elastici, e non intralciano né la vista né i movimenti della testa.

Alternative architetture considerate in fase di progettazione sono state valutate anche come configurazioni diverse. Un'opzione era quella di posizionare i pad termici disposti attorno al corpo (ad esempio quattro pad: sinistra, destra, avanti, dietro) per coprire tutte le direzioni cardinali, ma un pad frontale non sarebbe stato quasi mai attivato – gli eventi frontali sono già visti dall'utente senza bisogno di cue – e uno posteriore puro sarebbe di interpretazione non immediata, quando basta scegliere arbitrariamente se far girare l'utente in una direzione oppure l'opposta, in ottica di comfort come priorità. Oppure una configurazione con altrettanti pad, ma per indicare ROI non solo sul piano orizzontale, ma anche verticale: quindi posizionare due pad ai lati (sulle braccia) e due pad su zona alta e bassa del corpo per suggerire questa specifica direzionalità. Quest'ultima configurazione non è poi stata presa in considerazione sia per agevolare la comodità dell'utente durante i test, sia perché i prodotti immersivi che sviluppano gli eventi principali anche su un asse verticale non sono sufficientemente numerosi per essere considerati di riferimento per dei test con gli obiettivi di questo lavoro di tesi.

Si è quindi scelto un compromesso costo/beneficio, due zone da riscaldare sugli arti superiori forniscono una chiara indicazione sinistra/destra, sufficiente per la stragrande maggioranza dei casi narrativi (gli eventi importanti di solito avvengono in un settore preciso, non esattamente dietro le spalle senza componente laterale). Questa configurazione riduce costi e complessità – solo due canali di attuazione, due pad (o quattro, due per braccio, affiancati) e relativi sensori, due punti di fissaggio – e semplifica la comprensione per l'utente (il mapping potrebbe essere immediato e intuitivo).

Un'altra alternativa esaminata è stata l'uso di attuatori diversi dal calore, come vibrazione o impulsi d'aria (*wind feedback*). Dal punto di vista architetture, la differenza sarebbe nel modulo hardware: ad esempio motorini vibranti al posto dei pad, o micro-ventole direzionali. I primi sono facili da controllare con Arduino ma, come discusso nella sezione precedente, feedback di questo genere rischia di essere troppo netto e potenzialmente udibile (il ronzio) interferendo con l'audio. Le micro-ventole aggiungerebbero rumorosità e un notevole ingombro di alimentazione (oltre a tempi di risposta più lenti nell'avviamento dell'aria). Il feedback termico tramite pad resistivi sembra dunque rivelarsi una scelta equilibrata: relativamente semplice da implementare, silenzioso, low-cost e già testato in letteratura come arricchimento sensoriale.

Va evidenziato che l'architettura proposta è modulare ed estensibile. In futuro, si potrebbero aggiungere più pad (es. per feedback distinto sul busto) semplicemente espandendo le uscite Arduino e adattando la logica internamente a Unity. Oppure, se fosse disponibile un visore con eye-tracking

integrato, Unity potrebbe combinare il tracking oculare con quello della testa per una decisione ancora più fine su quando attivare il segnale (ad es. l'utente guarda di sfuggita verso sinistra con gli occhi anche se la testa rimane fissa – in tal caso potrebbe aver notato qualcosa, quindi evitare di attivare il pad per non creare ridondanza). Oppure spaziare nell'utilizzo di pad con dimensioni diverse, inerzie e tensioni di lavoro differenti. L'infrastruttura di base – connessione VR app e microcontrollore e attuatori indossabili – rimane la medesima.

Con questa panoramica architettuale, si è delineato come i vari componenti interagiscono per soddisfare i requisiti funzionali. Nel capitolo successivo, si passerà a descrivere in dettaglio la progettazione e implementazione di ciascun modulo: dai requisiti tecnici specifici di ogni componente (prestazioni, sicurezza, ergonomia) ai componenti hardware selezionati, fino alle logiche software implementate per il controllo del feedback termico direzionale.

3. Progettazione

3.1 Definizione dei requisiti

Nella fase di progettazione di dettaglio, si è proceduto a tradurre gli obiettivi e le funzionalità attese in requisiti specifici suddivisi per categoria: requisiti funzionali (già in parte delineati), requisiti tecnici di performance, requisiti ergonomici e requisiti di sicurezza. Questa formalizzazione ha guidato poi la scelta dei componenti e le soluzioni implementative.

Requisiti funzionali principali:

- Rilevamento orientamento: il sistema deve rilevare con precisione l'orientamento della testa dell'utente in tempo reale. Questo requisito implica che l'errore angolare massimo nella stima non superi pochi gradi e che l'aggiornamento sia sufficientemente rapido (idealmente ad ogni frame, ~90 Hz). In pratica, l'SDK VR (ad es. Oculus/SteamVR) deve fornire i dati di tracking e l'app deve leggerli senza lag percettibile.
- Configurazione ROI: il sistema deve permettere di configurare le regioni/eventi d'interesse nel contenuto 360°. Ciò significa avere un formato (ad esempio una struttura dati o script) in cui per ogni intervallo temporale del filmato si possa definire se esiste un evento da segnalare e la sua direzione. Questo requisito assicura flessibilità per adattare il sistema a diversi filmati.
- Logica di trigger: il sistema deve determinare quando attivare un feedback termico secondo regole logiche predefinite. La regola di base è: se c'è un ROI attivo e l'utente non lo sta guardando allora attiva pad corrispondente. Bisogna specificare una soglia angolare oltre la quale consideriamo "non visto" il ROI: ad esempio se superiore ai 30° dalla direzione del ROI (tenendo conto del campo visivo umano). Inoltre, devono essere incorporate condizioni di temporizzazione: ad esempio un ritardo opzionale per non attivare subito il pad appena inizia l'evento (dando qualche secondo all'utente per scoprirlo da solo), e una durata massima di attivazione continua per evitare stimoli prolungati.
- Mappatura direzionale corretta: alla condizione di trigger, il sistema deve accendere il pad corrispondente alla posizione del ROI. Ciò richiede una mappatura univoca direzione→pad. Nel caso di due pad (sinistra/destra), la mappatura è: ROI con azimut < 0° (cioè, a sinistra rispetto al *facing* iniziale) → pad sinistro; ROI con azimut > 0° → pad

destro. Come discusso, se azimut circa 180° (dietro), nel design attuale viene comunque assegnato a uno dei due (es. al pad del lato in cui cade leggermente il ROI o scelto arbitrariamente ma documentato all'utente, per esempio quello destro). Questo requisito garantisce coesione cognitiva: l'utente deve poter intuire facilmente la relazione tra sensazione termica e direzione da cercare.

- Spegnimento e reset: il sistema deve spegnere i pad al cessare delle condizioni di attivazione. In particolare, se l'utente guarda il ROI (angolo torna sottosoglia) oppure se l'evento termina (ROI non più attivo), il feedback termico va disattivato (o torna alla temperatura nominale). Inoltre, deve esserci una sorta di periodo refrattario o logica di reset: dopo un'attivazione, se l'utente continua a non guardare potrebbe essere inutile tenere il pad acceso in continuo; meglio spegnerlo e magari riaccenderlo dopo un intervallo se l'evento è ancora in corso e ancora ignorato. Questi accorgimenti rientrano nella logica di *override* e temporizzazione.
- Non intrusività: il feedback termico non deve interferire con gli altri canali sensoriali del filmato. Questo più che un'azione specifica è un vincolo sul design: implica ad esempio che il riscaldamento deve essere silenzioso, che l'utente non debba effettuare azioni extra (non deve premere pulsanti o simili per far funzionare il sistema), e che il filmato continua indipendentemente dal sistema. È un requisito qualitativo: l'esperienza con il sistema dev'essere il più simile possibile all'esperienza standard, salvo per il fatto che in alcune occasioni si sente calore su un braccio.
- Registrazione dati: per scopi sperimentali, il sistema deve tenere traccia degli eventi rilevanti ai fini dei test utente: quando è stato attivato un pad e quale, per quanto tempo, orientamento utente nel tempo, ecc. Questo non è strettamente necessario al funzionamento ma è utile per valutare le performance del prototipo.

Requisiti tecnici e prestazionali:

- Rapidità di attivazione percettiva: il feedback termico deve manifestarsi abbastanza velocemente da essere utile. Il tempo di reazione termica include: latenza software (trascurabile, pochi ms per inviare comando), latenza hardware (nel passare corrente) e soprattutto il tempo che il pad impiega a riscaldare la pelle a un livello percepibile. Un requisito è quindi che il pad raggiunga una temperatura percepibile ($\Delta T \sim +5^\circ\text{C}$) entro pochi secondi (idealmente < 5 s) a partire da una temperatura nominale. Questo ha

influenzato la scelta di pad di potenza adeguata. Test preliminari indicano che un piccolo pad da 5V impiega circa 3-4 secondi per essere percepito sulla pelle.

- Controllo fine della temperatura: è necessario poter modulare la potenza erogata ai pad per non superare certe soglie di temperatura. Il requisito è mantenere la temperatura superficiale del pad in un range operativo sicuro, ad es. 33°C–40°C. Ciò significa implementare un controllo (anche on/off semplice) via sensore di temperatura. Tecnicamente, il sistema deve poter leggere la temperatura con accuratezza di almeno $\pm 0.5^\circ\text{C}$ e frequenza di qualche Hz, e reagire (staccare alimentazione) entro 1 secondo dal superamento della soglia. Inoltre, sarebbe preferibile poter variare l'intensità del feedback (es. segnale più forte per eventi più critici). La modulazione è ottenuta in PWM (*pulse-width modulation*), per poter mantenere entro un certo range ($\pm 0.5^\circ\text{C}$) la temperatura rilevata costante.
- Sincronizzazione e frame rate: la pipeline Unity \rightarrow Arduino \rightarrow pad deve operare senza introdurre lag significativo. Il requisito posto è che dal momento in cui il codice in Unity decide di attivare un pad al momento in cui il pad inizia a scaldarsi non passino più di, indicativamente, 50 ms (che è ben al di sotto della latenza percettibile in questo contesto, data la lentezza intrinseca del calore). I test di comunicazione seriale hanno mostrato che l'invio di un comando e la commutazione del pin Arduino avviene nell'ordine di pochi millisecondi, quindi questo requisito è soddisfatto ampiamente. Anche il loop di controllo su Arduino deve essere sufficientemente reattivo: un aggiornamento dei sensori e attuatori almeno ogni 100 ms è richiesto per poter intervenire in tempo utile su eventuali sovratemperature, oltre che la precisione (in bit) richiesta per ogni lettura.
- Capacità di alimentazione: dal punto di vista elettrico, il sistema deve poter fornire la corrente necessaria ai pad senza cadute di tensione o reset. Ogni pad da 5V assorbe circa 0,6 A di corrente; con due pad attivi contemporaneamente si è quindi attorno a 1,2 A. Un comune collegamento USB da PC eroga 0,5 A (USB2) o 0,9 A (USB3) a 5V, quindi non sufficiente. Pertanto, il requisito è di dotarsi di un'alimentazione esterna in grado di fornire fino a $\sim 3\text{A}$ a 5V stabilizzati. Questo può essere ottenuto con un alimentatore DC dedicato o una batteria portatile ad alto output. Il sistema deve includere questa gestione: l'Arduino non deve essere sovraccaricato (infatti piloterà i pad attraverso MOSFET e alimentazione separata), e l'alimentazione scelta deve avere protezioni contro corto circuiti.

- Affidabilità e robustezza: il sistema deve funzionare per l'intera durata di una sessione (tipicamente 5-10 minuti di filmato) senza malfunzionamenti. Ciò implica che l'Arduino non vada incontro a *crash* o reset sotto carico, che la comunicazione seriale non perda messaggi critici (eventualmente implementando un semplice protocollo con *acknowledge* per conferma), e che i sensori mantengano accuratezza nel tempo. Un altro aspetto: i pad termici potrebbero, col prolungarsi delle accensioni e spegnimenti, accumulare inerzia termica; il sistema deve tenerne conto (es. se un pad è stato attivo pochi secondi fa ed è ancora caldo, una nuova attivazione potrebbe portarlo a soglia più velocemente – l'algoritmo di controllo può considerare la temperatura attuale come baseline). Tutto ciò rientra in un requisito di robustezza dell'algoritmo di controllo.

Requisiti ergonomici:

- Comfort fisico: il dispositivo indossabile (pad + fascia + cablaggio) deve essere comodo e non arrecare fastidio allo spettatore. I pad sono sottili (film flessibile) e coperti da tessuto; quindi, la superficie a contatto è morbida. Le fasce elastiche o in velcro devono poter essere regolate per adattarsi a varie circonferenze di braccio senza stringere troppo (evitando problemi circolatori) né essere troppo lente (per non scivolare e compromettere la percezione del cambio di temperatura). Il peso complessivo sulle braccia è trascurabile (nell'ordine di poche decine di grammi).
- Libertà di movimento: l'utente deve poter eseguire i normali movimenti della fruizione VR, girare su se stesso, allungare le braccia se lo desidera, ecc., senza impedimenti. Pertanto, i cavi di collegamento devono avere lunghezza sufficiente e preferibilmente essere instradati dietro le spalle o lungo le braccia per seguire i movimenti naturali. Nel prototipo, sono stati previsti cavi di ~1 metro a partire dall'Arduino (posizionato al fianco dello sgabello girevole) salgono fino ai pad sulle braccia, fissati con qualche passante per non intralciare. Questo consente di ruotare il busto di 360° senza tirare i fili. L'uso da seduto su sgabello girevole riduce ulteriormente il rischio di grovigli.
- Facilità di vestizione: indossare e togliere il dispositivo deve essere semplice e veloce, simile a mettere una fascia da fitness sul braccio. Idealmente bastano 1-2 minuti per allacciare entrambe le fasce con i pad e collegare l'Arduino. Anche il numero di componenti è ridotto: due fasce identiche che si posizionano simmetricamente rispetto all'utente.

- Minima distrazione sensoriale: al di là del comfort fisico, gli elementi del sistema non dovrebbero attirare l'attenzione visiva o uditiva dell'utente; i cavi sono dietro di lui, fuori vista. Importante è che non vi siano LED lampeggianti sull'Arduino o sui pad che possano riflettersi nel visore. Inoltre, il funzionamento deve essere silenzioso: i MOSFET, i pad e rumori elettrici sono inudibili immersi nell'audio del film. In sintesi, l'utente dovrebbe quasi "dimenticarsi" di indossare il dispositivo dopo qualche minuto, fino al momento in cui sente il calore.
- Adattabilità a vari utenti: il design deve accomodare diverse corporature e sensibilità. Le fasce elastiche coprono braccia di differente circonferenza. Il livello di temperatura percepita può variare in base alla soglia individuale: perciò c'è la possibilità di tarare le soglie di temperatura o durata in base a feedback del singolo (es. se un utente riferisce di sentire appena il calore, si può aumentare leggermente l'intensità per lo specifico utente). In un contesto sperimentale formalizzato, ovviamente, si sceglie un'impostazione standard per tutti, ma è importante che il sistema non sia calibrato su un singolo individuo in modo rigido.

Requisiti di sicurezza:

- Sicurezza elettrica: tutte le parti elettriche a contatto con l'utente operano a bassa tensione (5V), il che garantisce che non vi sia rischio di folgorazione. Tuttavia, il sistema deve essere protetto da cortocircuiti e sovracorrenti che potrebbero causare surriscaldamenti o scintille. L'alimentazione 5V scelta ha un circuito di limitazione della corrente a 5A e spegnimento in caso di corto. Inoltre, ogni connessione è stata isolata con guaina termorestringente o nastro isolante, in modo che l'utente non possa toccare punti conduttivi scoperti. I MOSFET sono montati su un piccolo circuito realizzato tramite *breadboard* con adeguata distanza tra piste e senza parti sporgenti.
- Sicurezza termica: i pad non devono causare ustioni o irritazioni. È stata impostata una temperatura massima di esercizio di circa 42 °C sulla superficie a contatto con la pelle, considerando che temperature sopra ~45 °C iniziano a risultare dolorose se applicate per decine di secondi. Per garantire questo aspetto, ogni pad è dotato di un sensore di temperatura (DS18B20) posizionato tra il pad e la pelle, così da misurare, tra l'altro, il valore reale sul punto di contatto. Il software sull'Arduino controlla continuamente questa temperatura: se supera una soglia di sicurezza (es. 42 °C) interrompe immediatamente l'alimentazione del pad e notifica una condizione di errore ai codici in Unity (che in questo caso può loggarla e impedirne la riattivazione). Inoltre, a scopo cautelativo, il

sistema spegne tutti i pad al termine della sessione. Le fasce che contengono i pad includono uno strato di garza medica tra il pad e la pelle, per fungere sia da sottile strato protettivo, per evitare il contatto diretto con la pellicola riscaldante, che potrebbe raggiungere temperature più alte al suo interno, sia per distribuire il calore su un'area leggermente più ampia (a livello di percezione). Questo strato inoltre previene ogni eventuale rischio di irritazione da contatto con il materiale plastico del pad.

- Controllo della durata e area di stimolo: per evitare fenomeni di scottatura localizzata, è importante che il calore non persista troppo a lungo sul medesimo punto. In più, le fasce posizionano i pad su una zona carnosa e meno sensibile del braccio (parte posteriore, a qualche centimetro sopra il gomito). Questa scelta è ragionata in base al fatto che certe aree del corpo, come l'interno avambraccio o i polsi, hanno la pelle più delicata e sensibile; il tricipite è più resistente. Inoltre, istruzioni all'utente includono la raccomandazione di tenere le braccia ferme lungo i fianchi durante la visione, in modo che il pad resti sempre a contatto adeguatamente con la pelle (se si spostasse potrebbe riscaldare l'aria e poi improvvisamente toccare la pelle più calda, causando spavento).
- Fail-safe: in qualunque momento deve essere possibile per l'utente interrompere manualmente il funzionamento se avverte discomfort. A tal fine, l'utente può semplicemente rimuoversi le fasce (rimuovendo la fascia di velcro) o sfilarle, oppure può chiedere all'operatore di staccare l'alimentazione. Nel prototipo un interruttore a pulsante è collegato in serie all'alimentazione dei pad: premendolo si toglie corrente ai riscaldatori (l'Arduino e il visore restano accesi). Questo pulsante di emergenza è posizionato in un punto accessibile anche all'utente stesso (ad esempio fissato sul bracciolo della poltrona).
- Assenza di ostacoli: dal punto di vista della sicurezza fisica, ci si è assicurati che i cavi non intralcino i movimenti al punto da poter far inciampare l'utente. In modalità da seduto, questo rischio è minimo (cavi salgono dal microcontrollore sul tavolo alle braccia, senza contatto coi piedi). La modalità in piedi non è prevista per i test. Dopo ogni sessione si controlla l'integrità dei cavi e l'assenza di sfilacciamenti o parti scoperte.

L'insieme di requisiti sopra delineati ha fatto da guida durante la progettazione e l'implementazione del prototipo. Nel seguito, sarà descritto come ciascun requisito è stato affrontato: dapprima presentando i componenti hardware selezionati e come soddisfano le specifiche e, in seguito, l'integrazione software e le logiche di controllo. Infine, le misure prese per rispettare i requisiti di sicurezza e le verifiche condotte.

3.2 Componenti hardware

L'hardware del sistema consiste essenzialmente in uno o più pad riscaldanti come attuatori, un microcontrollore Arduino come unità di controllo, alcuni componenti elettronici di potenza (transistor MOSFET e resistenze) per pilotare i pad, e dei sensori di temperatura per monitorare lo stato del sistema. Di seguito l'elenco dei componenti principali impiegati, spiegandone le caratteristiche tecniche rilevanti e la funzione all'interno del prototipo.

- Pad riscaldanti flessibili in poliimmide da 5V, 8W di potenza, marchio Quarkzman (o equivalenti generici). Si tratta di sottili pellicole riscaldanti dal diametro di 50 mm, composte da un film Kapton isolante che racchiude un percorso resistivo in lega metallica. A 5V di alimentazione, ciascun pad assorbe circa 0.6A generando 8W di calore. Questi pad sono concepiti per fornire riscaldamento uniforme su tutta la loro superficie, raggiungendo temperature anche superiori ai 60°C, se alimentati continuamente a piena potenza in aria libera. In questo caso d'uso, saranno applicati direttamente sulle fasce a contatto con la pelle (con interposto uno strato di isolante tessile) e comandati in modo intermittente. Tali pad sono leggeri, flessibili e sottili (meno di 0.5mm di spessore), dunque ben adattabili alla superficie curva del braccio; inoltre, funzionando a bassa tensione (5V) non introducono rischi elettrici. La resistenza elettrica di ogni pad è di circa 3.1Ω, un valore che comporta correnti elevate ma che è pilotabile con i MOSFET scelti. Un vantaggio di questi elementi è l'inerzia termica moderata: grazie alla massa ridotta, hanno un tempo di salita e discesa in temperatura relativamente breve rispetto, ad esempio, a resistenze di dimensioni maggiori. Sono inoltre dotati sul lato posteriore di un adesivo siliconico che facilita l'applicazione su superfici. In sintesi, i pad termici costituiscono l'interfaccia attuativa verso l'utente, traducendo i comandi elettrici in uno stimolo termico tangibile.
- Sensori di temperatura: per monitorare il calore erogato, ogni pad è abbinato a un sensore digitale di temperatura Dallas DS18B20. Questo sensore è molto diffuso per applicazioni Arduino grazie alla sua precisione e facilità d'uso: misura temperature da -55°C a +125°C con una precisione tipica di $\pm 0.5^\circ\text{C}$ nella fascia -10/+85 °C²⁴. Si presenta in un piccolo contenitore cilindrico (TO-92) o incapsulato in una sonda impermeabile. Il DS18B20 comunica tramite un bus digitale 1-Wire, il che significa che con un solo pin dell'Arduino è possibile leggere più sensori in parallelo (ogni sensore ha un indirizzo univoco a 64 bit). Nel circuito, entrambi i sensori dei due pad

condividono il medesimo filo dati verso l'Arduino. Dal punto di vista prestazionale, questo sensore può fornire letture a una frequenza massima di circa 9–10 Hz (la conversione a 12-bit richiede ~750 ms), più che sufficiente per gli scopi di questo progetto. La sua risoluzione è 0.0625 °C. Il sensore è stato fissato sul pad in prossimità della zona centrale (dove la temperatura è massima). La scelta di questo componente risponde al requisito di sicurezza termica: con i DS18B20 è possibile implementare un controllo in retroazione (tipo termostato) spegnendo il pad se supera la soglia impostata. In aggiunta, i sensori registrano l'andamento della temperatura per analizzare le prestazioni del pad (es. tempo per arrivare a regime). Un'ulteriore nota, i DS18B20 sono alimentati a 5V come l'Arduino, quindi non necessitano convertitori di livello, e consumano pochi mA; è stato quindi possibile alimentarli direttamente dal regolatore 5V dell'Arduino senza problemi.

- Microcontrollore – Arduino Uno: il “cervello” logico dell'hardware è un classico Arduino Uno, basato su microcontrollore ATmega328P a 16 MHz. L'Arduino Uno dispone di 20 pin I/O generali (6 dei quali possono generare segnali PWM) e comunica col PC via USB attraverso un'interfaccia seriale virtuale (CDC). In questo progetto l'Arduino svolge vari compiti simultanei: (a) ascolta i comandi seriali provenienti dal codice in Unity; (b) in base a essi, gestisce gli output digitali che controllano i pad (accensione/spegnimento tramite MOSFET); (c) legge periodicamente i sensori di temperatura DS18B20 tramite protocollo 1-Wire; (d) implementa le logiche di sicurezza (spegnimento automatico). L'Arduino Uno è stato scelto principalmente per comodità di sviluppo (ampia compatibilità di librerie, numero di pin sufficiente, presenza della USB integrata) e perché i requisiti temporali non sono stringenti al punto da richiedere un microcontroller più potente. Il carico computazionale, infatti, è leggero: la lettura dei sensori e la gestione I/O avviene molte volte per secondo ma senza avvicinarsi ai limiti della CPU. Anche la memoria (2kB di RAM, 32kB flash) è abbondante per lo sketch (script per Arduino) che sarà sviluppato. In alternativa sarebbe possibile usare un Arduino Nano o una scheda ancora più semplice, ma l'Uno offre più comodità per il prototipo su breadboard e la possibilità di debug via USB facilmente. Sul piano elettrico, l'Arduino viene alimentato via USB dal PC e contemporaneamente è connesso a un alimentatore 5V esterno che fornisce corrente ai pad; i due condividono il GND comune. È stato integrato un interruttore per scollegare i 5V dei pad quando serve. L'Arduino Uno

inoltre offre la comunicazione seriale TTL su pin 0-1, ma in questo progetto è utilizzata la Serial USB (porta COM virtuale) a 115200 bps, facilitata dal cavo USB collegato al PC che già serve per l'alimentazione logica. In sintesi, l'Arduino funge da unità di controllo *embedded*: è il mediatore fra il mondo software (PC/Unity) e il mondo fisico (circuito di potenza), con la responsabilità aggiuntiva di gestire localmente i meccanismi di protezione (grazie alla sua autonomia nel leggere i sensori e comandare attuatori anche se la comunicazione col PC si interrompesse).

- Transistor MOSFET: per pilotare i pad termici viene utilizzato un transistor N-channel logic-level, ossia progettato per raggiungere piena conduzione anche con tensioni di gate relativamente basse (4-5V). Questo componente, in contenitore TO-220 con aletta metallica, ha caratteristiche idonee allo scopo: può sostenere correnti fino a ~47A (con adeguata dissipazione) e ha una resistenza interna molto bassa quando in conduzione (circa 0.022Ω tipica a 5V). Non si surriscalda sensibilmente passando 1-2A di corrente e la caduta di tensione sul transistor è trascurabile (energia quasi tutta spesa sul carico). L'IRLZ44N ha anche il vantaggio di essere economicamente accessibile. Il drain del MOSFET è collegato a un terminale del pad termico, l'altro terminale del pad va a +5V; il source del MOSFET è a GND; il gate è pilotato da un pin digitale dell'Arduino. Quando il microcontrollore applica 5V al gate, il MOSFET entra in conduzione saturandosi, collegando di fatto il pad a massa e chiudendo il circuito: la corrente scorre attraverso il pad che così si riscalda. Quando il gate è a 0V, il MOSFET interrompe il circuito e il pad si spegne. Questa configurazione consente un controllo ON/OFF elettronico molto rapido e immune da usura (diversamente da un relè meccanico). Non essendoci carichi induttivi (un pad è puramente resistivo), non è necessaria una diode flyback sul MOSFET. Volendo predisporre il sistema a un uso più intensivo (es. pad accesi per tempi lunghi), si potrebbero montare i MOSFET su un piccolo dissipatore o passare a un modello con ancor più bassa resistenza, ma non si è reso necessario.
- Alimentazione 5V: Come anticipato, per alimentare i pad è stato utilizzato un alimentatore esterno da 5V capace di fornire fino a 3A in sicurezza. Solo i riferimenti di massa (GND) sono comuni, come deve essere per corretta commutazione MOSFET. L'alimentatore è dotato di protezioni (cortocircuito, sovracorrente). In un'ottica di portabilità, volendo eliminare la connessione alla rete, si potrebbe usare

un battery pack Li-Ion con step-down a 5V 5A dedicato. In ogni caso, la sezione di alimentazione è parte integrante dell'hardware e deve soddisfare i requisiti di cui sopra.

- Circuito di contorno e altri componenti: Nel montaggio su breadboard sono stati inclusi anche dei LED indicatori (con relativi resistori) per avere un'indicazione visiva quando un pad è alimentato, ma durante i test con utenti reali tali LED sono stati rimossi per non introdurre fonti luminose non volute. È stato previsto un pulsante di reset per l'Arduino a bordo (standard sull'Uno), utile durante lo sviluppo. Inoltre, un piccolo buzzer piezo era stato inizialmente inserito per fare dei segnali acustici di debug (es. un beep quando la temperatura superava la soglia), ma poi è stato disattivato perché non andrebbe lasciato in uso in quanto sarebbe un input sonoro estraneo durante i test. Tutti i componenti sono stati cablati su una breadboard in modo compatto e fissati con del nastro per evitare falsi contatti quando il tutto viene spostato.

