



UNIVERSITAT DE
BARCELONA

Treball final de grau

GRAU D'INFORMÀTICA

Facultat de Matemàtiques i Informàtica
Universitat de Barcelona

Anàlisi de la configuració espacial en
tasques col·laboratives simètriques a
VR

Autor: Carlos Chuan Lleonart

Director: Dra. Inmaculada Rodríguez
Realitzat a: Departament d'enginyeria informàtica

Barcelona, 10 de juny de 2025

Abstract

This project has focused on studying how spatial configuration affects multi-user collaboration in virtual reality environments. An application was developed where two users collaboratively solve a puzzle with three different spatial layouts to analyze the impact on coordination, communication, cognitive load, and satisfaction.

Photon was used for real-time synchronization, and OpenXR was employed to manage movement and interaction with VR devices such as the Pico 4 and Meta Quest 3, providing a coherent and immersive experience with avatars representing the users in the session.

Through the collection of both objective and subjective data, hypotheses were validated indicating that the “U”-shaped configuration, which facilitates visibility and direct collaboration, improves user performance and satisfaction. This work provides a solid foundation for designing collaborative VR environments and paves the way for future expansions in complexity and analysis.

Resum

Aquest projecte s'ha centrat en l'estudi de com la configuració espacial afecta la col·laboració multiusuari en entorns de realitat virtual. S'ha desenvolupat una aplicació on dos usuaris solucionen un puzzle de forma col·laborativa, amb tres distribucions espacials diferents, per analitzar l'impacte en la coordinació, comunicació, càrrega cognitiva i satisfacció.

S'ha utilitzat Photon per sincronitzar en temps real i OpenXR per gestionar el moviment i la interacció amb dispositius VR com Pico 4 i Meta Quest 3, oferint una experiència coherent i immersiva amb avatars que representen els usuaris a la sala.

Mitjançant la recollida de dades objectives i subjectives, s'han validat hipòtesis que indiquen que la configuració en "U", que facilita la visibilitat i la col·laboració directa, millora el rendiment i la satisfacció dels usuaris. Aquest treball aporta una base sòlida per al disseny d'entorns VR col·laboratius i obre camí a futures ampliacions en complexitat i anàlisi.

Agraïments

Vull expressar el meu més sincer agraïment a la meva parella, que després de tants anys d'aguantar-me, continua al meu costat amb un suport incondicional que em dona força cada dia.

També vull donar les gràcies a la meva família per ser la meva base, ajudant a créixer com a persona. El seu suport ha estat fonamental en aquest camí.

Òbviament, vull agrair a tots els amics, familiars i coneguts que han participat en aquest projecte com a voluntaris en les proves, perquè sense la seva col·laboració aquest treball no hagués estat possible.

Finalment, un especial agraïment a la meva tutora, per haver-me proposat aquest tema apassionant que ha convertit aquest projecte en tota una aventura d'aprenentatge i creixement.

Índex

1	Introducció	1
1.1	Context i motivació	1
1.2	Objectius	2
1.2.1	Objectiu general	2
1.3	Planificació	3
1.4	Estructura del document	3
2	Context teòric	5
2.1	Fonaments	5
2.1.1	Realitat virtual	5
2.1.2	Evolució històrica	5
2.2	Components clau: <i>hardware</i> i <i>software</i>	7
2.3	Immersió, presència i interacció	9
2.4	Reptes a la realitat virtual	11
2.4.1	Reptes tècnics	11
2.4.2	Implicacions socials i ètiques	12
2.5	Aplicacions de la realitat virtual	13
2.6	Escenaris multiusuari	14
2.6.1	Representació i identitat dels usuaris	14
2.6.2	Infraestructura tècnica i sincronització	14
2.6.3	Aplicacions i usos dels entorns multiusuari	15
2.6.4	Reptes de disseny i consideracions ètiques	15
2.6.5	Aplicació al projecte	15
3	Estat de l'Art	17
3.1	Recerca	17
3.1.1	Reptes i limitacions en la recerca existent	18

3.2	Contribucions del projecte	19
4	Proposta d'interacció multiusuari	21
4.1	Descripció general de la tasca	21
4.2	Elements de l'escena	21
4.2.1	Taules	22
4.2.2	Objectes del puzzle	23
4.2.3	Elements d'interfície d'usuari	25
4.3	Distribucions espacials	27
4.3.1	Aplicacions de les diferents configuracions espacials	28
4.4	Interaccions i mecàniques	29
4.4.1	Estratègies de moviment	29
4.4.2	Aspectes observables	30
5	Anàlisi del procés	31
5.1	Rols i actors	31
5.2	Flux de l'activitat	32
5.3	Diagrama de casos d'ús	33
5.4	Descripció detallada dels casos d'ús principals	34
6	Disseny de programari	37
6.1	Mòduls principals	37
6.1.1	Mòdul d'interacció	38
6.1.2	Mòdul de xarxa	38
6.1.3	Mòdul de registre	40
6.1.4	Mòdul de sessió	40
6.2	Arquitectura general detallada	41
7	Implementació	43
7.1	Flux complet d'una sessió multiusuari	43
7.2	Interacció i control de les accions	45
7.3	Connectivitat de la sessió	46
7.4	Sincronització d'avatars	48
7.5	Generació i distribució del puzzle	49
7.6	Interacció i control de propietat	52
7.7	Registre d'esdeveniments	54

<i>ÍNDEX</i>	vii
7.7.1 Esdeveniments de Photon	55
7.7.2 Esdeveniments de Unity	56
7.7.3 Esdeveniments de tipus log	56
7.8 Tecnologies usades	57
8 Testatge	59
8.1 Participants i disseny experimental	59
8.2 Procediment experimental	61
8.3 Variables de l'estudi	62
8.3.1 Variables de control	62
8.3.2 Variables dependents	62
8.4 Recollida i anàlisi de dades	63
8.4.1 Estadístiques descriptives	64
8.4.2 Anàlisi estadística i validació d'hipòtesis	65
8.5 Interpretació de resultats i interpretació	66
9 Conclusions i treball futur	67
A Qüestionaris utilitzat	73

Índex de figures

1.1	Diagrama de Gantt amb la planificació general.	3
2.1	Pòster del 1962 anunciant el Sensorama.	6
2.2	Dispositiu VR utilitzat en el projecte: Pico 4 i Meta Quest 3. . . .	7
2.3	Motor gràfic utilitzat en el projecte: Unity.	8
2.4	Visió normal de l'usuari (esquerra) i reduïda en fer algun moviment (dreta).	12
2.5	Exemple avatars en un escenari multiusuari. <i>Font: Unity</i>	14
3.1	Disposicions estudiades a l'article de <i>CollabVR</i> [9]. D'esquerra a dreta: "Configuració en paral·lel", "Configuració cara a cara", "Configuració amb vista lliure"	17
4.1	Taula d'origen amb les diferents peces preparades.	22
4.2	Taula de destí amb les plataformes on s'han de col·locar els objectes.	22
4.3	Plataforma de taula de destí amb diferents objectes.	23
4.4	Taula amb ordre objectiu	23
4.5	D'esquerra a dreta, senzills: esfera i cub. Complexos: casa, piràmide i torre.	24
4.6	Els diferents colors de la paleta creada.	24
4.7	Comptador de progrés amb dos objectes col·locats correctament. . . .	26
4.8	Els diferents menús que hi ha a l'aplicació.	26
4.9	Posició fixa dels menús a l'escenari, que requereix moviment físic per accedir-hi.	26
4.10	Exemple distribució en U.	27
4.11	Exemple distribució objectiu-rere origen.	27
4.12	Exemple distribució objectiu-rere destí.	27
5.1	<i>Storboard</i> representant els diferents estats de la sessió.	32
5.2	Diagrama de casos d'ús.	33

6.1	Diagrama amb els mòduls funcionals i les diferents connexions entre ells.	37
6.2	Mòdul d'interacció amb els seus components principals.	38
6.3	Mòdul de xarxa amb els seus components principals.	39
6.4	Diagrama de xarxa amb estructura seleccionada: client-servidor. . .	39
6.5	Mòdul de registre amb els seus components principals.	40
6.6	Mòdul de sessió amb els seus components principals.	41
6.7	Arquitectura de mòduls amb els components interns.	42
7.1	Diagrama de funcionament de OpenXR. Font: <i>khronos.org</i>	45
7.2	Diferents objectes que conté l'objecte <i>XR Interaction Setup</i> de OpenXR	46
7.3	Elements del mòdul de xarxa en detall.	47
7.4	Diagrama amb estructura client-servidor.	47
7.5	Representació bàsica de l'avatar amb cap i mans.	48
7.6	Imatge dels controladors que veu l'usuari.	49
7.7	Diagrama que il·lustra la sincronització de l'avatar, gestionat per " <i>Player VR Manager</i> ", i la seva comunicació en xarxa amb Photon gestionat per " <i>Photon View</i> " " <i>Photon Transform View</i> ".	50
7.8	Diagrama de relacions entre les diferents classes.	51
7.9	<i>Script</i> " <i>Photon Transform View</i> " amb les tres opcions seleccionades, afegit a un objecte a l'inspector de Unity.	52
7.10	<i>Script</i> " <i>Photon View</i> " associat a un objecte a l'inspector de Unity. .	53
7.11	configuració de l' <i>script</i> " <i>Photon View</i> " associat a un objecte a l'inspector de Unity.	53
7.12		54
7.13	Diagrama de tecnologies usades.	57
8.1	Percentatge d'usuaris que han utilitzat un dispositiu VR previament.	60
8.2	Percentatge d'usuaris segons la seva relació amb la tecnologia. . . .	60
8.3	Box plots de les variables principals per condició experimental. . . .	65

Capítol 1

Introducció

1.1 Context i motivació

La realitat virtual (VR) és una tecnologia immersiva que permet als usuaris endinsar-se en entorns tridimensionals generats digitalment, oferint una experiència única i altament interactiva. Aquesta immersió sensorial ha fomentat l'expansió de la VR en àmbits com l'entreteniment, l'educació, la medicina o la formació professional. A través d'aquesta tecnologia, es poden recrear situacions perilloses de manera segura, simular operacions quirúrgiques amb gran realisme o dur a terme pràctiques de laboratori sense necessitat de recursos físics. Plataformes com *VictoryXR* [28] han demostrat el potencial de la VR per portar l'aula a un entorn immersiu, mentre que aplicacions com *Nanome* [14] o *Oxford Medical Simulation* [16] ofereixen formació especialitzada a través d'experiències interactives.

Tot i aquestes possibilitats, la majoria d'aplicacions de realitat virtual se centren encara en experiències d'usuari individual. No obstant això, hi ha un interès creixent en escenaris col·laboratius, on diversos usuaris comparteixen un mateix espai virtual amb un objectiu comú. Aquest tipus d'interacció multiusuari planteja nous reptes, com ara la coordinació, la comunicació i la distribució espacial dels participants dins l'escena. És precisament en aquest darrer aspecte on aquest treball posa el focus: analitzar com diferents configuracions espacials poden afectar el rendiment, la col·laboració i la sensació d'immersió dels usuaris en una tasca col·laborativa simètrica.

Personalment, aquest projecte neix tant del meu interès en les tecnologies immersives com de la meua voluntat d'explorar la seva aplicació en contextos de col·laboració real. Al llarg del desenvolupament, he pogut enfrontar-me a reptes tant tècnics com metodològics, com ara el desenvolupament en entorns multiusuari o la preparació de sessions de prova amb participants reals. Aquesta experiència m'ha permès aprofundir en àmbits com el disseny d'interaccions en VR, la sincronització d'usuaris i l'anàlisi de comportament col·laboratiu, alhora que he pogut aplicar coneixements tècnics adquirits durant els estudis en un context pràctic i significatiu.

1.2 Objectius

En aquesta secció es defineixen els objectius del projecte, tant l'objectiu general com els diferents objectius específics, centrats en el desenvolupament i anàlisi necessària del projecte.

1.2.1 Objectiu general

L'objectiu general d'aquest treball és analitzar com la configuració espacial en un entorn de VR multiusuari pot influir en el desenvolupament de tasques col·laboratives simètriques. A partir del disseny i implementació d'un escenari interactiu, es busca identificar quina distribució afavoreix una millor comunicació, coordinació i rendiment dels participants, amb l'objectiu final de proporcionar recomanacions per a la creació d'entorns VR més eficients i immersius.

Objectius específics

Per tal d'assolir l'objectiu general plantejat, es defineixen els següents objectius específics, estructurats en quatre grans blocs:

- **Revisió teòrica i anàlisi preliminar**

- Investigar l'estat actual de la recerca en entorns de VR multiusuari.
- Identificar les eines, biblioteques i tecnologies més adequades per al desenvolupament d'experiències col·laboratives en VR.

- **Disseny i desenvolupament de l'entorn virtual**

- Dissenyar un escenari col·laboratiu que permeti comparar diferents configuracions espacials entre usuaris.
- Implementar una tasca col·laborativa simètrica dins l'entorn virtual.
- Integrar mecanismes de mesura per registrar dades rellevants durant l'activitat.

- **Avaluació de la interacció i recollida de dades**

- Analitzar com la distribució espacial afecta la comunicació, coordinació i eficiència dels participants.
- Mesurar indicadors quantitatius com el temps de resolució i qualitatiu com la fluïdesa percebuda.
- Recollir les impressions dels usuaris sobre immersió i usabilitat a través de qüestionaris o entrevistes.

- **Síntesi de resultats i propostes de millora**

- Comparar les dades obtingudes per determinar la configuració més efectiva per a la col·laboració.
- Formular recomanacions per al disseny d'entorns VR col·laboratius basades en els resultats de l'estudi.

1.3 Planificació

Per la planificació del treball s'ha dissenyat el diagrama de Gantt de la Figura 1.1, el qual permet una estructuració temporal clara de les diferents tasques.

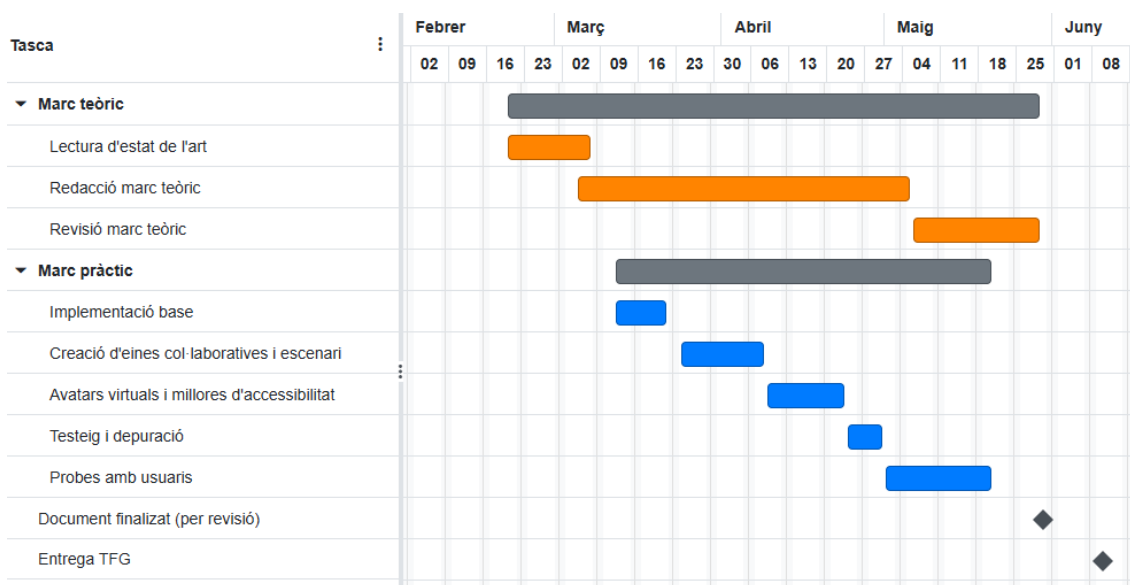


Figura 1.1: Diagrama de Gantt amb la planificació general.

1.4 Estructura del document

Aquest treball s'organitza en les següents seccions:

- **Introducció:** contextualitza la recerca dins del camp de la realitat virtual col·laborativa, presentant la motivació, objectius i hipòtesis del projecte.
- **Context teòric:** aporta un marc teòric de la VR i de la implementació d'aplicacions per la VR per tal d'entendre millors conceptes o procediments posteriors.
- **Estat de l'art:** revisa les principals aportacions en l'àmbit de la col·laboració multiusuari en VR, amb especial atenció a la disposició espacial i a la interacció simètrica.

- **Proposta d'interacció multiusuari a VR:** descriu la mecànica del puzzle col·laboratiu, el disseny de l'escenari, les condicions experimentals i les variables observables.
- **Anàlisi del procés:** descriu el flux detallat de la interacció, amb les diferents responsabilitats i els diferents casos d'ús.
- **Disseny:** presenta l'arquitectura conceptual del sistema, incloent-hi la classificació dels objectes, les distribucions espacials i el flux d'interacció entre els usuaris.
- **Implementació:** detalla els diferents mòduls tècnics del sistema (connexió en xarxa, interacció, sincronització, gestió del puzzle i registre de dades), així com els mecanismes de comunicació i registre.
- **Testatge:** explica la metodologia emprada per a la recollida de dades amb usuaris, la configuració experimental i les mesures recollides. En aquesta també s'hi troba l'exposició dels resultats obtinguts, incloent-hi la seva interpretació en relació amb els objectius plantejats.
- **Conclusions i treball futur:** resumeix les aportacions principals del projecte, reflexiona sobre les limitacions trobades i proposa línies de recerca futures.

Capítol 2

Context teòric

Aquest capítol presenta el marc conceptual necessari per comprendre la influència de la configuració espacial en entorns virtuals multiusuari. Es revisen els fonaments tècnics i teòrics de la VR, així com la seva evolució històrica i les principals teories relacionades amb la col·laboració i interacció en espais immersius.

2.1 Fonaments

2.1.1 Realitat virtual

La VR és una tecnologia que permet als usuaris submergir-se en entorns digitals tridimensionals, proporcionant una experiència immersiva que pot replicar, ampliar o transformar la percepció del món real [10]. Aquesta immersió es basa en la capacitat del sistema per estimular els sentits de manera coherent amb les expectatives de l'usuari [8]. Per tal d'aconseguir aquesta immersió, és necessari un dispositiu físic d'alguna mena, en el nostre cas utilitzarem els visors de VR (HMD) [5, 3]. Aquests visors ens permeten generar la immersió que busquem gràcies a tenir dues pantalles, una a cada ull, mostrant imatges amb estereoscòpia i generant sensació de profunditat com si es tractés del món real [30].

2.1.2 Evolució històrica

La història de la VR no seria possible sense fenòmens com l'estereoscòpia [30]. Descoberta el 1838, l'estereoscòpia descriu la sensació de profunditat generada a partir de la combinació de dues imatges diferenciades per una certa projecció i mostrades a cada ull, gràcies a aquest fenomen obtenim la sensació de profunditat que generen les VR.

Tot i això, no va ser fins al 1962 quan Morton L. Heilig va crear la primera experiència de VR, anomenada Sensorama [24]. Aquesta innovadora màquina permetia gaudir de gravacions 3D amb un grau d'immersió sorprenent per a l'època, ja que incorporava elements multisensorials com la simulació del vent (modulable

a les cames, la cara o tot el cos), vibracions, olors i elements audiovisuals, com es pot veure en el pòster d'anunci a la Figura 2.1.



Figura 2.1: Pòster del 1962 anunciant el Sensorama.

Amb l'augment de la potència computacional, la VR va començar a despertar un gran interès, fet que va permetre el desenvolupament de les primeres ulleres de VR el 1968 [34], aquestes només permetien visualitzar estructures simples en forma d'arestes. Des de llavors, la investigació en VR es va impulsar notablement, especialment en camps com la simulació militar per a l'entrenament de pilots, el tractament psicològic de soldats amb estrès posttraumàtic, ajudant a comprendre i superar aquest trastorn, i en exposicions artístiques d'àmbit científic.

El 1985 es van comercialitzar les primeres ulleres de VR controlades mitjançant guants, anomenades VPL EyePhone [6]. Aquest dispositiu tenia un preu de 250.000 dòlars americans, fet que en limitava l'ús principalment a la recerca.

No va ser fins al 2012, amb el llançament de les Oculus Rift [4], que la VR es va popularitzar globalment. Aquestes ulleres, amb un cost plenament assequible de 300 dòlars americans, van fer accessible la tecnologia al públic general, impulsant així l'interès i la inversió en el sector. Ja el 2016, centenars d'empreses privades invertien grans quantitats en VR, i el 2019 Forbes va descriure aquell any com "l'any en què la realitat virtual es fa real"[23]. L'arribada de la pandèmia de la Covid-19 va accentuar encara més l'ús d'aquesta tecnologia.

Actualment, el mercat de dispositius HMD compta amb models d'alta qualitat de marques com Facebook (Meta), Pico i Apple, acompanyats d'una indústria en

expansió que inclou sectors com els videojocs, les experiències immersives, l'educació i la recerca [1].

2.2 Components clau: *hardware i software*

La VR es basa en dos components fonamentals: el *hardware*, representat principalment per les ulleres de VR (Head-Mounted Displays, HMD), i el *software*, el qual inclou tant les aplicacions desenvolupades per a aquests dispositius com els motors gràfics i altres eines necessàries per generar experiències immersives. Actualment, tot i que cada marca de HMD estableix uns requisits mínims del *software* per ser utilitzat per les seves ulleres, tots es basen en uns mínims establerts en la indústria per garantir una experiència còmoda i immersiva per a la majoria d'usuaris. Aquests inclouen aspectes com la resolució de les pantalles, la taxa de refrec, el seguiment del moviment, la latència i la compatibilitat entre plataformes.

Hardware

En aquest projecte, ja que es treballa en escenaris multiusuari, s'utilitzen dos models de HMD. Per una banda, es treballa amb les Pico 4 [5], un dispositiu autònom que ofereix una resolució de 2160x2160 per ull, una taxa de refrec de fins a 90 Hz i un sistema de seguiment *inside-out*, el qual implica que no requereix sensors externs, només de l'ús de comandaments o, fins i tot, de les pròpies mans. I, per una altra banda, es treballa amb les Meta Quest 3 [3], les quals compten amb unes especificacions un pèl millors a les Pico 4: resolució de 2064x2208 per ull, una taxa de refrec de fins a 120 Hz i també un sistema *inside-out*. Es poden veure els dos models a la Figura 2.2.



Figura 2.2: Dispositiu VR utilitzat en el projecte: Pico 4 i Meta Quest 3.

Aquest hardware permet una implementació flexible i sense dependència d'un ordinador, facilitant les proves en diferents entorns i configuracions espacials.

Software

Per aquesta banda, s'han tingut en compte els següents elements:

- **Motor gràfic:** És molt recomanat treballar amb un motor gràfic quan es crea una experiència de VR, ja que hi ha molts processos que ja estan predissenyats

i optimitzats per a la creació d'aplicacions de tota mena, com podrien ser els processos físics (gravetat, col·lisions o força) o el procés de renderització. Actualment, al mercat hi ha molts motors gràfics disponibles, entre ells es poden trobar motors molt coneguts, com *Unreal Engine* o *Unity*, però n'hi ha molts més [32]. Així doncs, és molt important triar bé un motor gràfic abans de començar un projecte, ja que un cop començat, fer una migració de motor gràfic comporta una càrrega de feina molt gran. Per aquest projecte, s'utilitza *Unity* perquè és molt usat a l'hora de crear aquest tipus de projectes i hi ha molta documentació al respecte, així com totes les distribuïdores de HMD (*Pico* i *Meta*) tenen SDK per aquest motor gràfic.



Figura 2.3: Motor gràfic utilitzat en el projecte: Unity.

- **SDK i integració VR:** Un SDK (*Software Development Kit*) és un kit d'eines que desenvolupa una entitat per tal de facilitar un procés o una integració. Normalment, els SDK són desenvolupats per empreses per tal que sigui més senzill l'ús dels seus dispositius. Les empreses de HMD que s'utilitzen (*Pico* i *Meta*) tenen SDK específics de *Unity* els quals són de màxima utilitat. Paral·lelament, des de 2017 existeix *OpenXR*, un estàndard *open-source* que busca unificar les interfícies dels diferents SDK i visors HMD, cosa que permet als desenvolupadors crear projectes que es puguin utilitzar en diferents marques de HMD afegint una capa de complexitat mínima. En aquest projecte, es fa servir el SDK de *Pico* [20], el SDK de *Meta* [26] i el SDK de *OpenXR* [27].
- **Plataforma de connectivitat:** En aquest projecte, un component principal és la connexió entre usuaris, per tal que es vegin les accions dels altres usuaris i se'ls permeti interactuar amb l'entorn de manera còmoda. Aquest procés s'implementa amb l'ajuda d'eines externes que proveeixen de la infraestructura necessària i permeten una configuració ràpida, si no, comportaria el disseny i implementació de protocols i algoritmes específics per aquest procés, requerint una dedicació excessiva en un àmbit que no és l'objectiu de la investigació. En el mercat, actualment, ja existeixen solucions a aquest problema, les més conegudes són *Photon*, *Mirror* o *Netcode*. En aquest projecte, s'utilitza *Photon* [18]. Aquest disposa de diversos productes, cada un pensat per a un format i grau de complexitat. D'aquests, un dels més antics i estès al mercat és PUN [19]. A causa de la seva senzillesa i facilitat d'implementació, està molt enfocat a projectes de petita escala, fent-lo perfecte per a projectes com aquest.

L'ús de totes aquestes eines facilita enormement la implementació d'aquest tipus de projectes.

2.3 Immersió, presència i interacció

Per tal de crear una experiència de realitat virtual convincent, és essencial entendre els tres principis fonamentals que determinen la sensació d'immersió: la il·lusió del lloc, la il·lusió de plausibilitat i la incorporació del cos virtual.

Il·lusió del lloc (*Place Illusion*)

La il·lusió de lloc fa referència a la sensació que l'usuari ha estat transportat a un espai diferent del món real. Aquesta il·lusió es genera mitjançant un HMD que respon als moviments del cap i del cos, proporcionant una perspectiva coherent i una actualització en temps real del camp visual. Com més natural sigui aquesta resposta i menys retard presenti el sistema (*latency* baixa), més creïble serà la il·lusió.

Factors clau per assolir aquesta il·lusió:

- **Seguiment precís del moviment:** aquest és especialment problemàtic si no s'han calibrat correctament els controladors, generant dissonància en el moviment dels controladors.
- **Alta taxa de refresc i baixa latència:** per evitar la desconexió perceptiva, sensació que se sent quan un es troba separat de si mateix, com si és veïes des de fora.
- **Estereoscòpia i profunditat:** per simular una visió binocular realista, aportant sensació de profunditat gràcies a tècniques com la paral·laxi, la qual descriu un moviment més lent d'objectes que es troben lluny, i més ràpid amb objectes propers.

En aquest projecte, la il·lusió de lloc ha tingut un paper menor, ja que el motor gràfic Unity i els dispositius HMD utilitzats (Pico 4 i Meta Quest 3) estan dissenyats perquè el seguiment, la taxa de refresc i la sensació de profunditat no suposin una càrrega al desenvolupador. Així, només ha calgut evitar una mala optimització de l'aplicació, cosa que, per la dimensió del projecte, no ha estat un problema.

Il·lusió de plausibilitat (*Plausibility Illusion*)

La il·lusió de plausibilitat es refereix a la percepció que el món virtual és real i segueix les lleis de la física i la interacció tal com les esperem. Aquesta il·lusió es basa en la consistència de les regles de l'entorn i en la resposta natural dels elements virtuals a les accions de l'usuari.

Aspectes clau per aconseguir aquesta il·lusió:

- **Interacció intuïtiva:** La capacitat de tocar, agafar i manipular objectes de manera coherent amb les expectatives de l'usuari.

- **Feedback multisensorial:** Sons, vibracions i altres estímuls que reforcen la sensació de realitat.
- **Coherència de l'entorn:** Regles físiques realistes i comportament previsible dels elements virtuals.

La il·lusió de plausibilitat s'ha aconseguit proporcionant una interacció intuïtiva, on els usuaris poden agafar i manipular objectes de manera natural. S'ha integrat *feedback* multisensorial, incloent-hi vibracions, que reforcen la sensació de realisme. A més, l'entorn manté una coherència física i un comportament previsible gràcies al sistema de físiques de Unity, que sustenten la credibilitat de la simulació.

Incorporació del cos virtual (*Embodiment*)

La incorporació del cos virtual es refereix a la percepció que el cos virtual de l'usuari forma part d'ell mateix. Aquesta sensació és fonamental per millorar la immersió, ja que permet a l'usuari identificar-se amb el seu avatar, així com identificar i humanitzar als altres usuaris.

Elements essencials per aconseguir una bona sensació d'*embodiment*:

- **Representació d'extremitats:** Mans virtuals que es mouen de manera sincronitzada amb els controladors de VR.
- **Seguiment corporal:** L'ús del seguiment per reflectir postures i moviments del cos.
- **Interacció natural amb l'entorn:** La possibilitat de veure i utilitzar les mans dins del món virtual afavoreix aquesta incorporació, això inclou l'avatar que es mostra dels altres usuaris, ja que s'ha vist que amb representacions mínimes de cossos humans, ja s'obté aquesta sensació [8]. Així doncs, amb una cara i dues mans, un ja obté una sensació d'*embodiment* i personificació de l'altre molt gran.

S'ha incorporat el cos virtual mitjançant la representació sincronitzada de les mans amb els controladors VR i el seguiment corporal per tal de reflectir moviments i postures reals. L'entorn permet una interacció natural amb els diferents objectes, cosa que implica agafar i interactuar amb objectes petits, però limitant la interacció amb objectes més grans com plataformes o taules, aportant una sensació de realisme necessària amb la interacció amb l'entorn.

Il·lusions i incorporació en entorns multiusuari

En entorns de realitat virtual multiusuari, les il·lusions de lloc, plausibilitat i *embodiment* han de funcionar tant a escala individual com en la percepció dels altres

participants. Els usuaris han de percebre no només el món virtual com a real, sinó també la presència i les accions dels altres usuaris, la qual cosa incrementa la sensació de connexió i col·laboració.

Per assolir-ho, el sistema sincronitza en temps real el seguiment del cap, mans i altres moviments dels avatars, proporcionant una representació coherent i fluida que reflecteix la comunicació no verbal, com gestos o orientació de la mirada. Aquesta sincronització és fonamental per mantenir la coherència social i facilitar la interacció natural entre usuaris, que va més enllà de la simple presència física virtual.

A més, la interacció amb objectes compartits en l'espai virtual ha de ser consistent i responsiva, cosa que permet que les accions d'un usuari siguin visibles i afectin l'entorn percebut per la resta, reforçant així la il·lusió de plausibilitat col·lectiva. Aquesta dinàmica augmenta la sensació de presència social i millora la coordinació en tasques col·laboratives.

2.4 Reptes a la realitat virtual

2.4.1 Reptes tècnics

La implementació d'entorns de VR presenta diversos reptes tècnics que cal tenir en compte per tal de garantir una experiència òptima i segura:

- **Latència i rendiment:** Una alta latència en el seguiment de cap i mans fa que es trenqui la il·lusió de presència. Cal optimitzar tant el renderitzat (*frames per segon*) com la transmissió de dades en escenaris multiusuari per mantenir una resposta en temps real.
- **Qualitat de la imatge i resolució:** La resolució de les pantalles HMD determina la claredat visual, ja que una resolució insuficient provoca “*screen door effect*” [21] i fatiga ocular. També és necessari ajustar el camp de visió (FOV) perquè l'usuari senti una visió natural i no limitada.
- **Seguiment i calibratge:** El seguiment *inside-out* (sense sensors externs) facilita la portabilitat, però pot patir pèrdues de seguiment en presència d'oclusions o condicions de llum variable. El calibratge inicial i continu de l'equip és crític per mantenir coherència espaciotemporal.
- **Interacció i realisme físic:** Reproduir de forma convincent la física d'objectes i la col·lisió entre elements virtuals exigeix motors de físiques potents i ben integrats. L'ús de guants tàctils o *feedback haptic* pot millorar la sensació de manipulació, però afegeix complexitat en el processament. Els dos HMD utilitzats en aquest projecte porten controladors amb *feedback haptic* incorporat, fent que la incorporació del mateix al projecte sigui possible.
- **Cinetosi:** La cinetosi (o mareig del viatger) [29] és la sensació de mareig que es genera quan hi ha una dissonància entre el que es veu i el que se sent, com

quan s'està llegint en un vehicle en moviment. Aquesta sensació és comuna en VR i en limita l'ús per a moltes persones, ja que una sessió d'una hora pot causar malestar durant hores. Per minimitzar-la, en aquest projecte s'ha implementat un efecte visual que limita el camp de visió: quan l'usuari es mou, apareix un cercle al voltant de la càmera que redueix la visió perifèrica i ajuda a disminuir la cinetosi, a la Figura 2.4 es pot veure un exemple demostrant aquest efecte.

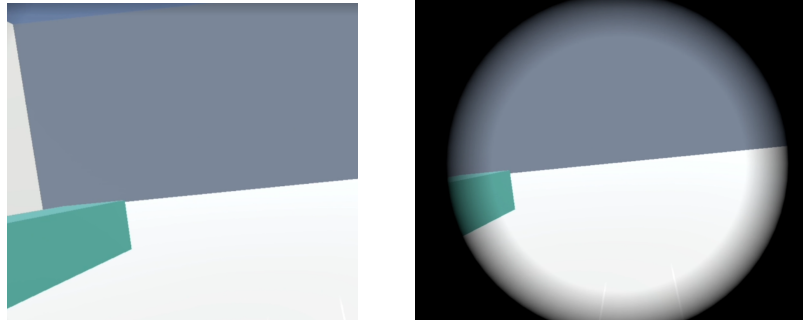


Figura 2.4: Visió normal de l'usuari (esquerra) i reduïda en fer algun moviment (dreta).

2.4.2 Implicacions socials i ètiques

El desplegament massiu de VR també planteja qüestions ètiques i socials que han de ser avaluades:

- **Privacitat i seguretat de dades:** Els sistemes VR recullen dades biomètriques (moviments, gestos, potser dades oculars). Cal establir protocols de xifratge i polítiques de privacitat per protegir la informació personal i evitar usos indeguts.
- **Accessibilitat i inclusió:** No tots els usuaris tenen la mateixa destresa motora, visió o tolerància al mareig per moviment. És imprescindible dissenyar interfícies ajustables (per exemple, opcions de navegació alternatives) i garantir que les tasques col·laboratives estiguin a l'abast de persones amb diferents capacitats.
- **Impacte en la salut mental i social:** L'exposició prolongada a entorns immersius pot generar desconexió social o confusió entre realitat física i virtual. Cal establir recomanacions d'ús segur (pauses, controls de temps) i dissenyar mecàniques que fomentin la comunicació i el retorn al món real.
- **Responsabilitat i conducta en escenaris col·laboratius:** En entorns multiusuari poden sorgir comportaments abusius o assetjament virtual. És necessari incorporar sistemes de moderació (*reporting*, controls d'avatar) i codi de conducta per preservar un espai respectuós.

2.5 Aplicacions de la realitat virtual

La realitat virtual té moltes possibles aplicacions, tot i que es podria dividir en quatre sectors principals.

Educació i formació

La VR s'ha consolidat com una eina potent per a l'aprenentatge immersiu i la formació professional. En entorns d'aprenentatge, la capacitat de representar conceptes abstractes de manera tridimensional facilita la comprensió i la retenció del coneixement, especialment en disciplines com les matemàtiques, la ciència i l'enginyeria [2]. A més, la simulació de situacions reals (per exemple, pràctiques de laboratori o entrenament de protocols d'emergència) permet practicar sense risc, augmentant la seguretat i l'eficàcia de la formació [10].

Salut i teràpia

En l'àmbit de la salut, la VR s'utilitza per a teràpies d'exposició (per exemple, tractament de fòbies i estrès posttraumàtic [22]), rehabilitació motora i gestió del dolor crònic. Els pacients poden interactuar amb entorns controlats que ajusten gradualment el grau d'ansietat o dolor, millorant els resultats terapèutics i la motivació durant la rehabilitació.

Jocs i entreteniment

La indústria de l'entreteniment ha adoptat la VR per crear experiències de joc immersives i socials. Títols com *Beat Saber* o plataformes com *VRChat* permeten als jugadors col·laborar o competir en mons virtuals, amb un alt nivell d'immersió social que no és possible en plataformes convencionals [37]. Aquesta adopció ha obert noves modalitats d'interacció i ha convertit la VR en un mitjà d'entreteniment massiu.