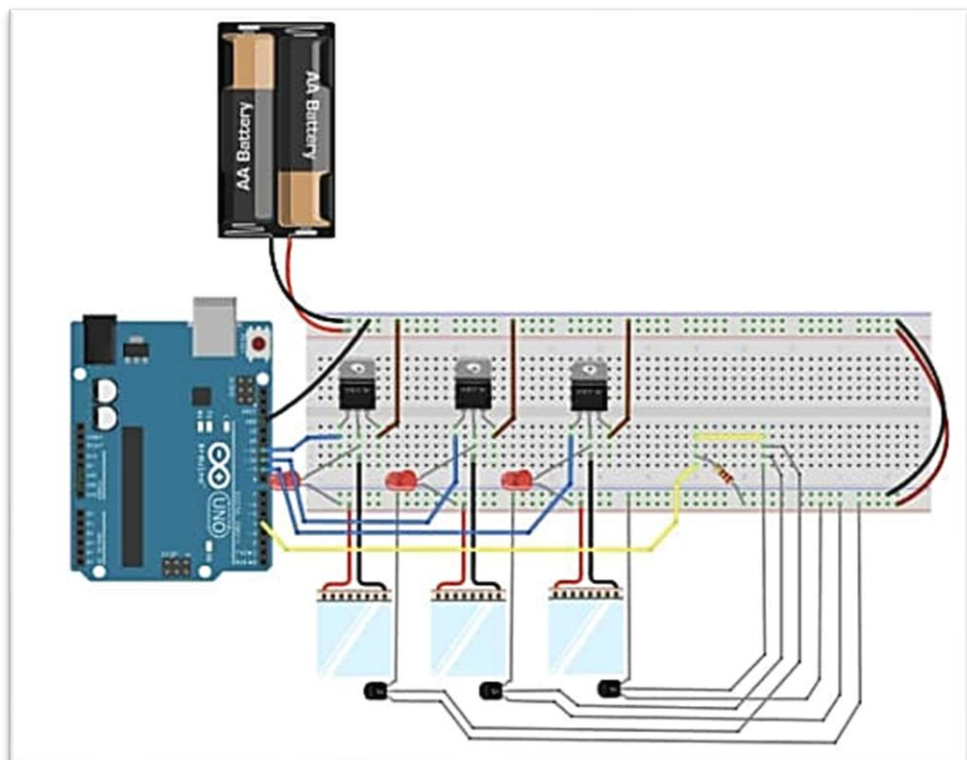


Figura 3.2.1 Schema circuito Arduino, con pad, mosfet e sensori

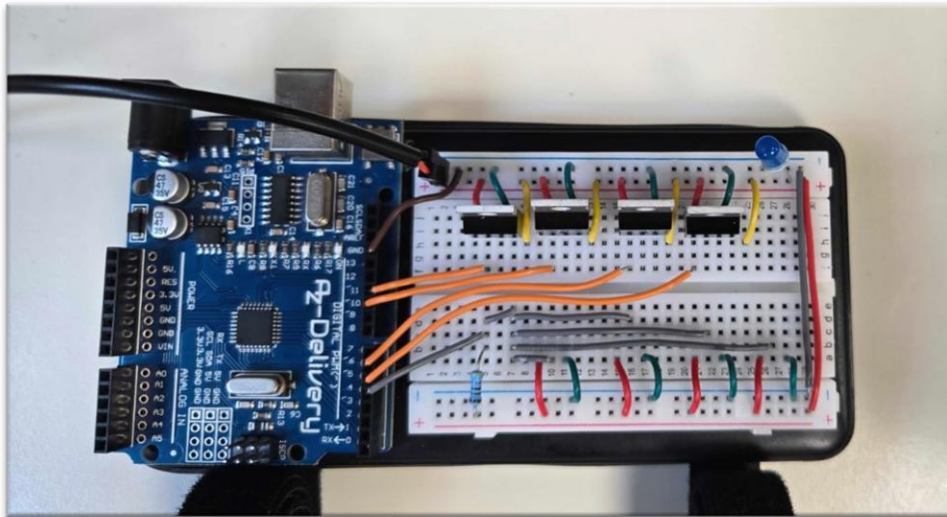


Figura 3.2.2 Arduino e breadboard, senza collegamenti ai pad

In conclusione, la scelta dei componenti hardware è stata guidata da criteri di affidabilità, semplicità e sicurezza: pad a bassa tensione e sufficientemente potenti, sensori accurati per il feedback, un controllore mainstream facile da programmare e MOSFET dimensionati con margine. Questa base hardware ha permesso di soddisfare i requisiti tecnici (controllo rapido e preciso della temperatura su due canali indipendenti) e quelli di sicurezza (monitoraggio costante e limitazione delle condizioni pericolose). Nel prossimo sottoparagrafo descriviamo come il sistema hardware e l'applicazione sviluppata in Unity interagiscono, ovvero l'integrazione software dell'intero sistema.

3.3 Integrazione software: Unity, tracking, trigger termici, misurazioni tecniche

Dal lato software, il fulcro dell'integrazione è l'applicazione sviluppata in Unity 3D che coordina il funzionamento del sistema. Unity è stato scelto perché fornisce un ambiente consolidato per sviluppare applicazioni VR interattive e consente un controllo preciso sia della logica in-game sia dell'accesso a risorse esterne come le porte seriali. Il progetto Unity creato per questo prototipo svolge diversi compiti chiave: gestisce la riproduzione del contenuto immersivo (video 360°), acquisisce i dati di tracking del visore, determina quando inviare segnali ai pad termici (logica di trigger), e raccoglie eventuali dati di ritorno (come temperature o log degli eventi) per analisi.

- Gestione del contenuto 360°: è stato importato in Unity il video sperimentale a 360° (equirettangolare) e riprodotto sulla sfera panoramica che circonda la posizione del visore. In pratica, una sfera con shader inverso (normali invertite) su cui è mappata la texture video. Unity fornisce un VideoPlayer component per streammare il filmato, sincronizzato con la

timeline. Questo ha permesso anche di sapere in ogni momento (`VideoPlayer.time`) il tempo corrente del video, utile per correlare la logica dei trigger agli eventi nel filmato. Per il tracking, è stato utilizzato l'SDK XR Interaction Toolkit di Unity, che espone la *pose* della main camera (corrispondente alla direzione dello sguardo dell'utente). In particolare, l'orientamento della testa viene letto come un quaternion o come angoli Euler (yaw, pitch, roll). L'interesse è prevalentemente per lo yaw (rotazione attorno all'asse Y, cioè l'orientamento orizzontale) e in certa misura al pitch (se l'evento fosse molto in alto o in basso potremmo decidere diversamente, ma attualmente i pad non distinguono verticale).

- Calcolo orientamento relativo: ad ogni frame, uno script Unity esegue la lettura dell'angolo di vista utente (ad es. in gradi da -180 a +180, dove 0° = fronte iniziale definita dal regista), e confrontarlo con l'angolo del ROI attivo (ottenuto da una struttura dati dove per il tempo corrente sappiamo se c'è un evento e a che angolo). La differenza (normalizzata tra -180° e 180°) indica quanto e in che direzione l'utente dovrebbe ruotare per vedere l'evento. Se è minore di, per esempio, 45°, si considera che probabilmente l'evento è entro o ai margini del suo FOV e dunque forse già percepito (soprattutto se c'è visione periferica o se l'utente potrebbe scorgerlo con la coda dell'occhio nel visore). Se invece fosse superiore, allora l'evento è decisamente fuori vista. A quel punto lo script controlla il timer: da quanto tempo l'evento è attivo e non visto. Se supera un certo delay (ad es. 2 secondi dall'inizio dell'evento, per non reagire istantaneamente), allora scatena la procedura di trigger termico.
- Invio comandi ad Arduino: Per far comunicare Unity con l'Arduino, è stata scritta una semplice classe C# che utilizza `System.IO.Ports.SerialPort`. All'avvio dell'app, il programma individua la porta COM associata all'Arduino (in questo caso, nota a priori, ad es. COM3) e apre il collegamento seriale a 115200 baud. È stato implementato un protocollo base: l'invio di un carattere ASCII per ogni comando. Ad esempio, convenzione: 'L' = attiva pad sinistro, 'R' = attiva pad destro, 'l' (minuscolo) = spegni pad sinistro, 'r' = spegni pad destro. Oppure si potrebbe usare codici numerici (0,1,2,3) con un significato. Nell'implementazione attuale, quando la logica di cui sopra rileva condizione di trigger, Unity esegue ad es. `serialPort.Write("L")`. Sul lato Arduino, uno sketch in esecuzione legge dal buffer seriale e, alla ricezione di 'L', alza il pin digitale corrispondente al pad sinistro. Lo stesso per gli altri comandi. Questo approccio asincrono event-driven è molto semplice ma efficace. L'invio occupa pochissimi millisecondi, come detto, e Unity può proseguire immediatamente ad aggiornare la scena (non c'è blocco, si usano chiamate non bloccanti o comunque la scrittura su seriale è molto rapida per pochi byte). È stato optato per l'invio di un comando solo al

momento delle transizioni (accensione o spegnimento), piuttosto che mandare costantemente lo stato. Questo evita di intasare la seriale e riduce possibili incoerenze.

- Ricezione di dati da Arduino: il flusso inverso è utilizzato per scopi di monitoraggio. L'Arduino, ogni 500 ms circa, legge i sensori DS18B20 e invia su seriale una stringa con le temperature attuali dei pad. Ad esempio, un formato "1:37.5\n2:29.0\n" (sensore 1 rileva 37.5°C, poi la stringa torna a capo). Unity, in un thread secondario o usando l'update della seriale, legge queste linee e le può registrare. Durante l'esperienza utente, tali dati non vengono mostrati (non c'è interfaccia visiva per l'utente), ma sono utili per debug e per verificare i parametri (es., se si notasse che la temperatura sale troppo, si interviene). Unity può anche usare questi dati per una logica decisionale: ad esempio, potrebbe decidere di spegnere anticipatamente un pad se vede che la sua temperatura è arrivata alla soglia, ancor prima del segnale di Arduino (funzione ridondante di sicurezza). In questo prototipo, poiché l'Arduino di suo già spegne a soglia, Unity si limita a loggare.
- Gestione dell'esperienza e sincronizzazione: Un aspetto importante del software Unity è la sincronizzazione temporale tra narrativa e feedback. È stato implementato un sistema di eventi temporizzati: essenzialmente una timeline degli eventi che si può configurare via editor. Uno script legge questa timeline e ad ogni frame verifica: *if (timeNow >= event.start && timeNow <= event.end) then ROI_active = true (with given angle) else ROI_active = false*. In caso di sovrapposizioni di eventi (che sono stati cercati di evitare), c'è una priorità fissa o si potrebbe scegliere l'evento più vicino al centro, per esempio. Unity tiene traccia di quale evento è attivo e se già è stato segnalato o meno. Ad esempio, si può utilizzare una variabile booleana per evitare di ri-segnalare continuamente. Questo insieme di meccanismi garantisce che i trigger termici siano erogati solo quando e quanto previsto. In altre parole, Unity "sa" quando un pad dovrebbe accendersi e spegnersi, e attua quell'intenzione tramite Arduino.
- Misurazioni tecniche e logging: è stato predisposto il software Unity per raccogliere dati utili a valutare il comportamento del sistema:
 - Log dell'orientamento utente nel tempo (ad esempio scrivendo su file CSV l'angolo di sguardo ogni 0.1s). Questo consente di verificare a posteriori quanto velocemente l'utente reagisce al segnale termico: ci aspettiamo di vedere, dopo un trigger, un cambio repentino dell'angolo verso la direzione segnalata.

- Log degli stati dei pad: ogni volta che Unity invia un comando 'L''R''l''r'', registra timestamp e tipo di comando. Così si sa esattamente quando un pad è stato acceso e spento dal punto di vista logico.
- Log delle temperature lette dai sensori, come detto. Questo per vedere, ad esempio, se i 5s di attivazione del pad hanno portato la temperatura a 38 °C o a 42 °C. Questi dati aiutano a tarare il sistema in prove successive.
- Eventualmente, log di variabili interne, per esempio se un evento è stato “mancato” oppure no (ad esempio se l’evento è finito e l’utente non l’ha mai guardato nonostante il segnale – informazione raccolta per valutare l’efficacia).

Queste misurazioni tecniche vengono scritte da Unity in un file di testo al termine della sessione. Nella fase di sperimentazione con utenti reali serviranno per fare analisi quantitative. Da un punto di vista progettuale, la presenza di questi log è stata anche uno strumento di verifica durante lo sviluppo: ad esempio, incrociando i log è stato possibile verificare che in una data prova il pad si è acceso al secondo X quando l’angolo utente era tot e la temperatura è salita fino a tot – tutto combacia con quanto progettato, o in caso contrario evidenzia bug.

- Integrazione Unity–Arduino nel ciclo di vita: l’applicazione in Unity è progettata per inizializzare la seriale all’avvio, quindi inviare un segnale di “reset” all’Arduino (non strettamente necessario, ma è stato convenuto un carattere “INIT” per sincronizzarsi). L’Arduino resetta i pad (assicurandosi che siano spenti all’avvio per sicurezza). All’avvio di Unity, uno script verifica la temperatura minima che i pad devono raggiungere prima di far partire la riproduzione del film immersivo (temperatura nominale di base, “a riposo”). Durante la riproduzione, in Unity si esegue la logica frame-by-frame. Alla fine del filmato o all’uscita anticipata, tramite Unity si invia un comando di spegnimento, poi chiude la porta seriale. L’Arduino eventualmente potrebbe entrare in un loop di attesa finché non viene lanciata una nuova sessione.
- Interfaccia utente e calibrazione: dal punto di vista dell’User Experience, è stata prevista una breve fase di calibrazione all’inizio: ad esempio, un tutorial in cui al soggetto viene chiesto di girarsi a destra quando sente caldo a destra, e a sinistra analogamente. Questo è implementato in Unity come una scena introduttiva: in pratica, Unity attiva i pad uno alla volta (in modo controllato) e chiede all’utente di confermare di averlo percepito e capito la direzione. Ciò serve sia a far familiarizzare l’utente col segnale, sia a verificare che l’intensità sia adeguata. Se l’utente dicesse “non ho sentito niente sul braccio sinistro”, potremmo in quel momento

regolare (aumentare la durata dell'impulso, per esempio). Questa interfaccia di calibrazione non è complessa: usa gli stessi comandi (accendi/spegni pad) ma manualmente, guidati dall'operatore o da uno script di routine. È stato considerato questo come parte integrante del software, benché separata dall'esperienza principale.

In definitiva, l'integrazione software su Unity è risultata abbastanza lineare, poiché la piattaforma facilita la lettura dei dati di tracking VR e mette a disposizione i mezzi per comunicare con hardware esterno. Le sfide principali sono state la sincronizzazione dei tempi e le condizioni per non avere né ritardi né falsi positivi. Un'attenzione particolare è stata data a evitare qualunque influenza del sistema termico sul frame rate VR: l'app su Unity continua a girare almeno a 90 fps, e le operazioni aggiuntive (controllo seriale e log) sono molto leggere, girando su thread separati o eseguite in coda ai frame. È stato verificato che l'introduzione di questi task non causasse *stutter* video né cali di frame percepibili – risultato confermato dalle misurazioni (nessun drop frame durante le prove, il VideoPlayer mantiene sync audio/video anche mentre i pad vengono attivati).

In conclusione, la parte software coordina senza soluzione di continuità l'esperienza utente con il sistema di feedback: la visione del filmato non è interrotta, e il codice di controllo termico opera dietro le quinte in tempo reale, fungendo da estensione logica della narrativa (richiamare l'attenzione quando serve). Le logiche implementate per attivare i pad in base all'orientamento sono discusse in dettaglio nella prossima sezione, dove traduciamo i precedenti requisiti in algoritmi concreti.

3.4 Mappatura tra orientamento utente e attivazione dei pad

Come anticipato, uno snodo cruciale della progettazione riguarda il modo in cui si traducono la direzione del contenuto di rilievo rispetto all'orientamento corrente dell'utente in un segnale termico su uno specifico pad. In altre parole: data una discrepanza angolare tra dove l'utente sta guardando e dove dovrebbe guardare, quale pad e se vada attivato. Questa è la mappatura direzionale del sistema, che deve essere intuitiva e affidabile.

In questo prototipo base, avendo poche zone da riscaldare (sinistra e destra), la mappatura è semplice: si basa principalmente sull'angolo orizzontale (azimut) dell'evento rispetto allo sguardo utente. Considerando il piano orizzontale, proiezione dell'ambiente a 360° visto dall'alto, si definisce 0° la direzione verso cui l'utente sta guardando all'inizio della riproduzione del video (quindi si segue il riferimento dell'utente, non un riferimento assoluto del mondo). In questo riferimento relativo, un evento che si trovi, ad esempio, a 90° alla destra dell'utente (cioè, esattamente alla sua destra rispetto

al suo attuale orientamento) verrà segnalato attivando il pad destro; un evento a 90° a sinistra attiverà il pad sinistro. Più in generale, usiamo la convenzione:

- Se l'evento (ROI) è situato su un angolo compreso tra +15° e +180° rispetto allo sguardo attuale (ovvero nel semicerchio alla destra dell'utente), si attiva il pad destro.
- Se l'evento è tra -15° e -180° (cioè, nel semicerchio alla sinistra dell'utente), si attiva il pad sinistro.

È stato introdotto un piccolo cono neutro di $\pm 15^\circ$ gradi in cui, se l'evento ricade, si considera che sia grosso modo di fronte o facilmente visibile perifericamente e non necessiti di *cue* termici. Questo per evitare attivazioni superflue quando l'evento ricade quasi completamente nel campo visivo: si preferisce attivare il pad solo se l'evento è chiaramente fuori dalla vista laterale (oltre 15° dalla direzione dello sguardo). Tale valore di 15° è empirico e può essere regolato ulteriormente; l'idea è di ridurre falsi positivi.

Con questa regola, essenzialmente si partiziona lo spazio orizzontale in tre zone: sinistra, fronte (no attivazione), destra. Nella pratica, durante un evento se l'utente gira la testa e l'evento entra nel cono frontale $\pm 15^\circ$, si spegne il pad segnalatore.

Caso di eventi dietro l'utente: se un evento è molto vicino a 180° (cioè, esattamente alle spalle), entrambe le regole sopra attiveranno uno dei due pad a seconda che sia leggermente spostato a +179° o -179°. È stato stabilito che ogni evento è assegnato univocamente a uno dei due lati (in fase di configurazione del filmato, se un evento dovesse essere esattamente dietro l'utente, sarebbe associato manualmente al lato più logico da cui aspettarsi che l'utente si giri – ad esempio se nel video un personaggio appare da dietro e poi cammina verso sinistra, si userà il pad sinistro). Questo approccio evita l'ambiguità e semplifica la mappatura.

Dimensione verticale (pitch): i pad sul corpo dell'utente, posti sulle braccia, naturalmente forniscono un'indicazione sul piano orizzontale (sinistra/destra). Non trasmettono informazioni sull'elevazione (alto/basso) dell'evento. In questa applicazione, la maggior parte dei ROI ricade sul piano orizzonte (gli elementi narrativi di solito accadono attorno al protagonista, non sopra o sotto di lui). Nel caso capitasse un evento significativamente sopra (es. un uccello in cielo in alto a sinistra), il pad sinistro si attiverebbe comunque per invitare a guardare a sinistra. Simmetricamente per il basso. In futuro, si potrebbe pensare di estendere i feedback includendo anche l'informazione di pitch (es. pad posizionato su spalla vs polso per alto vs basso), ma si entra in complessità non affrontata in questo prototipo. Dunque, per ora la mappatura non codifica l'asse verticale, dando per assunto che gli eventi di interesse siano sul piano orizzontale o che comunque l'utente li cercherà una volta giratosi.

Soglie e isteresi: Come accennato, si usa una soglia di $\pm 15^\circ$ per fronte vs lato. Si usa anche una soglia di isteresi per evitare flicker se l'utente oscilla attorno al confine. Ad esempio, se l'utente sta guardando nell'intorno dei 15° rispetto al ROI, potrebbe succedere che il sistema attivi il pad quando arriva a 16° (fuori soglia), poi lo spenga quando si sposta a 14° (dentro soglia), poi di nuovo 16° riaccendendolo, ecc. Questo sarebbe confondente. Quindi introduciamo un'isteresi di qualche grado: ad esempio, se attiviamo un pad perché l'angolo di differenza dal ROI è superiore ai 15° , poi lo si tiene attivo finché la differenza non scende sotto, ad esempio, 10° . Così l'utente ha margine per completare la rotazione senza che il segnale scompaia istantaneamente appena entra nel range. E viceversa per l'attivazione: se un evento è quasi frontale, si aspetta che l'errore superi circa i 20° prima di essere attivato, in modo da non triggerare per micro-distrazioni. È stata implementata questa isteresi in modo semplice: due soglie diverse per attivazione e disattivazione (es. 20° e 10° rispettivamente). Regolabili via parametri nell'editor. In sede di test, $20^\circ/10^\circ$ è parso funzionare bene (nessun flicker notato).

Mapping statico vs dinamico: la logica sopra definita è *user-centered* e dinamica – si ricalcola in continuo la direzione relativa. Questo copre anche il caso in cui l'utente, dopo aver percepito calore su un braccio, inizi a ruotare: man mano che ruota verso l'evento, l'angolo di errore diminuisce e quando scende sottosoglia il sistema spegne il pad.

Perciò, il sistema è pensato per dare un impulso direzionale iniziale verso dove guardare; una volta che l'utente ha reagito in qualche modo, l'assunzione è che abbia preso coscienza dell'evento, e non si continua a stimolarlo ulteriormente per lo stesso evento. L'output termico non è continuo né segue di continuo la posizione di ROI in movimento: sarebbe teoricamente possibile far "inseguire" un target col calore (es. pad destro caldo finché target alla nostra destra, poi a mano a mano sfuma se ci allineiamo, ecc.), ma sarebbe complesso e poco immediato da percepire. La scelta progettuale è stata di usare feedback discreti (on/off) associati a eventi discreti e fissi nello spazio (per un determinato range di tempo). Durante i test preliminari, questa strategia si è dimostrata sufficiente: gli utenti raramente oltrepassavano l'evento;

Validazione qualitativa della mappatura: è stato validato empiricamente la mappatura sinistra/destra con alcuni soggetti pilota. Tutti hanno riferito di trovare intuitivo il collegamento "braccio sinistro caldo = guarda a sinistra" e viceversa. Siccome il corpo umano ha una naturale simmetria bilaterale, associare stimoli tattili laterali a direzioni è immediato (analogo a certe interfacce per cui vibrazione a sinistra indica svolta a sinistra, ecc.). Certamente, due soli attuatori non possiamo indicare direzioni intermedie, ma si è deciso che questo livello di granularità non è necessario nel contesto narrativo,

dove tipicamente basta che lo spettatore orienti grossomodo il suo sguardo verso il nuovo punto di interesse, poi sarà la scena stessa a guidarlo precisamente.

In conclusione, la mappatura orientamento-pad implementata è semplice e robusta: ad ogni evento è associato un lato (L/R), e il pad corrispondente viene attivato se e solo se l'utente non è rivolto entro un certo angolo da quell'evento. Questo soddisfa i requisiti di chiarezza per l'utente (nessuna ambiguità nel segnale) e di efficacia nel coprire tutte le situazioni plausibili (sinistra/destra coprono 360°, con l'assunzione che eventi esattamente dietro l'utente siano rari e comunque assegnati a uno stimolo di direzione). Questa configurazione sarà poi confermata nel capitolo dedicato ai test utente.

Nel prossimo punto si discuterà delle logiche temporali di attivazione collegate a questa mappatura: cioè quando e per quanto tempo attivare i pad, come gestire più attivazioni ravvicinate o prioritarie e come l'algoritmo interviene in casi limite (override).

3.5 Logiche di attivazione (timer, trigger, override)

Questa sezione di “logiche di attivazione” fa riferimento all'insieme di regole temporali e condizioni particolari che governano l'accensione e lo spegnimento dei pad termici. Aver definito quale pad accendere in base alla direzione è un passo, ora bisogna anche definire quando farlo, per quanto tempo, e come comportarsi. In questa sezione si descrivono i meccanismi implementati per gestire questi aspetti, garantendo un funzionamento fluido e sicuro.

È stato deciso che ogni attivazione di pad dovrà avvenire sotto forma di mantenimento indefinito di accensione del pad a livello massimo (indicativamente 38°C) nel momento in cui funge da indicatore di direzione “errata”, e accensione a temperatura base nominale “a riposo” quando indica il ROI corretto (35°C circa). In ogni caso si andrà a evitare il riscaldamento eccessivo e che l'utente si abitui eccessivamente allo stimolo se prolungato. Nei test pilota è emerso che un impulso di 4-5 secondi di calore è percepito chiaramente e induce il movimento.

Come accennato, introduciamo un ritardo dall'inizio di un evento prima di attivare il pad, per dare all'utente la possibilità di accorgersi spontaneamente. Ciò significa che quando inizia un ROI (es. appare un elemento a sinistra nel video rispetto allo sguardo dell'utente), il sistema aspetta per esempio 2 secondi. Se l'utente si volta entro il tempo impostato nessun pad viene attivato (non ce n'è bisogno). Se trascorsi questi secondi ancora non guarda, allora si attiva il pad corrispondente. Questo ritardo serve a minimizzare le attivazioni non necessarie, e a non rovinare immediatamente la sorpresa narrativa in alcuni casi: si dà un margine all'utente di esplorare da sé. La lunghezza ideale del ritardo

può dipendere dal ritmo della scena – 2s è un buon compromesso generico. Per eventi molto brevi (della durata di pochi secondi totali), il delay potrebbe essere azzerato; nel dataset di video immersivi usato, gli eventi hanno durata di almeno 5-10 s, quindi 2s di attesa sono sostenibili.

Nel caso (evitato, ma possibile in teoria) di eventi sovrapposti su lati opposti, è stata definita una priorità narrativa per decidere quale segnalare. In genere, se due eventi importanti coincidono, vuol dire che uno è principale e l'altro secondario. L'evento principale avrà flag "alta priorità" e sarà l'unico ad essere segnalato con pad. Il secondario sarà ignorato (accettando che l'utente probabilmente lo perderà). Questo è coerente con il fatto che comunque l'utente non può fisicamente guardare due parti opposte contemporaneamente: deve scegliere. Dunque, bisogna guidarlo su quella porzione di inquadratura che la regia ritiene più importante. L'implementazione in Unity riflette ciò, nel caso due ROI attivi simultanei, si controlla un campo *priority* e si considera solo il più alto.

Cancellazione di trigger su evento concluso: se un pad è attivo e l'evento termina (es. il momento saliente finisce, magari perché l'oggetto scompare), il sistema spegne immediatamente il pad, anche se l'utente non ha guardato. Non avrebbe senso continuare a segnalare qualcosa che ormai non c'è più. Questo è implementato verificando la *timeNow* rispetto a *event.end*: se superata, si abortisce l'eventuale segnale in corso. Così si evitando situazioni anomale (per esempio l'utente sente calore, gira la testa ma l'evento era finito e non vede nulla – sarebbe spaesante; meglio in tal caso neanche segnalare, oppure se succede spegnere subito per non confonderlo oltre).

Sincronizzazione con input utente: si considera se l'utente cambia rapidamente orientamento più volte. Ad esempio, utente guarda avanti, con evento a sinistra allora pad sinistro on; l'utente all'inizio non reagisce, poi improvvisamente gira a destra per qualche motivo, poi si ricorda e gira a sinistra: bisogna accertarci di non generare conflitti. Per come è strutturata la logica, se l'utente guarda da tutt'altra parte (destra) mentre segnale sinistro è attivo, tecnicamente la condizione di spegnimento (ha guardato ROI) non è soddisfatta. Sono state prevenute rientranze immediate grazie al limite di due trigger. In pratica, situazioni oscillanti vengono smorzate grazie a quell'approccio – e anche l'isteresi sull'angolo previene attacca-stacca rapidi se uno passa attorno alla soglia.

Override manuale di sicurezza: un altro tipo di override è quello di sicurezza, se il sensore di temperatura rileva un valore troppo alto, l'Arduino come detto spegne tutto indipendentemente da comandi Unity. Questo è un override hardware. Unity è informato (anche se non strettamente necessario ai fini dell'esperienza, ma per log). Quindi può capitare che un pad sia attivo, la relativa temperatura superi i 42°C e allora Arduino spegne il pad. Unity vede dal feedback sensore che è stato spento (o potrebbe dedurlo se nota che la temperatura cala improvvisamente). A quel punto Unity considererà quell'attivazione conclusa e non tenterà di riaccenderlo. Questo evento viene segnalato e

deve essere gestito manualmente (per esempio riavviando il prototipo). In ogni caso, è da segnalare che nelle prove preliminari i pad non hanno mai superato le soglie impostate durante le finestre di attivazione programmate, quindi l'override di sicurezza non è mai entrato in azione. È comunque presente come rete di protezione.

Validazione con utenti delle logiche di attivazione: nei test preliminari con utenti pilota, è stato osservato che quasi sempre il feedback termico veniva notato entro 1-2 secondi dall'attivazione, e l'orientamento iniziava a cambiare subito dopo. Spegnerne esattamente quando guardano il ROI corretto è risultato efficace: alcuni non si sono resi conto del momento preciso in cui il calore spariva, perché concentrati sulla scena. Questo indica che i parametri scelti sono in un range accettabile. Nei casi in cui non c'è stata reazione e quindi cambio di direzione, è segno che probabilmente l'evento narrativo non catturava il loro interesse in ogni caso. Questo è un aspetto interessante: il sistema può segnalare, ma non può costringere a interessarsi – e in effetti *non vuole* farlo, per rispettare l'agency. Se l'utente, nonostante il segnale, decide di ignorarlo, la logica di fatto asseconda quella scelta lasciando correre. Questo è ritenuto il comportamento corretto: l'utente deve avere il controllo ultimo sull'esperienza.

In conclusione, le logiche di attivazione implementate assicurano che il feedback termico sia tempestivo ma non persistente, con adeguati meccanismi di timeout e tentativi limitati, e che eventuali situazioni anomale (sovrapposizioni, overshoot, rischi) vengano gestite in modo sicuro e non confusionario per l'utente. Queste logiche completano l'algoritmo di funzionamento del sistema, soddisfacendo i requisiti di sicurezza termica temporale discussi in precedenza.

Nei paragrafi seguenti affronteremo gli ultimi aspetti della progettazione, come è stato messo in sicurezza il prototipo dal punto di vista hardware e operativo e quali test preliminari sono stati condotti per verificare sia la sicurezza sia l'efficacia del sistema, includendo confronti con configurazioni alternative.

3.6 Messa in sicurezza del prototipo

La sicurezza – sia elettrica che termica – del prototipo è stata sin dall'inizio una priorità progettuale, come dettagliato nei requisiti illustrati finora. In questa sezione si descrive in pratica quali misure sono state adottate per garantire un utilizzo sicuro del sistema e la protezione dell'utente da possibili rischi. La “messa in sicurezza” ha riguardato interventi su più livelli: progettazione circuitale (alimentazione, isolamento), dispositivi di protezione, accorgimenti costruttivi (fasce e bendaggi), meccanismi di sicurezza nel firmware, procedure operative durante i test.

Alimentazione e protezione elettrica: l'uso di un'alimentazione dedicata a 5V è stato accompagnato da opportuni accorgimenti. L'alimentatore da banco utilizzato in laboratorio è stato impostato con una corrente massima di circa 3A e con modalità di limiting attiva: ciò significa che anche in caso di cortocircuito improvviso sui pad, l'alimentatore non erogherà più di 3A, prevenendo surriscaldamenti violenti. Nella pratica, un cortocircuito a 5V 3A produce 15W su eventuali cavi: sufficiente a scaldarli se sottili, ma non ad incendiare nulla se di durata breve. Per sicurezza, durante ogni test vi sarà sempre presente un operatore pronto a staccare la spina dell'alimentatore se dovessero presentarsi anomalie. Tutte le giunzioni elettriche del circuito (collegamenti su breadboard, pin dei MOSFET, ecc.) sono state isolate con guarnizioni.