Aplicacions industrials i d'enginyeria

En enginyeria, arquitectura i disseny industrial, la VR s'usa per a la visualització de prototips, simulacions d'assemblatge i revisió de projectes en escala real. Eines de control de versions immersives, com *VRGit*, permeten coordinar equips de treball en el desenvolupament i validació de dissenys 3D, reduint errors i iteracions costoses [38] i accelerant els cicles de desenvolupament i millora la col·laboració entre disciplines.

2.6 Escenaris multiusuari

Els escenaris multiusuari permeten que diversos usuaris comparteixin i interactuïn en un mateix espai virtual. Aquesta característica els converteix en eines especialment potents per a la col·laboració remota, el desenvolupament d'activitats conjuntes i la comunicació immersiva [10].

2.6.1 Representació i identitat dels usuaris

Cada participant en un entorn multiusuari es representa mitjançant un avatar. Aquesta representació pot anar des de figures molt simplifiades fins a models realistes que incorporen gestualitat, expressions facials i veu. La funció dels avatars és clau per a la identificació i la coordinació entre usuaris, ja que permeten transmetre presència, intencions i emocions dins l'espai virtual.

També fomenten la sensació d'*embodiment*, perquè ajuden l'usuari a sentir una identitat reflectida en l'avatar de l'altre. Fins i tot representacions minimalistes, com un cap i unes mans flotants, poden provocar un efecte d'antropomorfització, és a dir, la tendència natural a atribuir característiques humanes a formes simples [8]. Aquest mecanisme cognitiu contribueix a reforçar la percepció que l'altre usuari “habita” l'espai virtual amb un cos reconeixible i que, per conseqüència, nosaltres també ho fem. Es pot veure un exemple d'això amb la Figura 2.5, on es veuen tres usuaris representats virtualment únicament pel cap i les mans.

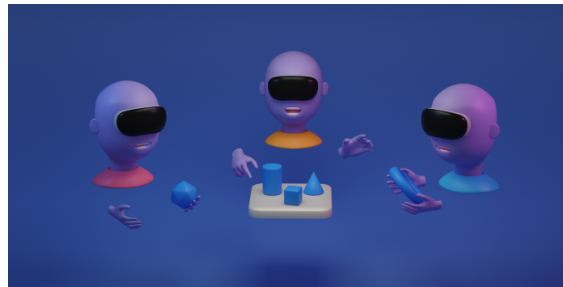


Figura 2.5: Exemple avatars en un escenari multiusuari. *Font: Unity*

La presència social, entesa com la sensació de compartir espai amb altres persones, es veu reforçada per l'ús d'aquests avatars. Aquesta presència esdevé especialment rellevant quan es pretén fomentar la col·laboració i el compromís dins l'experiència immersiva [37].

2.6.2 Infraestructura tècnica i sincronització

Un dels grans reptes dels escenaris multiusuari és garantir una experiència compartida coherent i fluida, el qual requereix una infraestructura que permeti la sincronització en temps real a tots els usuaris tant dels objectes de l'escena com de

l'estat global de l'escena com dels avatars dels usuaris. En aquest projecte s'utilitza Photon PUN [19] per tal de facilitar la implementació d'aquesta infraestructura.

2.6.3 Aplicacions i usos dels entorns multiusuari

Els entorns virtuals multiusuari tenen aplicacions diverses que van més enllà del sector del videojoc. En el context educatiu, permeten la realització de pràctiques a distància, activitats col·laboratives o simulacions compartides. En l'àmbit professional, són útils per a reunions virtuals, sessions de cocreació i formació immersiva.

També poden aplicar-se en l'àmbit mèdic, psicològic i artístic, oferint experiències compartides que abans només eren possibles de forma presencial. La capacitat de simular entorns realistes i de generar interaccions en temps real amplia significativament el ventall de possibilitats d'aquests entorns [38].

2.6.4 Reptes de disseny i consideracions ètiques

El desenvolupament d'un entorn multiusuari no implica únicament reptes tècnics, sinó també qüestions socials i ètiques, per garantir una experiència satisfactòria i respectuosa per als usuaris. S'han de dissenyar interaccions inclusives i accessibles, tenint en compte la diversitat d'usuaris i possibles limitacions físiques o sensorials.

A més, és necessari considerar els efectes psicològics de l'experiència, com la cinetosi [29] o l'impacte emocional derivat de la presència social virtual, requerint la implementació de mecanismes que minimitzin aquests riscos, com ara controls de moviment suaus, opcions de descans o la implementació de barreres de distància, les quals eviten que els usuaris s'apropin els uns als altres.

A causa de l'alt grau d'immersió, els usuaris poden arribar a sentir i patir emocionalment, com si fos de veritat, actes d'abús o de violència verbal a la VR. Un cas recent és el de la investigadora Nina Jane, qui declara haver sigut víctima d'assetjament sexual en una aplicació multiusuari [17].

2.6.5 Aplicació al projecte

En aquest treball, el desenvolupament d'un entorn multiusuari té com a objectiu facilitar la col·laboració entre dos usuaris dins d'una mateixa escena virtual. Mitjançant la sincronització dels objectes i usuaris, es pretén generar una experiència immersiva que promogui la coordinació, la interacció mútua i l'eficàcia en la resolució conjunta de tasques.

Aquest enfocament permet experimentar amb la resposta dels usuaris davant les diferents distribucions espacials dels elements. Aportant coneixement aplicat sobre les possibilitats dels entorns virtuals multiusuari en contextos col·laboratius.

Capítol 3

Estat de l'Art

En aquest capítol es revisa la recerca i els avenços més rellevants en realitat virtual multiusuari, amb especial atenció a la col·laboració immersiva, la configuració espacial i la percepció social. També es presenta com aquest projecte s'insereix en aquest context, aportant una anàlisi pràctica centrada en la interacció simètrica i la sincronització en temps real.

3.1 Recerca

La recerca en entorns de realitat virtual multiusuari ha experimentat un creixement notable en els darrers anys, especialment en àmbits com la col·laboració remota, l'educació i el disseny compartit. L'ús d'espais immersius per a activitats col·laboratives ha motivat l'estudi de com diversos factors, com la configuració espacial, la visibilitat d'objectes i la proximitat entre avatars, poden influir en la comunicació i el rendiment de les tasques executades [2]. Aquests estudis mostren que l'organització física dels participants i la distribució de la informació visual poden millorar la coordinació i l'eficàcia en la resolució conjunta.

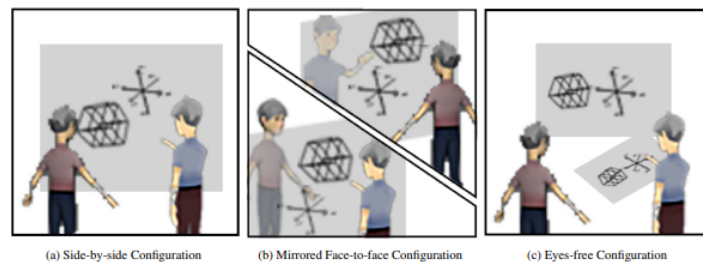


Figura 3.1: Disposicions estudiades a l'article de *CollabVR* [9]. D'esquerra a dreta: “Configuració en paral·lel”, “Configuració cara a cara”, “Configuració amb vista lliure”

Projectes com *CollabVR* [9] han aprofundit en l'impacte de la disposició física dels usuaris (per exemple, cara a cara, paral·lel o en vista lliure, com es pot veure a

la Figura 3.1) en la qualitat de la coordinació i la interacció. Aquestes configuracions poden influir en la facilitat amb què els usuaris s'entenen i sincronitzen durant les tasques col·laboratives. Altres propostes, com *Spacetime* [36], han desenvolupat sistemes que permeten la manipulació col·laborativa d'objectes en VR, mantenint la coherència espacial i temporal de les edicions simultànies, cosa que afavoreix un treball conjunt més fluid i natural.

A més, eines com *VRGit* [38] han explorat la gestió compartida de versions de contingut en entorns immersius, ressaltant la necessitat de sistemes robustos per garantir la persistència i la coherència de l'estat entre els usuaris en projectes col·laboratius complexos.

Pel que fa a l'experiència social i la percepció d'identitat, estudis recents evidencien que la sensació d'agència i presència social pot generar-se fins i tot amb avatars molt esquemàtics, sempre que aquests mantinguin una coherència espacial i temporal amb els moviments dels participants [8]. Aquest fet ha obert noves línies de recerca orientades a identificar els mínims necessaris per generar una sensació efectiva d'*embodiment* i facilitar la interacció fluida entre usuaris en espais virtuals.

3.1.1 Reptes i limitacions en la recerca existent

La realitat virtual multiusuari, tot i el seu desenvolupament accelerat, encara afronta reptes importants que condicionen la seva adopció i qualitat d'ús. Un dels principals obstacles és la complexitat d'assegurar una comunicació i coordinació natural entre usuaris, especialment quan es tracta de replicar les interaccions presencials en un entorn digital. Problemes com la latència, la dessincronització dels estats i la dificultat per gestionar la manipulació simultània d'objectes generen una experiència que pot resultar frustrant o poc intuïtiva [36].

A més, la gestió de versions i canvis simultanis en entorns immersius encara està en una fase inicial, amb solucions emergents com *VRGit* [38] que, malgrat oferir avanços, han de millorar en usabilitat i integració per a fluxos de treball més complexos. Aquesta limitació afecta directament la col·laboració en projectes creatius o tècnics que requereixen coherència i persistència d'informació.

Pel que fa a la dimensió social, encara hi ha reptes per aconseguir una presència social rica i significativa amb avatars lleugers. La recerca apunta que, tot i que la representació mínima amb mans i cap pot facilitar l'*embodiment* [8], la manca de gestualitat i expressivitat limita la profunditat de la interacció social i l'empatia entre usuaris.

Finalment, factors físics i ètics com la qualitat visual, l'efecte *screen door* [21], la cinetosi [29], la privacitat i la seguretat de les dades, així com els riscos d'assetjament virtual [17], plantegen reptes addicionals que cal abordar per garantir una experiència segura, còmoda i sostenible a llarg termini.

Aquest conjunt de limitacions situa la recerca actual en un marc on la millora de la configuració espacial i la interacció entre usuaris poden jugar un paper clau per avançar cap a entorns VR multiusuari més naturals, eficaços i accessibles.

3.2 Contribucions del projecte

- **Comparació directa entre múltiples configuracions espacials**, amb l'objectiu d'observar com la col·locació dels elements afecta la comunicació, la coordinació i la fluïdesa de la interacció.
- **Disseny d'una tasca col·laborativa amb acció i objectiu compartit**, a diferència d'altres propostes que es basen en interaccions asimètriques o rols diferenciats. Aquesta diferenciació permet estudiar la interacció d'igual a igual.
- **Integració pràctica en un sistema multiusuari funcional**, utilitzant una arquitectura basada en Photon PUN 2, que permet la sincronització d'objectes, moviments i accions entre dispositius en temps real [18].
- **Observació qualitativa del comportament col·laboratiu en context VR**, a través d'una avaluació informal centrada en la comunicació espontània, la presa de decisions compartida i l'adaptació espacial dins l'escena.

Aquest projecte no busca contraposar-se a les línies d'investigació existents, sinó que s'hi integra com una aportació complementària i específica. En concret, es focalitza en una situació col·laborativa simètrica on dos usuaris comparteixen responsabilitats i accés equitatiu a la informació per resoldre conjuntament una tasca.

Així, es proposa una visió aplicada i estructurada de com l'entorn físic virtual pot influir en les dinàmiques de col·laboració quan no existeix jerarquia, separació de rols o barreres d'accés a la informació. Aquesta aproximació permet explorar l'equilibri entre el disseny de l'espai, la mecànica de la tasca i la naturalesa de la interacció humana en realitat virtual.

Capítol 4

Proposta d'interacció multiusuari

En aquest capítol es presenta la proposta detallada de l'activitat col·laborativa que permet a dos usuaris treballar conjuntament en la resolució d'un puzzle dins un entorn de realitat virtual. S'explica l'escenari virtual, els elements que el componen, la dinàmica de la tasca i les diferents configuracions espacials que es compararan per analitzar la seva influència en la comunicació, coordinació i eficiència. També es descriuen els mecanismes d'interacció, moviment i seguiment, així com els aspectes observables que permetran avaluar el comportament i l'experiència dels participants.

4.1 Descripció general de la tasca

De forma general, la tasca consisteix a què, entre diversos usuaris, ordenin una seqüència d'objectes a partir d'una solució mostrada. Tant la solució com els objectes a ordenar es troben accessibles pels usuaris en tot moment.

L'activitat es desenvolupa en un escenari format per tres taules diferenciades: la taula d'origen, on es troben totes les peces disponibles; la taula de destí, on els usuaris han de col·locar les peces segons l'ordre correcte; i la taula amb ordre objectiu, on es mostra el patró que s'ha de replicar.

Encara que la “taula amb ordre objectiu” no sigui realment una taula sinó una superfície vertical, més semblant a una paret (com es pot veure a la Figura 4.4), on es mostren els objectes, per comoditat i claredat s'anomena “taula amb ordre objectiu”.

4.2 Elements de l'escena

En aquesta secció es detallen tots els elements que conformen l'escenari on es desenvolupa l'activitat. S'explica la funció i característiques de cadascun dels components principals, incloent-hi les taules que estructuraven l'espai, els objectes que els usuaris han d'ordenar i els menús d'interacció. Aquesta descripció és fonamental per comprendre la dinàmica de la tasca i la forma en què els usuaris interactuen amb

l'entorn.

4.2.1 Taules

A l'escena els usuaris es troben amb tres taules diferents, la taula d'origen, la taula de destí i la taula amb ordre objectiu. Amb aquestes, l'usuari podrà obtenir la informació i realitzar les accions necessàries per a solucionar el puzzle.

Taula d'origen

La taula d'origen és la taula on apareixen les diferents peces a ordenar, com es veu a la Figura 4.1, és de color verd. Aquesta estarà ubicada sempre en paral·lel amb la taula amb ordre objectiu a, aproximadament, 4 metres.

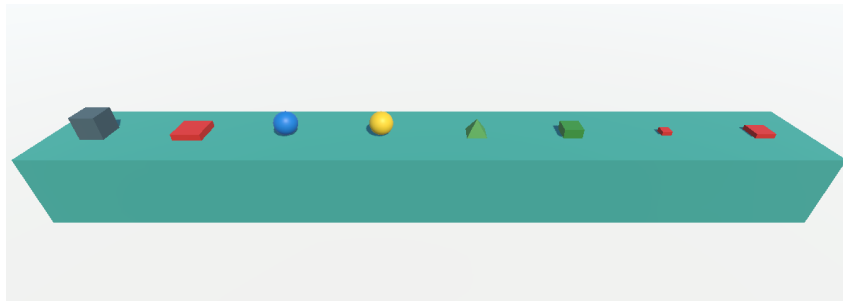


Figura 4.1: Taula d'origen amb les diferents peces preparades.

Taula de destí

La taula de destí, com es veu a la Figura 4.2, és una taula de color morat. Aquesta és on els usuaris hauran de dipositar, a les diferents plataformes, les peces que apareixen a la taula d'origen. En el cas que siguin objectes complexos, s'hauran de posar en l'ordre específic, si no, no serà considerat vàlid.



Figura 4.2: Taula de destí amb les plataformes on s'han de col·locar els objectes.

Les diferents plataformes d'aquesta taula són les responsables principals d'indicar a l'usuari si ha posat de manera correcta o incorrecta una peça. Per mostrar-ho, la plataforma canvia el seu color a color verd o vermell, corresponentment. Es pot

veure un exemple d'això a la Figura 4.3, on es veu una plataforma de la taula de destí a la qual hi hauria d'anar una casa verda, aquesta es torna verda quan es posa una base de la casa, mentre que es torna vermella quan només es posa la segona part de la casa, o quan es posa un objecte que no té l'ordre correcte.

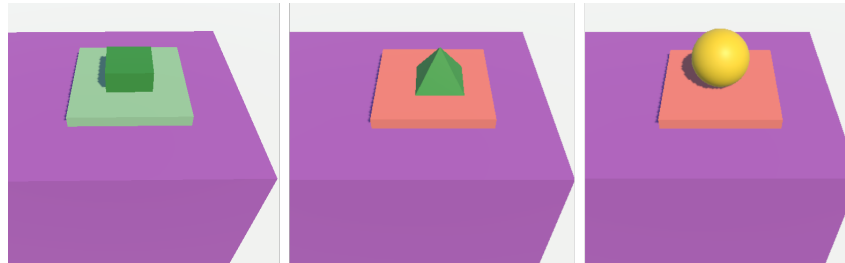


Figura 4.3: Plataforma de taula de destí amb diferents objectes.

Taula amb ordre objectiu

La taula amb ordre objectiu, que com es veu a la Figura 4.4, és de color blau, és on l'usuari es troba amb la mostra dels diferents objectes que haurà d'ordenar. En qualsevol moment que ho trobi necessari, un usuari pot apropar-se a la taula amb ordre objectiu i agafar i moure lliurement els objectes que hi ha per tal d'analitzar-los en més detall. Un cop deixats anar, l'objecte tornarà a posar-se automàticament a l'espai original.

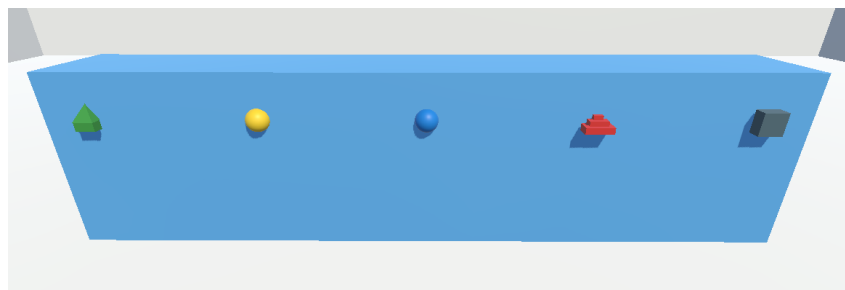


Figura 4.4: Taula amb ordre objectiu

Com es pot veure més endavant, a la secció 4.3, aquesta taula és la que es canvia de posició dins l'escenari per crear les tres distribucions diferents que es volen analitzar.

4.2.2 Objectes del puzzle

L'activitat consisteix a col·locar una sèrie d'objectes en un ordre concret, seguint un patró que es genera de forma aleatòria. Aquest ordre i la composició dels objectes es defineixen combinant dos conjunts: una sèrie de formes d'objectes i una paleta de colors.

El sistema s'assegura que cap objecte tingui un color repetit dins del mateix puzzle, fent que cada combinació sigui única i evitant duplicacions que puguin generar confusió durant la tasca.

Els objectes es classifiquen en dos tipus:

- **Objectes senzills:** formats per una única peça, com ara esferes o cubs, que representen les unitats bàsiques del puzzle.
- **Objectes complexos:** formats per múltiples peces apilables, com “cases” formades per un cub i una piràmide; “piràmides” formades per tres plataformes de diferents mides; o “torres” formades per un cilindre i un con. Aquests exigeixen una col·locació i ordenació més precisa segons el patró, obligant l'usuari a introduir les diferents peces en ordre.

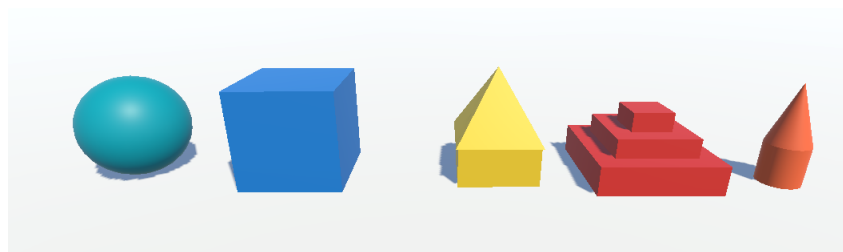


Figura 4.5: D'esquerra a dreta, senzills: esfera i cub. Complexos: casa, piràmide i torre.

Per altra banda, la paleta de colors es compon de 10 colors diferents, com es pot veure a la Figura 4.6



Figura 4.6: Els diferents colors de la paleta creada.

Així doncs, tenint 5 formes d'objectes i 10 colors diferents, on cada objecte pot ser pintat amb qualsevol color de la paleta, es generen un total de 50 objectes únics, ja que cada combinació de forma i color és considerada diferent. Amb això, s'amplia significativament la varietat d'elements disponibles per a la composició del puzzle, oferint un conjunt ampli i divers d'objectes per manipular i ordenar.

Un cop generada la seqüència aleatòria d'objectes, aquests es presenten de manera diferenciada a la taula d'origen que a la taula amb ordre objectiu.

Objectes a la taula d'origen

A la taula d'origen, apareixen totes les diferents peces que componen els objectes a ordenar, per tant, en el cas dels objectes complexos, apareixeran totes les diferents peces a ordenar. Per exemple, en el cas d'una piràmide, apareixeran les tres diferents plataformes que es poden observar a la Figura 4.5 en posicions aleatòries de la taula, com es pot veure a la Figura 4.1. En aquesta, es pot veure una taula d'origen que conté les peces dels següents objectes: cub gris, piràmide vermella, esfera blava, esfera groga i casa verda.

Objectes a la taula amb ordre objectiu

En contraposició, a la taula amb ordre objectiu hi trobem els objectes “sencers”, amb l'ordre objectiu d'esquerra a dreta.

Amb la mateixa sèrie d'objectes mencionada prèviament, es pot veure com quedaria la taula amb ordre objectiu a la Figura 4.4. Amb aquesta, es veu que els usuaris hauran d'introduir a la taula de destí els objectes en el següent ordre: casa verda, esfera groga, esfera blava, piràmide vermella i cub gris.

4.2.3 Elements d'interfície d'usuari

Per garantir una experiència d'usuari clara i intuïtiva durant la resolució del puzzle, s'han incorporat diversos elements d'interfície d'usuari (UI) que proporcionen informació i controls essencials per a la gestió i seguiment de la sessió. Aquests elements ajuden els usuaris a comprendre l'estat actual de la tasca, a prendre decisions informades i a controlar el flux de l'activitat sense perdre la sensació d'immersió ni la naturalesa col·laborativa.

En concret, l'UI està pensada per donar *feedback* immediat sobre el progrés, permetre la selecció i canvi de configuracions espacials i facilitar la finalització de les sessions, tot això integrat físicament dins l'escenari per incentivar una interacció tangible i natural. Així, els usuaris no només interactuen amb els objectes del puzzle, sinó també amb aquests elements UI que actuen com a eines de suport durant el procés.

Els dos elements principals de UI que s'utilitzen són:

- **Comptador de progrés:** Aquest indicador visual, visible a la Figura 4.7, reflecteix en temps real quants objectes han estat col·locats correctament. Permet als usuaris mantenir un seguiment clar i immediat de l'estat de la tasca, fomentant la motivació i facilitant la coordinació per assolir l'objectiu comú.

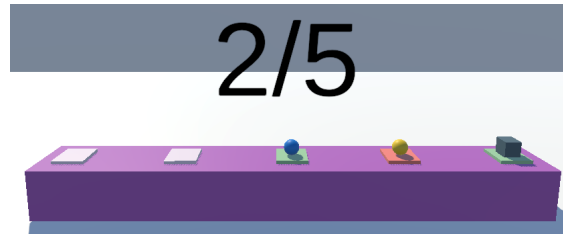


Figura 4.7: Comptador de progrés amb dos objectes col·locats correctament.

- **Controladors de sessió:** Aquests menús, mostrats a la Figura 4.8, ofereixen eines per gestionar l'estat de la sessió en diferents moments. Inclouen el menú inicial per a la connexió dels usuaris, el menú de selecció de distribució espacial que defineix la configuració de la taula amb ordre objectiu, i el menú de control durant la sessió, que permet finalitzar o canviar la configuració de manera accessible i senzilla.

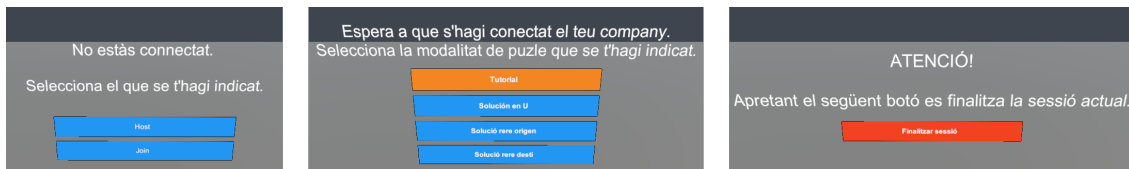


Figura 4.8: Els diferents menús que hi ha a l'aplicació.

Aquests menús es troben en una ubicació fixa dins l'espai virtual, com es mostra a la Figura 4.9, fet que obliga els usuaris a moure's físicament fins a la seva posició per interactuar-hi amb els controladors. Aquest disseny fomenta una interacció més immersiva i evita la sensació d'ús d'interfícies artificials o allunyades de l'entorn, reforçant la sensació d'estar en un espai compartit real.

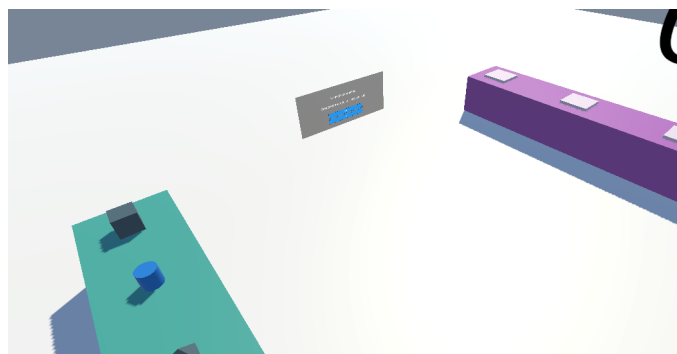


Figura 4.9: Posició fixa dels menús a l'escenari, que requereix moviment físic per accedir-hi.

A més, aquests menús apareixen i desapareixen automàticament segons l'estat de la sessió o les accions dels usuaris, cosa que evita distraccions i permet centrar l'atenció en la tasca quan cal, contribuint a una experiència d'usuari més fluida i natural.

4.3 Distributions espacials

Per estudiar l'impacte de la disposició de l'espai en la coordinació, la comunicació i l'eficiència general, es plantegen tres condicions experimentals, diferenciades segons la posició de la taula amb ordre objectiu:

A – Distribució en “U”: la taula amb ordre objectiu es col·loca en una de les bandes laterals, de manera que els usuaris no tenen un accés directe (a menys que girin la mirada) mentre agafen objectes a la taula d'origen o posen els objectes a la taula de destí.

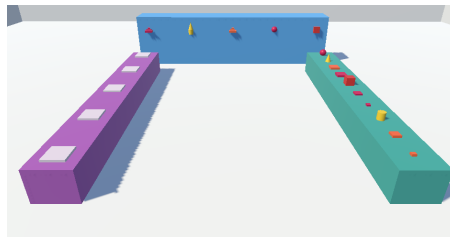


Figura 4.10: Exemple distribució en U.

B – Distribució objectiu-rere origen: la taula amb ordre objectiu està situada darrere la taula d'origen, cosa que permet visualitzar l'ordre final en el moment en què s'agafen els objectes.

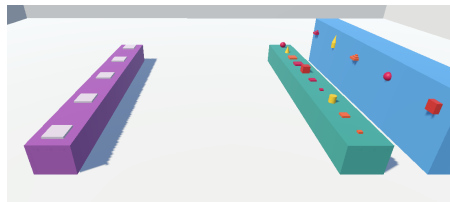


Figura 4.11: Exemple distribució objectiu-rere origen.

C – Distribució objectiu-rere destí: la taula amb ordre objectiu està situada darrere la taula de destí, quedant fora del camp de visió mentre s'agafen els objectes a col·locar.

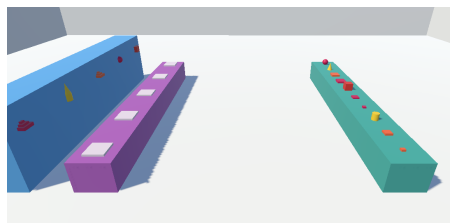


Figura 4.12: Exemple distribució objectiu-rere destí.

A partir d'aquestes configuracions espacials, es pretén mostrar com la ubicació i la visibilitat de la informació condicionen la manera com els usuaris cooperen i

comuniquen. Plantejant situacions com, per exemple, que si la taula amb ordre objectiu és fàcilment visible durant l'activitat, la coordinació sigui més directa i intuïtiva, amb menys necessitat de comunicació verbal explícita. En canvi, quan la informació sigui accessible visualment, els usuaris recorrin més a la comunicació verbal i gestual per mantenir la sincronització i l'eficiència.

Aquestes diferències busquen evidenciar que la disposició física de l'espai és un factor determinant que modela les estratègies col·laboratives i impacta en el rendiment global de la tasca. Així, conèixer i controlar la configuració espacial pot ser clau per dissenyar entorns virtuals més efectius i adaptats a les necessitats dels usuaris.

4.3.1 Aplicacions de les diferents configuracions espacials

Les diferents distribucions espacials proposades en aquest projecte poden reflectir i servir per a diversos escenaris reals on la col·laboració i la coordinació entre usuaris són claus.

- **Distribució en “U”:** Aquesta configuració, on la taula amb ordre objectiu es troba lateralment i no sempre accessible visualment, és representativa de situacions en què la informació de referència està parcialment oculta o s'ha de consultar de manera puntual. Pot ser útil en entorns industrials o de fabricació, on els operaris treballen en diferents zones d'una línia de producció i han de comunicar-se sovint per coordinació, però no sempre poden veure tots els elements simultàniament.
- **Distribució objectiu-rere origen:** Situar la taula amb ordre objectiu darrere la taula d'origen permet als usuaris veure directament el patró mentre recullen les peces. Aquesta disposició pot simular escenaris de formació o ensenyament, on els participants tenen accés constant a la informació guia, com en simulacions educatives o laboratoris virtuals, facilitant la consulta immediata durant l'acció.
- **Distribució objectiu-rere destí:** Quan la taula amb ordre objectiu està darrere la taula de destí i fora del camp de visió durant la manipulació, s'aprofita en situacions en què la memòria de treball i la comunicació verbal són essencials. Això podria reflectir entorns de treball en equip en logística o disseny col·laboratiu, on la coordinació depèn de la comunicació fluida i de compartir informació verbalment mentre es manipulen físicament els elements.

Aquestes diferents configuracions, a més, permeten estudiar com l'accessibilitat visual i la disposició física afecten la naturalesa de la comunicació, la presa de decisions i la distribució de rols en entorns col·laboratius virtuals, aportant coneixement que pot ser aplicat en dissenys d'interfícies i espais VR adaptats a contextos específics.

4.4 Interaccions i mecàniques

L'experiència de l'usuari en aquest escenari virtual es basa en la possibilitat de moure's lliurement dins l'espai i interactuar amb els diferents elements de manera natural i intuïtiva. Els participants utilitzen els controladors dels dispositius Pico 4 i Meta Quest 3, que permeten el seguiment precís de les mans i els moviments corporals.

A més de manipular les peces del puzzle, els usuaris poden accedir i interactuar amb els menús d'interfície ubicats a l'espai, que faciliten la gestió de la sessió i la selecció de configuracions. Aquesta interacció física amb els objectes i els elements UI reforça la sensació d'immersió i promou una comunicació i col·laboració més fluides.

Les diferents peces del puzzle estan programades amb comportaments físics coherents, cosa que permet un ús natural d'aquestes. Quan una peça es col·loca correctament, el sistema proporciona *feedback* visual immediat, canviant el color de la plataforma a verd o vermell per indicar l'estat de la col·locació. També s'ofereix *feedback* tàctil en forma de vibració tant en agafar com en deixar anar un objecte. Aquests *feedbacks* reforcen la il·lusió de plausibilitat esmentada a la secció 2.3, generant en els usuaris la sensació que, tot i no ser visualment realista, es troben en un món real.

4.4.1 Estratègies de moviment

Els usuaris disposen de llibertat de moviment dins l'escenari i, per garantir una experiència còmoda i minimitzar la cinetosi [29], s'han implementat diversos mecanismes de control adaptats al context del projecte.

La cinetosi es produeix per una dissonància entre el moviment percebut visualment, especialment les acceleracions, i el moviment físic real experimentat pel cos. En aplicacions de realitat virtual amb desplaçaments continus i acceleracions evidents, com ara simulacions de muntanyes russes, aquest fenomen és especialment comú. Per això, en molts casos s'utilitza la teleportació com a mètode de moviment, evitant que l'usuari percebi acceleracions i, per tant, reduint la cinetosi.

No obstant això, en el nostre escenari, que és relativament reduït i de curta durada, s'ha optat per un moviment progressiu i fluid amb un dels controladors, ja que la teleportació pot resultar menys natural i més difícil d'adoptar per usuaris novells. Aquest moviment permet als participants desplaçar-se de manera suau per l'espai sense generar un impacte negatiu en la comoditat.

La rotació del cos es controla amb l'altre controlador, i atenent que la majoria dels usuaris són principiants i segons la literatura especialitzada [15], s'ha triat una rotació "a salts", on els canvis d'orientació es realitzen en increments fixos i no de manera contínua. Aquesta estratègia, juntament amb una reducció temporal del camp visual durant la rotació, com es mostra a la Figura 2.4, ajuda a minimitzar el malestar i la sensació de mareig.

Finalment, el moviment del cap correspon directament al moviment físic real dels usuaris, oferint una experiència natural i consistent amb la il·lusió de lloc descrita anteriorment. Aquesta combinació de controls permet explorar l'espai i interactuar amb els objectes i l'entorn sense que el moviment esdevingui una barrera o font d'incomoditat durant l'activitat.

4.4.2 Aspectes observables

Durant les sessions, el sistema registra automàticament un conjunt limitat d'accions rellevants, com ara quan els usuaris agafen o deixen anar un objecte, si la col·locació és correcta o incorrecta, i l'inici i finalització de la sessió per mesurar el temps total de resolució. Aquests registres (*logs*) permeten analitzar alguns aspectes clau de l'activitat, tot i que no cobreixen totes les possibles variables d'interès.

Les dades capturades permetran analitzar:

- El temps total necessari per completar la tasca.
- El nombre i la distribució temporal d'accions d'agafar i deixar d'objectes, que pot ser un indicador indirecte de la fluïdesa de la interacció.
- La quantitat d'objectes col·locats correctament o incorrectament al llarg de la sessió.

Altres aspectes rellevants, com la inactivitat o les estratègies emergents segons la configuració, no es mesuren directament a través dels *logs*, sinó que s'analitzen de forma qualitativa mitjançant observació directa durant les sessions.

Pel que fa a la comunicació verbal, aquesta no es registra automàticament en el sistema, sinó que s'analitza externament a través de gravacions d'àudio o anotacions qualitatives, complementant així la informació obtinguda dels *logs*.

Aquesta combinació de dades quantitatives automàtiques i observacions qualitatives proporciona un marc flexible i complementari per avaluar com l'espai i la dinàmica d'interacció influeixen en la coordinació i el rendiment dels usuaris, i obre la porta a futures ampliacions que permetin una anàlisi més completa i objectiva.

Capítol 5

Anàlisi del procés

En aquest capítol es realitza una descripció detallada del flux d'interacció i les responsabilitats dels diferents participants en l'activitat col·laborativa plantejada. L'objectiu és clarificar els rols, les accions possibles i la dinàmica general de la sessió, facilitant així la comprensió del funcionament intern del sistema i la base per a la implementació tècnica.

5.1 Rols i actors

En el context del sistema multiusuari desenvolupat, es distingeixen principalment dos tipus de rols:

- **Màster:** És l'usuari que crea i controla la sessió. Té accés exclusiu als menús de gestió de la sessió, com la selecció de distribucions espacials i la finalització de la partida. Aquest rol garanteix la coordinació i coherència de l'entorn compartit.
- **Client:** És l'altre participant que s'uneix a la sessió creada pel màster. Té accés a la interacció amb els objectes i a la comunicació amb el màster, però no pot controlar el flux de la sessió.

Aquests rols són assignats automàticament en el moment en què els usuaris s'uneixen a la sessió, adoptant el rol de màster a qui genera la sessió, i el rol de client a qui s'uneix a la sessió, tot utilitzant el primer menú de la Figura 4.8 al qual tots els usuaris tenen accés en començar la sessió, com es veu al pas 1.1 de l'*storyboard* de la Figura 5.1.

Aquesta diferenciació de rols es correspon amb la implementació utilitzada a la infraestructura de connexió (Photon PUN), on el màster és responsable de l'orquestració de la sessió i els clients actuen com a participants actius però amb permisos limitats.