L'Arduino stesso è protetto sul 5V USB da un polyfuse a 500 mA – anche questo assicura che, in casi di malfunzionamento, la corrente dalla porta USB non possa fare danni al PC o all'Arduino. In questo utilizzo, comunque, la gran parte della corrente per i pad proviene dall'alimentatore esterno, non dalla USB; quindi, il polyfuse Arduino non dovrebbe mai intervenire.

Isolamento termico e fisico dei pad: come menzionato, i pad termici sono stati ricoperti da uno strato di materiale isolante prima di essere posti a contatto con la pelle. In concreto, sono state utilizzate delle pezze di tessuto felpato spesso circa 2 mm (ritagli di cotone) e del nastro per fissarle sui pad. Questo strato svolge due funzioni: (1) impedisce il contatto diretto pelle-poliimmide; (2) smorza i gradienti termici, distribuendo il calore. È stato testato che la superficie esterna del tessuto si mantiene diversi gradi più bassa della superficie nuda del pad quando alimentato. Inoltre, il tessuto rende più confortevole la sensazione sul braccio (il pad nudo è plastico e leggermente rigido ai bordi, il tessuto invece è morbido).

Le fasce elastiche usate per tenere i pad in posizione sono in cotone con velcro per due motivi. Primo, garantire che i pad restassero ben aderenti alla pelle su tutta la superficie – se ci fossero bolle d'aria o zone non aderenti, potrebbe accadere che una parte del pad si surriscaldi di più e poi improvvisamente tocchi la pelle, causando una sensazione di bruciore localizzato. La benda compressiva uniforma la pressione e l'aderenza. Secondo, funge da isolante esterno: mantiene il calore localizzato invece di disperderlo troppo nell'ambiente, migliorando l'efficienza (in pratica, fa da “fascia riscaldante” trattenendo il calore sul braccio). Questo ci ha permesso di ottenere una buona percezione del calore con potenze moderate e di controllare meglio la dissipazione.

Sensori di sicurezza e taratura: i DS18B20 sono stati calibrati confrontandoli con un termometro IR superficiale, scaldando i pad a varie temperature e verificando che la lettura del sensore corrispondesse alla temperatura sulla superficie tessile. C'era uno scostamento di circa -1 °C (il sensore incorporato nella sonda, se non perfettamente a contatto interno, legge un valore leggermente

inferiore): è stato tenuto presente di questa differenza nel fissare la soglia durante i test. I DS18B20 sono molto affidabili e con risoluzione fine, quindi reagiscono velocemente (entro 0.1 s) ai cambi di temperatura. In caso di qualunque errore di lettura (es. sensore disconnesso dà valori nulli), il firmware Arduino interpreta ciò come condizione di errore e spegne il pad relativo. Questo è un'altra misura di sicurezza: fail-safe in caso di guasto sensori.

Spegnimento automatico e manuale: il firmware Arduino, come detto, spegne tutti i pad ed entra in loop sicuro al termine dell'esperienza. Oltre a ciò, c'è un controllo manuale che è possibile premere per l'utente, per cui in qualunque momento il soggetto ha la possibilità di interrompere l'alimentazione 5V ai pad. In caso l'utente comunicasse immediatamente disagio l'operatore toglie corrente in pochi secondi. È stata testata questa procedura "di emergenza" simulando un malfunzionamento (es. forzando un pad acceso e disabilitando il controllo per vedere la reazione).

Linee guida per l'utente e supervisione: prima di ogni prova, all'utente viene spiegato come funziona il sistema e vengono date alcune linee guida comportamentali per la sua sicurezza. Ad esempio, si suggerisce di non incrociare le braccia durante il filmato (per non spostare i pad) e di non toccare con le mani le fasce o i cavi mentre fruisce dall'esperienza immersiva per non scollegare nulla accidentalmente o scottarsi le dita toccando magari la parte scoperta del pad – che comunque è isolata. Gli viene detto di riferire immediatamente se sente dolore o fastidio e che può in qualunque momento interrompere l'esperienza. Inoltre, nel briefing si fa presente che si sentirà calore in alcune parti del corpo. Sottolineando che è tutto sotto controllo e monitorato.

Durante la visione, si supervisiona costantemente l'utente, pronti a intervenire. Si monitora sia le letture di temperatura in diretta sul PC (avendo uno script dedicato che mostra il valore misurato dai sensori) sia l'utente fisicamente (segni di disagio, movimenti insoliti). Il contesto e ambiente della simulazione in VR stesso è configurato in modo da garantire la sicurezza: l'utente si trova su uno sgabello girevole con base stabile, in un'area libera da ostacoli; il cavo del visore e i cavi dei pad sono gestiti dall'operatore per non arrotolarsi. Nel caso l'utente fosse in piedi, l'operatore avrebbe la stessa attenzione a evitare che si muova fuori dall'area o si attorcigli (in questo test, comunque, si è preferito fare prove da seduto).

Test di sicurezza a vuoto: prima di far indossare il dispositivo a un utente, è stato testato "a vuoto" in scenari peggiori, lasciando i pad accesi intenzionalmente più a lungo del normale (10-15 minuti continuativi) per vedere cosa succedeva. Senza dissipazione (non su pelle ma in aria), i pad tendevano a stabilizzarsi attorno a 70 °C, con i MOSFET caldi ma stabili. I cavi e connettori sono rimasti a temperatura ambiente. Questo ha dato fiducia che anche in caso di bug del software Unity (che magari lasci un comando attivo per errore) l'Arduino e i limiti hardware contengono il problema.

Si può concludere che la messa in sicurezza del prototipo è stata curata con attenzione e che il sistema si è dimostrato sicuro da utilizzare nelle condizioni sperimentali previste. Questa robustezza ha permesso di concentrarsi sugli aspetti sperimentali senza incidenti. La prossima sezione descriverà i test pre-sperimentali condotti per verificare non solo la sicurezza ma anche la funzionalità e l'efficacia del sistema, inclusi confronti con configurazioni alternative che erano state ipotizzate in fase progettuale.

3.7 Test pre-sperimentazione

Prima di passare alla sperimentazione con utenti in scenario controllato, sono stati condotti una serie di test preliminari sul prototipo per assicurarsi che tutti i sottosistemi funzionassero correttamente, che i requisiti di sicurezza fossero soddisfatti e per raccogliere dati utili a ottimizzare la configurazione. Questi test interni (effettuati dai membri del team o con colleghi, in maniera informale) hanno incluso sia verifiche tecniche oggettive sia simulazioni dell'esperienza utente con osservazioni qualitative e quantitative.

Si possono suddividere i test pre-sperimentali effettuati nelle seguenti categorie:

- (a) test di funzionamento hardware (circuito e sensori),
- (b) test di integrazione software (comunicazione Unity-Arduino, temporizzazioni),
- (c) test di risposta termica (tempi di riscaldamento/raffreddamento, temperature raggiunte),
- (d) simulazioni dell'esperienza utente (prove con scenari del film),
- (e) confronto con configurazioni alternative (per validare che le scelte progettuali prese – ad esempio numero e posizione pad – fossero ragionevoli).

(a) Test di funzionamento hardware: questi sono stati i primi, condotti su banco senza visore VR coinvolto. È stato controllato che ogni componente svolgesse la propria funzione base:

- Alimentazione e MOSFET: con un multimetro e un oscilloscopio è stato verificato che inviando un segnale HIGH dal pin Arduino il MOSFET saturasse portando quasi 5V sul pad e 0V sul drain e che a segnale LOW staccasse completamente (nessuna tensione residua sul pad). Sono stati testati i due canali indipendentemente caricandoli con resistenze di potenza note per misurare la corrente: con un carico fittizio di 5Ω è stato osservato ~1A, come atteso. Successivamente provato direttamente coi pad: misurata corrente ~1.6 A per pad (coerente con gli 8 W attesi). Nessun surriscaldamento anomalo dei transistor.

- Sensori DS18B20: testati inizialmente immergendoli in acqua a varie temperature e confrontando con termometro: rientrati nell'accuratezza ± 0.5 °C come da datasheet. Poi fissati sui pad e controllato che leggessero adeguatamente la temperatura del pad: riscaldando il pad a bassa potenza, è stato misurato col termometro IR sulla superficie tessile e confrontato con output sensore. Come detto, trovato differenza di pochi gradi (compensata in soglia lato software). Verificata la reattività: scaldando velocemente il pad, i sensori reagivano ampiamente entro 1 secondo nel mostrare aumento.
- Comunicazione seriale: aperto un terminale seriale sul PC e manualmente inviati comandi all'Arduino (bypassando Unity) per accendere/spegnere i pad. Visto che funzionava (pad caldi al comando "1" ad es., e spenti con "2"). Provata anche la trasmissione inversa: Arduino inviava stringhe e leggibili dal terminale. Stabilità: lasciato Arduino a inviare letture ogni 1s per un'ora, nessun errore o blocco, il PC riceveva tutto correttamente.
- Consumi elettrici: misurato con un amperometro che l'assorbimento a regime con un pad acceso era circa 0.5–0.6 A, con due pad arrivava a 1.0–1.2A. Provato a generare un corto momentaneo su un pad e l'alimentatore è andato in limitazione (3A costanti, tensione scesa) e il fusibile non è intervenuto (richiede più tempo). Rimosso il corto, tutto tornato normale; l'Arduino non si è resettato. Ciò indica robustezza della sezione di alimentazione.

(b) Test di integrazione software: una volta soddisfatti dell'hardware stand-alone, è stato fatto girare l'app Unity collegata.

- Verificato che all'avvio Unity trovasse la porta COM corretta e che inviando comandi dal codice effettivamente l'Arduino li eseguisse (lo si notava dai LED di debug e dalla temperatura del pad). Provato uno scenario, script Unity impostato per attivare pad destro dopo 5s dall'avvio, per 3s. Indossando la fascia su braccio destro, è stato confermato che dopo 5s si sentiva caldo e spegneva dopo circa 3s.
- Calibrato il timing: inizialmente c'erano delle incertezze se usare *Invoke()* di Unity o un timer interno. Si è passati a gestione con variabili di tempo nell'*Update()* per avere maggior controllo. Testato che il delay e la durata fossero rispettati al millisecondo (loggato timestamp di evento e di comando pad, confrontandoli).
- Tracking orientamento: all'inizio senza visore, è stato simulato l'orientamento utente con un controllo manuale. Questo ha permesso di testare la logica come se l'utente ruotasse effettivamente il punto di vista. Così, è stato simulato un evento a sinistra attivo, se si orientava lo sguardo verso sinistra, il codice in Unity spegneva il pad, ecc. Tutto funzionava

come atteso, compresa l'isteresi (provando ad oscillare attorno alla soglia, non c'era flicker grazie alle soglie differenziate).

- Eccezioni: provato a disabilitare la porta seriale a runtime (simulando una disconnessione USB): l'app Unity non andava in crash perché avevamo previsto try/catch, e l'Arduino in mancanza di comandi non fa nulla. In questi casi peggiori, i pad sarebbero rimasti nello stato ultimo comandato, ma con i timer di sicurezza su Arduino, comunque, si sarebbero spenti.

(c) Test di risposta termica e misure tecniche: qui è stato caratterizzato precisamente come rispondevano i pad alle attivazioni, per tarare intensità e durata.

- Tempo di attivazione percepibile: è stato fatto indossare una delle fasce per poi attivare manualmente i pad per tempi variabili. Emerge che già entro ~1.5–2 secondi dall'accensione si percepisce un tepore iniziale, che poi aumenta. A cinque secondi si raggiunge un livello chiaramente avvertibile e confortevole. Verso 8-10 secondi iniziava a diventare molto caldo, quasi fastidioso. Quindi la scelta di 5s appare giustificata, sufficiente a dare un segnale robusto ma non a surriscaldare.
- Tempo di raffreddamento: spegnendo dopo 5s, il pad non scende a temperatura ambiente istantaneamente, questo perché la sensazione di calore residuo permane per altri ~5-10s diminuendo gradualmente. Questo è in parte positivo (non è un drop brusco, quindi l'utente non percepisce on/off netti ma un impulso graduale e morbido). D'altro canto, se si volesse dare due impulsi ravvicinati sullo stesso pad, il secondo lo troverebbe ancora tiepido. È stato poi condotto un esperimento via software per misurare le tempistiche di riscaldamento e raffreddamento dei pad in diverse condizioni d'uso: pad arrivato a partire da 34°C a 38 °C in 5s, e dopo lo spegnimento impiega ~15s per tornare sotto i 30 °C. Quindi, se si pensasse a un doppio trigger, converrebbe aspettare almeno ~10s per avere di nuovo contrasto (il secondo impulso su un pad ancora caldo potrebbe quasi non essere notato perché la pelle si è acclimatata).
- Uniformità pad: è stata utilizzata una termocamera (FLIR) sui pad attivi: era evidente che il calore fosse distribuito uniformemente su tutta la superficie, con differenze di max 1°C tra centro e bordo. Questo significa che l'isolante e la pressione uniforme aiutano a distribuire correttamente il calore. È importante per assicurare che non ci siano hotspot localizzati che possano creare un punto di contatto troppo caldo.

- Latenza end-to-end: è stato misurato il tempo totale dal momento in cui il codice in Unity rileva condizione - invio comando - Arduino si attiva - pad inizia a scaldare percepibilmente. Con log insieme alla testimonianza utente: stima $\sim 0.2s$ (comando+elettronica) + 2s (termica) = $\sim 2.2s$. Quindi se un evento parte, dopo il delay previsto, entro un paio di secondi l'utente sente il feedback attivato. Questo è accettabile nel flow narrativo.
- Consumo batteria: valutato se si volesse alimentare a batteria portatile: con $\sim 3A$ e voltaggio 5V, ogni attivazione di 5s ha un consumo trascurabile per una batteria da ad esempio 20Wh. Dunque, il sistema potrebbe funzionare su battery pack per ore. Nei test a banco è stato effettivamente usato un powerbank in alcune prove: in 30 minuti di uso discontinuo la carica è calata di pochi punti percentuali. Questo indica una buona portabilità potenziale.

(d) Confronto con configurazioni alternative:

- Pad su altre posizioni: per esempio, è stato provato a spostare i pad dal tricipite all'avambraccio interno su un soggetto, per vedere se percepiva diversamente il calore e come questo si rapportasse al feedback di direzionalità. Il soggetto ha riferito che all'interno dell'avambraccio il calore si sentiva prima (pelle più sensibile) ma dava più fastidio (sensazione di bruciore più acuta). Sul tricipite era più diffuso e tollerabile. Questo ha confermato che la posizione scelta (braccia esterne) è più bilanciata per uno stimolo soft. È stato anche ipotizzato spalla vs braccio: un pad posizionato sulla spalla (deltoide) forse avrebbe potuto indicare la direzione con ancora più immediatezza. Però è più complesso da fissare, oltre a considerare la presenza del visore vicino.
- Intensità modulata: è stata testata l'idea di modulare via PWM il calore, per esempio per differenziare un evento critico vs uno secondario (immaginando uno pseudo-codice: caldo intenso = evento molto importante, caldo lieve = evento minore). In pratica, si pilota Arduino con un duty cycle 50% vs 100%. Si nota che a 50% (intermittente veloce) il pad scalda più gradualmente e rimane tiepido (max $\sim 34^{\circ}C$). L'utente percepisce un lieve calore, potrebbe essere sufficiente come segnale "soft". Quindi tecnicamente possibile implementare livelli di intensità. Questa è una configurazione che può essere sfruttata nella sperimentazione attuale, considerando che modulando il duty cycle si può ottenere una variazione di temperatura più delicata, utile per sviluppi futuri (ad es. un sistema adattivo che prima prova con segnale debole e poi aumenta se ignorato).

Questi test pre-sperimentali hanno permesso di affinare la configurazione: sono state regolate soglie angolari, durate, e confermato la robustezza delle soluzioni hardware. Inoltre, sono stati utili per confermare che l'esperienza utente non venisse degradata dal sistema – i feedback dei test preliminari sono stati positivi, evidenziando che il sistema era per lo più trasparente e facile da seguire.

Con il prototipo validato da questi test, si può passare alla fase successiva, ovvero la sperimentazione con utenti per misurare l'effetto del sistema sulla FOMO, sulla presenza e sugli altri parametri di user experience.

4. Implementazione

In questo capitolo si presenta la configurazione hardware del prototipo indossabile e l'integrazione software (applicazione Unity e firmware Arduino) per il controllo dei pad termici e la raccolta dei dati sperimentali.

4.1 Assemblaggio hardware

Come anticipato, il prototipo realizzato consiste in quattro pad riscaldanti flessibili in poliimmide alimentati a 5V (diametro ~5 cm, spessore <0,5 mm), controllati dal microcontrollore Arduino mediante opportuni circuiti di pilotaggio a transistor MOSFET. Ciascun pad è accoppiato a un sensore di temperatura digitale DS18B20, posto tra il pad e la pelle, per monitorare in tempo reale la il calore erogato e la relativa temperatura. I pad termici selezionati hanno una potenza massima di circa 8W ciascuno (assorbimento ~0,8A a 5V) e sono in grado di produrre un aumento di temperatura percepibile di alcuni gradi nel giro di pochi secondi (vedi tabella “temperature Pad” in Appendice). Al fine di garantire la sicurezza, la temperatura viene mantenuta entro soglie confortevoli, tipicamente al di sotto di 40 °C sulla pelle. I pad sono infatti stati testati in modo da fornire uno stimolo termico efficace senza diventare eccessivamente caldi, mantenendo il comfort entro limiti di sicurezza. Inoltre, funzionando a bassa tensione (5V), essi non introducono rischi elettrici per l'utente.



Figura 4.1.1 Pad termico con sensore, garza e nastro in velcro

Per la sperimentazione finale, i quattro pad sono stati fissati sugli arti superiori tramite fasce in velcro: due per braccio, uno posizionato in alto all'altezza del muscolo tricipite (braccio superiore) e uno in basso nei pressi del polso (avambraccio) su ciascun lato. In questo modo si ottengono quattro punti di attuazione distribuiti simmetricamente intorno all'utente (sinistra-alto, sinistra-basso, destra-alto, destra-basso). Tra ogni pad e la pelle è interposto un sottile strato di tessuto isolante traspirante (garza di cotone), che svolge una duplice funzione: diffondere uniformemente il calore ed evitare il contatto diretto per motivi igienici e di comfort. Ciascun sensore DS18B20 è collocato in prossimità del pad corrispondente, rilevandone la temperatura effettiva durante l'uso (vedi figura 4.1.1).

Tutti i pad sono collegati tramite cavi piatti flessibili all'Arduino, il quale è stato fissato con una striscia di velcro su un supporto stabile accanto all'utente (vedi figura 4.1.2). Questo accorgimento mantiene l'elettronica vicina al partecipante senza gravare direttamente sul visore o sul corpo, e consente ai cavi di seguire agevolmente i movimenti rotatori dell'utente evitando intralci.



Figura 4.1.2 Arduino posizionato in un alloggiamento ad hoc a fianco all'utente

La disposizione dei pad in questa configurazione permette di comunicare informazioni sulla posizione degli eventi nel video in modo intuitivo. In particolare, l'attivazione di entrambi i pad sul lato sinistro del corpo segnala che un evento di interesse (POI, Point of Interest) sta avvenendo nell'area sinistra della scena, mentre l'attivazione dei pad di destra indica un evento situato verso destra. Inoltre, l'attivazione simultanea dei due pad superiori (su entrambi i tricipiti) viene utilizzata per segnalare eventi posti dietro all'utente. Al contrario, se un evento rilevante è già visibile nel campo frontale dell'utente, nessun pad viene attivato, evitando stimoli superflui (diventando così uno strumento ancor meno invasivo). Non appena il sistema rileva che l'utente ha orientato lo sguardo correttamente

verso il POI segnalato, il feedback termico relativo viene disattivato (il pad si spegne) così da non protrarsi oltre il necessario e non distrarre ulteriormente l'utente. Questo comportamento on/off automatico garantisce che il segnale termico assolva alla sua funzione di *cue* direzionale in modo discreto e temporaneo.

Dal punto di vista della sicurezza, il firmware implementa due meccanismi di protezione, uno lato software l'altro più vicino al lato hardware. Se la temperatura misurata da un sensore supera una soglia prestabilita (per esempio 40 °C), l'Arduino interviene spegnendo immediatamente il pad corrispondente per prevenire surriscaldamenti e potenziali discomfort per l'utente. Inoltre, per tutta la durata del test con il dispositivo indossato, gli utenti avevano a disposizione un tasto fisico da poter premere in un qualunque momento per staccare corrente ai pad e quindi spegnerli, in caso di necessità o emergenza (vedi figura 4.1.3). Nei test condotti, tuttavia, la temperatura dei pad è rimasta ampiamente sotto la soglia critica (nessun pad oltre ~38-39 °C) grazie al controllo attivo e alla moderata inerzia termica del sistema. E anche il tasto fisico non è mai stato premuto, su 21 test condotti. Nel complesso, l'hardware progettato soddisfa i requisiti di leggerezza, ergonomia e sicurezza termica, risultando relativamente comodo da indossare, trattandosi di un prototipo, e mappando in modo intuitivo le direzioni dello stimolo caldo con quelle degli eventi nel mondo virtuale.



Figura 4.1.3 Tasto fisico a disposizione in caso di emergenza

4.2 Configurazione e calibrazione dei sensori termici

Per gestire e monitorare il dispositivo termico durante gli esperimenti è stata sviluppata una specifica interfaccia utente (UI) in Unity (vedi figura 4.2.1). Questa applicazione desktop consente di avere sotto controllo e monitorare lo stato del sistema in tempo reale, di intervenire manualmente se necessario e di impostare i valori minimi e massimi di temperatura che i singoli pad possono raggiungere. Nella UI vengono visualizzate le temperature istantanee di ciascun pad, aggiornate in tempo reale tramite i dati inviati dai sensori DS18B20. In aggiunta, si dispone di comandi manuali per accendere o spegnere i pad individualmente, con la possibilità di selezionare livelli di intensità preimpostati (ad esempio *MIN*, *MAX*) per ciascun pad. Questo è utile nelle fasi di test e calibrazione, permettendo di verificare la risposta di ogni attuatore prima dell'inizio della sessione. È presente anche un controllo globale per attivare/disattivare simultaneamente tutti i pad, semplificando un eventuale spegnimento rapido di emergenza.

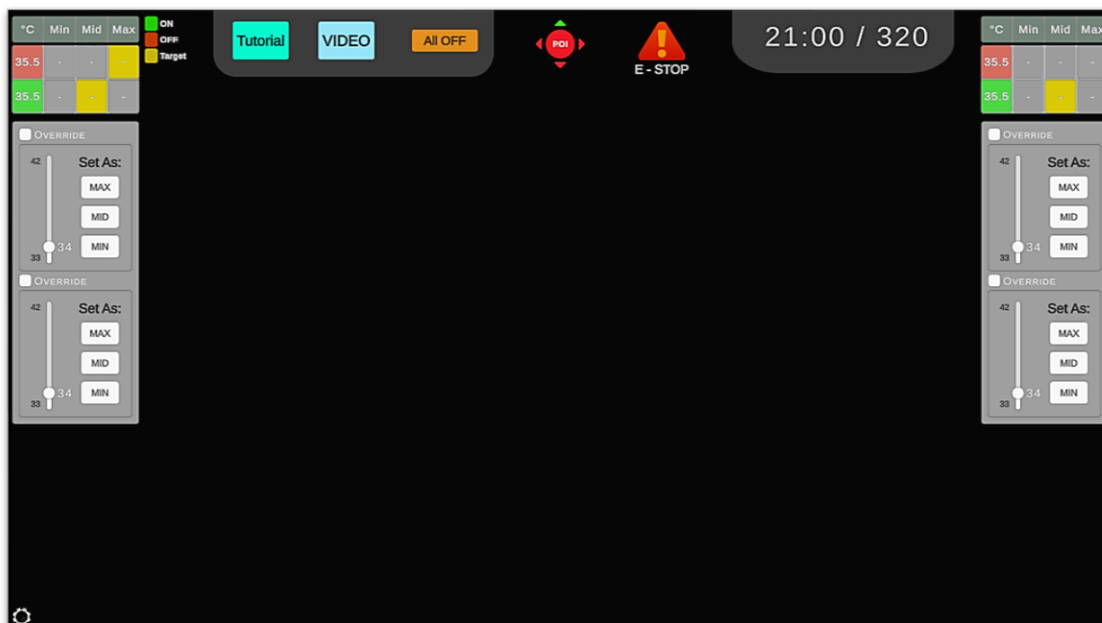


Figura 4.2.1 UI per controllo e monitoraggio del sistema in Unity

All'interno dell'interfaccia sono inoltre integrati indicatori e controlli ausiliari: un display del timer sincronizzato con il video (minutaggio corrente) e lo stato del pulsante di arresto di emergenza (E-stop). L'interfaccia mostra chiaramente se l'E-stop è stato premuto, così che l'operatore possa reagire prontamente. Sono inclusi anche i controlli per la selezione e l'avvio dei filmati 360° all'interno del visore, integrando quindi la gestione del contenuto multimediale con quella del dispositivo termico in un'unica applicazione.

Prima di ogni prova con un nuovo partecipante, è stata effettuata una calibrazione termica iniziale dei pad e dei sensori. In particolare, si è provveduto a portare i pad a una temperatura di standby “neutra”, leggermente inferiore a quella corporea, in modo che risultassero appena tiepidi al tatto. Ciò è stato fatto durante la fase di familiarizzazione pre-esperimento (vedi sezione 5.4), sfruttando i controlli manuali dell’interfaccia per impostare ciascun pad al livello minimo di potenza sufficiente da renderlo percepibile ma non caldo. Questo procedimento ha permesso inoltre ai partecipanti di adattarsi gradualmente alla nuova sensazione termica in un contesto neutro. Allo stesso tempo, la calibrazione garantisce che tutti i sensori di temperatura forniscano letture accurate e che il sistema mantenga le temperature desiderate con precisione.

Come accennato, la temperatura target per i cue termici durante la visione è stata scelta in modo da essere ben percepibile ma sicura: tipicamente nell’attorno tra i 36 e i 38 °C, con un limite massimo impostato a ~40 °C, a seconda dell’utente. Tale valore è ampiamente al di sotto della soglia di potenziale rischio per la pelle (che si colloca attorno ai 43-45 °C per esposizioni prolungate). Durante l’uso, grazie al feedback dei sensori, l’Arduino modula l’erogazione di potenza per mantenere il pad nel range desiderato e, come detto, interviene con uno spegnimento automatico del singolo pad se la temperatura dovesse oltrepassare il limite di sicurezza. Nei fatti, nessun partecipante ha mai raggiunto condizioni di discomfort termico, e non si sono verificati trigger dell’E-stop dovuti al calore, poiché nessuno ha dovuto premere il pulsante di emergenza per eccesso di caldo.

Ogni partecipante ha svolto una breve sessione di training iniziale con il dispositivo per prendere confidenza con la sensazione del calore e poter familiarizzare con questa nuova tipologia di feedback direzionale. In tale fase, è stato illustrato al soggetto la presenza dei pad termici come parte dell’esperienza multisensoriale, senza enfatizzarne troppo la funzione per non creare bias o aspettative eccessive. Il partecipante ha potuto sentire un lieve riscaldamento di prova, confermando che l’intensità fosse confortevole. Questo ha contribuito sia a rassicurare l’utente sulla non nocività del feedback, sia a tarare soggettivamente la percezione: eventuali partecipanti particolarmente sensibili avrebbero potuto segnalare necessità di abbassare l’intensità, mentre altri più tolleranti al calore potevano gestire senza problemi il livello standard. In pratica, comunque, il profilo termico è rimasto uniforme per tutti i partecipanti, non essendosi presentate richieste di modifica fuori dai range previsti: il calore è stato percepito universalmente come mite e non invasivo, confermando la bontà della calibrazione svolta in fase di preparazione.

4.3 Sviluppo del codice (Arduino e Unity)

La pipeline software del sistema è suddivisa tra il firmware in esecuzione su Arduino e l'applicazione sviluppata in Unity 3D lato PC. La comunicazione avviene tramite collegamento seriale USB continuo, attraverso un semplice protocollo testuale personalizzato. Dal lato Arduino, il microcontrollore esegue un firmware, scritto in C++ nell'ambiente di sviluppo Arduino IDE, che si occupa di ricevere comandi dal PC e inviarne conferme e dati di telemetria. Più in dettaglio, l'Arduino resta in ascolto sulla porta seriale: quando riceve un comando di attivazione/disattivazione per uno o più pad (rappresentato da codici carattere o stringhe, ad es. un carattere "L" per accendere il pad sinistro, "R" per il destro, comandi per spegnere, ecc.), il firmware aggiorna immediatamente lo stato dei relativi MOSFET di potenza, alimentando o togliendo corrente ai pad selezionati. In parallelo, in un loop temporizzato, l'Arduino legge tutti i sensori DS18B20 (indirizzati sul bus 1-Wire) e invia al PC un pacchetto di telemetria contenente le temperature rilevate e altri stati di sistema. I dati possono ad esempio essere inviati come stringhe CSV del tipo "T1=34.5;T2=35.0;T3=...;E=0" dove $T1..T4$ sono le temperature in °C e E è un flag per l'E-stop. Questo consente all'applicazione Unity di aggiornare in tempo reale l'interfaccia di monitoraggio e anche di registrare tali informazioni nei log. Qualora un sensore riporti un valore superiore alla soglia di sicurezza (come descritto, ~40 °C), il firmware esegue immediatamente lo spegnimento di emergenza del pad interessato e può inviare un messaggio di allerta al PC, in modo che l'evento sia loggato e l'operatore avvisato.

Dal lato Unity, il sistema software integra più funzionalità, tra cui la riproduzione dei video 360° per il visore VR, il tracciamento dell'orientamento della testa dell'utente e la logica decisionale che stabilisce quando attivare o disattivare i pad. All'interno del progetto Unity è stato sviluppato uno *script* dedicato (in C#) che legge continuamente, ad ogni frame, l'orientamento corrente dell'utente (in termini di angoli yaw-pitch-roll o quaternione, tramite le API XR del visore). Contestualmente, per ciascun contenuto video sono stati definiti a priori i Point of Interest (POI) o eventi narrativi chiave: essi costituiscono l'equivalente dei "punti salienti" che l'utente non dovrebbe perdere. Ogni POI è descritto da un istante temporale (momento del video in cui l'evento accade) e da una posizione angolare nel panorama sferico (ad es. azimuth/direzione rispetto al nord iniziale, e eventualmente elevazione). Prima dell'esperimento, è stata dunque compilata per ciascun video una *timeline* degli eventi narrativi con le rispettive direzioni nel mondo 360°. Durante l'esecuzione, lo script all'interno di Unity verifica ad ogni frame se vi è un POI "attivo" in quel momento (ossia se il video ha raggiunto l'istante di un evento). Se sì, il software calcola la differenza angolare tra la direzione di quel POI e la direzione corrente dello sguardo dell'utente.