5.2 Flux de l'activitat

Per garantir una comprensió clara i completa del desenvolupament de la tasca col·laborativa, es descriu a continuació el flux d'activitat que recorren els usuaris des de l'entrada a l'entorn fins a la finalització del puzzle. Aquest flux recull les fases i accions principals que defineixen l'experiència i facilita l'anàlisi de la interacció i coordinació dels participants.

A l'*storyboard* de la Figura 5.1 es pot veure la seqüència temporal i el flux entre els diferents estats de la sessió, des de la connexió entre els usuaris, fins a la finalització del puzzle.

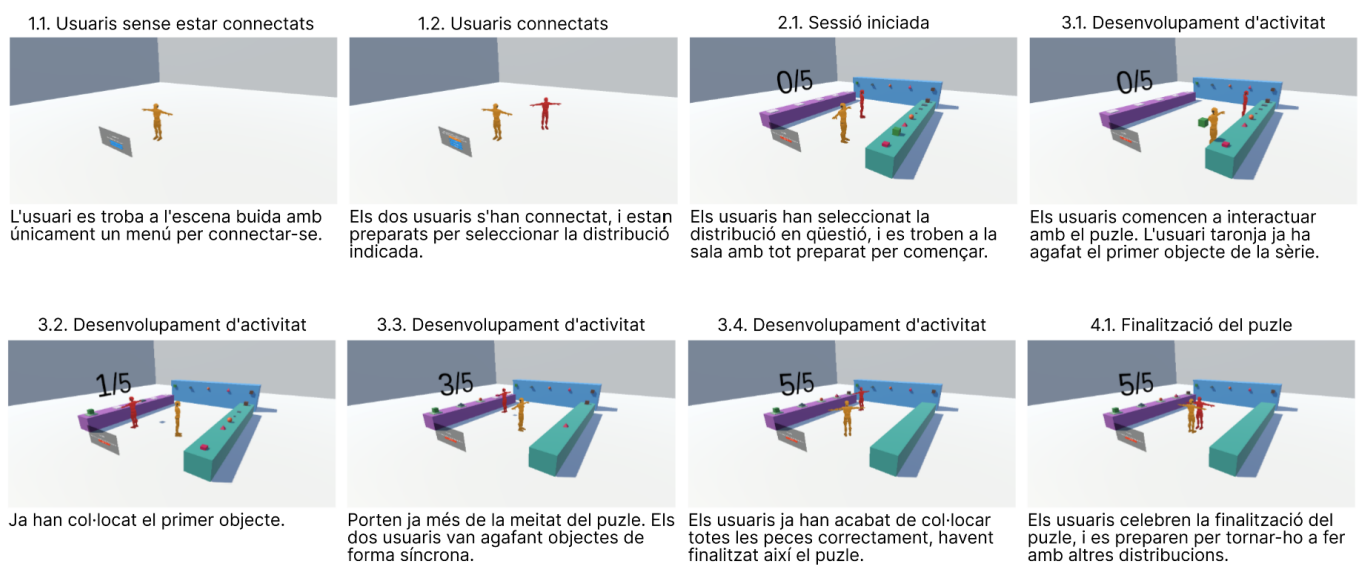


Figura 5.1: *Storyboard* representant els diferents estats de la sessió.

El primer valor dels números del títol, correspon a les següents seccions, on s'entrarà en detall sobre les accions realitzades pels usuaris.

1. Connexió i preparació de la sessió:

Els usuaris accedeixen a l'entorn virtual i es connecten al mateix espai multiusuari el menú corresponent (vegeu secció 4.2.3). Un dels dos usuaris es connecta creant la sessió (prement "Host"), mentre que l'altre es connecta unint-se a una sessió (prement "Join"), en aquest moment ambdós usuaris han obtingut el seu rol, màster i client, respectivament.

En aquest moment, es mostra el menú inicial on poden esperar que l'altre usuari es connecti. Quan tots dos estan preparats, se selecciona la configuració espacial que se'ls hagi indicat. Aquesta pot ser o un tutorial amb una escena senzilla amb únicament dos objectes, cosa que permet als usuaris posar en pràctica els controls explicats prèviament amb una escena amb la distribució en $\bar{U}$ amb únicament dos objectes, o pot ser una de les distribucions d'estudi (vegeu secció 4.3).

2. Inici de la sessió amb la distribució assignada:

Un cop seleccionada la configuració, els usuaris accedeixen a l'escenari on troben les tres taules principals: d'origen, de destí i de solució. En aquest punt, el sistema registra que la sessió ha començat (vegeu secció 4.4.2).

3. Desenvolupament de la tasca col·laborativa:

En aquest punt, els participants ja poden agafar les peces de la taula d'origen i col·locar-les a la taula de destí seguint l'ordre i el patró mostrat a la taula amb ordre objectiu. Durant aquesta fase, s'enregistren totes les accions rellevants (agafar, deixar anar, col·locació correcta o incorrecta) en els *logs* per a posterior anàlisi.

Els usuaris poden moure's lliurement per l'escena i utilitzar la seva comunicació verbal i gestual per coordinar-se. La disposició espacial triada influeix en la facilitat d'accés a la informació i, per tant, en la necessitat de comunicar-se i la manera com s'organitzen.

4. Finalització i *feedback*:

Quan tots els objectes estan correctament col·locats, es registra el final de la sessió i es mostra als usuaris un *feedback* visual de compliment. A continuació, poden triar finalitzar la sessió o reiniciar amb una altra configuració espacial.

5.3 Diagrama de casos d'ús

A continuació, a la Figura 5.2 es presenta un diagrama de casos d'ús que il·lustra els principals actors, rols i accions dins la sessió multiusuari. En aquest es veuen les accions de gestió que pot fer cada usuari segons el seu rol, màster o client, així com les accions durant la sessió que pot realitzar qualsevol dels usuaris.

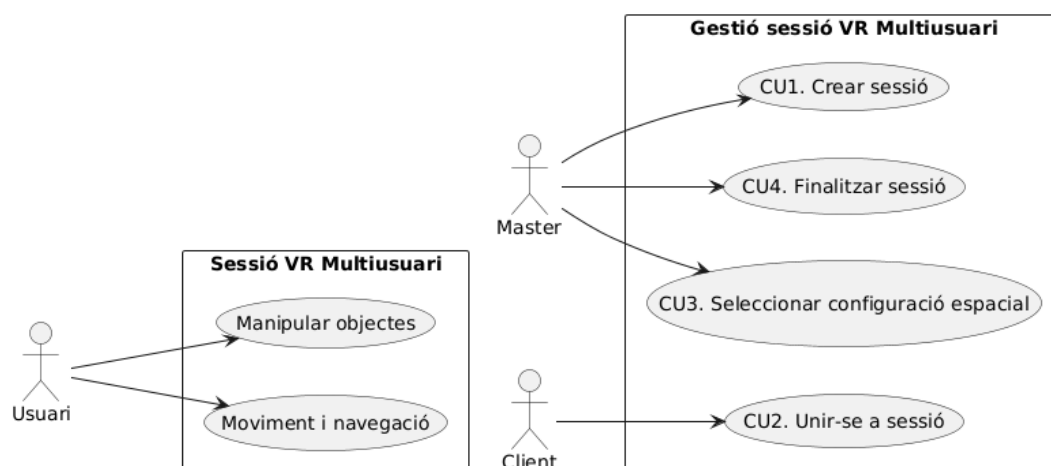


Figura 5.2: Diagrama de casos d'ús.

Aquest diagrama complementa la descripció textual anterior i servirà de refe-

rència per a la implementació i per la comprensió global del sistema per part dels usuaris i desenvolupadors.

5.4 Descripció detallada dels casos d'ús principals

En aquesta secció es formalitzen els casos d'ús, aportant una descripció clara i estructurada que inclou les condicions prèvies, el flux normal d'esdeveniments, possibles variacions i els efectes posteriors a la seva execució. Aquesta anàlisi permet definir de manera precisa el comportament esperat i facilitar la implementació i les proves.

CU1. Crear sessió

Descripció: El Màster crea una nova sessió multiusuari, establint els paràmetres inicials necessaris per al desenvolupament de l'activitat.

Precondicions: El Màster està connectat a la infraestructura de *Photon*.

Flux principal:

1. El Màster inicia la creació de sessió.
2. El sistema genera un identificador únic per la sessió.
3. La sessió queda preparada per rebre clients

Fluxos alternatius: Si el sistema detecta un error en la creació, es cancel·la el procés.

Postcondicions: La sessió està activa i accessible per als Clients.

CU2. Unir-se a sessió

Descripció: Els Clients s'uneixen a una sessió activa per participar en l'activitat.

Precondicions: La sessió ha estat creada i està activa.

Flux principal:

1. El Client selecciona la sessió disponible.
2. El sistema valida la connexió.
3. El Client entra a la sessió i pot iniciar interaccions.

Fluxos alternatius: Si la sessió està plena o no existeix, es cancel·la el procés.

Postcondicions: El Client està connectat i sincronitzat amb la sessió.

CU3. Seleccionar configuració espacial

Descripció: El Màster selecciona la configuració espacial que es vol utilitzar per a la sessió, començant automàticament l'activitat.

Precondicions: La sessió està creada i el Màster està connectat.

Flux principal:

1. El Màster accedeix a les opcions de configuració.
2. El Màster selecciona una de les configuracions disponibles (distribució en U, objectiu-rere origen o objectiu-rere destí).
3. El sistema actualitza la disposició de l'escenari per a tots els usuaris.
4. El sistema genera la seqüència d'elements a ordenar, i genera els objectes necessaris a les diferents taules.

Fluxos alternatius: Si la configuració no és vàlida, es cancel·la i es manté la configuració prèvia.

Postcondicions: La configuració espacial està actualitzada i sincronitzada per tots els usuaris, i l'activitat està en marxa, registrant-se el primer *log*.

CU4. Finalitzar sessió

Descripció: El Màster finalitza la sessió, acabant l'activitat i tancant la connexió.

Precondicions: Sessió en curs.

Flux principal:

1. El Màster sol·licita finalitzar la sessió.
2. El sistema atura el registre d'accions i calcula el temps total.
3. Tots els usuaris reben la notificació de finalització.
4. El sistema recull i emmagatzema les dades per a l'anàlisi.

Fluxos alternatius: Si hi ha errors, es notifica i es permet intentar novament.

Postcondicions: La sessió queda tancada i les dades enregistrades.

CU5. Moviment i navegació

Descripció: Tots els usuaris poden moure's lliurement dins l'escenari virtual utilitzant els controladors VR.

Precondicions: Usuari connectat a la sessió.

Flux principal:

1. L'usuari utilitza els controladors per a desplaçar-se i rotar.

2. El sistema sincronitza els moviments amb la resta d'usuaris.

Postcondicions: El moviment es reflecteix en temps real per a tots els participants.

CU6. Manipular objectes

Descripció: Els usuaris poden agafar, moure i col·locar objectes dins l'escenari.

Precondicions: Usuari connectat i sessió iniciada.

Flux principal:

1. L'usuari agafa un objecte amb el controlador.
2. L'usuari mou l'objecte segons la necessitat de la tasca.
3. L'usuari col·loca l'objecte a la taula de destí.
4. El sistema registra l'acció i comprova la validesa.

Postcondicions: L'objecte es posiciona i l'acció queda registrada per a l'anàlisi, el moviment se sincronitza amb tots els usuaris en tot moment.

CU7. Registrar accions (logs)

Descripció: El sistema registra automàticament les accions rellevants dels usuaris per a la seva posterior anàlisi.

Precondicions: Sessió iniciada.

Flux principal:

1. El sistema captura events com agafar i deixar anar objectes, col·locació correcta o incorrecta, i inici/fi de sessió.
2. El sistema emmagatzema les dades amb marca temporal.

Postcondicions: Els *logs* estan disponibles per a l'estudi del comportament i el rendiment.

Capítol 6

Disseny de programari

En aquest capítol es presenta l'arquitectura general del sistema, descrivint els mòduls principals que gestionen la interacció, la sincronització, el registre i la coordinació de la sessió multiusuari. Aquesta estructura modular facilita una implementació clara i escalable, integrant tant components propis amb eines externes com Unity, OpenXR i Photon.

6.1 Mòduls principals

El sistema es compon de diversos “mòduls” funcionals que cobreixen la interacció, la sincronització, el registre de dades i la gestió del puzzle. Cada un d'aquests mòduls es compon de diferents *scripts* i classes, com es pot veure a la Figura 6.1 aquests mòduls es troben connectats entre ells.

A forma de llegenda general, d'ara en avant, a totes les figures que incloguin mòduls, *scripts* o classes, en cas algun d'aquests tingui el contorn puntejat, implicarà que aquest mòdul ha sigut implementat per alguna entitat externa, com pot ser Photon, Unity o OpenXR, aquesta serà especificada amb l'explicació de la figura. Per exemple, veient la Figura 6.1, veiem que el mòdul d'interacció té el contorn puntejat, això és degut al fet que, com es veu a la següent secció, els components interns, són creats per OpenXR o funcionalitats internes dels HMD.

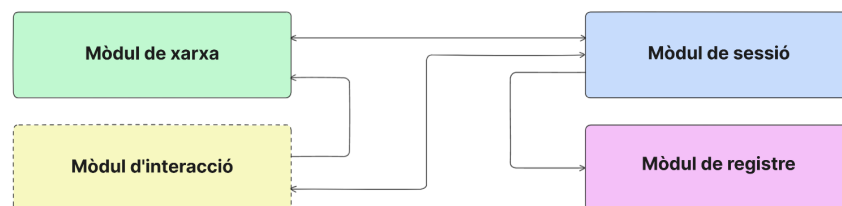


Figura 6.1: Diagrama amb els mòduls funcionals i les diferents connexions entre ells.

6.1.1 Mòdul d'interacció

El mòdul d'interacció gestiona els moviments i accions dels usuaris dins l'escena virtual, incloent-hi la manipulació d'objectes i la interacció amb els menús UI. Utilitza el sistema d'entrada XR i el seguiment dels controladors per permetre una experiència natural i intuïtiva. Gran part de la seva funcionalitat es basa en el SDK OpenXR, que facilita la compatibilitat amb diferents dispositius VR.

La Figura 6.2 mostra els components principals del mòdul i les seves interconnexions, destacant la separació clara de responsabilitats per garantir una implementació flexible i escalable. Com es pot veure, tots els elements tenen el contorn puntejat, denotant que aquests han sigut creats externament, en aquest cas, per Open XR.

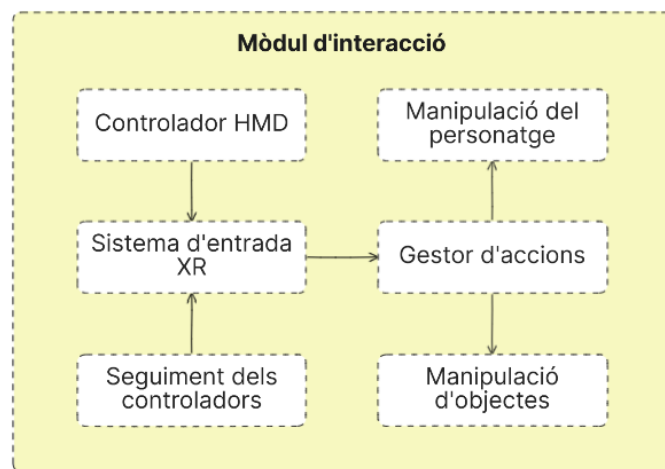


Figura 6.2: Mòdul d'interacció amb els seus components principals.

6.1.2 Mòdul de xarxa

El mòdul de xarxa és responsable de gestionar la comunicació entre els diferents usuaris de la sessió multiusuari, assegurant la sincronització en temps real tant dels avatars com dels objectes i dels esdeveniments que es produeixen dins l'escena.

A la Figura 6.3 es mostra la composició interna d'aquest mòdul, on podem observar diversos controladors especialitzats que treballen conjuntament per mantenir l'estat consistent i actualitzat per a tots els participants:

- **Controlador de sessió:** gestiona la creació, inici, unió i finalització de sessions, així com el control dels usuaris que hi participen. Aquest controlador realment pertany al mòdul de sessió, l'introduïm aquí per tal de visualitzar-ho més còmodament i detallar la seva actuació dins d'aquest mòdul.
- **Controlador de xarxa:** actua com a intermediari principal, enviant i rebent dades de la infraestructura en núvol (servidors Photon) i coordinant la sincronització dels altres controladors.

- **Controlador d'events:** processa els esdeveniments generats pels usuaris, com ara accions sobre els objectes o canvis d'estat.
- **Controlador de personatge virtual:** actualitza la posició, orientació i animacions dels avatars per garantir una representació fluida i coherent.
- **Controlador d'objectes virtuals:** s'encarrega de sincronitzar els objectes manipulables a l'escena, actualitzant la seva posició, estat i interacció amb els usuaris.

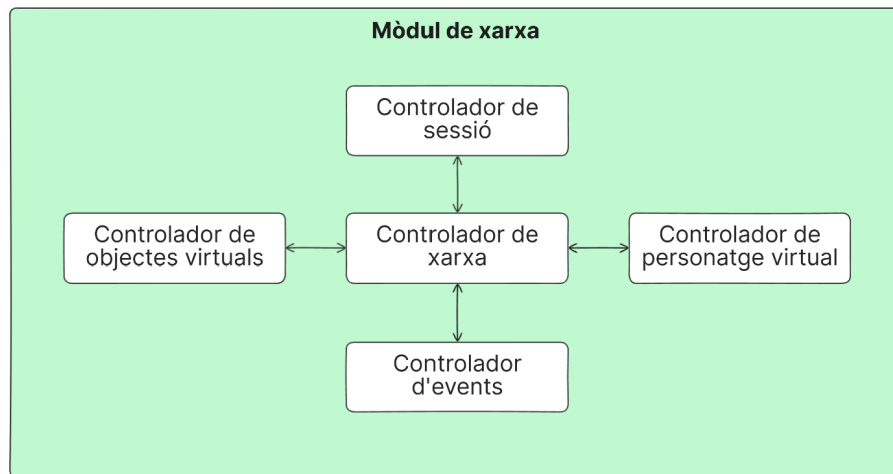


Figura 6.3: Mòdul de xarxa amb els seus components principals.

El funcionament general del sistema de xarxa, que segueix una arquitectura de tipus client-servidor, es representa a la Figura 6.4. En aquest model, els clients (usuaris) es comuniquen amb els servidors en núvol que gestionen la infraestructura Photon. Aquesta estructura permet que les accions i moviments d'un usuari es propaguin en temps real als altres participants, assegurant la sincronització i coherència de l'experiència multiusuari.

Cal destacar que, en aquesta fase de disseny, es presenta un model conceptual general sense especificar jerarquies com "Màster" i "Client", que són pròpies de la implementació concreta amb Photon.

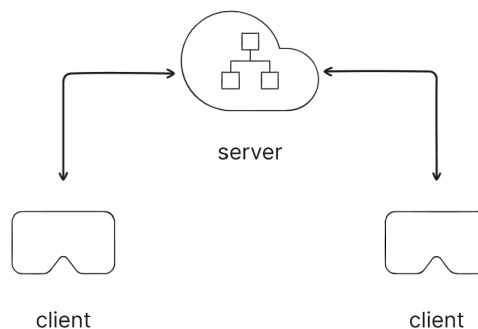


Figura 6.4: Diagrama de xarxa amb estructura seleccionada: client-servidor.

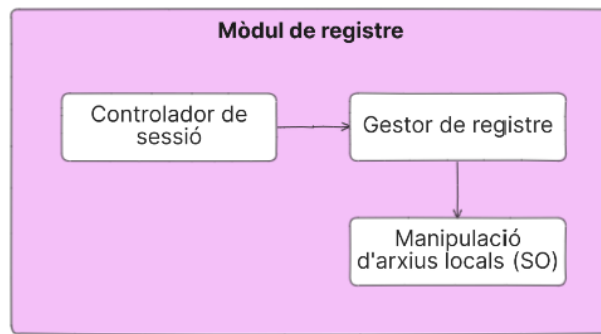


Figura 6.5: Mòdul de registre amb els seus components principals.

Aquest enfocament modular facilita la separació clara de responsabilitats dins el sistema i permet una gestió eficaç dels processos de xarxa, minimitzant la latència i millorant l'experiència de col·laboració en temps real.

6.1.3 Mòdul de registre

El mòdul de registre s'encarrega de gestionar la captura i emmagatzematge de les accions realitzades pels usuaris durant la sessió. A la Figura 6.5 es poden veure els següents components:

- **Controlador de sessió:** Aquest element pertany al mòdul de sessió, però és utilitzat per aquest per conèixer quan són executades les accions rellevants, com agafar o deixar anar objectes, i l'inici i final de sessió.
- **Gestor de registre:** Organitza i prepara les dades per al seu correcte emmagatzematge.
- **Manipulació d'arxius locals:** Escriu i gestiona els fitxers de *logs* al sistema operatiu, assegurant la persistència de les dades.

6.1.4 Mòdul de sessió

El mòdul de sessió és responsable de la gestió global de la sessió, coordinant l'inici, la configuració, la gestió d'accions i la preparació de l'entorn virtual per als usuaris. Com es pot veure a la Figura 6.6, aquesta està composta dels següents elements:

- **Controlador de sessió:** Administra el flux de la sessió, incloent-hi la selecció de l'escenari, l'inici i la finalització d'aquesta, així com la sincronització amb altres mòduls.
- **Escenari seleccionat:** Representa l'acció de seleccionar un escenari, donant peu al controlador a començar a gestionar-ho tot.

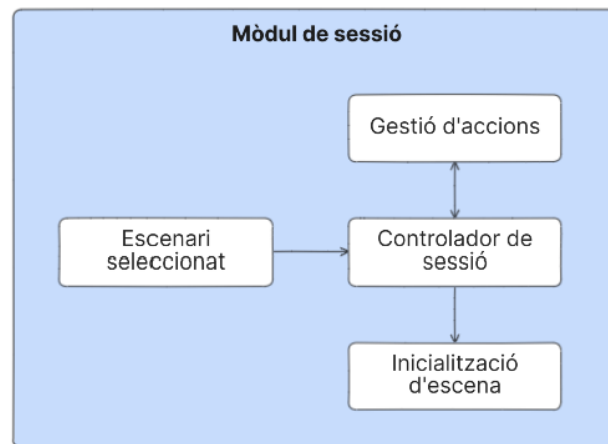


Figura 6.6: Mòdul de sessió amb els seus components principals.

- **Inicialització d'escena:** S'encarrega de carregar i preparar els elements necessaris a l'escenari abans de l'inici de la sessió, assegurant que l'entorn estigui llest per als usuaris.
- **Gestió d'accions:** Aquest element pertany al mòdul d'interacció, és utilitzat per interactuar amb l'estat de la sessió.

6.2 Arquitectura general detallada

En aquesta secció es presenta una síntesi de l'arquitectura del sistema, agrupant la informació mostrada a la Figura 6.1, que mostra els mòduls funcionals i les seves interaccions bàsiques oferint una visió global de l'estructura del sistema, amb la informació exposada a les seccions prèvies, on s'explica en detall cada un dels mòduls, aquesta síntesi es pot veure reflectida la Figura 6.7.

Aquest conjunt de diagrames proporciona una imatge clara i ordenada de l'arquitectura completa, facilitant la comprensió del funcionament i la integració dels diferents blocs que conformen el projecte.

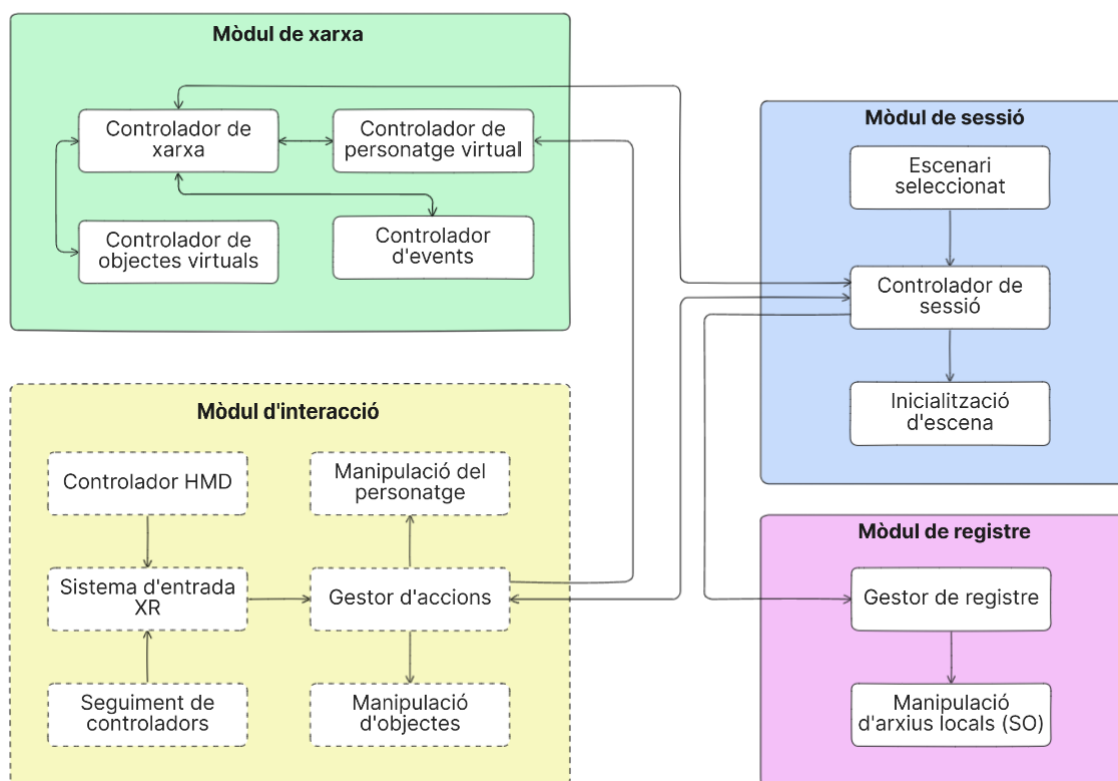


Figura 6.7: Arquitectura de mòduls amb els components interns.

Aquesta estructura modular i ben definida assegura que cada part del sistema pugui evolucionar i adaptar-se a futures necessitats sense afectar la resta, oferint una base sòlida per al desenvolupament i la implementació del projecte.

Capítol 7

Implementació

Aquest capítol descriu com s’ha implementat el sistema multiusuari, detallant les tecnologies utilitzades, la gestió de la interacció en VR, la comunicació en xarxa mitjançant Photon i la sincronització d’avatars i objectes. També s’explica el registre d’esdeveniments per a l’anàlisi posterior, tot oferint una visió clara del funcionament tècnic del projecte. Aquest projecte ha sigut penjat a GitHub [11] per a l’accés de tothom.

7.1 Flux complet d’una sessió multiusuari

Abans de res, es presenta un llistat detallat dels passos que es desenvolupen durant una sessió multiusuari en l’entorn VR, des de la connexió inicial fins a la finalització. Aquest flux descriu les interaccions, sincronitzacions i registres que tenen lloc per garantir una experiència col·laborativa coherent i fluida. Durant les següents seccions, veurem detalls sobre la implementació necessària per poder aconseguir aquest flux complet.

Es pot veure un exemple d’aquest flux a la gravació d’una de les primeres sessions que es va realitzar [12]. En aquest es veuen *bugs* de funcionament que es comenten amb més profunditat a la secció 8.

1. Inici de l’aplicació i connexió

- L’usuari inicia l’aplicació VR en el seu dispositiu (Pico 4 o Meta Quest 3).
- L’aplicació carrega els SDKs corresponents (OpenXR, Photon, Unity).
- L’usuari estableix connexió amb el servidor Photon a partir del menú UI, unint-se a la xarxa multiusuari.

2. Creació o unió a la sessió

- El client que crea la sessió és designat com a *Màster*.
- Els altres usuaris s’uneixen a la sessió com a *Clients*.

- El *Màster* selecciona la configuració espacial per a la generació del puzzle.

3. Generació del puzzle

- A partir de la configuració seleccionada, l'*script* "*Session Controller*" genera la llista d'objectes combinant formes i colors.
- Es crea la seqüència aleatòria d'objectes que conformaran el puzzle, utilitzant una llavor que tots els usuaris han rebut, fent que es generi el mateix per a tothom.
- S'envien esdeveniments interns (Unity) per notificar la creació dels objectes i generar-los a les taules d'origen i de solució.

4. Inici de la tasca

- El comptador de temps s'activa en el moment en què s'inicialitza completament la distribució escollida.
- Els usuaris poden moure's lliurement per l'escena, accedir a les taules i interactuar amb els objectes.

5. Interacció i manipulació

- Els usuaris agafen i deixen anar objectes amb els controladors VR, amb *feedback* tàctil i visual.
- Els canvis en la posició i orientació dels avatars se sincronitzen en temps real via Photon.
- La propietat dels objectes es transfereix automàticament entre usuaris quan aquests interactuen amb els elements (gestió mitjançant l'*script* "*Network Interactable Object*").

6. Registre d'esdeveniments

- Es registren accions clau: inici/final de sessió, agafar/deixar objectes, col·locacions correctes i errònies.
- Els esdeveniments es registren localment en format JSON per a posterior anàlisi.
- La qualitat i quantitat de la comunicació verbal es registra externament (no via logs interns).

7. Seguiment i sincronització d'avatars

- Els avatars representen la posició, rotació i moviment de mans i cap en temps real.
- L'avatar local s'amaga per l'usuari corresponent.
- La informació d'avatar es propaga mitjançant els scripts de Photon.

8. Finalització de la tasca

- Quan es col·loquen correctament tots els objectes, s'atura el comptador de temps.
- Es mostra el resultat final i es poden iniciar noves sessions o distribucions.

9. Sortida de la sessió i desconnexió

- Els usuaris poden abandonar la sessió voluntàriament traient-se el HMD.
- El servidor Photon allibera la sessió quan el *Màster* es desconnecta.
- Les dades dels *logs* es guarden definitivament en local en format *.json*.

7.2 Interacció i control de les accions

Per a utilitzar la informació del moviment, tant amb el HMD com els controladors, que generen els usuaris en interactuar amb l'aplicació, s'utilitza OpenXR. Com podem veure a la Figura 7.1, aquesta eina permet generalitzar l'entrada de dades de diferents proveïdors per tal de ser usada de forma transversal gràcies a generar una interfície que transforma les dades específiques generades per cada un dels diferents proveïdors, a dades generalitzades. Gràcies a això podem crear una aplicació amb un mateix *script* que gestioni el moviment tant a unes HMD de Meta com de Pico, com podria ser el nostre cas.

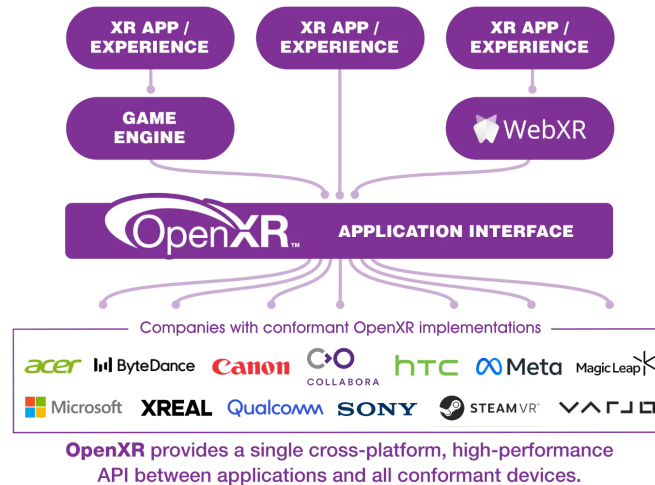


Figura 7.1: Diagrama de funcionament de OpenXR. Font: *khronos.org*.

El SDK de OpenXR, a part de proveir amb aquesta transformació de la informació, també proveeix de *scripts* i objectes de *Unity* predissenyats per gestionar el moviment de l'usuari i les diferents accions realitzades. En el projecte, s'utilitzen aquests objectes de OpenXR, ja que estan optimitzats i permeten una primera configuració de manera molt àgil i ràpida.

Més específicament, per la configuració de la càmera i els controladors, es fa servir l'objecte "*XR Interaction Setup*", el qual proveeix de l'estructura d'objectes

que podem veure a la imatge 7.2 així com *scripts* associats a cada un d'aquests objectes.

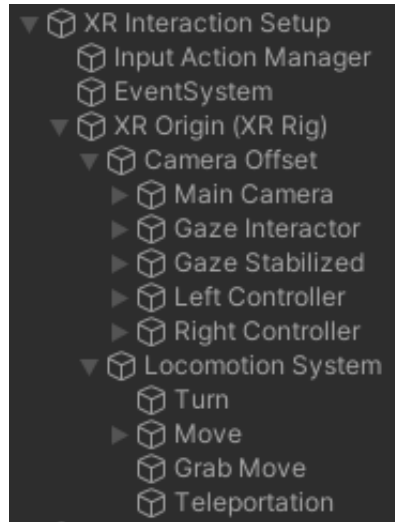


Figura 7.2: Diferents objectes que conté l'objecte *XR Interaction Setup* de OpenXR

Per altra banda, per permetre a un usuari agafar diferents objectes, a aquests se'ls hi ha de posar un l'*script* "*XR Grab Interactable*", també de OpenXR, amb aquest l'objecte ja passa a ser totalment interactiu.

7.3 Connectivitat de la sessió

Com ja s'ha mencionat, per tal de gestionar la connectivitat entre usuaris i tenir una xarxa i interactivitat útil, s'utilitza Photon Engine [18], més específicament el mòdul PUN 2 de Photon. Aquest mòdul és altament utilitzat i molt conegut pels desenvolupadors de Unity, juntament amb la senzillesa d'implementació, ho fa una eina perfecta per aquest projecte, ja que hi ha molta documentació i, en cas de trobar errors, és més senzill de solucionar-los.

Per tal de gestionar els diferents elements de connectivitat, s'ha creat l'*script* "*Network Manager*". Es pot veure aquest a la Figura 7.3, la qual representa la Figura 6.3 vista prèviament, havent-hi substituït els diferents elements del mòdul pels diferents *scripts* utilitzats.

L'*script* "Network Manager" conté, entre d'altres, dues funcions principals: *Host room* i *Join room*. Aquestes dues funcions principals utilitzen funcionalitats de Photon PUN per tal de proveir les configuracions necessàries i poder-se connectar als seus serveis. Cada usuari aplica el següent procés:

1. Connexió amb el servidor de Photon.

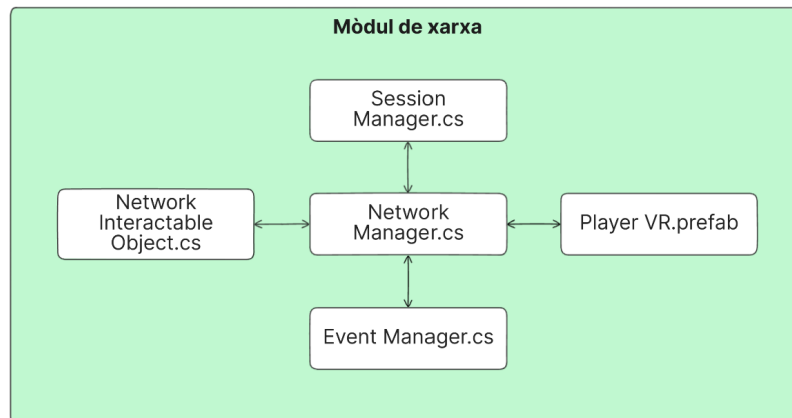


Figura 7.3: Elements del mòdul de xarxa en detall.

2. Es crea o s'uneix a la sessió en qüestió.
3. Es crea un avatar local i remot per a cada usuari.

Un cop ambdós usuaris hagin realitzat aquest procés, a la sessió hi haurà un màster i un client, com ja hem vist a la secció 5.1. Aquests rols es poden veure reflectits al diagrama 7.4. En aquest veiem que l'estructura de xarxa que s'ha seleccionat al projecte és de tipus client-servidor.

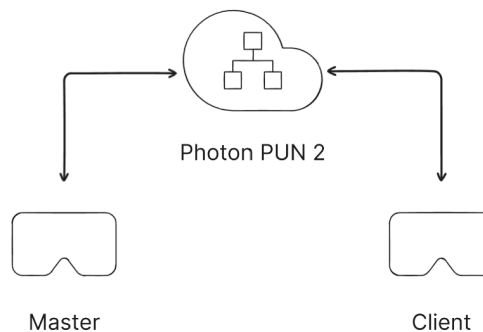


Figura 7.4: Diagrama amb estructura client-servidor.