A questo punto si aprono due possibili casi: se l'utente sta già guardando verso il POI (differenza angolare al di sotto di una soglia prestabilita, ad es. 20-30°), significa che l'evento è nel suo campo visivo – in tal caso non viene attivato alcun feedback termico, poiché l'utente non rischia di perderlo; se invece l'utente non sta guardando il POI (evento fuori dal FOV corrente), ed è trascorso più di un brevissimo intervallo dall'inizio dell'evento (qualche istante di tolleranza per evitare falsi allarmi se l'utente sta per girarsi da solo), allora lo script innesca il feedback termico appropriato. Per fare ciò invia un comando seriale all'Arduino indicando quale pad accendere, come descritto in precedenza. Il riscaldamento del pad fornisce così all'utente un segnale sensoriale aggiuntivo che lo invita a girarsi verso la fonte. Lo script in Unity continua comunque a monitorare in tempo reale l'orientamento, perché non appena rileva che l'utente si è girato verso l'evento (ossia la differenza angolare scende sotto la soglia) oppure se l'evento nel frattempo termina, il software invia immediatamente all'Arduino il comando di spegnimento del pad attivo. In questo modo la durata del cue termico è la minima indispensabile. L'intero ciclo si ripete per ogni evento di interesse durante la visione, potendo anche attivare più cue termici in sequenza se gli eventi sono ravvicinati (è comunque evitata l'attivazione contemporanea di pad diversi per eventi distinti, poiché i POI sono definiti in modo da non sovrapporsi temporalmente).

L'applicativo si occupa anche di registrare dettagliatamente tutti gli eventi rilevanti in log, come descritto nella sezione seguente.

4.4 Pipeline di raccolta dati

Durante ogni sessione di visione, il sistema ha registrato automaticamente una serie di dati oggettivi in formato CSV, successivamente utilizzati per l'analisi quantitativa. In particolare, ad intervalli regolari (circa ogni frame video, compatibilmente con la frequenza di aggiornamento del visore) l'applicazione Unity ha salvato su file i seguenti elementi:

- L'orientamento della testa dell'utente, tipicamente espresso in termini di yaw, pitch, roll o quaternione, aggiornato frame-by-frame. Questo tracciato permette di ricostruire esattamente dove stava guardando il partecipante in ogni momento del video.
- Lo stato dei pad termici, ovvero quali pad erano accesi/spenti in ciascun istante. In pratica, ogni volta che un pad veniva attivato o disattivato, l'evento veniva loggato con un timestamp (ad es. "t=32.5s: ON pad sinistro"). Inoltre, con alta frequenza veniva registrata l'ultima intensità di output inviata a ciascun pad.

- Le temperature rilevate dai sensori DS18B20, annotate periodicamente. Ogni record di log includeva la temperatura (in °C) di ciascun pad in quell'istante, rendendo possibile tracciare l'evoluzione termica durante l'esperienza e verificare che i valori restassero nei limiti previsti.
- Il timestamp degli eventi narrativi (POI) e l'identificativo/direzione del POI attivo. Ciò significa che per ogni frame o intervallo campionato è noto se un certo evento rientrava nel campo visivo dell'utente o meno.
- Lo stato del pulsante E-stop, registrato in continuo.

Per implementare la registrazione continua si è utilizzato uno script logger (denominato *HeadGazeCsvLogger*) che ad ogni frame raccoglieva le informazioni dal sistema (posizione della testa, stati dei pad, ecc.) e le riportava testualmente su un file CSV, salvato automaticamente a fine sessione. Il campionamento temporale effettivo dei dati di tracking è risultato di circa 90-100 campioni al secondo (legato al frame rate del rendering e alla frequenza del sensore IMU del visore), più che sufficiente per cogliere anche movimenti rapidi della testa. Tutti i file di log generati (uno per ciascuna sessione utente, per ciascun video) sono stati successivamente importati ed elaborati per estrarre le metriche di interesse.

La pipeline di elaborazione dati prevedeva passaggi di *data cleaning* e calcolo degli indicatori oggettivi descritti. In primo luogo, sono state scritte funzioni per identificare, dato il tracciato di orientamento e la lista di POI, quali eventi sono stati visti da ciascun partecipante e con quale ritardo. In pratica, per ogni POI si è controllato se l'utente ha rivolto la testa verso la direzione dell'evento entro una finestra temporale prestabilita dall'inizio del POI (ad es. 3 secondi); se sì, l'evento è considerato "visto" (anche parzialmente), in caso contrario "perso". Si è calcolato il tempo di latenza (delay) per gli eventi visti, definito come l'intervallo tra l'inizio del POI (e del segnale termico se presente) e il momento in cui l'utente lo inquadra nel proprio FOV. Inoltre, integrando sul tempo i tracciati angolari, sono state derivate misure come la percentuale di tempo in cui un partecipante guardava fuori dai POI attivi e la durata totale (in secondi) degli intervalli "al di fuori" dei POI. Parallelamente, dal segnale di orientamento sono state estratte statistiche sul movimento della testa. Per esempio, la velocità angolare media durante il video, il picco di velocità registrato, il numero di rotazioni rapide (*burst* di movimento) e la frequenza di cambi di direzione dello sguardo al minuto. Questi parametri forniscono un quadro del comportamento esplorativo dell'utente (un alto numero di cambi repentini potrebbe indicare una ricerca affannosa di contenuti, potenzialmente correlata a FOMO elevata).

Oltre all'analisi numerica, i dati raccolti sono stati utilizzati per generare alcune visualizzazioni grafiche utili all'interpretazione dei risultati. In particolare, sono state prodotte *heatmap* della

distribuzione dello sguardo sulle scene a 360° proiettando i punti di osservazione dell'utente sulla sfera panoramica, si evidenziano le zone osservate più frequentemente (in colore più caldo) rispetto a quelle trascurate. Confrontando le heatmap aggregate delle due condizioni (con e senza feedback termico) è possibile apprezzare differenze nei pattern di esplorazione visiva. Un'altra visualizzazione impiegata è stata quella frame-by-frame su timeline: per ciascun POI si è rappresentato, in funzione del tempo, se l'utente lo stava guardando (indicatore "on target") o meno, ottenendo un grafico a barre temporali che mostra chiaramente quando lo sguardo aggancia l'evento e per quanto tempo vi rimane (vedi capitolo 6). Questo tipo di grafico, ripetuto per ogni evento, ha permesso di valutare in modo dettagliato i tempi di reazione e i periodi di mancata visione. Ad esempio, si può vedere visivamente se con il feedback termico l'utente tende a coprire maggiormente i vari eventi significativi con minori "vuoti" rispetto alla condizione senza aiuto.

Tutti i dati raccolti, infine, sono stati sintetizzati in appositi file per l'analisi statistica. In particolare, i risultati grezzi e derivati sono stati organizzati in fogli di calcolo, tra cui uno dedicato ai dati di tracciamento e metriche oggettive (file *Punteggi_Tracciamenti.xlsx*), e uno ai dati dei questionari soggettivi (file *Questionari_Analisi.xlsx*). Nel primo di questi documenti ogni riga corrisponde a un partecipante e ogni colonna a una particolare misura, facilitando così il confronto statistico tra le due condizioni sperimentali. La presenza simultanea di misure soggettive e oggettive per ciascun soggetto consente anche analisi incrociate – ad esempio verificare se chi ha riportato un certo punteggio di FOMO abbia effettivamente perso più eventi, o se un calo di immersione soggettiva si correli con determinate variazioni nei movimenti della testa. Questi aspetti di analisi saranno approfonditi nel capitolo dedicato ai risultati sperimentali.

5. Metodologia sperimentale

In questo capitolo si presenta la metodologia con cui è stato condotto lo studio sperimentale per valutare il sistema di feedback termico descritto finora. Sono definiti gli obiettivi e le ipotesi di questo studio, delineato il disegno sperimentale, illustrando le metriche di valutazione adottate, descritta la procedura di test passo-passo e dettagliata la natura dei dati raccolti (soggettivi e oggettivi). L'obiettivo finale è verificare l'efficacia del feedback termico nel mitigare la FOMO nei video 360° e il suo impatto sull'esperienza utente in termini di immersione, presenza, agency e altri fattori rilevanti nel contenuto di contenuti immersivi.

5.1 Obiettivi e ipotesi del test

Lo scopo principale della sperimentazione è verificare se l'impiego di segnali termici direzionali riduce la FOMO negli spettatori di video narrativi a 360°, senza compromettere aspetti fondamentali dell'esperienza immersiva quali il senso di presenza, il livello di immersione e la agency (cioè la libertà percepita di esplorare la scena a proprio piacimento). In altri termini, lo studio intende valutare se l'utente, grazie ai *cue* di calore, perde meno contenuti importanti e si sente meno in ansia di esserseli persi, mantenendo però un coinvolgimento e un senso di controllo paragonabili a quelli di una visione tradizionale priva di aiuti.

Come obiettivi secondari, vengono presi in considerazione anche il comfort termico e l'usabilità percepita del prototipo. Sebbene questi aspetti (comodità d'uso, assenza di fastidi fisici, praticità nel mettere/togliere il dispositivo, ecc.) non siano il focus primario, è comunque importante valutarli per capire l'accettabilità di una tale soluzione in un contesto applicativo reale. Un sistema efficace ma troppo scomodo o intrusivo, infatti, difficilmente sarebbe adottato dagli utenti finali; perciò, raccogliere feedback su comfort e usabilità fornisce indicazioni utili per eventuali miglioramenti futuri del dispositivo.

Le ipotesi di questo studio prevedono che l'introduzione del feedback termico produca effetti positivi sul comportamento e sulle percezioni degli utenti. In particolare, ci si aspetta che il partecipante, ricevendo un avviso quando accade qualcosa fuori dal suo sguardo, provi meno la "paura di perdersi" elementi della storia. Questa ipotesi si tradurrebbe in due aspetti misurabili: (a) un minore livello di FOMO soggettiva riportato nei questionari post-esperienza (es. minore accordo con frasi del tipo "ero preoccupato di essermi perso qualcosa di importante"), e (b) una riduzione della FOMO oggettiva,

ovvero un aumento della percentuale di eventi narrativi effettivamente osservati dall'utente (meno POI mancati rispetto alla visione senza aiuti).

Al tempo stesso, si ipotizza che il feedback termico non influenzi in modo negativo l'immersione, la presenza e l'agency. Idealmente, se progettati correttamente, i *cue* di calore dovrebbero essere sufficientemente trasparenti e integrati nell'esperienza da non distrarre l'utente o fargli percepire un controllo esterno. L'aspettativa è dunque che immersione e presenza rimangano elevate e comparabili a una visione standard: il calore potrebbe perfino offrire un leggero beneficio immersivo aggiungendo una componente sensoriale (multisensorialità), ma principalmente l'obiettivo è che non "rompa" l'illusione immersiva. Analogamente, per l'agency ci si attende che gli utenti continuino a sentirsi liberi di guardare dove vogliono e non "costretti" dal sistema – in altre parole, che interpretino il calore come un suggerimento discreto e non come un obbligo. Un esito ideale sarebbe che i partecipanti apprezzino il supporto fornito, trovandolo utile per orientarsi nella storia senza per questo sentire di aver perso autonomia.

Infine, un'ulteriore ipotesi qualitativa è che il feedback termico possa contribuire ad una visione più consapevole e focalizzata: riducendo l'ansia da "missing out", l'utente potrebbe adottare uno stile di esplorazione più calmo e mirato, con minori movimenti erratici della testa. Ciò potrebbe riflettersi positivamente sulla comprensione ed efficacia narrativa del filmato, in quanto lo spettatore riesce a seguire meglio tutti i punti salienti della trama senza distrarsi o agitarsi. Tali aspetti saranno indagati sia con misure quantitative sia attraverso domande aperte di confronto tra le due condizioni.

5.2 Design sperimentale

Per testare le ipotesi sopra descritte è stato ideato un design sperimentale tra i soggetti controbilanciato (*within-subjects*). Ogni partecipante ha preso parte a entrambe le condizioni di visione previste: una condizione sperimentale in cui il dispositivo di feedback termico era attivo durante il video e una condizione di controllo in cui il video veniva fruito in modo standard senza alcun feedback aggiuntivo. In questo modo, è stato possibile un confronto diretto e statisticamente significativo tra le due modalità. L'ordine di esposizione è stato controbilanciato: metà dei partecipanti ha guardato per primo un video con feedback termico e poi un secondo video senza feedback, mentre l'altra metà ha seguito l'ordine inverso. Ciò serve a controllare effetti di apprendimenti, affaticamento o familiarizzazione. In questo modo, eventuali effetti d'ordine si bilanciano tra i gruppi e non inficiano i risultati.

In pratica, sono stati utilizzati due video 360° differenti ma analoghi per contenuto e durata (entrambi di natura narrativa, durata <5 minuti, con contenuti comparabili in termini di complessità e presenza di elementi narrativi). Chi, ad esempio, iniziava con il video A + feedback termico, in seconda battuta vedeva il video B senza feedback; viceversa, un altro partecipante avrebbe visto prima B con feedback e poi A senza feedback. Questo approccio fa sì che ogni video sia stato visto da un numero uguale di partecipanti sia con che senza il dispositivo, evitando che eventuali differenze intrinseche tra i filmati (es. uno più coinvolgente dell'altro) possano confondere l'effetto del feedback termico.

Il campione coinvolto nella sperimentazione è stato composto da 21 partecipanti volontari. Si tratta in gran parte di studenti universitari e giovani adulti, tutti maggiorenni con età media di 25 anni (deviazione standard 2,52 e mediana 24) di cui il 62% maschi e il 38% femmine. Prima di iniziare i test è stata verificata l'assenza di condizioni di esclusione. Ai candidati è stato richiesto di non soffrire di epilessia fotosensibile, di non avere seri problemi visivi/uditivi non corretti, né allergie o sensibilità anomala al calore cutaneo (criteri per garantire la sicurezza prima di iniziare i test). Inoltre, dalle domande pre-test è stato anche osservato che quasi tutti i partecipanti avevano almeno una minima familiarità con la realtà virtuale o i video a 360°: alla domanda *“Hai mai usato un visore VR?”* hanno risposto positivamente il 71% dei soggetti, conforme con la domanda subito successiva, *“Hai mai visto video 360° in VR?”* che ha avuto esito positivo il 67% delle volte.

Le analisi riportate considerano un'unica variabile indipendente, cioè la condizione di visione (feedback termico attivo vs nessun feedback), con confronti entro-soggetto tra le due modalità. L'ordine di presentazione è stato controbilanciato tra i partecipanti per controllare e verificare possibili effetti di apprendimento/affaticamento ed è stato trattato come fattore di controllo. Non sono stati inoltre definiti gruppi tra-soggetto basati su caratteristiche demografiche, in ragione della dimensione del campione e dell'obiettivo di focalizzarsi sull'effetto della condizione di visione.

Per la dimensione FoMO in contesti immersivi a 360°, è stato assunto come riferimento il lavoro di Aitamurto et al. [6], da cui sono state derivate le definizioni operative e relativi item. Quest'ultimi sono stati rivisti sul piano lessicale per ancorarli alla fruizione di video sferici e all'eventuale presenza di segnali direzionali, adottando una scala Likert da 1 a 7 punti. In parallelo, per la presenza e immersione sono stati presi di riferimento i contributi dell'IPQ (Igroup Presence Questionnaire) [21] e della scala Slater–Usuh–Steed [22]; anche in questo caso è stata impiegata la scala 1–7, mantenendo coerenza metrica tra le sezioni del questionario.

La valutazione dell'accettabilità del dispositivo indossabile si è basata sulla WEAR Scale [23] nelle sue principali dimensioni (design/estetica, self-expression, conseguenze percepite e percezione sociale). Gli item sono stati integrati con affermazioni specifiche su comfort termo-tattile e

integrazione del feedback termico durante la fruizione, alla luce della letteratura reperita su ACM Digital Library e di considerazioni ergonomiche emerse nei piloti. Per lo screening della cybersickness, è stata adottata una versione ridotta del Simulator Sickness Questionnaire (SSQ; Kennedy et al.) [24], focalizzata su un sottoinsieme di sintomi maggiormente rilevanti per la visione di brevi sequenze 360°, con formulazioni allineate a pratiche correnti documentate in Taylor & Francis Online e Frontiers.

Per la valutazione dell'usabilità percepita del sistema è stata impiegata la System Usability Scale (SUS) nella formulazione originale di Brooke (1996) [25], mantenendo i 10 item standard con alternanza di polarità e la scala a 5 punti (da “fortemente in disaccordo” a “fortemente d'accordo”). Il punteggio è stato calcolato secondo la procedura canonica (ricodifica, somma e moltiplicazione per 2.5), così da preservare la comparabilità con la vasta letteratura preesistente.

Le variabili dipendenti – cioè le misure di *outcome* confrontate tra le condizioni – includono, quindi, sia metriche soggettive (derivate dai questionari compilati dai partecipanti) sia oggettive (derivate dai dati di tracking e performance registrati dal sistema). Di seguito le due macrocategorie.

Soggettive:

- FOMO percepita, cioè il livello di *Fear of Missing Out* soggettiva che il partecipante riferisce di aver provato durante la visione. Viene misurato tramite questionari post-esposizione con domande specifiche relative all'ansia di aver perso qualcosa di importante. Ad esempio, affermazioni adattate dalla scala FOMO di Przybylski et al. (2013) [26] riformulate per il contesto VR – “*Ero preoccupato che stesse succedendo qualcosa di interessante in un punto che non stavo guardando*” – alle quali il soggetto risponde su scala Likert (da 1 a 7). Dalle risposte si ottiene un punteggio soggettivo di FOMO per ciascun video. Ci si attende che questo punteggio medio risulti inferiore nella condizione con feedback termico (indicando minore paura di perdersi eventi).
- Immersione: rappresenta il grado di coinvolgimento sensoriale e di assorbimento attentivo nell'esperienza VR. È rilevata tramite un insieme di item Likert somministrati subito dopo ogni video, con frasi del tipo “*Mi sono sentito totalmente immerso nell'esperienza*”. Gli item coprono vari aspetti dell'immersione (coinvolgimento, attenzione, senso di presenza spaziale, ecc.) e sono aggregati in un punteggio medio. Un'elevata immersione è considerata desiderabile in entrambe le condizioni; l'aspettativa è di non rilevare differenze significative tra le due esperienze. Tuttavia, si è anche posto il quesito se il segnale termico potesse distrarre in minima parte dall'azione principale, ipotesi che verrebbe indicata da un punteggio di

immersione leggermente inferiore con il dispositivo (risultato che andrebbe comunque contenuto e analizzato con attenzione, dato che immersione e FOMO potrebbero avere una relazione inversa).

- Presenza: intesa come il *sensu di “esserci” fisicamente* nel mondo virtuale mostrato dal video. Anche questa dimensione è misurata con scale soggettive post-esperienza, includendo item sul realismo dell’ambiente, la sensazione di trovarsi davvero nel luogo virtuale, ecc. (ad es. *“L’ambiente del video mi è sembrato reale e tangibile”, “Avevo la sensazione di essere davvero sul posto raffigurato”*). La presenza è legata all’immersione ma non del tutto sovrapponibile; si valuta se l’aggiunta del calore possa aumentare la presenza tramite maggiore realismo multisensoriale, oppure se eventuali distrazioni la riducano. Come per l’immersione, l’obiettivo progettuale era mantenere la presenza almeno pari al caso senza feedback.
- Agency: definisce il senso di controllo attivo e di libertà di esplorazione che il partecipante percepisce. Nel contesto di un video 360°, l’agency si manifesta nella libertà di guardare ovunque senza sentirsi pilotati. Per misurarla sono state poste affermazioni del tipo *“Potevo decidere liberamente dove guardare”, “Avevo il controllo del mio punto di vista”*, alle quali il soggetto ha potuto rispondere sempre su scala 1-7 dopo ciascun video. Un valore medio elevato (prossimo a 7) indica che l’utente ha percepito completa autonomia. Ci si attende che la presenza dei *cue* termici non riduca significativamente l’agency: il sistema è concepito per orientare l’attenzione in modo leggero e poco invasivo senza imporre nulla. Una lieve diminuzione potrebbe tuttavia emergere se alcuni utenti avvertissero i segnali come una sorta di “spinta” a guardare altrove; sarà quindi importante confrontare i punteggi medi di agency e analizzare eventuali commenti qualitativi dei partecipanti al riguardo.
- Comfort e usabilità: dopo aver sperimentato la condizione con il dispositivo, ai partecipanti sono state poste domande sul comfort fisico e termico. In particolare: *“Il calore applicato sul braccio era fastidioso o piacevole?”*, *“Hai trovato scomodo indossare il dispositivo durante la visione?”*, *“Il livello di calore era troppo alto, troppo basso o adeguato?”* ecc. Queste domande, con risposte su scala Likert, forniscono indicazioni sull’accettabilità del sistema. Idealmente, il feedback dovrebbe risultare non invasivo o eccessivamente ingombrante: i partecipanti dovrebbero percepire il dispositivo come relativamente comodo da portare (non intralciare i movimenti né pesare) e il calore come lieve/piacevole oppure neutro, sicuramente non doloroso o insopportabile. Viene inoltre valutata l’usabilità percepita in senso lato: ad esempio tramite domande finali sulla preferenza tra le due esperienze, e con una scala standard

(come il SUS – System Usability Scale). Queste misure, sebbene non centrali per confermare l’ipotesi principale, aiutano a interpretare i risultati, perché un basso comfort potrebbe spiegare eventuali cali di immersione, mentre un alto gradimento indicherebbe potenzialità di adozione.

Oggettive:

- FOMO oggettiva: indica la quantità di contenuti narrativi chiave effettivamente non visti dall’utente. Viene quantificata tramite i dati di tracking confrontati con la posizione dei POI: in particolare si calcola la percentuale di POI persi (ovvero la frazione di eventi importanti che non sono mai entrati nel campo visivo del partecipante durante la loro occorrenza). Un’altra metrica correlata è la percentuale di tempo “perso”, cioè la proporzione della durata complessiva degli eventi in cui l’utente guardava altrove invece che sul POI. Si considera anche la durata totale (in secondi) di mancata visione accumulata e le oscillazioni veloci della testa durante la visione. L’ipotesi è che con il feedback termico tali valori diminuiscano sensibilmente, siccome l’utente ha la possibilità di perdere meno eventi rilevanti.
- Tempo di reazione ai POI: per ogni evento narrativo (POI) è stato calcolato il tempo impiegato dall’utente per voltarsi a guardarlo, qualora lo abbia visto. Questa latenza è misurata in secondi, dal momento in cui l’evento inizia (ed eventualmente dal momento in cui il sistema attiva il pad) al momento in cui il POI entra nel campo visivo dell’utente. Inoltre, si può scomporre la latenza in base alla direzione dell’evento – ad es. calcolare la latenza media verso sinistra, destra e dietro – per vedere se vi sono differenze (ad esempio un partecipante potrebbe essere più lento a reagire a sinistra che a destra, indicando un’asimmetria). Ci si aspetta che con il feedback termico le latenze risultino inferiori (tempi di reazione più pronti), poiché l’utente riceve un avviso immediato e non deve scoprire da solo che qualcosa sta accadendo.
- Comportamento esplorativo (dati di head-tracking): dal tracciamento dei movimenti della testa sono state derivate numerose metriche che descrivono come l’utente ha esplorato l’ambiente 360°. Alcune già citate riguardano la velocità di rotazione, per esempio la velocità angolare media della testa in deg/s durante la visione e la velocità angolare massima registrata. Valori più alti potrebbero indicare un comportamento più frenetico (testa che gira rapidamente, aumentando la FOMO), mentre valori bassi indicano movimenti più lenti e controllati. Si è calcolato inoltre anche il numero di “burst” di movimento – cioè quante volte la velocità di rotazione ha superato una certa soglia per breve tempo, indicando una rapida

rotazione improvvisa. Allo stesso modo, la durata totale in stato di “burst” (sommando i secondi in cui la testa si muoveva sopra soglia) offre un’idea di quanto tempo l’utente ha passato compiendo movimenti rapidi. Un’altra misura è la frequenza di *switch* dello sguardo: quante volte al minuto l’utente ha invertito la direzione di rotazione o si è spostato da un lato all’altro della scena. Uno *switch rate* elevato implica uno sguardo irrequieto che compie salti tra le varie direzioni (potenziale segnale di FOMO elevata), mentre uno *switch rate* basso può indicare che l’utente rimane più a lungo focalizzato su una zona prima di cambiare direzione. Sono stati anche valutati eventuali pattern “zigzag” – micro-oscillazioni ripetute del capo avanti e indietro – e il numero di rotazioni complete a 360° che l’utente ha effettuato. In generale queste metriche servono a caratterizzare quantitativamente la strategia esplorativa, poiché un partecipante con FOMO alta potrebbe mostrare molti *switch*, alte velocità e tanti movimenti superflui (a livello narrativo); viceversa, con un aiuto che riduce l’incertezza, ci si aspetta un’esplorazione più mirata, con meno movimenti superflui e più tempo dedicato ai punti giusti.

Riassumendo, le misure chiave per verificare le ipotesi saranno la FOMO soggettiva e oggettiva, l’immersione, la presenza e l’agency medie riferite, i dati di comfort e usabilità, oltre alle metriche di comportamento esplorativo, come i tempi di reazione e dinamiche di movimento della testa. Nel capitolo 6, dedicato all’analisi e la discussione di questi risultati, tali variabili verranno confrontate statisticamente tra condizione con e senza feedback, per verificare quali differenze emergono in modo significativo.

5.3 Procedura di test

L’esperimento è stato condotto in ambiente controllato presso il laboratorio dipartimentale. La stanza di test era silenziosa, priva di distrazioni visive, con illuminazione moderata per non influenzare la visione del visore. Il partecipante veniva fatto sedere su una sedia girevole, in modo da potersi comodamente voltare a 360°. Attorno era garantito spazio libero sufficiente per allungare le braccia e ruotare il busto in sicurezza. Ciascuna sessione individuale aveva una durata totale di circa 45-60 minuti, comprendendo tutte le fasi dall’accoglienza iniziale al debriefing finale.

La procedura sperimentale seguiva una serie di fasi standardizzate, descritte di seguito:

1. Accoglienza e consenso informato (~5 min): il partecipante veniva accolto nell’area di test e invitato ad accomodarsi. L’operatore forniva una breve spiegazione introduttiva dello scopo generale dello studio, senza rivelare dettagli specifici sul funzionamento del dispositivo

termico o sulle ipotesi (per evitare di influenzare il comportamento). Si illustrava la natura dell'esperienza (visione di filmati VR) e si rassicurava il soggetto sul poter interrompere il test in qualsiasi momento senza conseguenze. Successivamente si verificavano i criteri di ammissibilità, si confermava che il partecipante fosse maggiorenne, in buona salute, senza precedenti di epilessia fotosensibile, né particolari allergie o discomfort verso stimoli termici cutanei. Si chiedeva anche se, in caso, in passato avesse sofferto di cybersickness con VR, per prestare attenzione a eventuali segnali di malessere durante la prova. Una volta accertata l'idoneità, si procedeva oltre.

2. Questionario pre-esperienza (~5 min): prima di indossare il visore, il partecipante compilava un questionario iniziale su PC o tablet. Questo questionario pre-test raccoglieva informazioni di base e serviva a stabilire alcuni parametri di riferimento (*baseline*). In dettaglio, includeva: (a) *dati demografici e background* (età, genere, esperienza pregressa con la VR e familiarità con video 360°); (b) *atteggiamento verso la tecnologia*, mediante alcune domande validate sull'affinità con le nuove tecnologie e la propensione all'innovazione, per contestualizzare il profilo del partecipante; (c) *tendenza generale alla FOMO*: una breve scala per misurare la predisposizione personale alla *Fear of Missing Out* nella vita quotidiana. Questa sezione era adattata da questionari FoMO esistenti (Przybylski et al. 2013) tradotti in italiano – ad esempio item come “*Mi infastidisce perdermi eventi a cui partecipano le persone a cui tengo*”, “*Quando non posso partecipare a un'attività, temo che gli altri vivano esperienze più gratificanti senza di me*” valutati su scala 1-7. Lo scopo di questa misura baseline era verificare se persone con predisposizione a una FOMO elevata rispondessero in modo diverso al sistema rispetto a chi aveva una FOMO generica bassa; (d) *stato attuale*: alcune domande sullo stato psicofisico immediato del partecipante, per assicurarsi che fosse a suo agio e registrare valori di riferimento.
3. Preparazione e istruzioni (~10 min): l'operatore preparava il partecipante all'esperienza immersiva. Veniva mostrato come indossare il visore VR (Meta Quest 2) e spiegato l'uso dello sgabello girevole: il partecipante poteva ruotare la sedia per guardarsi intorno, ma doveva evitare di alzarsi in piedi per non uscire dall'area di sicurezza. In questa fase veniva introdotto anche il dispositivo termico indossabile: al partecipante venivano fatte vedere le fasce con i pad e spiegato che facevano parte dell'esperienza multisensoriale. Montaggio del dispositivo: se il primo video che il partecipante avrebbe visto fosse stato nella condizione con feedback, a questo punto si sarebbe proceduto a fissare le fasce termiche sulle sue braccia. Le cinghie in velcro venivano regolate per aderire confortevolmente (né troppo strette né

troppo lente) sui punti prestabiliti (braccio e avambraccio); ci si assicurava che l'utente potesse muovere liberamente le braccia e ruotare il busto senza impedimenti e che i cavi fossero posizionati in modo da non intralciare. Se invece il partecipante avrebbe inizialmente visto il video senza feedback, le fasce non venivano ancora indossate: sarebbero state applicate nella pausa successiva, in modo da non aggiungere ingombro inutile durante questa fase dell'esperienza. In ogni caso, l'operatore illustrava le istruzioni di sicurezza, raccomandandosi di restare sempre seduti durante l'esperienza, di muovere la testa lentamente soprattutto all'inizio per evitare vertigini, e di segnalare immediatamente se avesse avvertito qualsiasi malessere (nausea, disorientamento) o eccessivo calore sulle braccia. Si chiariva che il sistema disponeva di un pulsante di emergenza per interrompere all'istante il riscaldamento se necessario. Inoltre, per garantire igiene e comfort, veniva interposto uno strato di tessuto (garza di cotone) tra i pad e la pelle. Il partecipante poteva fare domande e si verificava che fosse pronto e a suo agio prima di procedere.