Gràcies a aquest procés, aconseguim una primera aproximació a la connectivitat entre els usuaris, cosa que els permet trobar-se a la mateixa sessió per poder interactuar conjuntament.

És important tenir present que els rols de màster i client no tenen cap relació amb un element en local o remot. Quan es parla d'un element en local, es parla d'un element que té l'usuari que està renderitzant l'aplicatiu, mentre que aquest mateix element en remot es refereix al mateix objecte, però que estan renderitzant els altres usuaris connectats a la xarxa. Per tant, a ulls de qualsevol usuari, tots els elements són locals, mentre que si els tenen els altres són remots.

7.4 Sincronització d'avatars

Com s'ha descrit al pas 3 de la secció 7.3, la sincronització dels avatars és l'últim pas necessari per aconseguir una experiència multiusuari immersiva i coherent. Per a això, es crea un avatar per a cada usuari que entra a la sessió, el qual és format per formes bàsiques: un cub gran que representa el cap, i dos cubs més petits que representen les mans, tal com es mostra a la Figura 7.5. Aquest avatar es genera a l'usuari que acaba d'entrar a la sessió (el qual s'anomena "local"), però, si hi hagués altres usuaris a la sala, es crearia una instància d'aquest mateix avatar a cada un d'ells (el qual s'anomena "remot"), on aquests estan sincronitzats amb l'avatar generat localment, cosa que permet que tots els usuaris visualitzin el seu moviment.

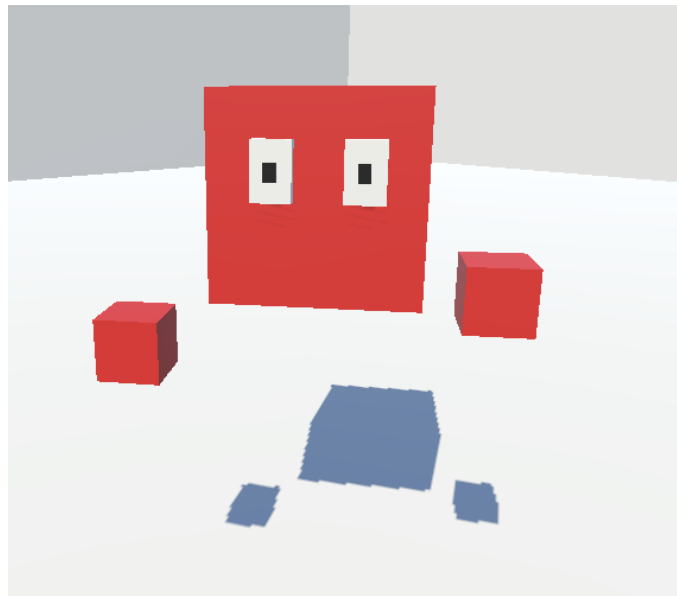


Figura 7.5: Representació bàsica de l'avatar amb cap i mans.

Aquest avatar l'usuari no el veurà aquest avatar en si mateix com si l'estigués controlant, en contraposició aquest veurà dos comandaments com els de la Figura 7.6, generats automàticament per OpenXR, els quals seguiran el moviment dels controladors del món real.

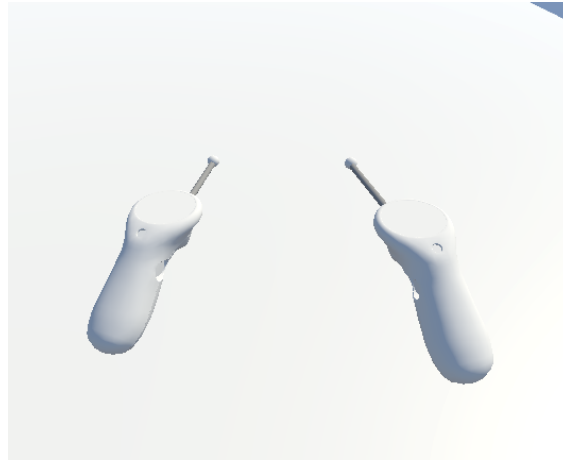


Figura 7.6: Imatge dels controladors que veu l'usuari.

Per a sincronitzar els avatars se segueixen els següents passos, tot utilitzant els elements de la Figura 7.7:

- La informació de la posició i orientació de cada part de l'avatar es vincula a través de l'*script* propi "*Player VR Manager.cs*". Associant els moviments físics de l'usuari (cap i mans) amb els de l'avatar local.
- Un cop l'avatar segueix el moviment de l'usuari, aquesta informació se sincronitza amb els avatars remots mitjançant els *scripts* proporcionats per Photon, com "*Photon View*" i "*Photon Transform View*". Aquests s'encarreguen d'enviar contínuament les dades de posició i rotació als altres usuaris de la sessió, més detall a la secció 7.6.

Per reforçar la distinció entre local i remot, quan el màster crea la sessió, abans que es connecti cap usuari, se li genera un avatar, però únicament de forma local i ell mateix no el veu, ell veu els controladors de la Figura 7.6. En el moment en què entra un altre usuari, a aquest automàticament se li genera un avatar que representa al màster i segueix el moviment del màster, aquest avatar és el que es considera remot. A la Figura 7.7 es pot veure una representació d'això, on només hi ha un avatar local, mentre que hi ha N avatars remots, un per cada client a la sessió.

Gràcies a l'arquitectura de la Figura 7.7, s'aconsegueix una actualització en temps real amb molt baixa latència, que proporciona als usuaris una sensació d'immersió i presència social molt elevada, fonamental per a la col·laboració efectiva en entorns de realitat virtual multiusuari.

7.5 Generació i distribució del puzzle

Abans d'explicar el procés de generació del puzzle, és important conèixer algunes de les classes principals que intervenen en la seva definició i gestió: *Puzzle Element*,

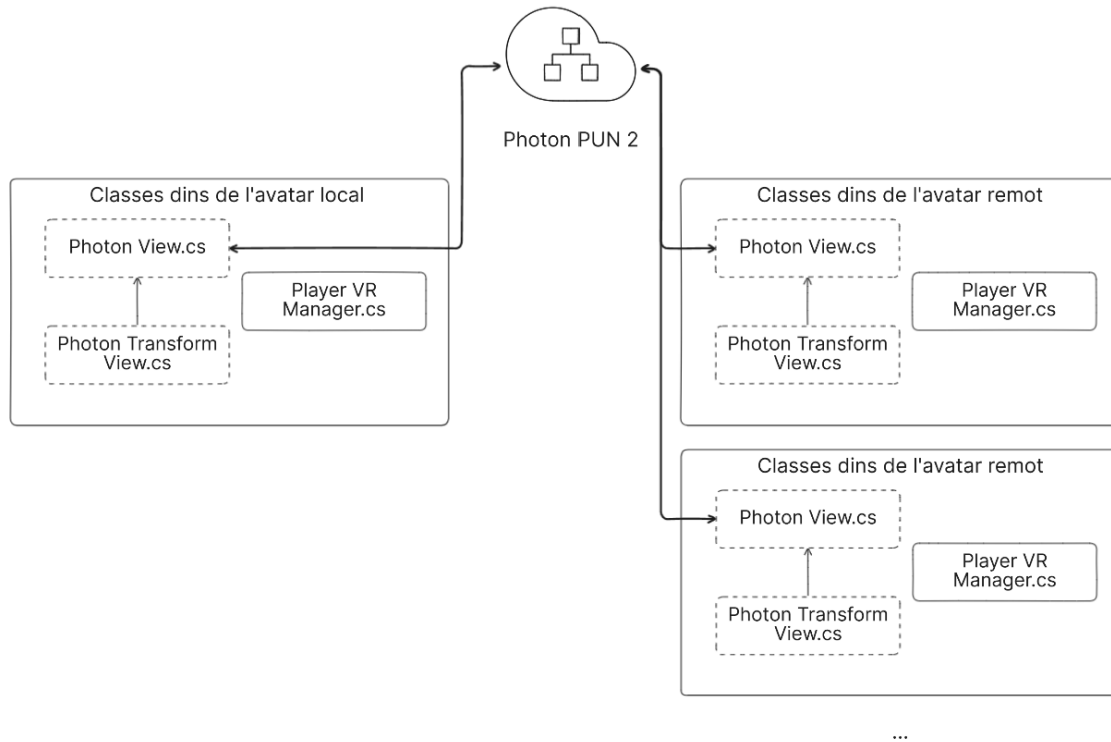


Figura 7.7: Diagrama que il·lustra la sincronització de l'avatar, gestionat per "Player VR Manager", i la seva comunicació en xarxa amb Photon gestionat per "Photon View" i "Photon Transform View".

Puzzle Component i les seves corresponents classes de dades *PuzzleElementData* i *PuzzleComponentData*.

Explicació conceptual dels components

Com ja s'ha vist a la secció 4, els diferents objectes del puzzle es classifiquen en dos tipus: *senzills*, formats per una única peça (per exemple, un cub), i *complexos*, formats per múltiples peces apilables (com una piràmide formada per diverses plataformes).

Per gestionar aquesta jerarquia, cada peça individual es representa mitjançant la classe *Puzzle Component*, que conté informació sobre el grup al qual pertany (per exemple, un identificador únic que combina la forma i el color, com *cube_red* o *pyramid_blue*) i la seva posició dins d'aquest grup.

Aquests components s'agrupen en *Puzzle Elements*, que representen l'objecte complet i faciliten l'accés agrupat a les seves parts internes. Aquestes classes estan dissenyades perquè la informació es pugui configurar fàcilment a través de l'inspector de Unity, facilitant el desenvolupament i la gestió dels objectes.

Finalment, les classes *PuzzleElementData* i *PuzzleComponentData* actuen com a estructures internes de dades, utilitzades per emmagatzemar i processar la informació dels elements i components durant l'execució, per exemple el material i

objecte utilitzats, el nom del grup al qual pertany o l'ordre dins de l'element (en el cas de *PuzzleComponentData*), aquesta informació és generada a temps real durant l'execució, per la qual cosa no és assignada i manipulada des de l'inspector de Unity.

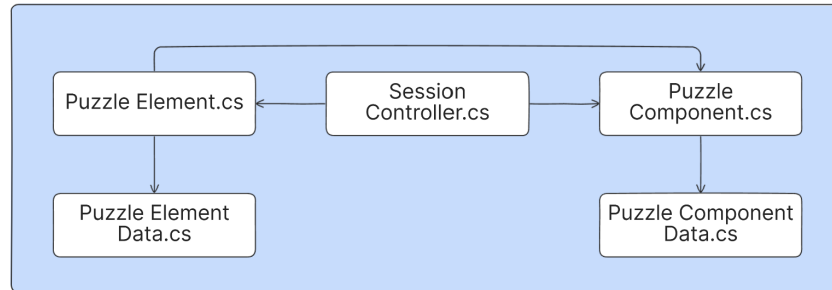


Figura 7.8: Diagrama de relacions entre les diferents classes.

Es pot veure a la Figura 7.8 quina relació tenen les classes mencionades amb la classe central que gestiona tota la sessió.

Flux de generació del puzzle

La classe central que gestiona la creació i configuració del puzzle és el *Session Controller*, dissenyat per oferir una arquitectura flexible i escalable. Aquest controlador utilitza dos llistats configurats a l'inspector: un de materials (colors) i un de *Puzzle Elements* (formes d'objectes).

A partir d'aquests llistats, el procés de generació segueix els passos següents:

1. Combinació de tots els materials amb els *Puzzle Elements* per crear totes les variants possibles d'objectes únics.
2. Aleatorització de la llista de combinacions per garantir variabilitat.
3. Selecció dels primers N elements de la llista aleatoritzada per definir la composició del puzzle actual.
4. Generació i emmagatzematge de la informació de *PuzzleElementData* i *PuzzleComponentData* corresponents.
5. Emissió d'un esdeveniment intern de Unity per notificar la creació del puzzle, cosa que permet que altres components subscrits reaccionin adequadament.

Pseudocodi simplificat de generació

```
// Un pseudocodi de la classe Session Controller
classe SessionController {
    materials = [...]      // Llistat de colors
    puzzleElements = [...]  // Llistat de formes d'objectes
```

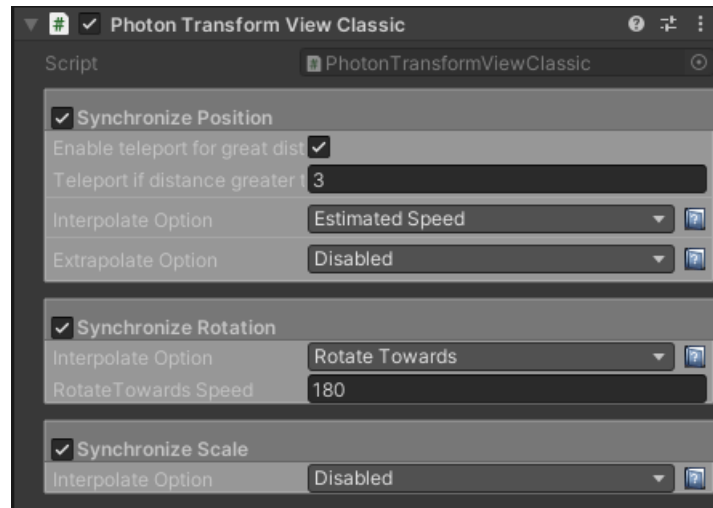


Figura 7.9: *Script* "Photon Transform View" amb les tres opcions seleccionades, afegit a un objecte a l'inspector de Unity.

```

funció generatePuzzle(N) {
    combinations = []
    per cada material a materials:
        per cada element a puzzleElements:
            combinations.add(new PuzzleElement(material, element))
    aleatoritzar(combinations)
    selected = combinations.takeFirst(N)
    emmagatzemarDades(selected)
    notificarSubscriptors()
}
}

```

7.6 Interacció i control de propietat

Per garantir una sincronització consistent a la xarxa dels elements que es mouen dins l'escena, Photon ofereix dos *scripts* fonamentals: *Photon View* i *Photon Transform View*. A continuació s'explica el seu funcionament bàsic.

Photon Transform View

Aquest *script* permet configurar quins atributs de l'objecte es volen sincronitzar mitjançant *Photon View* d'entre posició, rotació i escala. Com es pot veure a la Figura 7.9, un cop seleccionades les propietats, es poden ajustar paràmetres específics per a cadascuna. Aquest *script* és imprescindible quan es treballa amb *Photon View* per garantir la sincronització visual dels objectes a la xarxa.

Photon View

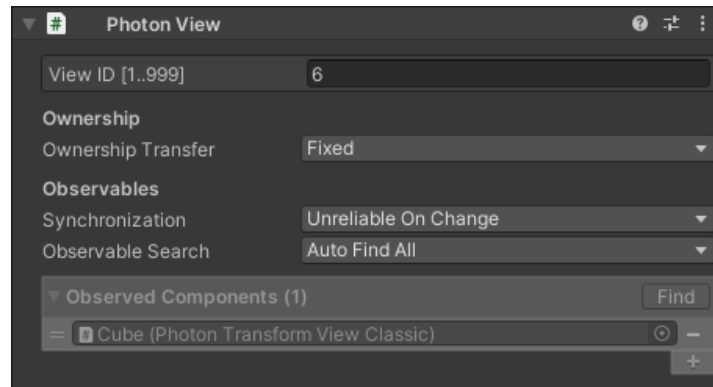


Figura 7.10: *Script* "Photon View" associat a un objecte a l'inspector de Unity.

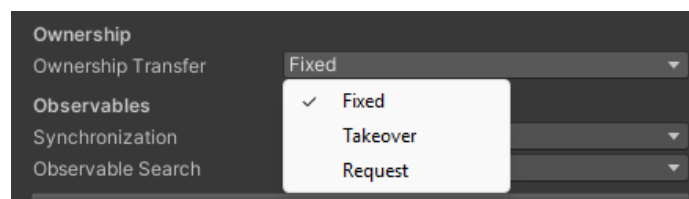


Figura 7.11: configuració de l'*script* "Photon View" associat a un objecte a l'inspector de Unity.

Aquest *script* és clau per a la comunicació d'objectes a través de la xarxa Photon. Com es pot veure a la Figura 7.10 amb la propietat "View ID", aquest assigna un identificador únic (ID) a cada objecte perquè pugui enviar i rebre informació correctament. És fonamental que aquest ID sigui consistent a tots els clients de la xarxa per assegurar que es refereix al mateix objecte. *Photon View* coordina la sincronització aplicant les actualitzacions rebudes a través dels *scripts* associats, com *Photon Transform View*, que transmet la informació de posició i rotació als avatars remots.

Aquí apareix el concepte de propietat, el qual vincula un objecte amb un usuari concret, cosa que permet que només aquest pugui transmetre la informació gestionada pel *Photon Transform View*. Com es mostra a la Figura 7.11, la transferència d'aquesta propietat es configura assignant el comportament corresponent a l'objecte amb *Photon View*. En aquest projecte, s'ha optat per una transferència mitjançant peticions ("request"), per garantir un control total sobre els objectes de l'escena. Així, cada vegada que un usuari intenta manipular un objecte, ha de sol·licitar explícitament la transferència de propietat.

Network Interactable Object

Així doncs, aquest *script* es va crear per poder gestionar la transferència de propietat dels diferents objectes interactius de l'escena, és una extensió del *XR Grab*

Interactable de OpenXR mencionat prèviament, adaptat per gestionar la propietat d'un objecte a la xarxa. Amb aquest, el sistema s'assegura que qualsevol client que agafi un objecte obté la seva propietat automàticament i de manera transparent per a l'usuari.

Quan un objecte és agafat, l'*script Network Interactable Object* sol·licita, mitjançant una funció interna de Photon, la transferència de propietat. Sigui acceptada o no la sol·licitud, s'envia un esdeveniment personalitzat (més informació respecte els esdeveniments a la secció 7.7) als altres clients que l'objecte ha canviat de propietari. D'aquesta manera es manté la coherència en tots els clients.

Els passos principals són:

- **Usuari agafa un objecte:** Un cop un usuari agafa un objecte es realitza una petició de transferència i, suposant que la resposta serà vàlida, automàticament s'envia un esdeveniment personalitzat als altres usuaris informant que l'objecte ha canviat de propietari.
- **Gestió de resta d'usuaris:** Un cop s'aprova la sol·licitud o un cop es rep l'esdeveniment personalitzat, la resta d'usuaris ajusten les propietats de l'objecte perquè no interfereixin amb el moviment del propietari actual.