4. Familiarizzazione in VR (~5 min): per mettere il partecipante a proprio agio con il visore e l'ambiente virtuale, si iniziava con una breve sessione di prova. Una volta indossato l'HMD, veniva avviata una scena VR neutra a 360° (un semplice ambiente statico con il POI visibile). Durante questi minuti di familiarizzazione, l'operatore incoraggiava l'utente a esplorare liberamente lo spazio virtuale ruotando la testa e la sedia a 360°. Si ricordavano le precauzioni di base. Questo periodo serviva anche a verificare che il tracking del visore e i dispositivi funzionassero correttamente. Se il partecipante in questa fase indossava già il prototipo termico, si procedeva a calibrare il sistema termico: i pad venivano attivati al livello minimo in modo da portarli a una temperatura neutra leggermente sotto quella corporea, sufficiente perché il partecipante iniziasse a percepire un lieve calore. Il soggetto veniva invitato a fare attenzione a tale sensazione e a confermare che risultasse tiepida e non fastidiosa. Quando il partecipante si dichiarava confidente nell'uso del visore e a suo agio nell'ambiente virtuale, si interrompeva la scena demo e si preannunciava l'inizio della prima prova sperimentale.
5. Visione del *Video 1* (~5 min): si avviava il primo filmato immersivo a 360° (Video 1) tramite l'applicazione Unity, con visualizzazione stereoscopica sull'HMD e audio spazializzato. Il partecipante guardava il video seduto sulla sedia girevole; se la sua prima condizione era stata con feedback attivo, allora avrebbe indossato in quel momento anche le fasce termiche (già montate poco prima), altrimenti sarebbe stato privo di dispositivo. Al partecipante veniva chiesto di guardare il filmato in modo naturale e libero, come farebbe con un comune video VR, senza compiti secondari. Si incoraggiava ad esplorare la scena a 360° ruotando la testa o

la sedia, e a prestare attenzione alla storia, ma non venivano fornite indicazioni su dove volgere lo sguardo. Questo per consentire l'emergere spontaneo di eventuali sensazioni di FOMO e osservare il comportamento esplorativo senza bias istruzionali. Durante la visione, se il feedback termico era in uso, avrebbe fornito segnali di calore sincronizzati con il contenuto narrativo. Per esempio, se nel video c'era un POI attivo alla destra dell'utente, il sistema aumentava leggermente il calore sul braccio destro, per dare il suggerimento di voltarsi in quella direzione. Tutti i cambiamenti termici erano progettati per essere gradualmente e di bassa intensità, rimanendo entro soglie confortevoli (mai oltre ~42 °C sulla pelle), in modo da non distrarre con bruschi sbalzi ma comunque essere percepibili. Se l'utente volgeva lo sguardo verso la fonte suggerita, il pad veniva spento. Nella condizione senza feedback, l'utente vedeva il video senza alcun segnale aggiuntivo, dovendo quindi affidarsi solo a ciò che vedeva e sentiva per decidere dove guardare.

Durante la visione il software raccoglieva in automatico i dati oggettivi, in particolare, ogni variazione di orientamento della testa veniva tracciata e registrata in un log temporale, e – nel caso di feedback attivo – venivano anch'essi loggati gli eventi di attivazione/spegnimento dei pad e le temperature raggiunte. L'utente non era direttamente consapevole di questa registrazione e si cercava di mantenere l'esperienza il più naturale possibile.

Al termine del video, il filmato veniva stoppato. L'operatore assisteva il partecipante nella rimozione temporanea del visore e dell'eventuale dispositivo termico.

6. Questionario intermedio (~5 min): completata la prima visione, il partecipante compilava un questionario relativo all'esperienza appena conclusa. Questo questionario *post-video* era somministrato su PC e comprendeva diverse sezioni:

- Una serie di item per valutare la presenza e l'immersione percepite nel video appena visto, nonché il grado di coinvolgimento emotivo e attentivo. Alcune tra queste, per esempio: *“Mi sono sentito realmente presente nel luogo mostrato dal video”*, *“Ho seguito la storia con attenzione costante”*, *“Gli eventi mi hanno coinvolto emotivamente”*. Tutti su scala Likert 1-7.
- Domande sul senso di agency e (nel caso di visione VR) di embodiment, quali: *“Mi sentivo libero di esplorare l'ambiente a 360°”*, *“Non mi sono sentito costretto a guardare in una certa direzione”*, *“Avevo il controllo del mio punto di vista durante la visione”*, che miravano a cogliere se il partecipante avesse percepito o meno condizionamenti esterni nello scegliere dove guardare.

- Una sezione dedicata alla FOMO riferita al video includeva affermazioni per capire se l'utente avesse provato la paura di perdersi dettagli o al contrario la tranquillità di non esserseli persi (*Joy of Missing Out*). Esempi: “*Temevo che mentre guardavo in una direzione stesse accadendo qualcosa di importante altrove*” oppure “*Non ero preoccupato di perdermi parte della storia*” sempre valutati su scala 1-7.
- Se nella prima sessione il dispositivo termico fosse stato attivo, sarebbe stata presentata anche una sezione aggiuntiva di domande relative al feedback termico e al dispositivo indossabile. Qui si chiedeva, ad esempio: “*Hai notato i segnali di calore? Ti sono sembrati coerenti con ciò che accadeva nel film?*”, “*Il calore ti ha aiutato a capire dove guardare?*”, “*Hai trovato fastidioso o distraente il calore?*”. Se invece il primo video era senza feedback, le domande relative al dispositivo venivano saltate.

Il questionario intermedio richiedeva circa cinque minuti di tempo, condotte in modalità intervista, cioè con l'operatore che poneva le domande al partecipante, compilando le risposte date e chiarendo eventuali dubbi rispetto ad alcune domande. Al termine, si passava alla fase successiva.

7. Pausa (~2-3 min, opzionale): dopo il questionario intermedio, era prevista una breve pausa di pochi minuti. Il partecipante poteva rilassarsi e prepararsi mentalmente per la seconda parte. Questa pausa aveva anche lo scopo di attenuare possibili effetti di *carry-over* tra le due visioni e di far “resettare” in parte l'esperienza precedente. Durante questo intervallo, l'operatore controllava rapidamente i log raccolti fino a quel momento e resettava eventuali parametri sul sistema. Inoltre, se il partecipante doveva utilizzare il dispositivo termico nella seconda sessione (cioè se nel primo video non l'aveva indossato), la pausa veniva sfruttata per montare le fasce termiche. In tal caso si ripeteva brevemente la procedura di fissaggio. Dopo aver verificato che tutto fosse a posto, si proseguiva.
8. Visione del *Video 2* (~5 min): si procedeva con la seconda sessione di visione immersiva, utilizzando il secondo video 360° previsto. La procedura era analoga alla prima e anche durante questo video continuava la raccolta di dati oggettivi di tracciamento testa e, se applicabile, log degli eventi termici. L'operatore supervisionava passivamente la sessione attraverso l'interfaccia all'interno di Unity sul monitor (dove vedeva in tempo reale dove l'utente guardava e il monitoraggio dei pad attivi, senza tuttavia interferire con l'esperienza). Al termine del video 2, il partecipante veniva aiutato a togliere il visore (e le fasce, se le indossava).

9. Questionario post-esperienza (~5-7 min): infine, il partecipante compilava l'ultimo questionario, di chiusura. Questo questionario finale includeva le stesse sezioni di misure soggettive riferite alla seconda visione appena conclusa (presenza, immersione, agency, FoMO/JoMO, ecc., analoghe al questionario intermedio ma relative al Video 2), ma in aggiunta, conteneva alcune domande riassuntive sull'esperienza complessiva e sul confronto tra le due condizioni. Ad esempio, veniva chiesto se il partecipante avesse notato differenze significative tra la prima e la seconda visione, quale delle due avesse preferito. Una sezione di domande aperte permettevano di raccogliere feedback qualitativi rilevanti, poiché tali commenti aiutano a interpretare i dati quantitativi.

L'insieme di risposte raccolte in questo questionario finale forniva quindi dati sia sul Video 2 sia un confronto diretto tra le due condizioni dal punto di vista del partecipante. Terminata la compilazione, l'operatore salvava tutti i risultati e concludeva la sessione di raccolta dati.

10. Debriefing e chiusura (~2 min): infine, si svolgeva un breve colloquio di debriefing con il partecipante. L'operatore ringraziava per la partecipazione e spiegava ora in maniera più esplicita l'obiettivo dello studio, rivelando che l'esperimento mirava a ridurre la FOMO tramite il feedback termico. Si discuteva apertamente di quanto accaduto. Molti partecipanti a questo punto fornivano impressioni spontanee e commenti (che venivano annotati come osservazioni qualitative). Si chiedeva se il soggetto avesse domande o curiosità e si rispondeva a tutti i dubbi. A seconda dei casi si fornivano spiegazioni più tecniche. In questo lasso temporale, si verificava anche lo stato del partecipante, assicurandosi che non avesse accusato malesseri da *cybersickness* o effetti indesiderati né irritazioni cutanee dovute al calore. In nessun caso si sono registrati problemi persistenti. Riguardo al calore, nessuno ha lamentato dolore o segni sulla pelle: anzi, in alcuni casi è stato descritto il livello di caldo come "appena percepibile" o "debole ma notevole", confermando che i parametri impostati erano effettivamente conservativi. Si ricordava infine al partecipante che i suoi dati sarebbero stati anonimizzati e utilizzati solo per scopi di ricerca, e lo si ringraziava nuovamente per il contributo.

5.4 Raccolta dei dati (soggettivi e oggettivi)

Come detto, durante la sperimentazione sono stati raccolti sia dati soggettivi, tramite i questionari descritti, sia dati oggettivi tramite il sistema di tracciamento e logging. Queste due tipologie di

informazioni forniscono prospettive complementari, poiché le prime riflettono l'esperienza percepita dall'utente, le seconde documentano il comportamento effettivo e le performance misurabili.

I dati soggettivi provengono dai questionari pre e post esperienza, presentati sommariamente nella sezione precedente. In particolare, dopo ciascun video sono state acquisite valutazioni quantitative su immersione, presenza, agency, FOMO e comfort. Ogni partecipante ha generato dunque due serie di punteggi (una per condizione). Inoltre, il questionario finale ha fornito confronti diretti e commenti qualitativi sulla preferenza tra le due condizioni. Tutti questi dati soggettivi sono stati inseriti in un foglio di calcolo aggregato (*Questionari_Analisi.xlsx*), dove per ogni partecipante sono riportati i punteggi medi o sommatori delle varie scale nelle due condizioni. Tali dati sono stati poi analizzati statisticamente per verificare differenze significative – analisi di cui si discuterà nel capitolo dei risultati.

I dati oggettivi, invece, includono principalmente le misure estratte dai log di head-tracking e di sistema. Per ciascuna sessione di ogni partecipante, i file CSV registrati (vedi sezione 4.4) sono stati elaborati per calcolare le metriche descritte in 5.2, come la percentuale di POI persi, tempi di reazione medi, velocità angolari, frequenza di switch, ecc. Questo processo di estrazione è avvenuto in parte con script automatici; tali risultati sono stati poi copiati nel foglio Excel riassuntivo (*Punteggi_Tracciamenti.xlsx*). All'interno di questo file, per ciascun partecipante e per ciascuna condizione, sono elencati tutti i parametri oggettivi calcolati. Ad esempio, le colonne includono “FOMO_A_miss_pct_con” e “FOMO_A_miss_pct_senza” (percentuale di POI persi con e senza feedback), “latenza_media_con” e “latenza_media_senza”, “velocità_media_deg/s_con” ecc., fino a “switch_rate_con” e “switch_rate_senza”, oltre a indicatori come “max_temp_pad” per verificare le temperature massime raggiunte e “estop_trigger” per registrare se l'e-stop è stato premuto.

Questi dataset oggettivi consentono analisi quantitative precise. Confrontando la colonna “%POI persi” tra condizioni possiamo vedere se effettivamente nella versione con il feedback attivo la percentuale scende; oppure confrontando “velocità_angolare_media” si verifica se nella versione con il feedback l'utente muove meno freneticamente la testa, e/o più lentamente. I dati oggettivi sono stati confrontati con i dati soggettivi per trovare conferme incrociate. Ad esempio, possiamo controllare se un partecipante che ha dichiarato poca FOMO con il feedback ha effettivamente un FOMO_A_miss_pct molto basso in quella condizione (ovvero quasi nessun evento perso), indicando coerenza tra percezione e realtà. Oppure verificare se, in media, la riduzione di eventi mancati misurata (~20% in meno) corrisponde a un miglioramento nei punteggi FOMO soggettivi. Allo stesso modo, eventuali differenze nei punteggi di immersione o presenza tra le condizioni possono essere interpretate alla luce dei log.

I risultati numerici, con le relative analisi statistiche (valori medi, deviazioni standard, p-value dei test), saranno presentati nel Capitolo 6. In sintesi, la metodologia di raccolta dati ha permesso di disporre, per ogni partecipante in ciascuna condizione, di un ampio insieme di misure soggettive ed oggettive allineate temporalmente, rendendo possibile un confronto dell'impatto del feedback termico direzionale sull'esperienza utente a 360°. I passi successivi consisteranno nell'analizzare questi dati per confermare o meno le ipotesi di partenza e trarre conclusioni sul valore di questa nuova tecnica di mitigazione della FOMO.

6. Analisi e discussione dei risultati sperimentali

In questa sezione vengono analizzati in dettaglio i dati raccolti durante i test utente, confrontando sistematicamente la condizione “con feedback termico direzionale” e la condizione di controllo “senza feedback termico”. I risultati sono organizzati per tematiche chiave: immersione, agency, FOMO, comfort, presenza, coerenza, accettabilità, percezione, cybersickness, individuazione di immagini specifiche, usabilità SUS e dati oggettivi di tracking; ciascuna introdotta dal relativo contesto teorico e seguita dalla discussione dei risultati quantitativi (punteggi medi nelle due condizioni, differenze statisticamente significative) e qualitativi emersi. I test sono stati condotti nell’arco di una settimana con il coinvolgimento di 21 utenti. Come descritto in precedenza, è stata alternata tra utenti la visione dei video e dell’utilizzo del dispositivo di feedback termico. Quindi, circa la metà degli utenti hanno visionato prima il video 1 e poi il 2, l’altra metà il contrario; analogamente è stato fatto per il dispositivo indossabile, associandolo anch’esso alternatamente al video 1 e 2. Per semplicità di consultazione, è importante segnalare che tutti i dati che riportano la dicitura “video 1” nei file Excel di analisi sono da intendersi come video visualizzato indossando il feedback termico attivo (indipendentemente quindi dal contenuto effettivo del video) e che da qui in avanti saranno utilizzati gli acronimi “CF” e “SF” per indicare quando si parla dell’esperienza fatta, rispettivamente, con feedback e senza feedback. Il confronto tra le due esperienze è quindi costituito da una versione con feedback termico attivo e indossato durante la visione di un contenuto immersivo contro la sola visione del contenuto tramite visore VR (Meta Quest 2).

È opportuno anche segnalare i due video selezionati per condurre i test, che sono risultati validi per motivi di ritmo narrativo, ritenuto adeguato all’esperienza, per un’alternanza di POI relativamente coerente con la latenza e inerzia dei pad termici, durata sotto i 5 min e analogia di contenuto e azioni presenti all’intero del video. I video utilizzati come base per la conduzione dei test sono “*Elephants on the Brink | Racing Extinction (360 Video)*” prodotto da Animal Planet e distribuito da Discovery, e “*Lions 360°*” prodotto da National Geographic [62][63]. Anche in questo caso, per semplicità di consultazione, si abbreviano i titoli dei video in “Elefanti” e “Leoni”.

Per verificare la significatività statistica dei risultati, sono stati utilizzati, in funzione della natura dei dati (es. se è presente una distribuzione normale), T-test (two paired samples) e il suo equivalente non parametrico Wilcoxon Signed-Rank Test for Paired Samples; per entrambi i test saranno riportati dove necessario i valori dei p-value e p-exact, rispettivamente (two.tail)

6.1 Immersione

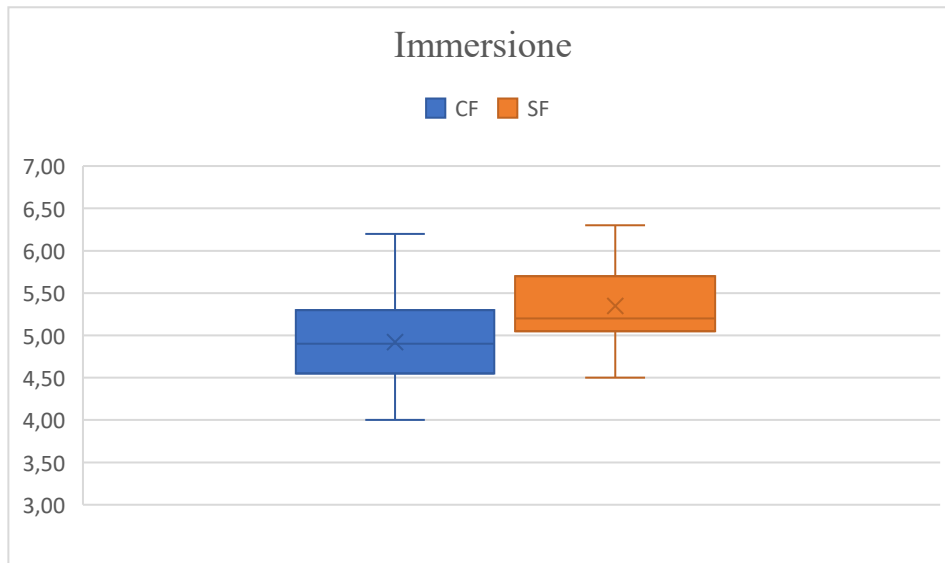


Figura 6.1.1 Boxplot delle medie significative della sezione Immersione complessiva

	Mean	Std Dev	<i>p-value</i>	<i>Effectr</i>
CF	4,92	0,560909		
SF	5,35	0,451242	2,2E-06	0,825514

Ricordando che l'immersione rappresenta il grado di coinvolgimento sensoriale e attentivo dell'utente nell'esperienza VR, ovvero quanto lo spettatore "si sente dentro" il mondo a 360°, si può dire che un'elevata immersione è fondamentale per il cinema immersivo, amplificando il coinvolgimento emotivo e l'attenzione alla trama. In questo esperimento l'immersione è stata misurata tramite un insieme di domande Likert (ad es. "Mi sentivo totalmente immerso nell'esperienza"), somministrate dopo ciascun video. Ci si attendeva che l'aggiunta di un feedback termico, se progettato in modo da non distrarre, mantenesse un livello di immersione pari o superiore al caso standard.

Risultati: il punteggio medio di immersione riferito dagli utenti è risultato leggermente inferiore con il feedback termico attivo rispetto alla versione senza. In particolare, la media aggregata su scala 1–7 è stata di circa 4,92 CF contro 5,35 SF. Questa differenza (~0,4 punti) è statisticamente significativa, con un *p-value* inferiore allo 0,0001, indicando che l'introduzione dei *cue* termici ha leggermente ridotto il senso di immersione percepito. Il dato suggerisce che l'aggiunta di stimoli di calore – pur essendo graduale – potrebbe aver introdotto una minima distrazione o aver richiamato l'attenzione dell'utente fuori dalla completa immedesimazione nel video. Osservando le singole domande, quasi tutte, se si confrontano i punteggi medi tra versione CF e SF le componenti dell'immersione mostrano questo trend. Per esempio, elementi come il senso di "coinvolgimento nella scena" o di "profondità

dell'esperienza" hanno ottenuto in media punteggi leggermente più bassi con il dispositivo indossato. Alcuni partecipanti, nei commenti, hanno infatti riferito di prestare attenzione ai segnali di calore, il che potrebbe averli momentaneamente distolti dalla scena principale riducendo la percezione di trovarsi completamente "dentro" l'ambiente virtuale. In sintesi, è stato osservato che l'immersione rimane sopra il livello "neutro" in entrambe le condizioni, ma il feedback termico comporta un lieve decremento di tale indice. Questo risultato sottolinea l'importanza di dover progettare stimoli termici il più possibile trasparenti e integrati, per evitare di "rompere" l'illusione immersiva.

6.2 Agency

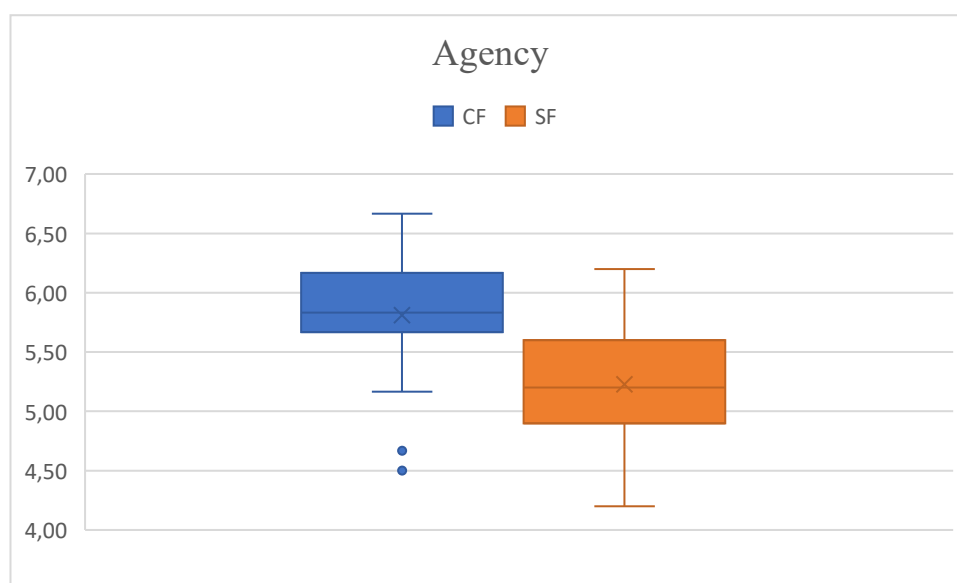


Figura 6.2.1 Boxplot delle medie significative della sezione Agency complessiva

	Mean	Std Dev	p-value	Effect r
CF	5,81	0,530424		
SF	5,23	0,53772	8,68E-06	0,7978

Nel contesto di video a 360°, un'elevata agency significa che lo spettatore sente di poter esplorare liberamente la scena, senza costrizioni o forzature imposte dal sistema. Poiché uno degli obiettivi chiave del prototipo termico era preservare l'agency pur guidando l'attenzione, è cruciale verificare che i segnali termici non abbiano indotto negli utenti la sensazione di essere "pilotati" o limitati nelle scelte visive. L'agency è stata valutata con una serie di affermazioni (es. "Potevo decidere liberamente dove guardare", "Non mi sentivo guidato da fattori esterni", "Avevo il controllo del mio punto di vista"), sempre su scala Likert 1-7 post-esperienza.

Risultati: complessivamente, il senso di agency non risulta compromesso in modo sostanziale dalla presenza del feedback termico. Anzi, i partecipanti hanno attribuito all'esperienza CF un punteggio medio percepito superiore rispetto alla versione SF (valori medi aggregati ~5,81 vs 5,23 su 7). Questa variazione di 0,58 è significativa con, anch'essa, un *p-value* inferiore allo 0,0001. Alcuni utenti hanno infatti indicato che in presenza del calore direzionale gli utenti si sono sentiti più liberi di esplorare (percezione strettamente legata ai risultati relativi alla sezione FOMO che sarà riportata successivamente), commentando che *“i suggerimenti di calore non impediscono di guardarsi intorno, anzi aiutano a capire dove potrebbe valere la pena guardare”* oppure *“sapendo dove avrei dovuto guardare, mi sentivo libero di poter esplorare altrove”*. Questi riscontri qualitativi corroborano l'idea che il prototipo, pur guidando l'attenzione, non limita il senso di controllo. In conclusione, l'agency percepita rimane elevata in entrambi i casi (punteggi >5 su 7). Ciò suggerisce che il feedback termico raggiunge un delicato equilibrio: orienta l'utente senza farlo sentire eterodiretto in modo eccessivo o intrusivo.

6.3 FOMO

In questo studio la FOMO è stata considerata sotto due prospettive, come anticipato: (1) tratto generale di predisposizione personale alla FOMO (misurato con un questionario standard indipendente dall'esperienza specifica) e (2) FOMO durante la visione dei video sperimentali, valutata sia soggettivamente sia oggettivamente.

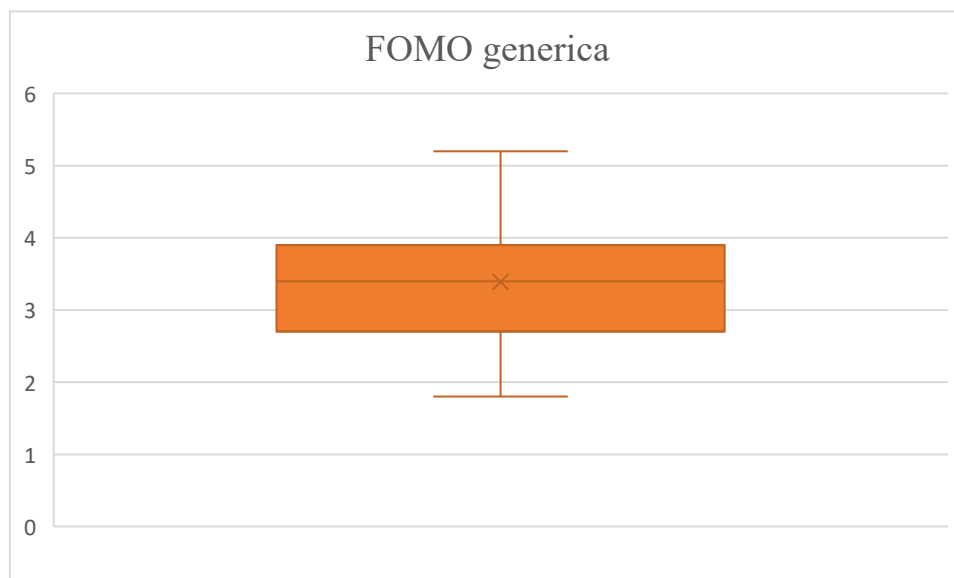


Figura 6.3.1 Boxplot dei punteggi medi della sezione FOMO generica

	Mean	Std Dev	<i>p-value</i>	<i>Effect r</i>
FOMO generica	3,39	0,858432		

FOMO generica: dai questionari pre-video emerge che il campione di partecipanti presenta un livello medio di FOMO moderato. In una scala da 1 a 7 il punteggio medio è circa 3,4, con variazioni individuali (minimo ~1,8, massimo ~4,8). Ciò indica che, in generale, gli utenti tendevano solo leggermente all'ansia di "perdere eventi" in contesti mediatici, pur con differenze personali. Come atteso, questa misura non dipende dalla condizione sperimentale, ma è stata utile per interpretare i comportamenti.

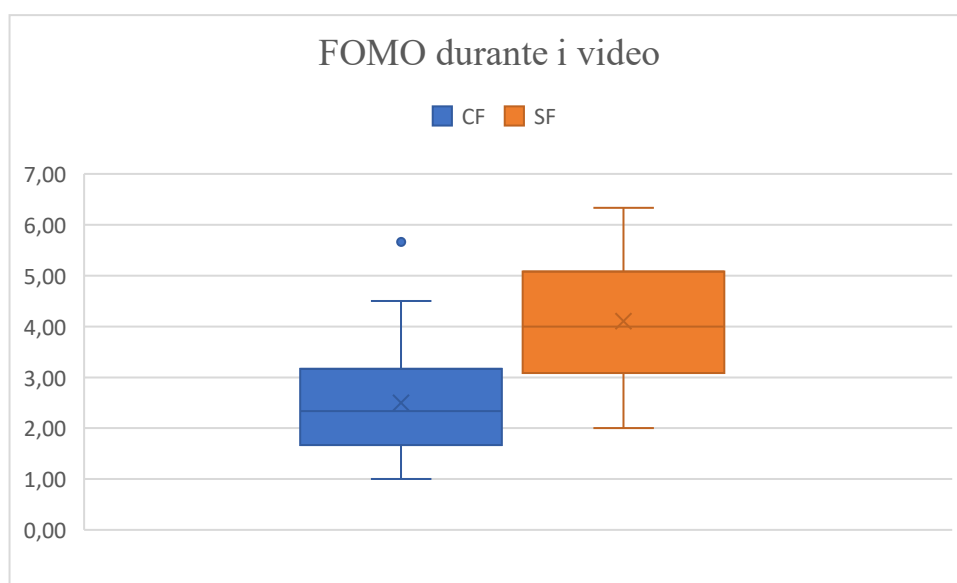


Figura 6.3.2 Boxplot dei punteggi medi della sezione FOMO durante i video, CF e SF

	Mean	Std Dev	<i>p-value</i>	<i>Effect r</i>
CF	2,50	1,142609		
SF	4,10	1,33591	2,76338E-05	0,770140168

FOMO durante i video: l'efficacia del feedback termico nel mitigare la FOMO è stata valutata sia con *score* soggettivi (domande post-visione) sia con indicatori oggettivi di performance. I questionari post-esperienza includevano affermazioni come "La paura di perdermi parti della scena mi ha distratto" e "Ero preoccupato che altrove stessero accadendo eventi più importanti". I risultati mostrano differenze marcate. SF, infatti, gli utenti hanno riportato livelli di FOMO significativamente più alti (quasi doppi in media). Su scala 1-7, il punteggio medio di accordo con frasi di timore di *missing out* è circa 4,1 nella condizione SF, contro 2,10 CF (quindi minore FOMO percepita col sistema attivo). La differenza (~1,60) è statisticamente significativa (*p-value* inferiore allo 0,0001) e indica una riduzione evidente dell'ansia di perdersi qualcosa grazie ai segnali termici. In altre parole,

con il feedback attivo gli utenti si sentivano più tranquilli di non mancare eventi narrativamente importanti, mentre senza aiuti tendevano ad essere più in apprensione. Da notare, inoltre, che alcune domande erano a formulazione invertita e anche in questi casi la condizione CF ha raccolto giudizi più positivi (maggiore senso di completezza nella fruizione). Questi dati soggettivi sono corroborati dai commenti ricevuti da parte degli utenti; infatti, numerosi partecipanti hanno dichiarato spontaneamente che *“il calore mi faceva sentire più sicuro di non perdermi parti di film”* o che *“senza il feedback termico temevo di essermi perso qualcosa e allora mi guardavo più spesso attorno”*. Anche i punteggi delle singole domande, in media, risultano a favore della versione CF nella totalità dei casi. Tali feedback qualitativi confermano che il prototipo termico ha centrato l’obiettivo di attenuare la FOMO percepita.

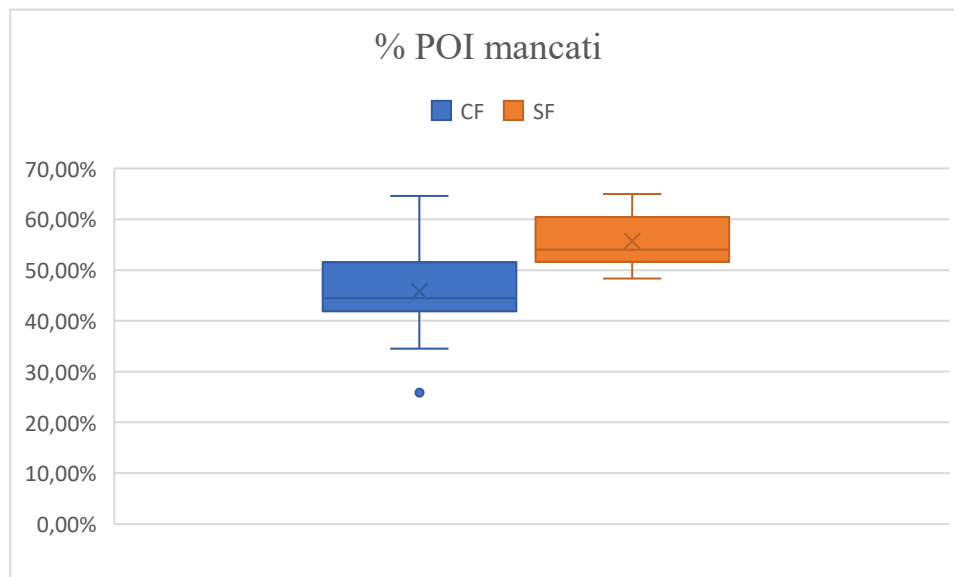


Figura 6.3.3 Boxplot dei punteggi medi della percentuale di POI mancati, CF e SF

	Mean	Std Dev	<i>p-value</i>	<i>Effect r</i>
CF	45,82%	0,079935		
SF	55,69%	0,048928	1,04108E-05	0,79372

Dal punto di vista oggettivo, la FOMO è stata quantificata misurando la percentuale di eventi chiave non visti da ciascun utente in ogni condizione. Tramite l’analisi dei dati di head-tracking è stato possibile stabilire per ogni utente quali POI sono stati effettivamente guardati e quali sono stati mancati. I risultati oggettivi rispecchiano pienamente quelli soggettivi: nella versione CF gli utenti hanno perso meno eventi chiave. In media, nella condizione CF ciascun partecipante ha mancato in media circa il 45,8% dei POI (“POI_miss_pct”), mentre SF il valore sale al 55,7%. Questa riduzione di ~10 punti percentuali è significativa (*p-value* inferiore allo 0,0001) e corrisponde a u

miglioramento dell'attenzione efficace (vedi figura 6.3.3 e 6.3.4). Grazie ai segnali di calore direzionali, gli utenti hanno individuato più tempestivamente eventi narrativi rilevanti, diminuendo la quota di elementi persi.



Figura 6.3.4 Percentuale POI mancati in confronto al tempo di allineamento medio al POI per utente, condizioni CF e SF

Questo è uno dei risultati più rilevanti dell'esperimento, che dimostra quantitativamente la capacità del feedback termico di mitigare la FOMO, aiutando lo spettatore a non mancare contenuti importanti. Vale anche la pena sottolineare che ciò è avvenuto senza dover rinunciare alla libertà di esplorazione, poiché i partecipanti, pur continuando a decidere autonomamente dove guardare, sono stati naturalmente richiamati dal calore verso le zone salienti, col risultato di perdersi meno momenti chiave. Non solo, anche i dati acquisiti relativi ai "burst_count" (conteggio dei movimenti rapidi) e "burst_time" (tempo in secondi accumulato durante questi movimenti bruschi), sono concordi con quanto detto finora. Nel primo caso, infatti, si parla di una media di 16 movimenti bruschi contro 23 senza feedback (*p-value* uguale a 0,0319); mentre nel secondo caso una media di 3,30 secondi contro 5,88 per la versione senza feedback (*p-value* uguale a 0,0022).

In sintesi, tutte le misure – questionari e tracking – concordano nel mostrare una riduzione significativa della FOMO quando è attivo il feedback termico direzionale, evidenziando il principale beneficio atteso del prototipo.

6.4 Comfort & Coerenza

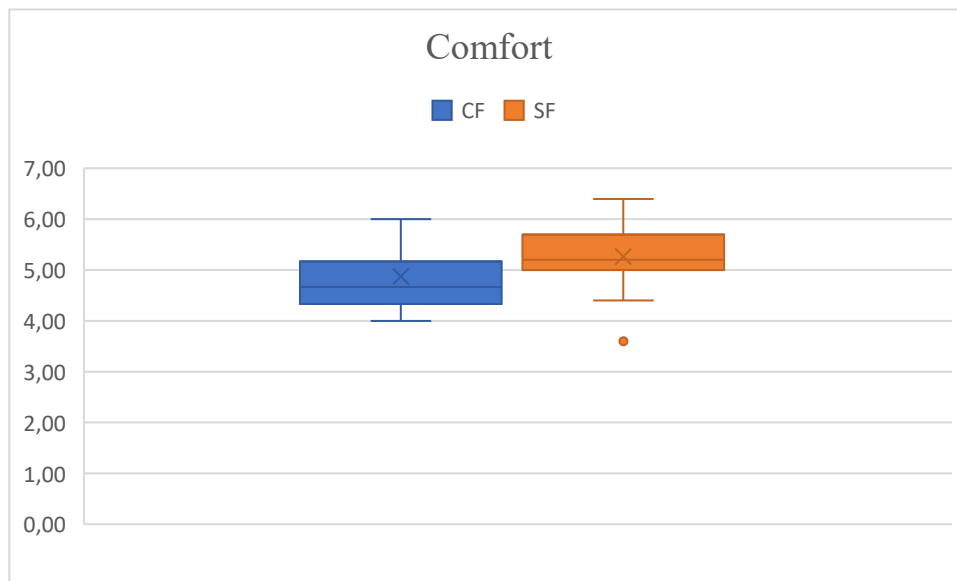


Figura 6.4.1 Boxplot dei punteggi medi complessivi della sezione Comfort, CF e SF

	Mean	Std Dev	<i>p-value</i>	<i>Effect r</i>
CF	4,87	0,552531		
SF	5,27	0,6733	0,047183	0,42752

Il comfort durante l’esperienza VR è stato valutato considerando sia il comfort fisico legato all’indossare il dispositivo termico, sia il comfort generale nella fruizione (assenza di distrazioni, sensazione di rilassamento). Questo aspetto è cruciale, perché un sistema efficace ma scomodo o intrusivo difficilmente sarebbe accettato dagli utenti. Il comfort è stato sondato con domande su scala 1–7, comprendenti sia affermazioni positive (es. “*Il dispositivo era comodo da indossare*”) sia negative (es. “*Ha interferito con la mia concentrazione sul video.*”). Come anticipato, quindi, nella versione esperienziale senza dispositivo termico, è da intendersi una valutazione riferita al solo visore utilizzato.

Risultati: il sistema termico è risultato abbastanza confortevole, anche se si registra qualche lieve criticità di comfort nella condizione CF rispetto a SF: punteggi che in media vanno da 1 a 7, nella versione CF pari a 4,87 contro 5,27 della versione SF (*p-value* uguale a 0,0047). In generale, però, i partecipanti non hanno riportato grossi disagi; nessuno ha interrotto anticipatamente l’esperienza né ha segnalato dolori o intolleranze significative dovute al dispositivo. Analizzando i punteggi delle singole domande, le metriche di comfort fisico non mostrano differenze rilevanti tra video 1 e 2, se non per la domanda “*L’ho percepito ingombrante o pesante*”, in cui la media del punteggio (sempre su scala 1-7) per la configurazione con feedback risulta 1,86 contro 3,33 del solo visore: trattandosi di una domanda con punteggio invertito (il punteggio è migliore se basso), la prima versione ottiene

un punteggio molto alto rispetto alla seconda, suggerendo che nonostante il livello di comfort migliore non sia stato raggiunto durante questi test, ci sia comunque un potenziale di miglioramento e ampio margine di manovra per eventuali configurazioni hardware in future applicazioni. In altri termini, il calore non è stato percepito sempre come fonte di discomfort; diversi soggetti, infatti, lo hanno definito *“leggero e piacevole”* nei commenti. Questo è un dato incoraggiante, poiché, se uno dei timori principale era che gli stimoli termici potessero creare discomfort fisico o eccesso di caldo, alcuni dei risultati indicano che, entro i parametri usati (variazioni di ~4–5°C percepiti), il feedback sia confortevole e non provochi eccessivo disagio termico. Questo aspetto è anche conforme con i punteggi positivi rilevati nella categoria di domande *“Coerenza”*, in cui l’obiettivo era stabilire l’effettiva efficacia del dispositivo termico (senza domande di confronto tra versione con e senza feedback, poiché orientate al solo utilizzo di quest’ultimo): punteggi globali a questa sezione, con domande del tipo *“Le variazioni di temperatura sono state appropriate alle scene.”* hanno ottenuto una media, in scale da 1 a 7, di 5,40; una sola domanda, in questa categoria, è stata fatta per mettere a confronto i due sistemi (con dispositivo e senza, solo visore), *“Il dispositivo mi è sembrato un’estensione naturale del corpo”*, e in questo caso la versione CF termico ha ottenuto punteggi significativamente maggiori (4,00 contro 1,81 SF, con *p-value* inferiore a 0,0001).

D’altro canto, alcuni item relativi al Comfort rivelano differenze significative, in cui il feedback termico ha ottenuto un punteggio leggermente inferiore. Ciò può essere legato dunque non tanto al tipo di feedback in sé (che sarebbe in opposizione a quanto rilevato finora), quanto alla scomodità e ingombro che l’hardware attuale crea, trattandosi ancora di un prototipo sperimentale.

In generale, i punteggi di queste sezioni denotano una tendenza, per cui qualche soggetto ha avvertito un piccolo livello di distrazione dovuto al calore. Ciò è confermato da commenti come: *“All’inizio notavo il caldo e pensavo a quello”* oppure *“ero curioso di sentire quando arrivava il prossimo segnale”*. Inoltre, dalla metrica FOMO già discussa, sappiamo che il feedback ha migliorato l’attenzione agli eventi, per cui l’eventuale distrazione introdotta in momenti iniziali dell’esperienza è controbilanciata dal vantaggio di non distogliere lo sguardo nei momenti sbagliati.

In sintesi, il prototipo risulta sufficientemente comodo e non intrusivo. I partecipanti hanno potuto fruire dei filmati indossando il dispositivo senza problemi rilevanti. Si è osservato solo un lieve calo di comfort generale con il feedback indossato (minor *“agio”* e maggiore attenzione iniziale al nuovo stimolo), ma nessun disagio fisico significativo. Questi risultati supportano l’idea che un feedback termico ben calibrato e progettato a livello hardware possa essere integrato senza compromettere in modo sostanziale la comodità dell’esperienza utente, anche se ulteriori ottimizzazioni (es. fasce più

ergonomiche, stimoli ancora più gradualmente e distribuiti uniformemente sulla pelle) potrebbero eliminare del tutto le residue fonti di distrazione.

6.5 Presenza

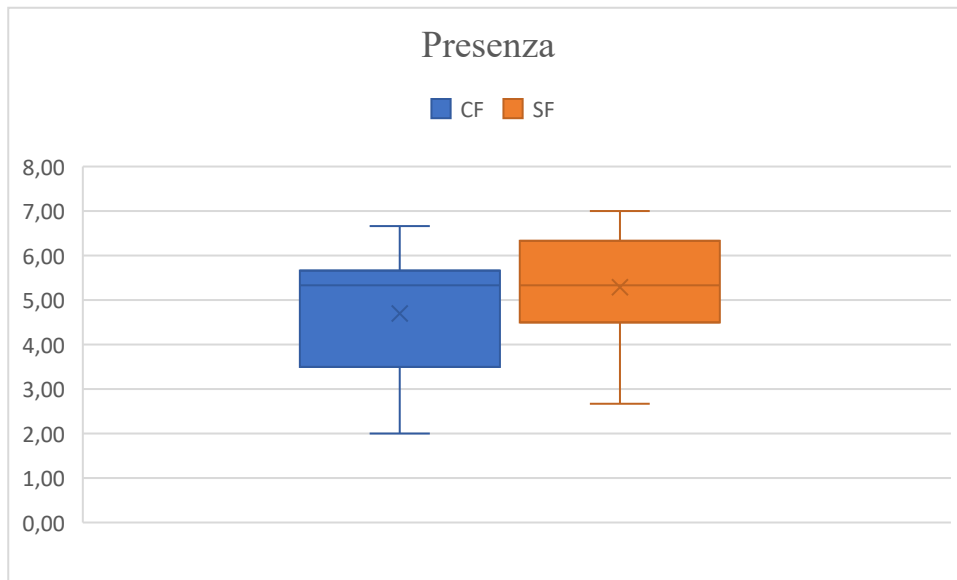


Figura 6.5.1 Boxplot dei punteggi medi complessivi della sezione Presenza, CF e SF

	Mean	Std Dev	p-value	Effect r
CF	4,70	1,421676		
SF	5,29	1,252933	5,26E-05	0,75291

In questo studio si è voluto verificare se l’aggiunta dei *cue* termici potesse aumentare la presenza (grazie a una stimolazione multisensoriale più ricca) oppure, al contrario, diminuirla (se il dispositivo fosse percepito come elemento esterno non appartenente alla scena). La presenza è stata misurata tramite una scala validata (adattata dal IPQ/ITC-SOPI), con le seguenti affermazioni: “*Mi sono sentito in compagnia di altre persone nel video*”, “*I personaggi mi sembravano solo immagini prive di presenza*”.

Risultati: sorprendentemente, i punteggi di presenza sono leggermente diminuiti con il feedback termico, non aumentati. In media, il questionario di presenza ha ottenuto punteggi aggregati di circa 4,70 (CF) contro 5,29 (SF) su scala 1–7. La differenza (~0,6) è risultata statisticamente significativa (*p-value* inferiore allo 0,0001), segnalando che la presenza percepita è stata inferiore nella condizione con i segnali termici. In particolare, le prime due affermazioni hanno mostrato questo calo, oltre a

essere risultati statisticamente significativi. L'affermazione *“Mi sono sentito in compagnia di altre persone nel video.”* ha raccolto consenso leggermente minore CF, media ~4,24, rispetto alla versione SF, media ~4,95, con un *p-value* uguale a 0,0012. Analogamente, la sensazione che *“Ho percepito i personaggi come socialmente presenti”* è risultata attenuata CF (medie: 4,33 CF, 4,90 SF, *p-value* uguale a 0,0001). Nel complesso, quindi, è stato osservato un effetto di riduzione della presenza associato al feedback termico.

Questa evidenza può essere interpretata in diversi modi. Da un lato, l'abbassamento di presenza correla con il leggero calo di immersione discusso prima: se l'utente è anche solo in parte distratto o consapevole dello stimolo aggiuntivo, potrebbe mantenere maggiore coscienza dell'ambiente reale attorno a lui (sentendo ad esempio la fascia sul braccio) e quindi sperimentare meno *“telepresenza”* nel mondo virtuale. Inoltre, alcuni partecipanti hanno riferito che il calore, pur essendo coerente con la scena, ricordava loro la presenza di un apparato esterno: un utente ha commentato *“il calore era una guida utile, ma mi riportava alla realtà ogni volta che il pad si faceva sentire”*. Questo tipo di consapevolezza metacognitiva può avere diminuito la sensazione di trovarsi lì, nell'ambiente virtuale, sul momento. D'altro canto, è possibile che l'ambiente virtuale di test non fosse molto coinvolgente di per sé e che il margine di miglioramento offerto dal feedback termico sulla presenza fosse limitato; al contrario, vi era più margine per introdurre piccoli elementi di rottura. È importante sottolineare comunque che i valori assoluti di presenza sono rimasti analoghi tra esperienza con e senza dispositivo. Il feedback termico, quindi, non distrugge la presenza, ma la sua introduzione, allo stato dell'arte, può aver inciso sull'illusione che si ha quando ci si dimentica completamente del mondo reale. In prospettiva, questo suggerisce di lavorare ulteriormente sull'integrazione trasparente dei feedback multisensoriali, migliorando, per esempio, la comodità del dispositivo o aumentando il realismo termico (temperature e posizioni ancora più credibili e meglio contestualizzate con contenuti diegetici), il feedback potrebbe diventare parte integrante dell'ambiente percepito e magari contribuire positivamente alla presenza invece che ridurla.

Per il prototipo attuale, la discussione critica è che l'obiettivo di non intaccare significativamente presenza e immersione è stato quasi raggiunto (riduzioni moderate), ma non si è ottenuto un aumento di presenza grazie al canale termico.

6.6 Accettabilità

Per accettabilità si intende il grado in cui gli utenti giudicano complessivamente positivo e utilizzabile il sistema di feedback termico, ovvero la loro disponibilità ad adottarlo in future esperienze simili. In questa categoria rientrano considerazioni generali sulla soddisfazione, la preferenza e la percezione costi/benefici del metodo. Per esempio, è stato chiesto se *“l’aggiunta del feedback termico ha migliorato l’esperienza”*, se *“Useresti volentieri questo dispositivo in altre esperienze VR.”*, oppure se *“Indossarlo potrebbe far pensare agli altri qualcosa di negativo”*. Tali domande mirano a capire se il prototipo, al di là delle misure specifiche, sia accettato dagli utenti oppure se susciti resistenze.

Risultati: in media, gli utenti hanno valutato positivamente l’esperienza con feedback, ma purtroppo i dati specifici riportati non sono risultati statisticamente significativi, se non per una singola domanda: *“Useresti volentieri questo dispositivo in altre esperienze VR”*. Il punteggio medio su questa voce è 6 su 7 CF, contro 6,8 SF. La differenza ($\sim 0,8$) è risultata significativa con *p-value* uguale a 0,0068. È da sottolineare che la domanda specifica ha quasi sempre ottenuto un punteggio massimo per quando gli utenti rispondevano in merito alla versione SF, quindi per il sistema solo con visore: molti infatti davano per scontato per usufruire di un contenuto immersivo a 360° bisogna disporre necessariamente di un visore, dando così il punteggio massimo su 7. Nonostante questo aspetto, è apprezzabile notare l’alto punteggio medio assegnato al dispositivo termico. Questo è un dato fondamentale: non solo il sistema riduce FOMO, ma è anche apprezzato soggettivamente. Diversi partecipanti hanno commentato che *“con il caldo era più interessante”* o *“mi sono divertito di più col feedback, lo vorrei anche in altri video”*. Tali affermazioni qualitativi confermano un atteggiamento generalmente positivo verso la tecnologia.

Inoltre, è interessante notare che, in particolare alcuni di utenti con punteggi di FOMO generica bassi hanno commentato che *“non ne sentirei il bisogno”*, indicando che probabilmente l’utilità percepita del sistema cresce al crescere del problema. Tuttavia, anche questi soggetti non hanno valutato negativamente il sistema, assegnando punteggi neutri o positivi alla domanda di preferenza.

Un altro aspetto da restituire è che nessun utente ha valutato il sistema come non accettabile: anche il partecipante più critico ha comunque assegnato la sufficienza all’esperienza con feedback e ha riconosciuto il potenziale del sistema. Statisticamente, non si evidenziano differenze significative in altre voci di accettabilità tra condizioni.

In conclusione, l’accettabilità complessiva del feedback termico direzionale è stata buona. Gli utenti non solo hanno tollerato il sistema, ma in larga parte lo hanno preferito rispetto alla visione standard. Questo risultato, unito ai benefici oggettivi misurati, suggerisce che la soluzione proposta ha buone

chance di essere ben accolta da un pubblico più ampio, a patto di comunicarne chiaramente lo scopo e di continuare a migliorare aspetti di comfort. Possiamo dunque considerare validata la fattibilità user-friendly di questo approccio: il pubblico target è disposto ad adottare un'interfaccia termica indossabile se questa effettivamente arricchisce l'esperienza senza rovinarla.

6.7 Percezione del Feedback Termico

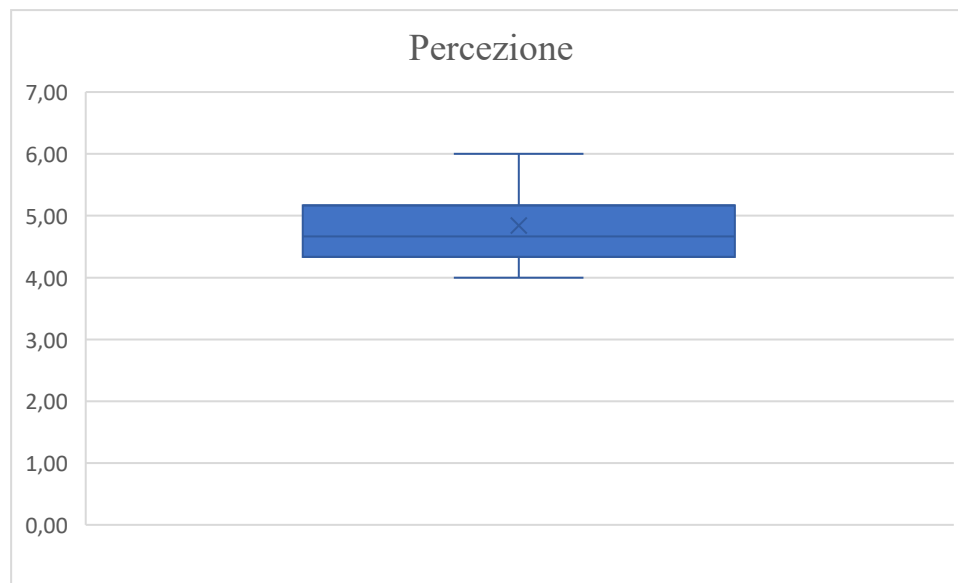


Figura 6.7.1 Boxplot dei punteggi medi complessivi della sezione Presenza, CF e SF

	Mean	Std Dev	<i>p-value</i>	<i>Effect r</i>
Percezione	4,84	0,501321		

In questa sezione si esaminano le proprietà percettive del feedback termico, in particolare quanto e come gli utenti hanno percepito i segnali di calore erogati. Era importante verificare che il feedback fosse sufficientemente percepibile, ma al tempo stesso non sovra stimolante. Per valutare ciò, dopo il video con feedback sono state poste domande quali *“Complessivamente ho percepito molto caldo”*, *“In qualche momento ho percepito calore eccessivo sulla pelle”*, *“La direzione da cui proveniva il calore mi è parsa coerente con la scena”*. Non vi è un confronto diretto con la condizione senza feedback (dove, ovviamente, non c'erano stimoli da percepire), ma possiamo confrontare le risposte con le aspettative progettuali.

Risultati: tutti i partecipanti hanno percepito senza difficoltà i segnali termici durante il video 1. Alla domanda diretta in fase di setup *“Noti quando arrivava un segnale di calore?”*, il 100% degli utenti

ha risposto affermativamente. Relativamente alle domande del questionario posto, la chiarezza percettiva dei cue termici ha un punteggio medio di $\sim 4,84$ su 7. Ciò significa che il livello di stimolazione scelto era appropriato: il calore è stato avvertito, pur essendo descritto come “*leggero*”. Nessuno ha riportato di aver “*faticato a sentire il segnale*”; al contempo, non risultano neppure giudizi di calore eccessivo. L’intensità è quindi stata ritenuta bilanciata. La deviazione standard bassa (circa $\pm 0,5$) suggerisce che quasi tutti hanno concordato sull’adeguatezza della potenza termica. Questo riscontro è importante perché conferma di aver raggiunto un compromesso sensoriale, i pad hanno fornito un segnale abbastanza intenso da non passare inosservato, ma non così forte da risultare fastidioso o distrarre eccessivamente.

Riguardo al tempismo e alla distinguibilità, la maggioranza dei soggetti ha riferito di saper distinguere i diversi impulsi termici e di notare da quale direzione provenissero (braccio sinistro o destro). La latenza percepita tra evento e segnale è stata giudicata “*abbastanza breve*” dalla maggioranza. Questo indica che la sincronizzazione implementata è risultata efficace nel far percepire il calore al momento giusto.

Combinando questi risultati con quelli sulla FOMO e coerenza, emerge un quadro chiaro: il feedback termico è stato percepito in modo netto e significativo, svolgendo il suo ruolo di segnale direzionale, ma senza essere intrusivo. Gli utenti lo notavano quando necessario (quindi poteva efficacemente attirare l’attenzione), e allo stesso tempo non ne rimanevano turbati. Dal punto di vista progettuale, la *perceivability* è un parametro centrato correttamente: se fosse stata troppo bassa, il sistema non avrebbe avuto effetto (rischiando di non mitigare affatto la FOMO); se fosse stata troppo alta, avrebbe potuto causare discomfort o distrazione. I dati suggeriscono che il livello impiegato è stato quasi ottimale per questa esperienza. Piccoli aggiustamenti futuri potranno riguardare la risoluzione spaziale (ad es. utilizzare più di due pad su quattro per localizzare meglio la direzione di provenienza del segnale termico) e la profilazione individuale (alcuni utenti molto sensibili al caldo potrebbero preferire intensità leggermente minori, altri magari leggermente maggiori).

6.8 Cybersickness

La cybersickness (o *chinetosi da VR*) è il malessere fisico che può colpire alcuni utenti durante esperienze in realtà virtuale, con sintomi come nausea, vertigini, disorientamento e affaticamento visivo. È un fattore critico da monitorare, poiché qualsiasi aggiunta al sistema (come un feedback indossabile in questo caso) non deve peggiorare la situazione sotto questo profilo. In questo studio ci si è assicurati che i video 360° impiegati fossero relativamente statici (movimenti di camera lenti o

assenti) per minimizzare la cybersickness di base. Tuttavia, sono stati comunque misurati eventuali sintomi tramite un questionario sintetico post-esperienza. Questo includeva parametri come, per esempio “*Nausea*”, “*Mal di testa*”, “*Affaticamento visivo / bruciore agli occhi*”, “*Vertigini*”, ecc. – valutati tra 0 = per niente e 3 = severo. Sono stati confrontati i punteggi di cybersickness tra le due condizioni per vedere se l’uso del feedback termico avesse alcun impatto (positivo o negativo).

Risultati: i sintomi di cybersickness sono stati molto contenuti in entrambe le condizioni e non presentano differenze significative tra con e senza feedback. Il 90% dei partecipanti ha non ha riportato alcun sintomo (punteggio 0 su tutta la linea) dopo il video 1 CF, l’81% dopo il video 2 SF. Queste oscillazioni minime appaiono casuali e comunque entro soglie molto basse. Si può dunque affermare con buona certezza che il sistema termico non ha introdotto effetti avversi di chinetosi.

Questa piccola differenza a favore del sistema CF è concorde con alcuni studi che ipotizzano come l’aggiunta di stimoli tattili/termici possa persino ridurre la cybersickness, fornendo al cervello segnali sensoriali aggiuntivi che ne facilitano l’orientamento. In questo caso, non emergono evidenze chiare di un tale beneficio – probabilmente perché i sintomi erano già praticamente nulli in partenza, dato il tipo di contenuto scelto. Questo risultato implica che l’introduzione di stimoli di calore non crea conflitti sensoriali né stress addizionale per l’utente dal punto di vista fisico o fisiologico. In conclusione, sul fronte cybersickness il prototipo è risultato neutro, ovvero non altera la già bassa incidenza di malesseri in esperienze ben progettate. Si possono quindi escludere controindicazioni del sistema rispetto alla comodità fisica e alla sicurezza dell’utente sotto questo profilo.

6.9 Immagini Specifiche e Dettagli Notati

Durante i test, un’ulteriore misura di efficacia (legata alla FOMO) è stata la capacità degli utenti di notare elementi specifici inseriti nel video. In particolare, nei contenuti a 360° utilizzati sono stati individuati alcune azioni svolte dai personaggi all’intero dei video la cui individuazione da parte dello spettatore è stata poi verificata tramite domande mirate. Lo scopo era di verificare se il feedback termico aiutasse gli utenti ad accorgersi di questi dettagli, aumentando la copertura visiva della scena. In particolare, per il video “*Elefanti*”, al minuto 02:06 si possono osservare degli altri elefanti in procinto di abbeverarsi, in un’azione secondaria alla narrazione principale, ma abbastanza ravvicinata alla figura centrale di quell’istante (questo implica che se il soggetto stava seguendo il feedback correttamente, questa azione secondaria sarebbe stata notata, per quanto presente in una sola porzione periferica dell’inquadratura); nel video “*Leoni*”, invece, al minuto 03:20 sono presenti degli elefanti pronti alla carica che si avvicinano ai leoni presenti in scena. Quest’ultima azione è stata presa in

considerazione perché si trova, all'interno del panorama sferico, spazialmente opposta all'azione principale, ma è anche richiamata in maniera diegetica a livello sonora dal barrito di uno degli elefanti.

Risultati: globalmente, il feedback termico ha portato più utenti a notare i dettagli specifici, sebbene la differenza non sia risultata statisticamente significativa. Per quanto riguarda il primo elemento, il 90% dei partecipanti lo hanno notato nella versione CF, contro l'85% dei partecipanti SF (10 utenti per il primo video con feedback e 11 senza). Uno scenario analogo si è verificato per il secondo elemento: più persone l'hanno individuata con *cue* direzionale indossato 85%, rispetto a un 80% senza. Questa distribuzione di risposte suggerisce che vi è una tendenza generale a migliorare la scoperta di dettagli con l'aiuto del calore, ma non in maniera uniforme su tutti gli utenti, e non statisticamente significativi per una considerazione rilevante.



Figura 6.9.1 Elemento specifico del video “Leoni”



Figura 6.9.2 Elemento specifico del video “Elefanti”

Tuttavia, il segnale è promettente, poiché in entrambi i casi esaminati, il conteggio di “*notatori*” è maggiore in presenza di feedback. D'altra parte, il fatto che alcuni abbiano notato i dettagli senza feedback e li abbiano invece mancati con il feedback indica che il sistema non garantisce automaticamente l'osservazione di ogni elemento, probabilmente molto può dipendere dall'interesse individuale e dalla dinamica dell'attenzione.

Questo risultato qualitativo, combinato con la riduzione di FOMO e di percentuale di POI persi, rafforza l'idea che il sistema possa guidare efficacemente l'attenzione senza far perdere altri dettagli. In futuro, introdurre feedback direzionali anche per elementi minori potrebbe ulteriormente aiutare, ma bisogna bilanciare attentamente per non sovraccaricare l'utente di stimoli per ogni piccolo particolare. In questo caso si è volutamente limitato il feedback solo agli eventi narrativamente importanti e ciò, si può dire, ha funzionato per i POI principali, mentre per dettagli minori la differenza è stata marginale.

6.10 Usabilità (SUS)

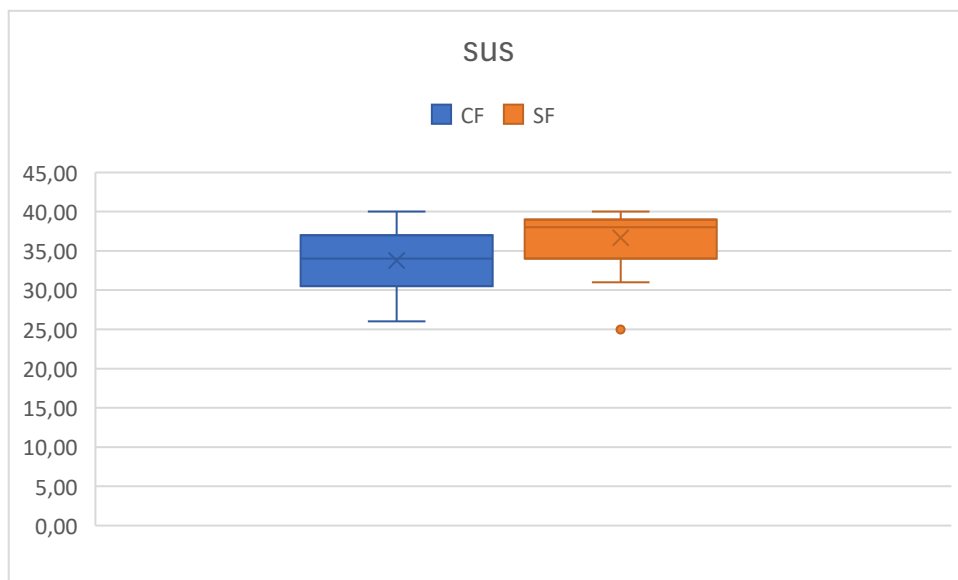


Figura 6.10.1 Boxplot delle medie significative della sezione SUS complessiva

	Mean	Std Dev	<i>p-value</i>	<i>Effect r</i>
CF	33,76	3,897496		
SF	36,67	3,799123	0,010151	0,54

Post-video, per entrambe le visioni, è stato somministrato agli utenti un questionario relativo alla System Usability Scale (SUS), adattato per valutare l'usabilità percepita del sistema complessivo di fruizione. Anche se il SUS è originariamente pensato per applicazioni interattive, in questo contesto è stato utilizzato per ottenere un indice globale di facilità d'uso e apprendimento dell'esperienza con e senza feedback. Si voleva cioè capire se l'introduzione del feedback termico rendesse l'esperienza più complessa o problematica da usare. Le 10 affermazioni SUS (es. *“Ho trovato il sistema inutilmente complesso”*, *“Penso che potrei usare questo sistema senza il supporto di una persona*

esperta”, “*Mi sentivo molto sicuro nell’usarlo*”, ecc.) sono state riferite sia alla semplice visione 360° standard sia al sistema con feedback, utilizzando un punteggio per domanda da 1 a 5.

Risultati: entrambi gli scenari hanno ottenuto punteggi di usabilità molto alti, segno che gli utenti hanno trovato l’esperienza semplice e intuitiva in ogni caso. Il punteggio SUS totale medio, normalizzato da 0 a 100, è di 84,40/100 con feedback termico e di 91,67/100 senza (un punteggio sopra ~70 è considerato “buona usabilità”). I risultati di questi test e confronti tra sistemi hanno portato a una differenza (~7 punti) statisticamente significativa con *p-exact* per il *Wilcoxon Signed-Rank Test for Paired Samples two tail* uguale a 0,0067, con usabilità leggermente minore col feedback. Possiamo quindi concludere che la presenza del feedback termico non abbia influito in modo sostanziale sull’usabilità percepita del sistema. In altri termini, gli utenti non hanno trovato la condizione con feedback più complicata o confusionaria da usare rispetto alla visione tradizionale.

Analizzando le singole voci SUS, troviamo conferma di quanto sopra: ad esempio, l’affermazione “*Le varie funzioni dell’esperienza erano ben integrate*” ha ottenuto punteggi elevati sia con feedback sia senza (mediana 5/5 in entrambi i casi). Nessuno ha percepito incoerenze o malfunzionamenti nell’integrazione del feedback termico con il visore e l’esperienza software. Inoltre, anche l’affermazione “*mi sentivo sicuro nell’utilizzare il sistema*” ha ottenuto mediane 5/5 in entrambe le condizioni – il feedback termico non ha generato incertezze o timori nell’uso. L’unica affermazione che ha mostrato una differenza apprezzabile è stata “*Immagino che la maggior parte delle persone imparerebbe a utilizzare questa esperienza molto rapidamente*”, in cui la condizione senza feedback ha raccolto il massimo da quasi tutti i soggetti (media di 4,14), mentre la versione con feedback ha segnato un punteggio medio molto basso (1,57), abbassando la media complessiva. Ciò è comprensibile, dato che indossando il feedback bisogna considerare un elemento in più durante l’esperienza, insieme al fatto che il comfort e la vestibilità del prototipo non diano un’immediata sensazione di chiarezza su come debba essere usato; tuttavia, il fatto che la maggior parte abbia comunque dato il punteggio massimo di semplicità anche con il feedback indica che la curva di apprendimento del sistema termico ha grande margine di miglioramento. Infatti, è stato possibile osservare che dopo la parte temporale dedicata al setup e alle istruzioni per fruire di questo dispositivo, gli utenti hanno capito la relazione tra calore e campo visivo. Bisogna quindi prendere in considerazione una procedura di spiegazione e setup iniziale più chiare o immediate.

In definitiva, il questionario SUS conferma che l’aggiunta del feedback termico non compromette l’usabilità: l’esperienza resta percepita come relativamente facile, coerente e priva di sforzo. Questo è un risultato importante sotto il profilo progettuale, perché uno dei rischi delle soluzioni multimodali è di introdurre complessità aggiuntiva. In questo caso, molti utenti hanno valutato l’interfaccia

termica come trasparente, al punto che molti l'hanno interpretata semplicemente come una caratteristica intrinseca del film (da cui l'alto punteggio di integrazione). In conclusione, il sistema raggiunge un livello di usabilità più che modesto e statisticamente paragonabile a quello di guardare un semplice video 360° senza aggiunte. Questo significa che il feedback termico non introduce barriere d'uso percepibili e può quindi essere adottato senza rendere l'esperienza termica di nicchia o solo per utenti avanzati.

6.11 Heatmap dello sguardo

Un ulteriore riscontro coerente con le analisi di immersione, presenza, agency e FOMO proviene dalle heatmap generate a partire dal tracciamento dell'orientamento del visore. Per ogni contenuto sono stati aggregati i campioni di sguardo su una proiezione equirettangolare della sfera, producendo quattro mappe di densità, quattro in tutto (video 1 con dispositivo e senza, video 2 con dispositivo e senza). La codifica cromatica è stata normalizzata per video, con soglia di rosso impostata oltre il contributo di almeno 5 partecipanti, pari al 50% del campione esposto a quello specifico filmato; sotto tale soglia le aree compaiono in gradazioni via via più fredde. In entrambe le clip e in presenza del feedback termico direzionale, le heatmap mostrano isole rosse compatte che coincidono stabilmente con i POI lungo gran parte della timeline. Questo pattern indica un allineamento collettivo delle traiettorie di sguardo verso gli eventi salienti, con una dispersione ridotta e un minor numero di "splat" periferici. Subito dopo l'attivazione del cue si osserva una migrazione del fuoco visivo che converge sulla regione corretta, con la macchia di densità che cresce fino a superare la soglia del 50% e assume il rosso saturo. Al contrario, nelle condizioni senza dispositivo le mappe risultano più sparse e de saturate, con molteplici chiazze medio-deboli distribuite lungo l'orizzonte e sulle altezze, indice di una esplorazione più erratica e di una maggiore frammentazione dell'attenzione, che raramente raggiungono la soglia rossa, coerentemente con l'aumento di eventi mancati e con i tempi di reazione più lunghi osservati senza guida.

Queste evidenze visive sostengono tre conclusioni. Primo, il sistema indirizza efficacemente l'attenzione collettiva e, quindi, dove il dispositivo suggerisce, le mappe si addensano e diventano rosse, segnalando che almeno metà degli utenti sta effettivamente guardando il POI nel momento opportuno. Secondo, la FOMO oggettiva risulta attenuata, poiché la copertura dei POI è più continua e meno intermittente nelle condizioni con feedback, in linea con la riduzione della percentuale di POI persi. Terzo, l'agency percepita rimane compatibile con un comportamento guidato ma non forzato: le heatmap non mostrano cluster eccessivamente "puntiformi" o rigidamente sovrapposti che

suggerirebbero un inseguimento meccanico, bensì macchie compatte ma fisiologicamente estese, segno di convergenza volontaria con variabilità individuale preservata. In sintesi, la lettura congiunta delle quattro heatmap conferma che il feedback termico produce focalizzazione e coerenza direzionale senza indurre traiettorie artificialmente identiche.

Il risultato è un compromesso favorevole tra guida e libertà: meno dispersione, più copertura dei contenuti rilevanti, e un'organizzazione dello sguardo che migliora la fruizione narrativa senza apparenti penalizzazioni nella naturalezza dell'esplorazione.



Figura 6.11.1 Heatmap sovrapposta al video “Leoni”, CF



Figura 6.11.2 Heatmap sovrapposta al video “Leoni”, CF



Figura 6.11.3 Heatmap sovrapposta al video “Leoni”, SF

6.12 Considerazioni finali sui risultati

Sulla base di tutti i risultati sopra presentati, è possibile trarre alcune considerazioni generali. Innanzitutto, l'ipotesi principale di questo studio è confermata, in quanto l'utilizzo di un feedback termico direzionale in video immersivi a 360° riduce la FOMO rispetto a una visione senza aiuti, e lo fa preservando in larga misura l'esperienza utente in termini di immersione, presenza e agency. I partecipanti hanno perso meno contenuti e si sono sentiti meno preoccupati di mancarli, senza per questo avvertire grosse controindicazioni (anzi, preferendo il metodo). Questo è un risultato incoraggiante che posiziona il feedback termico come una soluzione promettente e dal grande potenziale nel campo del cinema VR. In letteratura, l'equilibrio tra guida dell'attenzione e mantenimento dell'immersione è ben documentata e, infatti, approcci di *guidance* visiva “salienti” o sovrapposti possono introdurre distrazioni o ridurre la sensazione di presenza [27]. Al contrario,

segnali più sottili o integrati nella diegesi mirano a limitare tale compromesso. Yamaguchi et al. [7] mostrano che un design attento della guida (panoramic thumbnail) può alleviare la FOMO senza penalizzare la presenza. Il risultato di questo studio - mitigazione della FOMO con un lieve calo di immersione - si colloca quindi in continuità con questi lavori, suggerendo che anche canali non visivi, se non perfettamente “coerenti” con la scena, possono rendere l’utente più consapevole del medium e quindi incidere leggermente sulla presenza. Tale lettura è coerente con il quadro teorico di Slater sulla plausibility illusion [22], per cui segnali che non appartengono chiaramente al mondo virtuale rischiano di indebolire la plausibilità e, di riflesso, la presenza. D’altro canto, i dati hanno evidenziato anche alcune sfide e limiti. C’è stato di fatto, seppure lieve, un impatto negativo su immersione e presenza, che suggerisce esserci spazio di miglioramento per rendere il feedback più trasparente e trasformare quel calo in un aumento della sensazione di presenza fisica tramite il calore, per esempio considerando di aggiungere elementi diegetici nel video, per suggerire inconsciamente la presenza di calore all’interno della scena immersiva. Inoltre, non tutti gli utenti hanno beneficiato allo stesso modo, poiché alcuni, e particolarmente chi poco soggetto a FOMO, hanno tratto meno vantaggi; questo indica che il sistema potrebbe essere reso adattivo, rilevando, magari, in tempo reale il comportamento di scanning e modulando l’intensità o la frequenza dei *cue* in base al bisogno effettivo dell’utente. La letteratura sul cinematic VR suggerisce che i *cue* diegetici preservano meglio plausibilità e coinvolgimento rispetto a segnali esplicitamente sovrapposti, in linea con raccomandazioni progettuali più ampie sulla minimizzazione di HUD e overlay in VR. In prospettiva, l’inserimento di fonti di calore “motivate” dalla scena (fuochi, luci calde, effetti ambientali) potrebbe ricondurre il segnale termico entro la logica narrativa, attenuando la consapevolezza del dispositivo e il conseguente effetto sull’immersione. Inoltre, l’adozione di schemi adattivi - riducendo frequenza o intensità del *cue* quando il comportamento di sguardo risulta già orientato - è coerente con risultati che evidenziano come guidance troppo insistente possa comprimere agency e senso di controllo, mentre strategie più misurate sostengono la fruizione senza “forzare” l’utente.

Un altro punto emerso è che il feedback attuale copriva solo gli eventi principali, mentre elementi secondari non sempre venivano colti, e qualcuno con il feedback attivo tendeva a concentrarsi sui soli segnali perdendo quell’“esplorazione creativa” che a volte porta a scoprire dettagli per proprio conto. Bilanciare guida e scoperta libera resta dunque un tema aperto: il sistema potrebbe in futuro combinare segnali di diversa intensità oppure lasciare zone di silenzio sensoriale apposta per invogliare l’utente a esplorare di propria sponte. Trovare questo equilibrio è fondamentale per evitare di trasformare la regia termica in un vincolo che, seppur efficiente, riduca il piacere dell’esplorazione personale. Anche su questo aspetto emergono consonanze con lo stato dell’arte, perché diversi lavori mostrano che tecniche di reindirizzamento o *guidance* troppo evidenti possono influire su

orientamento spaziale e senso di autonomia, mentre approcci più discreti mantengono meglio la libertà esplorativa [7]. In parallelo, risultati positivi sulla preservazione della presenza in condizioni di *guidance* “ben congeniata” rafforzano l’idea che il bilanciamento tra indizio e scoperta sia una variabile critica di progetto, più che un effetto inevitabile della *guidance* in sé.

Sul piano tecnico e di implementazione, i commenti degli utenti non hanno segnalato problematiche che non fossero già considerate in fase di progettazione, il che è positivo: nessuno ha lamentato ritardi percettibili, disallineamenti o malfunzionamenti. Ciò suggerisce che la sincronizzazione e l’hardware erano adeguati. Tuttavia, dal lato hardware il prototipo è ancora wired e artigianale: diversi partecipanti, pur trovandolo relativamente comodo, hanno immaginato possibili miglioramenti come “sarebbe bello se facesse caldo in punti diversi” oppure “se fosse tutto senza fili non te ne accorgi nemmeno”. Questo evidenzia opportunità per il futuro, come sviluppare wearable termici integrati (ad esempio una maglia o un gilet con elementi riscaldanti disposti su varie parti del torso per aumentare la resa direzionale e immersiva) e rendere il sistema completamente wireless per eliminare l’ingombro dei cavi. Tali migliorie potrebbero accrescere ulteriormente sia la coerenza (sentire il calore direttamente sul corpo dove ci si aspetterebbe) sia la comodità. In questa direzione, l’evoluzione verso interfacce termiche più morbide, che distribuiscano meglio il calore e conformabili alla zona su cui vanno applicate - come suggerito da ricerche su soft haptic/thermo wearables [28] - potrebbe favorire comfort e integrazione percettiva, riducendo il carico attentivo in esubero e, di riflesso, gli effetti collaterali sull’immersione documentati per *cue* più intrusivi.

In conclusione, l’analisi integrata dei dati porta a concludere che il prototipo di feedback termico direzionale proposto ha dimostrato efficacia e usabilità nel contesto considerato. Esso mitiga la FOMO senza introdurre effetti collaterali gravi, e anzi viene percepito positivamente dagli utenti. I risultati qui discussi forniscono una base empirica solida su cui costruire: da un lato, confermano che vale la pena perseguire questa linea di ricerca (estendendola magari ad altri sensi come il freddo, come suggerito da alcuni utenti stessi, o ad altri generi narrativi); dall’altro, offrono indicazioni precise per ottimizzare e perfezionare la tecnologia (migliorare comfort per eliminare i cali di immersione, aumentare la coerenza termica per contribuire alla presenza, rendere il sistema adattativo alle esigenze individuali, ecc.). Nel complesso, questi risultati collocano il contributo della tesi in una prospettiva concreta. Il feedback termico direzionale emerge come una soluzione praticabile e promettente per guidare l’attenzione nel cinema immersivo, con il potenziale di arricchire significativamente l’esperienza dello spettatore senza comprometterne la libertà e il piacere dell’esplorazione.

7. Sviluppi futuri e Conclusioni

7.1 Risultati principali

I risultati della sperimentazione confermano quindi che il sistema di feedback termico direzionale ha raggiunto l'obiettivo di mitigare significativamente la FOMO nel cinema VR a 360°, mantenendo al contempo un buon livello di immersività e controllo per lo spettatore. In sintesi, i partecipanti con la guida termica hanno mostrato meno ansia di “perdere momenti importanti” e hanno effettivamente visto più eventi narrativi rispetto a quando guardavano lo stesso filmato senza alcun aiuto. Di seguito riepiloghiamo i punti salienti emersi dall'analisi dei dati quantitativi e qualitativi:

- Riduzione della paura di perdersi eventi: il punteggio medio di FOMO percepita dai partecipanti si è dimezzato con l'uso del feedback termico, *riducendosi di circa il 50% rispetto alla condizione senza guida*. In particolare, su una scala normalizzata 0–100, la paura di “perdere qualcosa” è scesa da un valore medio di ~52 (esperienza senza feedback) a ~25 con il sistema termico attivo – una differenza statisticamente significativa come è stato mostrato nel capitolo precedente. Questo dato indica che la semplice presenza di un segnale direzionale rassicurava gli spettatori sulla possibilità di cogliere i punti salienti, riducendo ansia e distrazione. Tale effetto supporta l'ipotesi che alleviare la FOMO permetta allo spettatore di godersi maggiormente il film, trasformando la potenziale frustrazione in una maggiore serenità durante la visione.
- Aumento dell'attenzione verso gli eventi narrativi: dal tracciamento dell'orientamento dello sguardo è emerso che i partecipanti hanno effettivamente perso meno contenuti importanti grazie ai *cue* termici. Analogamente, il numero di eventi completamente mancati durante la visione è calato. Pur non eliminando del tutto il problema il sistema ha dimostrato un contributo concreto nel colmare le lacune attentive, aiutando il pubblico a seguire meglio lo svolgersi della trama al primo tentativo. Significativamente, il tempo di reazione agli eventi fuori vista si è ridotto, i partecipanti con feedback termico tendevano a rivolgere lo sguardo verso la direzione più narrativamente importante entro pochi secondi (circa 4s in media). Questo conferma l'efficacia del *cue* termico nell'attrarre l'attenzione in tempi relativamente rapidi.
- Minore necessità di esplorazione frenetica: un altro risultato interessante riguarda il comportamento esplorativo degli utenti. Senza guida, molti partecipanti tendevano a guardarsi

intorno frequentemente e nervosamente, nel tentativo di non perdersi nulla. Con il feedback termico, è stato osservato un approccio più rilassato, poiché diversi indicatori comportamentali mostrano un calo nell'esplorazione eccessiva. Anche il tasso di rotazioni rapide della testa (switch rate), infatti, e il numero di movimenti "a scatti" (burst) al minuto risultano ridotti sotto l'effetto dei *cue* di calore. In media, i partecipanti con sistema attivo hanno effettuato meno cambi di direzione improvvisi e hanno mantenuto una velocità angolare di rotazione leggermente inferiore rispetto alla condizione senza aiuti. Questo suggerisce che la presenza dei segnali termici allevia il bisogno di controllare compulsivamente tutte le direzioni, permettendo allo spettatore di affidarsi al sistema per non mancare gli eventi importanti. In pratica, gli utenti guidati dal calore hanno esplorato in modo più mirato e consapevole, godendosi la visione con maggiore calma. Si tratta di un aspetto positivo sia per il comfort fisico (meno affaticamento) sia per l'esperienza narrativa, che diventa più fluida e meno distratta.

- Immersione e presenza preservate (con lievi differenze): l'introduzione del feedback termico non ha stravolto i livelli di immersività percepita. I punteggi medi di presenza e immersione rimangono buoni in entrambe le condizioni, con differenze tutto sommato contenute. Queste differenze, pur risultando statisticamente significative ai test (indice che gli utenti hanno notato la presenza del dispositivo), rappresentano un calo medio di appena 0.5 punti su 7. In altre parole, l'esperienza con guida termica è stata quasi altrettanto immersiva di quella tradizionale, e gli spettatori hanno comunque riferito un alto senso di "essere lì" nella scena (valori intorno a 5 su 7). Dal punto di vista qualitativo, alcuni partecipanti hanno commentato che il calore percepito sulle braccia si integrava abbastanza bene nell'esperienza, e dopo pochi minuti tendevano a considerarlo parte dell'ambiente. Ciò è coerente con l'intento progettuale: il segnale termico, se ben calibrato, non aggiunge elementi visivi estranei e non risulta troppo intrusivo, permettendo di mantenere un buon livello di presenza narrativa.
- Agency e controllo dello sguardo: un aspetto cruciale era assicurarsi che il sistema non compromettesse l'agency dello spettatore, ossia la libertà percepita di orientare lo sguardo a proprio piacimento. Dai questionari emerge che i partecipanti si sono sentiti ancora in potere di preferire le proprie scelte visive: il senso di agency è rimasto alto in entrambe le condizioni, con punteggi medi attorno a 5,81/7 con feedback e leggermente inferiori (circa 5,23/7) senza il feedback. Nessuno ha segnalato di aver sentito imposizioni o costrizioni, al contrario, molti hanno descritto il calore come un suggerimento tenue, che potevano scegliere di seguire oppure no. In effetti, in diversi casi gli utenti hanno deliberatamente ignorato il segnale per

alcuni secondi – per esempio, se stavano già seguendo un’azione secondaria interessante – salvo poi comunque voltarsi più tardi. Questo comportamento indica che l’agency personale è stata rispettata, la regia termica non forza lo sguardo istantaneamente, ma lascia un margine di autonomia allo spettatore, che rimane libero di esplorare il mondo virtuale secondo i propri tempi. In definitiva, il sistema raggiunge un buon equilibrio, guidando senza “prendere il controllo” della visuale.

- Comfort, sicurezza e accettabilità: sul piano ergonomico, il prototipo indossabile si è dimostrato abbastanza confortevole e sicuro. Nessun partecipante ha riportato fastidi fisici dovuti al dispositivo. La fascia con i pad termici è stata valutata comoda da indossare, e il calore erogato è stato giudicato generalmente piacevole o neutro. Solo in rari casi qualcuno ha avvertito un leggero senso di calore “puntuale” un po’ intenso, ma senza raggiungere livelli di dolore o distrazione significativa. Importante sottolineare che non si sono verificati incidenti né problemi tecnici durante le sessioni: la sicurezza termica è stata confermata, nessun pad eccessivamente caldo, nessun malfunzionamento elettronico, permettendo agli utenti di concentrarsi sull’esperienza senza preoccupazioni. Anche la cybersickness (chinetosi da VR) è rimasta bassa in entrambe le condizioni. I sintomi riportati (nausea, disorientamento) sono stati minimi o nulli, e l’aggiunta del feedback termico non ha inciso negativamente su questo aspetto. Anzi, alcuni partecipanti hanno suggerito che potenzialmente un lieve calore potrebbe persino distogliere l’attenzione dai malesseri da motion sickness, anche se questo aspetto andrebbe indagato più a fondo. In generale, il livello di accettazione della tecnologia è risultato alto, poiché alla domanda “*Userei un simile sistema durante la visione di altri film VR*”, la maggior parte ha risposto in modo affermativo, citando come motivazione il fatto che “aiuta a non perdersi le parti importanti senza rovinare l’esperienza”. Nessuno ha ritenuto l’approccio completamente inutile o fastidioso – un indicatore chiave che il bilanciamento tra intrusività e benefici scelto è appropriato.
- Preferenza per l’esperienza guidata: nel confronto puntuale tra i due sistemi (con e senza dispositivo) gli utenti hanno complessivamente preferito la versione dell’esperienza con feedback termico rispetto a quella tradizionale. Ai partecipanti è stato chiesto di indicare quale visione avessero gradito di più e l’86% di essi ha indicato la variante con guida, nonostante il gradimento dei video (indipendentemente dal feedback) si fosse stabilizzato su una media del 57% per il video “Elefanti” e 43% per il video “Leoni”. Molti hanno apprezzato e riportato durante l’esperimento la diminuzione dell’ansia, riferendo di essersi sentiti più tranquilli sapendo di avere un aiuto che li avrebbe avvisati all’occorrenza. Alcuni hanno sottolineato

che ciò ha permesso loro di immergersi meglio nella storia, focalizzandosi sulla trama principale sapendo che eventuali dettagli fuori dallo sguardo non sarebbero passati inosservati. Altri ancora hanno descritto il feedback come un elemento che “arricchisce” l’esperienza. Questa risposta positiva del pubblico è incoraggiante e suggerisce che la strada del feedback termico direzionale è percepita come utile e desiderabile per migliorare il cinema VR. Naturalmente, qualcuno ha anche espresso suggerimenti e preferenze personali – ad esempio c’è chi avrebbe gradito un’intensità di calore un maggiore per renderlo più distinguibile, e chi inizialmente non aveva capito subito il significato del segnale. Questi spunti sono preziosi e vengono considerati nelle proposte di miglioramento qui di seguito.

In conclusione, il prototipo sviluppato ha dimostrato sperimentalmente i vantaggi ipotizzati, come meno FOMO, più contenuti visti, meno stress da ricerca, il tutto senza compromettere gravemente l’esperienza utente. Gli obiettivi dello studio delineati inizialmente possono dirsi in buona parte raggiunti. Si tratta, è bene ricordarlo, di un primo passo in un dominio nuovo e i risultati ottenuti vanno interpretati nelle condizioni specifiche di questo test (un corto a 360° di natura documentaristica, con pubblico giovane/adulto sano e mediamente esperto di VR). Ciò nonostante, il contributo originale portato da questo lavoro è stato quello di aver introdotto e valutato empiricamente una soluzione alternativa nel contesto del cinema a 360° per aprire la strada all’utilizzo del canale termico – finora poco esplorato – come mezzo per guidare l’attenzione. Questo getta le basi per tutta una serie di sviluppi futuri, sia tecnologici sia narrativi, di cui si discuterà qui di seguito.

7.2 Proposte di miglioramento del sistema

I risultati incoraggianti ottenuti non nascondono ovviamente margini di miglioramento del sistema proposto. Essendo un prototipo sperimentale, vi sono diversi aspetti ottimizzabili sia dal punto di vista tecnico sia dell’integrazione narrativa. Sulla base delle osservazioni raccolte e delle riflessioni emerse durante il progetto, proponiamo qui alcune possibili direzioni di intervento per versioni future della soluzione di feedback termico direzionale.

- Maggiore granularità direzionale con sensori multipli: attualmente il sistema utilizza quattro pad termici (due per la sinistra e per la destra) per indicare in quale metà del campo visivo si stia svolgendo un evento fuori campo. Questa configurazione, sebbene rivelata efficace nello scenario di sperimentazione, potrebbe essere resa più granulare aumentando il numero di attuatori termici attorno all’utente. Oltre a un maggior numero di pad disposti in una configurazione differente, si potrebbe pensare a una *cintura/giubbotto con array di elementi*

riscaldanti distribuiti a 360°. In tal modo il sistema potrebbe indicare direzioni più precise da cui proviene l'azione. Questa espansione richiederebbe di aggiungere collegamenti al microcontrollore (o moduli collegati) e adattare la logica di mappatura, ma un maggior numero di sensori termici potrebbe anche permettere di rappresentare più eventi simultanei: ad esempio, in una scena multi-evento, diversi pad potrebbero accendersi contemporaneamente per segnalare allo spettatore punti di interesse in direzioni diverse. Bisogna ovviamente considerare il limite umano nel gestire più stimoli insieme – troppe attivazioni rischiano di confondere – ma in linea di principio un dispositivo del genere offrirebbe molta più flessibilità registica. Inoltre, con più pad sarebbe possibile implementare effetti di “movimento del calore” lungo il corpo (ad esempio un impulso che si sposta da sinistra a destra se un oggetto in movimento attraversa la scena dietro l'utente), arricchendo ulteriormente il linguaggio espressivo della narrazione.

- Integrazione di feedback termici freddi: finora è stata sfruttata la dimensione termica unicamente sul versante del caldo. Un'estensione intrigante sarebbe incorporare anche stimoli di freddo controllati. In tal modo si aprirebbero due canali termici indipendenti (riscaldamento e raffreddamento) che potrebbero essere usati con significati differenti. Si potrebbe impiegare il calore per richiamare l'attenzione su eventi critici principali e il freddo per segnalare elementi secondari o di contesto, creando una sorta di codice termico a doppia intensità. Oppure, in chiave narrativa, caldo e freddo potrebbero associarsi simbolicamente a situazioni diverse (come un pericolo o evento imminente per il caldo e il freddo associato al mistero o alla distanza). Dal punto di vista tecnico, realizzare pad che possano anche raffreddarsi è più complesso, si potrebbero usare elementi termoelettrici (celle di Peltier) capaci sia di riscaldare sia di assorbire calore, ma a costo di maggiore consumo energetico e necessità di dissipazione. In alternativa più semplice, si potrebbero combinare pad caldi e pad freddi separati (ad es. cuscini con riscaldamento resistivo e altri con piccole cartucce di aria/gas freddo). I partecipanti stessi, durante le discussioni post-test, hanno ipotizzato che un brivido freddo improvviso potrebbe essere un segnale potente in certe scene. Da esplorare con cautela l'ergonomia del freddo, poiché la tolleranza cutanea al freddo varia e un freddo eccessivo potrebbe risultare più fastidioso del caldo lieve. Tuttavia, offrire due gamme termiche arricchirebbe sicuramente il linguaggio di regia: caldo e freddo combinati potrebbero veicolare informazioni differenti o accentuare il coinvolgimento emotivo.
- Miglioramenti nel tracking e nella logica di attivazione: un aspetto cruciale per la fluidità del sistema è la precisione del tracking dell'orientamento utente. Nel prototipo è stato usato il

solo tracciamento della testa fornito dall'HMD, con una logica binaria (se l'utente non guarda entro una certa soglia angolare, attiva il pad corrispondente). In futuro, sarebbe auspicabile integrare tracking oculare (eye-tracking) qualora il visore lo supporti. Combinando i dati di direzione dello sguardo con quelli della posizione della testa, la decisione di attivazione potrebbe diventare ancora più fine e intelligente, per esempio, se l'utente sta già rivolgendo la sua attenzione con i soli occhi verso un evento laterale (pur senza ruotare la testa), il sistema potrebbe riconoscerlo ed evitare di attivare inutilmente il pad (prevenendo ridondanze o disturbi). Viceversa, l'eye-tracking potrebbe segnalare disattenzione anche quando la testa è orientata vagamente verso il target – in tal caso il pad potrebbe attivarsi lo stesso per indirizzare con più chiarezza l'occhio. Oltre all'eye-tracking, si potrebbe migliorare la logica di trigger rendendola maggiormente adattiva. Attualmente i parametri come soglia angolare, ritardo iniziale (delay) e durata sono statici, tarati in base ai test preliminari. Si potrebbero implementare meccanismi dinamici, come un sistema che modula l'intensità o la durata del segnale in base al comportamento dell'utente. Allo stesso modo, il sistema potrebbe apprendere durante la visione le tempistiche di risposta dello specifico spettatore e adattare di conseguenza il timing dei *cue* successivi (un utente lento a reagire potrebbe beneficiare di trigger leggermente anticipati o prolungati, viceversa per uno molto reattivo si potrebbero ridurre). Infine, un tracking migliorato potrebbe prevedere anche il riconoscimento di postura corporea o movimenti ampi. Se l'utente si sporge o cambia posizione rapidamente, il sistema potrebbe temporaneamente sospendere o ritardare un *cue* per non sovraccaricarlo di stimoli in un momento di movimenti concitati. In sintesi, c'è spazio per rendere la logica di guida più intelligente, minimizzando i falsi positivi e assicurando che il feedback termico si attivi solo quando veramente utile.

- Ottimizzazione dell'hardware e usabilità: sul fronte hardware, diverse migliorie pratiche possono aumentare l'usabilità del sistema. Una di queste riguarda sicuramente la possibilità di rendere il sistema wireless. Il prototipo, ad oggi, prevede cavi dall'Arduino ai pad e al PC, accettabili in laboratorio ma scomodi in un impiego reale. Miniaturizzare e rendere wireless il modulo termico sarebbe fondamentale per un prodotto finito. Si potrebbe, ad esempio, integrare un microcontrollore Bluetooth/BLE alimentato a batteria ricaricabile, capace di pilotare i pad senza fili. I test hanno indicato che il consumo energetico è relativamente basso (poche centinaia di Joule per segnale), quindi una comune batteria portatile potrebbe reggere ore di funzionamento. Eliminare i cavi aumenterebbe enormemente la libertà di movimento e il comfort dell'utente, oltre a facilitare installazione e setup. Un'altra miglioria hardware riguarda la vestibilità del dispositivo, attualmente è presente una fascia elastica con velcro

attorno alle braccia; versioni future potrebbero assumere forme diverse, come un gilet sottile termico da indossare sopra i vestiti, oppure bracciali o cuscinetti modulari posizionabili su varie parti del corpo a scelta dello spettatore. L'importante sarà garantire una distribuzione uniforme del calore e la stabilità e sicurezza del contatto sulla pelle, evitando sia punti di eccessiva concentrazione di calore sia spostamenti e rotazioni dei pad durante l'uso. Anche i materiali e il design potranno essere ottimizzati, usando pad più piccoli o con inerzia termica minore, usando materiali a risposta più rapida, permetterebbero tempi di attivazione e raffreddamento ancora più brevi, migliorando la precisione temporale dei cue. O, al contrario, pad di dimensioni maggiori per garantire una distribuzione più uniforme sulla pelle. In aggiunta, incapsulare il sistema in un *form factor* ben progettato aumenterebbe l'appeal e la facilità d'uso, portandolo più vicino a un vero prodotto per il pubblico generalista. Infine, non va trascurata la possibilità di includere un canale di vibrazione abbinato. Alcuni partecipanti, infatti, hanno ipotizzato che un piccolo buzz vibrotattile insieme al calore potrebbe rendere il segnale ancora più evidente, sfruttando due sensi in parallelo. Un sistema ibrido calore e vibrazione potrebbe quindi essere un'evoluzione interessante.

In sintesi, le proposte sopra delineate mirano a rendere il sistema più accurato, versatile e *user-friendly*. Queste migliorie non snaturano il concetto di base, ma anzi lo rendono più solido e pronto per applicazioni reali. Nel prossimo paragrafo saranno esposte alcune di queste possibili applicazioni, immaginando come una regia termica potrebbe essere utilizzata in contesti diversi da questo esperimento.

7.3 Possibili applicazioni della guida termica

Oltre al caso d'uso esplorato nella presente tesi, la tecnologia di feedback termico direzionale potrebbe trovare applicazione in molti altri scenari nell'ambito della realtà virtuale e non solo. Di seguito si discute di alcune possibili estensioni e contesti d'uso che emergono dalle caratteristiche del sistema.

- Cinema VR e storytelling immersivo: L'applicazione più immediata è nell'industria del cinema immersivo e dei video narrativi a 360°. Registi e creatori di contenuti VR potrebbero adottare la guida termica come strumento innovativo di linguaggio filmico, per assicurarsi che lo spettatore non manchi gli snodi narrativi cruciali. Per esempio, in un cortometraggio VR di genere thriller, un leggero calore dietro la nuca potrebbe avvisare di “guardarsi alle spalle” prima di una rivelazione importante, senza bisogno di inserire espedienti visivi intrusivi. Allo

stesso modo, in un documentario naturalistico a 360° (come quello utilizzato nei test) il feedback termico può segnalare la presenza di un animale o di un evento interessante fuori dal campo visivo, aumentando la completezza dell'esperienza educativa dell'utente. Un aspetto importante è che il termico, a differenza di suoni o frecce su schermo, non rompe l'illusione diegetica, come già discusso, lo spettatore può interpretare il calore come parte dell'ambiente (sole, fuoco, vento caldo) e quindi rimanere immerso nella storia. Questo apre possibilità creative, perché i registi potranno sperimentare con cue termici integrati nella narrazione, giustificando anche diegeticamente il caldo percepito. In prospettiva, la guida termica potrebbe diventare un elemento standard del *toolkit* del regista VR, accanto a luci, suoni e vibrazioni, per orchestrare l'esperienza multisensoriale dello spettatore.

- Esperienze VR multisensoriali e 4D: il sistema si inserisce nel filone più ampio delle esperienze VR multisensoriali, dove oltre a vista e udito si coinvolgono tatto, olfatto e senso termico. Già oggi esistono attrazioni 4D o dispositivi sperimentali (come Ambiotherm) che forniscono vento e calore per aumentare la presenza. La differenza di questo approccio è l'uso funzionale del termico per la regia dell'attenzione, ma nulla vieta di combinarne l'uso con altri effetti. Immaginiamo parchi a tema o installazioni di arte immersiva dove il visitatore, indossando un giubbotto termico, viene guidato attraverso un percorso narrativo e il calore può indirizzarlo fisicamente, mentre altri effetti (profumi, getti d'aria, piattaforme in movimento) completano la sensazione. In un cinema 4D, invece di limitarsi a spruzzi d'acqua e poltrone vibranti sincronizzati alla scena, si potrebbero aggiungere segnali termici personalizzati per chi indossa un dispositivo apposito, offrendo un livello di interattività individuale dentro un'esperienza collettiva. Queste applicazioni potrebbero arricchire l'engagement e la sensazione di presenza dello spettatore. Lo studio condotto dimostra che il canale termico è sufficientemente maturo per essere sfruttato in sicurezza, e apre la strada a nuovi format di intrattenimento multisensoriale.
- Addestramento e simulazioni di sicurezza: al di fuori dell'entertainment, si può pensare all'utilizzo della guida termica in contesti di training VR e simulazioni professionali. Ad esempio, nelle esercitazioni dei vigili del fuoco o in simulazioni militari, un sistema di pad termici potrebbe segnalare la direzione di fonti di pericolo invisibili – come un principio di incendio alle spalle, o il passaggio di un nemico – permettendo di reagire prontamente. In scenari di addestramento alla sicurezza sul lavoro, un feedback termico potrebbe avvisare l'operatore di un rischio imminente in ambiente virtuale, senza ricorrere a sirene o indicatori grafici, ma simulando fisicamente la sensazione di calore che davvero emanerebbe un

macchinario surriscaldato. Ciò renderebbe la simulazione più realistica e aiuterebbe a formare riflessi istintivi nei lavoratori. In tutti questi casi, il vantaggio sarebbe di aumentare l'attenzione verso elementi critici e la *situational awareness* dell'utente in VR, senza sommergerlo di informazioni visive testuali che distraggono dall'addestramento pratico. Un risvolto interessante è che il termico potrebbe imprimere meglio nella memoria dell'utente certi avvertimenti rispetto a semplici avvisi visivi, perché il ricordo di aver sentito calore prima di un evento virtuale potrebbe ancorarsi come esperienza appresa per la realtà.

- Supporto a utenti con disabilità sensoriali: un altro ambito dove la comunicazione termica potrebbe rivelarsi preziosa è quello dell'accessibilità in VR. Persone con deficit visivi o uditivi potrebbero beneficiare di un canale aggiuntivo che supplisca in parte al senso mancante. Ad esempio, un utente sordo che non può percepire bene i suoni direzionali potrebbe ricevere indicazioni sul posizionamento delle fonti audio attraverso il calore. Viceversa, un utente cieco all'interno di una scena VR può essere aiutato nel percepire eventi visuali rilevanti tramite *cue* termici sincronizzati. In generale, il feedback termico può fungere da canale alternativo non verbale per veicolare informazioni di contesto a chi non può accedere pienamente a tutti gli stimoli della VR. Naturalmente, andrebbe studiato con attenzione come calibrarlo, e accompagnarlo eventualmente da descrizioni audio aggiuntive o segnali visivi appropriati. Ma uno dei punti forti di questo tipo di feedback è che rimane lieve e di sottofondo, non richiede attenzione focalizzata per essere colto – caratteristica utile per non sovraccaricare chi già deve concentrare sforzi sugli altri sensi disponibili. Immaginando anche applicazioni ludiche, un videogioco VR progettato appositamente per giocatori ipovedenti potrebbe usare il calore per indicare direzioni o minacce, rendendo l'esperienza più inclusiva. In sintesi, la dimensione termica potrebbe arricchire la palette sensoriale accessibile in VR, garantendo a più persone di vivere storie immersive senza sentirsi escluse.
- Miglioramento dell'emozione e del coinvolgimento: oltre all'aspetto funzionale di guida dell'attenzione, non va dimenticato che caldo e freddo hanno anche un impatto sul piano emotivo. In ottica narrativa, il calore potrebbe essere associato a emozioni di tensione, eccitazione o comfort a seconda del contesto, mentre il freddo potrebbe evocare sensazioni di isolamento, paura o calma. Integrare variazioni termiche coerenti con la narrazione, a seconda degli studi a supporto di queste assunzioni, potrebbe dunque amplificare l'esperienza emotiva dello spettatore. In questo studio, ci si è concentrati sul ruolo direzionale del calore, ma in futuro si potrebbe pensare a sincronizzare il feedback termico con la colonna sonora o con la fotografia del film VR per creare vere e proprie sinestesie narrative. Queste applicazioni

creative trasformano il sistema da puro strumento di usabilità (evitare la FOMO) a strumento artistico per arricchire la storia. Il cinema tradizionale usa luci, colori e suoni per modulare l'emozione del pubblico; il cinema VR multisensoriale potrebbe aggiungere il termico come ulteriore strumento espressivo del regista.

In definitiva, la versatilità del feedback termico direzionale lo rende adatto a molti contesti, dalle sale cinematografiche VR ai musei interattivi, dalla formazione all'assistenza inclusiva. Naturalmente, ciascuna applicazione richiederà adattamenti specifici – ad esempio intensità diverse, differenti forme di attuatori (pad, sedili riscaldati, ecc.) o combinazioni con altri feedback. La speranza di questo studio è che i risultati di questi esperimenti possano ispirare ulteriori test e progetti in tali direzioni, contribuendo ad avvicinare sempre più la VR a esperienze totalizzanti e coinvolgenti, capaci di stimolare tutti i sensi dell'essere umano.

In conclusione, il lavoro svolto rappresenta un passo iniziale verso esperienze immersive sempre più multisensoriali e incentrate sull'utente, in cui la tecnologia è subordinata alla narrazione. Le conclusioni principali evidenziano come un semplice impulso di calore possa fare la differenza nell'orientare l'attenzione senza rompere la magia dell'immersione. Gli sviluppi futuri delineati mostrano che c'è ampio spazio per migliorare e applicare questa idea in contesti diversi – dal cinema all'addestramento, dall'intrattenimento multisensoriale all'accessibilità – e per integrarla in un toolkit completo a disposizione della comunità creativa VR.

Ringraziamenti

Concludere un percorso significa anche riconoscere che ogni traguardo è sempre il risultato di un cammino condiviso, e dietro ogni pagina di questa tesi ci sono persone che, in modi diversi, hanno contribuito con la loro presenza, il loro sostegno e il loro ingegno a rendere possibile questo progetto.

Desidero innanzitutto ringraziare Gabriele, che mi ha accompagnato dall'inizio alla fine di questo progetto, contribuendo in modo concreto e instancabile alla sua realizzazione. Dalle prime idee di progettazione fino ai numerosi test e aggiustamenti pratici che hanno reso possibile la costruzione del dispositivo. Ogni saldatura del prototipo porta la sua firma. La sua presenza costante, la pazienza e la competenza tecnica sono state un punto di riferimento in ogni fase del lavoro, così come la capacità di aiutarmi a trovare sempre una soluzione anche davanti agli ostacoli più imprevedibili.

Un sincero ringraziamento va anche a Matilde e Graziano, per la loro presenza, la disponibilità e il sostegno continuo durante le fasi di sviluppo e sperimentazione. Li ringrazio non solo per l'aiuto pratico e per aver contribuito a reperire i partecipanti ai test, ma anche per l'entusiasmo e la fiducia con cui hanno accompagnato questo percorso - prometto che lo sgabello dei test tornerà presto al legittimo proprietario!

Un grazie profondo a mia madre Tiziana, che ha reso possibile la chiusura di questo capitolo di studi e a cui devo, più di ogni altra cosa, questo traguardo. Per aver creduto in me anche nei momenti più incerti e per avermi insegnato il valore della dedizione e della costanza.

Ci tengo in particolare a ringraziare anche il mio relatore, per la pazienza, la disponibilità e l'attenzione con cui mi ha seguito passo dopo passo, offrendo sempre un punto di vista costruttivo, fondamentale per dare direzione e rigore scientifico a un progetto che nasceva da un'idea sperimentale.

Un ringraziamento sentito va a tutti i partecipanti dei test, che hanno reso possibile la sperimentazione del dispositivo e la raccolta dei dati necessari alla valutazione. Il loro tempo, la loro curiosità e i loro feedback sono stati preziosi per comprendere davvero l'impatto dell'esperienza sviluppata.

A tutti gli amici che mi sono stati vicini, che, con la loro presenza, hanno reso più leggeri i momenti di maggiore pressione e stanchezza, grazie. Il vostro incoraggiamento e la vostra ironia sono stati un carburante indispensabile per arrivare fino in fondo.

E soprattutto, un grazie speciale a Ilaria, la mia splendida compagna, per avermi sostenuto in ogni momento, con pazienza, amore e fiducia. Per aver creduto in me anche quando io stesso dubitavo, per avermi spronato a dare il meglio e aver condiviso notti insonni e revisioni infinite.

A lei, che mi ha ricordato il valore di ciò che si costruisce insieme, dedico con gratitudine questo lavoro di tesi.

Bibliografia & Riferimenti

- [1] W. Gao, «Reduce Fear of Missing Out in 360-Degree Video by Forced Guiding System» Keio University, (2023/2024).
- [2] J. Herrera, «Building long-term empathy: A large-scale comparison of traditional and virtual reality perspective-taking.» 2018.
- [3] M. Minsky, «Telepresence» *OMNI*, 1980.
- [4] J. Steuer, «Defining Virtual Reality: Dimensions Determining Telepresence.» *Journal of Communication*, 1992.
- [5] J. H. Murray, « Hamlet on the Holodeck: The Future of Narrative in Cyberspace.» *The Free Press.*, 1997.
- [6] T. Aitamurto, S. Zhou e Y. Sadeghi, «From FOMO to JOMO: Examining the fear and joy of missing out and presence in a 360° video viewing experience» in *CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 2021.
- [7] T. Yamaguchi, «Panoramic thumbnail to relieve FOMO in 360° video without reducing presence» in *IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, 2022.
- [8] A. Serrano, B. Masia e D. Gutierrez, «The emergence of 360° video and virtual reality» *Computer Graphics and Applications*, 2017.
- [9] C. G. D. & S. A. Marañes, «Exploring the impact of 360° movie cuts in users' attention» in *2020 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, 2020.
- [10] *The People's House: Inside the White House with Barack and Michelle Obama*. [Film]. Felix & Paul Studios, 2017.
- [11] S. Unseld, Regia, *Dear Angelica*. [Film]. Oculus Story Studio, 2017.
- [12] R. Rodriguez, Regia, *The Limit*. [Film]. 2018.
- [13] J. Lin, R. Bailey e L. Yu, «Outside-In: Visualizing out-of-view objects in 360° videos» in *IEEE Virtual Reality (VR)*, 2017.
- [14] M. Speicher, C. Rosenberg, D. Degraen, F. Daiber e A. Krüger, «Exploring Visual Guidance in 360-degree Videos» in *ACM International Conference on Interactive Experiences for TV and Online Video*, 2019.
- [15] R. Ramchurn, Regia, *The MOMENT*. [Film]. AlbinoMosquito / Mixed Reality Lab: University of Nottingham, 2018.
- [16] M. e. a. Marucci, «The impact of multisensory integration and perceptual load on performance in complex tasks.» *Scientific Reports.*, 2021.

- [17] C. S. e. a. Shayman, « The addition of a spatial auditory cue improves spatial updating in virtual reality.» 2024.
- [18] F. Biocca, C. Harms e J. K. Burgoon, «Toward a more robust theory and measure of social presence: Review and suggested criteria» *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 2003.
- [19] N. J. P. K. S. T. D. & D. E. Y.-L. Ranasinghe, «Ambiotherm: Enhancing Sense of Presence in Virtual Reality by Simulating Real-World Environmental Conditions.» Proceedings of CHI ., 2017.
- [20] K. Lyu, A. Brambilla, A. Globa e R. de Dear, «An immersive multisensory virtual reality approach to the study of human–built environment interactions: Technical workflows» *MethodsX*, 2023.
- [21] T. F. F. & R. H. Schubert, «The experience of presence: Factor analytic insights.» *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 2001.
- [22] M. U. M. & S. A. Slater, «Depth of presence in virtual environments.» *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 1994.
- [23] N. & G. S. B. Kelly, « The WEAR Scale: Developing a measure of the social acceptability of a wearable device» CHI Conference Extended Abstracts. ACM., 2016 .
- [24] R. S. L. N. E. B. K. S. & L. M. G. Kennedy, «Simulator sickness questionnaire: An enhanced method for quantifying simulator sickness» *The International Journal of Aviation Psychology*, 1993.
- [25] J. Brooke, «SUS: A “quick and dirty” usability scale» Taylor & Francis, London, 1996.
- [26] A. K. M. K. D. C. R. & G. V. rzybylski, « Motivational, emotional, and behavioral correlates of fear of missing out.» *Computers in Human Behavior*., 2013.
- [27] M. R. C. D. D. D. F. & K. A. Speicher, «Exploring Visual Guidance in 360-degree Videos» ACM International Conference on Interactive Experiences for TV and Online Video., 2019.
- [28] S. Lee, S. Jang e Y. Cha, «Soft wearable thermo+touch haptic interface for virtual reality» *iScience*, 2024.
- [29] Z. Zhang, «Saliency in 360°: A study of viewer attention in panoramic video» *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2018.
- [30] H. Yao, L. Zhao, B. Chen, K. Li, H.-N. Liang e L. Yu, «3DStoryline: Immersive visual storytelling» *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2023.
- [31] B. G. Witmer e M. J. Singer, «Measuring presence in virtual environments: A presence questionnaire,» *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 1998.
- [32] F. Tosi, «High-fidelity 360° video for immersive VR: Capture, stitching, and presentation» *Signal Processing: Image Communication*, vol. 81, p. 115715, 2020.

- [33] I. Sutherland, «A head-mounted three-dimensional display» in *AFIPS Fall Joint Computer Conference*, 1968.
- [34] E. A. Suma, «Leveraging change blindness for redirection in virtual environments» in *IEEE Virtual Reality Conference (VR)*, 2011.
- [35] J. Steuer, «Defining virtual reality: Dimensions determining telepresence» *Journal of Communication*, 1992.
- [36] T. Stebbins e E. D. Ragan, «Redirecting view rotation in immersive movies with washout filters» in *IEEE VR*, 2019.
- [37] M. Slater, «Place illusion and plausibility can lead to realistic behaviour in immersive virtual environments» *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 2009.
- [38] M. Slater, M. Usoh e A. Steed, «Depth of presence in virtual environments» *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 1994.
- [39] S. Schmidt, «Diegetic cues for attention guidance in cinematic VR,» in *ACM Symposium on Applied Perception*, 2018.
- [40] D. D. Salvucci e J. H. Goldberg, «Identifying fixations and saccades in eye-tracking protocols,» in *Symposium on Eye Tracking Research & Applications*, 2000.
- [41] S. Rothe, F. Müller e C. Wienrich, «Flicker to focus: Guided attention in cinematic VR using luminance flicker» in *IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, 2019.
- [42] Y.-H. Peng, C. Yu, S.-H. Liu, C.-W. Wang, P. Taele, N.-H. Yu e M. Y. Chen, «WalkingVibe: Reducing Virtual Reality Sickness and Improving Realism while Walking in VR using Unobtrusive Head-mounted Vibrotactile Feedback» in *CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 2020.
- [43] A. Pavel, «Orienting users to regions of interest in 360° videos» in *IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, 2019.
- [44] N. Padmanaban, R. Konrad, T. Stramer, E. A. Cooper e G. Wetzstein, «Optimizing virtual reality for all users through gaze-contingent and perceptually-motivated rendering» *ACM Transactions on Graphics*, 2017.
- [45] S. Nielsen, N. C. Nilsson e R. Nordahl, «It's alive! Exploring the effect of a virtual firefly on users' attention in cinematic VR» in *IEEE VR Workshop on K-12 Embodied Learning through VR & AR*, 2016.
- [46] J. H. Murray, *Hamlet on the Holodeck: The Future of Narrative in Cyberspace*, MIT Press, 1997.
- [47] J. Mateer, «Directing for cinematic virtual reality: how the traditional film director's craft applies to immersive environments and notions of presence» *Journal of Media Practice*, 2017.
- [48] J. LaViola, «A discussion of cybersickness in virtual environments» *ACM SIGCHI Bulletin*, 2000.

- [49] R. S. Kennedy, N. E. Lane, K. S. Berbaum e M. G. Lilienthal, «Simulator sickness questionnaire: An enhanced method for quantifying simulator sickness» *The International Journal of Aviation Psychology*, 1993.
- [50] J. Jerald, *The VR Book: Human-Centered Design for Virtual Reality*, Morgan & Claypool, 2015.
- [51] B. Henderson, *A Grammar of Film Language*, Silman-James Press, 2011.
- [52] D. Gutiérrez, A. Serrano e C. Marañes, «Exploring the impact of 360° movie cuts in users' attention» in *IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, 2020.
- [53] A. De Abreu, C. Ozcinar e A. Smolic, «Look around you: Saliency maps for omnidirectional images in VR applications» in *QoMEX: International Conference on Quality of Multimedia Experience*, 2017.
- [54] A. Caputo, M. Zancanaro e A. Giachetti, «Eyes on teleporting: Comparing locomotion techniques in virtual reality with respect to presence, sickness and spatial orientation» 2023.
- [55] E. Bozgeyikli, A. Raij, S. Katkooi e R. Dubey, «Point & teleport locomotion technique for virtual reality» in *Annual Symposium on Computer-Human Interaction in Play (CHI PLAY)*, 2016.
- [56] M. Azmandian, M. Hancock, H. Benko, E. Ofek e A. Hinkenjann, «Haptic retargeting: Dynamic repurposing of passive haptics for enhanced virtual reality experiences» in *CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 2016.

Sitografia

- [57] Analog Devices. (2019). DS18B20: Programmable resolution 1-Wire digital thermometer (Rev. 6) [Datasheet]; <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ds18b20.pdf>
- [58] OMEGA Engineering. (n.d.). Polyimide film insulated flexible heaters — KH/KHLV/KHR series [Datasheet]; https://www.omega.nl/heaters/pdf/KHR_KHLV_KH.pdf
- [59] Vishay Siliconix. (n.d.). IRLZ44 — Logic-level power MOSFET [Datasheet]; <https://www.vishay.com/docs/91328/irlz44.pdf>
- [60] Alpha & Omega Semiconductor. (n.d.). AO3400A — N-channel enhancement mode MOSFET (SOT-23) [Datasheet]. https://www.aosmd.com/res/data_sheets/AO3400A.pdf
- [61] "Secret Life of the Koala", 2016, nbcuniversalACM Digital Library; <https://dl.acm.org>
- [62] "Elephants on the Brink - Racing Extinction (360 Video)", 2018, Animal Planet; https://www.youtube.com/watch?v=G5Y_X9VeNrw
- [63] "Lions 360", 2017, National Geographic; <https://www.youtube.com/watch?v=sPyAQQklc1s>
- [64] IEEE Xplore – portale ufficiale IEEE per TVCG, VR, ISMAR, CG&A, ecc; <https://ieeexplore.ieee.org>
- [65] IEEE VR (Conference on Virtual Reality & 3D User Interfaces) – sito ufficiale della conferenza; <https://ieeivr.org>
- [66] IEEE ISMAR (International Symposium on Mixed and Augmented Reality) – AR/MR, interazione e visual computing. <https://ieeismar.org>
- [67] ACM CHI (Human Factors in Computing Systems) – principale conferenza HCI, user studies, usabilità; presence/agency. <https://sigchi.org/conferences>
- [68] ACM UIST (User Interface Software and Technology) – interfacce, dispositivi e tecniche interattive avanzate; <https://uist.acm.org>
- [69] IEEE TVCG (Transactions on Visualization and Computer Graphics) – rivista di riferimento per VR/AR e visual computing; <https://ieeexplore.ieee.org/xpl/RecentIssue.jsp?punumber=2945>
- [70] Frontiers in Virtual Reality – rivista open access su presence, sickness, multisensoriale e applicazioni VR; <https://www.frontiersin.org/journals/virtual-reality>
- [71] Virtual Reality (Springer) – rivista accademica su VR, interazione, immersività e studi utente; <https://www.springer.com/journal/10055>
- [72] IEEE Computer Graphics and Applications (CG&A) – articoli applicativi su VR/AR, rendering e sistemi interattivi; <https://www.computer.org/cga>
- [73] Computers & Graphics (Elsevier) – ricerca su graphics/VR/visualizzazione e strumenti per esperimenti; <https://www.journals.elsevier.com/computers-and-graphics>
- [74] Sensors (MDPI) – special issues frequenti su haptics, wearable sensing e dispositivi multisensoriali; <https://www.mdpi.com/journal/sensors>

- [75] Multimedia Tools and Applications (Springer) – video 360°, QoE, attention guidance, analytics; <https://www.springer.com/journal/11042>
- [76] Presence: Teleoperators & Virtual Environments (MIT Press, archivio) – classici su presence e telepresence; <https://www.mitpressjournals.org/loi/pres>
- [77] SIGGRAPH (ACM) – conferenza/famiglia di venue su computer graphics e tecnologie immersive; <https://www.siggraph.org>

Appendice

Tutti i materiali di supporto sono raccolti in un unico repository GitHub dedicata, organizzata in cartelle tematiche per favorire tracciabilità e replicabilità: codici Arduino e Unity, protocollo e questionari di test, tabelle di tracciamento e log delle sessioni. Il link pubblico è il seguente:

https://github.com/CristianoSantalucia/Tesi_FoMO_CinemaImmersivo