Amb aquests elements, s'obté una configuració d'un objecte com la que s'observa a la Figura 7.12, amb la qual es pot interactuar de forma síncrona per múltiples usuaris transferint la propietat de forma transparent i automàtica.

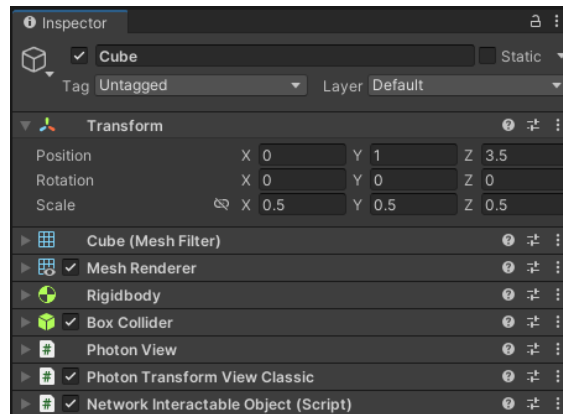


Figura 7.12

7.7 Registre d'esdeveniments

Per gestionar l'aplicació, es fa ús de tres tipus d'esdeveniments: esdeveniments interns de Photon, esdeveniments interns de Unity i esdeveniments registrats per l'aplicació en format *log*. Cadascun d'aquests tipus juga un paper fonamental en l'execució del sistema i permet obtenir i gestionar informació de manera asíncrona.

7.7.1 Esdeveniments de Photon

Atès que l'arquitectura de la xarxa és de tipus client-servidor (com vist a la Figura 7.4), tota comunicació entre clients ha de passar per la xarxa. Per facilitar aquest procés, Photon ofereix un sistema d'esdeveniments, cosa que permet enviar informació a tots els clients de manera ràpida i configurable.

Aquests esdeveniments es componen i s'utilitzen de la següent manera:

Pseudocodi: Estructura d'un esdeveniment de Photon

```
// Definició del codi de l'esdeveniment (ha de ser igual a l'enviament i recepció).
byte eventCode = 01;

// Dades a enviar.
object[] data = [informació_1, informació_2, ...];

// S'aixeca l'esdeveniment amb el codi i les dades associades.
PhotonNetwork.RaiseEvent(eventCode, data);
```

Un cop s'aixeca un esdeveniment, és necessari disposar d'un component dedicat a escoltar i gestionar aquests esdeveniments. En aquest projecte, aquest paper el compleix l'*script "Event Manager"*, amb un funcionament similar al següent:

Estructura de Event Manager

```
OnEvent(event) {
    switch(event.Code) {
        case 01:
            object[] data = event.CustomData;
            // Processar dades...
            break;
        // Altres casos...
    }
}
```

Amb unes poques línies de codi es poden enviar i rebre esdeveniments personalitzats, el que facilita molt la sincronització en moments claus. En aquest projecte, s'han definit tres esdeveniments principals:

- **Grabbed My Object (01):** Utilitzat a l'*script Network Interactable Object* per indicar la transferència de propietat d'un objecte a qui l'envia. No porta informació addicional.
- **Create Scene (02):** Envia la selecció de l'escena realitzada per l'usuari màster, incloent-hi el tipus d'escena i la llavor aleatòria per a la generació sincronitzada entre clients.

- **Delete Scene (03):** Indica la finalització de l'escena per part del màster, i provoca l'eliminació i restabliment dels elements a tots els clients.

7.7.2 Esdeveniments de Unity

Per gestionar el flux d'accions i la generació d'elements dins l'aplicació, s'utilitzen esdeveniments de Unity basats en el patró *observer* [7], que permeten als diferents *scripts* subscriure's i reaccionar quan s'aixequi un esdeveniment.

En aquest projecte, aquest patró s'aplica en els següents casos principals:

- **Generació de la sessió:** Quan el controlador de sessió genera la sèrie aleatòria d'objectes, notifica als *scripts* subscrits perquè generin els elements necessaris. Per exemple, la taula amb ordre objectiu rep aquesta notificació, consulta la sèrie d'objectes seleccionada i crea els objectes per a la seva visualització.
- **Destrucció de la sessió:** Quan se sol·licita destruir la sessió actual, el controlador notifica als *scripts* associats perquè destrueixin el que sigui necessari per restablir la sessió.
- **Actualització del comptador de progrés:** Cada cop que es modifica l'estat d'una plataforma a la taula de destí, es genera un esdeveniment que actualitza de manera reactiva el comptador de progrés.

Aquests esdeveniments faciliten la coordinació i ordenació de les accions, cosa que permet gestionar de forma eficient processos que poden ser asíncrons o dependre d'altres esdeveniments.

7.7.3 Esdeveniments de tipus log

Per obtenir informació que permeti dur a terme una anàlisi posterior, es registren diferents accions claus realitzades pels usuaris durant la sessió. Aquesta informació s'emmagatzema en arxius *.json* un cop finalitzada la sessió. Cada esdeveniment conté les següents propietats: *nom*, *timestamp*, *payload* i *from*. Aquesta estructura permet personalitzar els esdeveniments segons les necessitats, mantenint la seqüència temporal dels fets. La propietat *payload* és un text codificat en format *key : valor*;

A continuació es detalla la llista d'esdeveniments que es registren:

- **Task started:** generat quan s'inicia l'escena.
Payload: tipus d'escena començada, entre: "Tutorial", "UShape", "BehindStart" i "BehindEnd".
- **Task finished:** generat quan s'acaba l'escena.
No conté *payload*.

- **Object picked:** generat quan un client agafa un objecte.
Payload: nom de l'objecte agafat.
- **Object placed:** generat quan un client deixa un objecte a una plataforma.
Payload: nom de l'objecte i plataforma on s'ha deixat.
- **Error placement:** generat quan un client deixa un objecte en una plataforma errònia.
Payload: plataforma on s'ha deixat.

Gràcies a aquests esdeveniments, es pot fer un seguiment posterior dels usuaris i detectar patrons de comportament. Durant la sessió, els esdeveniments es van acumulant a l'script "*Event Logger*", abans de tancar la sessió de Unity, aquesta informació es converteix a format JSON i s'emmagatzema localment.

7.8 Tecnologies usades

Per a dur a terme aquest projecte, s'han utilitzat diverses eines i tecnologies, les quals es mostren a la figura 7.13. A la primera fila s'hi troben les tecnologies específiques dels HMD: Meta [26] i Pico [20]. A continuació, es presenta l'eina que generalitza l'ús dels diferents HMD, OpenXR [27]. Seguit, s'hi troba el motor gràfic Unity [25]. Finalment, a la darrera fila, s'inclou el proveïdor de xarxa Photon [18], que gestiona la comunicació multiusuari, així com l'editor de codi Visual Studio [13] utilitzat per al desenvolupament del projecte.

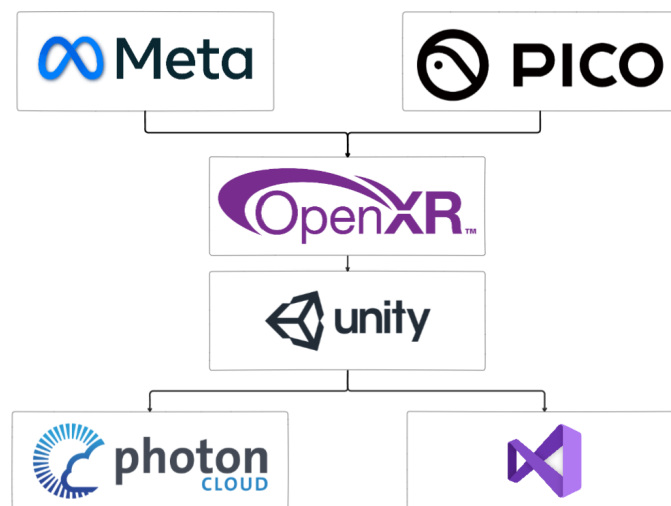


Figura 7.13: Diagrama de tecnologies usades.

Capítol 8

Testatge

Aquest capítol descriu el disseny experimental i la metodologia utilitzada per avaluar el sistema desenvolupat. Es detallen les característiques dels participants, les variables de control i dependents, així com els procediments i eines emprades per recollir i analitzar les dades. L'objectiu és garantir una avaluació rigorosa i reproducible dels efectes de les diferents distribucions espacials sobre la col·laboració en realitat virtual multiusuari.

8.1 Participants i disseny experimental

L'estudi s'ha realitzat amb un total de 9 parelles de participants, seleccionades segons criteris de comoditat i disponibilitat. Per aquest motiu, es va aprofitar la coincidència amb amics, familiars i coneguts, organitzant sessions amb persones que visquessin a prop o amb les quals fos fàcil coincidir. Totes les parelles van participar voluntàriament i, com es pot veure a la Figura 8.1, la majoria no havien tingut un contacte previ amb VR, però com es pot veure a la Figura 8.2, la gran majoria són usuaris habituals i la meitat són molt habituals o experts amb la tecnologia, fent-los perfils adequats per a aquest estudi.

El disseny experimental és de tipus *within-subjects*, on cada parella experimenta les tres configuracions espacials (Distribució en “U”, Distribució objectiu-rere origen i Distribució objectiu-rere destí). Per controlar possibles efectes d'ordre com ara l'aprenentatge previ (conegut com a *carryover effect* [35], s'aplica un contrabalançament mitjançant una matriu de *Latin Square* [31]. Això assegura que cada configuració aparegui en cadascuna de les tres posicions d'execució de manera equitativa, cosa que permet una anàlisi estadística més robusta i una millor comparació entre condicions. Totes les sessions van ser moderades per l'autor, el qual també feia d'observador.

Previ a començar les proves, es confirma que la parella estan disposats a dedicar aproximadament 20' per dur a terme la prova, ja que és el que dura, un cop confirmat, es comença la sessió. El moderador prepara els HMD i els espais on els usuaris realitzaran la prova i se'ls proporciona una introducció detallada sobre els objectius

Has fet servir un dispositiu de VR abans?

● Sí, però molt puntualment (1-2 vegades) ● No, mai ● Sí, força sovint (jocs, aplicacions, etc.)



Figura 8.1: Percentatge d'usuaris que han utilitzat un dispositiu VR previament.

Com et consideres en relació amb la tecnologia?

● Molt habitual/da o expert/a ● Usuari/ària mitjà/na ● Poc habitual/da



Figura 8.2: Percentatge d'usuaris segons la seva relació amb la tecnologia.

i la mecànica de la sessió. Aquest text introductori, el qual es troba a l'apèndix A amb el qüestionari realitzat, explica la dinàmica general, la importància de la col·laboració i els controls necessaris per a la correcta resolució del puzzle. Seguit es realitza un tutorial pràctic per familiaritzar els participants amb els controls dels dispositius VR i les interaccions amb els objectes i elements de l'escena. Aquest tutorial tracta d'una escena bàsica amb dos elements a ordenar, s'anima a la parella a perdre temps interactuant amb l'entorn de forma general, sense pressions.

Finalment, per garantir la salut i el benestar dels participants, se'ls pregunta després de cada distribució si experimenten símptomes de cinetosi [29]. En cas que algun usuari manifesti aquests símptomes, la sessió s'atura per oferir temps de recuperació o, si cal, per aturar la prova totalment. No obstant això, no es va registrar cap cas i totes les sessions es van completar sense incidències.

8.2 Procediment experimental

Les sessions es desenvolupen de la següent manera:

1. Els participants responen a preguntes demogràfiques.
2. S'ofereix una introducció i lectura del funcionament de la tasca.
3. Es realitza un tutorial amb objectes bàsics per familiaritzar-se amb controls i moviment.
4. Es resol el puzzle en les tres configuracions espacials, amb ordre contrabalançat.
5. Després de cada sessió, els participants completen el qüestionari RAW-TLX [33] en format paper.
6. En finalitzar totes les proves, es recull un qüestionari general sobre quina distribució prefereixen, es poden veure les preguntes realitzades a l'apèndix A.

Com es pot veure a la gravació de la demo [12], en iniciar les sessions amb els usuaris es van detectar diversos *bugs*, com per exemple un estat "flotant" dels objectes quan es col·locaven a les plataformes de la taula de destí. Tot i que aquests errors es van corregir en la versió final del codi [11], durant totes les sessions de test els usuaris van experimentar les mateixes dificultats, ja que arreglar-los hauria trencat la integritat del procés experimental.

Aquest fet ha tingut com a conseqüència que els *logs* generats no fossin útils, ja que el sistema no va poder detectar correctament la finalització de les sessions. L'única dada crítica recollida, el temps total de la sessió, es va mesurar manualment pel moderador de forma externa, la qual cosa va implicar una pèrdua significativa de precisió. Malgrat això, totes les parelles van ser afectades de la mateixa manera, mantenint la coherència en la comparació dels resultats.

8.3 Variables de l'estudi

Per garantir una anàlisi clara i interpretable, es defineixen variables de control i variables dependents, així com es defineixen les hipòtesis sobre el resultat de les variables dependents a cada un de les distribucions.

8.3.1 Variables de control

Es fixen paràmetres constants per a totes les proves per reduir la variabilitat externa:

- **Nombre i tipus d'objectes:** 10 peces per sessió, combinant 3 objectes complexos i 2 senzills, amb una paleta de 10 colors diferents.
- **Distància entre taules:** 4 metres en disposició paral·lela en tots els escenaris.
- **Ordre de presentació:** contrabalançat segons *Latin Square* per a la rotació de les distribucions espacials.

8.3.2 Variables dependents

Les variables recollides reflecteixen aspectes objectius i subjectius del rendiment i experiència dels usuaris, la i indica la distribució realitzada.

- **Temps de resolució (T):** mesurat en segons des del primer contacte amb un objecte fins a la col·locació correcta de l'última peça, indicant l'eficiència de la tasca:

$$T_i = t_{\text{final}}^{(i)} - t_{\text{inici}}^{(i)}$$

- **Qualitat de la comunicació (C):** nombre total de paraules intercanviades (W_i) normalitzat pel nombre de participants ($N_i = 2$) i el temps de resolució (T_i), multiplicat per 100 per facilitar la interpretació:

$$C_i = \frac{W_i}{N_i \times T_i} \times 100$$

- **Càrrega cognitiva (L):** obtinguda a partir del qüestionari RAW-TLX, que avalua sis dimensions de l'esforç mental, físic i temporal amb una quantificació de 0 a 10. La mitjana de les puntuacions serveix com a indicador global:

$$L_i = \frac{1}{6} \sum_{k=1}^6 M_k^{(i)}$$

- **Satisfacció (S):** mesurada amb la suma d'entre quatre preguntes de preferència entre les distribucions, puntuades ordinalment de 1 a 3 (menys a més

satisfactòria). Les quatre preguntes tracten de: preferència general, sensació de rapidesa, sensació de comunicació i sensació de treball en equip, aquestes es poden veure a l'apèndix A. Quedant la següent formulació:

$$S_i = \sum_{k=1}^4 Q_k^{(i)}$$

$$Q_i = \begin{cases} 3 & \text{distribució preferida} \\ 2 & \text{distribució intermèdia} \\ 1 & \text{distribució menys preferida} \end{cases}$$

Formulació d'hipòtesis

Basant-se en els principis de proxèmica i la dinàmica de col·laboració en entorns VR [2], es proposen les hipòtesis següents relacionades amb les diferents configuracions espacials (A: Distribució en “U”, B: Distribució objectiu-rere origen, C: Distribució objectiu-rere destí):

Hypothesis 1 (H1). $T_A < T_B < T_C$. Es preveu que el temps de resolució sigui menor en la disposició en “U” (A) per la visibilitat convergent de la solució per ambdós usuaris, minimitzant desplaçaments i esperes; mentre que en B i C, la necessitat de coordinació i comunicació afegida allarga el temps necessari.

Hypothesis 2 (H2). $C_C > C_B > C_A$. La quantitat i qualitat de la comunicació verbal serà més elevada en la configuració C, on la taula amb ordre objectiu està menys accessible visualment, requerint més intercanvi d'informació; menys intensa en B, i mínima en A, on la informació és accessible i compartida de manera més eficient.

Hypothesis 3 (H3). $L_A < L_B < L_C$. La càrrega cognitiva percebuda serà menor en A perquè la informació està sempre visible; mentre que en B i C augmenta progressivament degut a la necessitat de memoritzar i gestionar la informació sense visibilitat constant.

Hypothesis 4 (H4). $S_A > S_B > S_C$. La satisfacció global dels usuaris serà més alta en la disposició en “U” (A), per la facilitat de col·laboració i ergonomia; amb valoracions intermèdies en B, i la més baixa en C, on l'esforç cognitiu i la frustració esperada són majors.

8.4 Recollida i anàlisi de dades

Durant les sessions, es va enregistrar automàticament el temps de resolució i les accions clau dels usuaris a través del sistema de *logs* integrat, mentre que la comunicació verbal es va recopilar de forma externa per a una anàlisi qualitativa posterior.

8.4.1 Estadístiques descriptives

A continuació es presenten les estadístiques descriptives per a les variables dependents principals, agrupades segons les tres configuracions espacials estudiades. Aquesta anàlisi preliminar proporciona una visió general del comportament dels participants abans d'entrar en anàlisi inferencial.

Taula 8.1: Estadístiques descriptives per variable i condició experimental.

Variable	Distribució	Mitjana	Desviació	Mínim	Màxim
Temps de resolució (s)	en U	96,78	14,94	74	127
	objectiu-rere origen	100,22	14,18	79	120
	objectiu-rere destí	102,11	18,81	69	133
Qualitat comunicació	en U	6,81	3,34	2,36	12,37
	objectiu-rere origen	5,40	2,12	1,55	9,09
	objectiu-rere destí	5,16	1,78	3,13	8,41
Càrrega cognitiva RAW-TLX	en U	3,54	1,39	1,67	6,50
	objectiu-rere origen	3,65	1,36	1,67	6,17
	objectiu-rere destí	3,91	1,28	1,67	6,50
Satisfacció	en U	8,06	1,99	5	11
	objectiu-rere origen	8,28	2,40	4	12
	objectiu-rere destí	7,67	2,08	5	12

A més, a la Figura 8.3 es mostren els box plots per a cada variable i condició, facilitant la visualització de la dispersió i mediana de les dades.

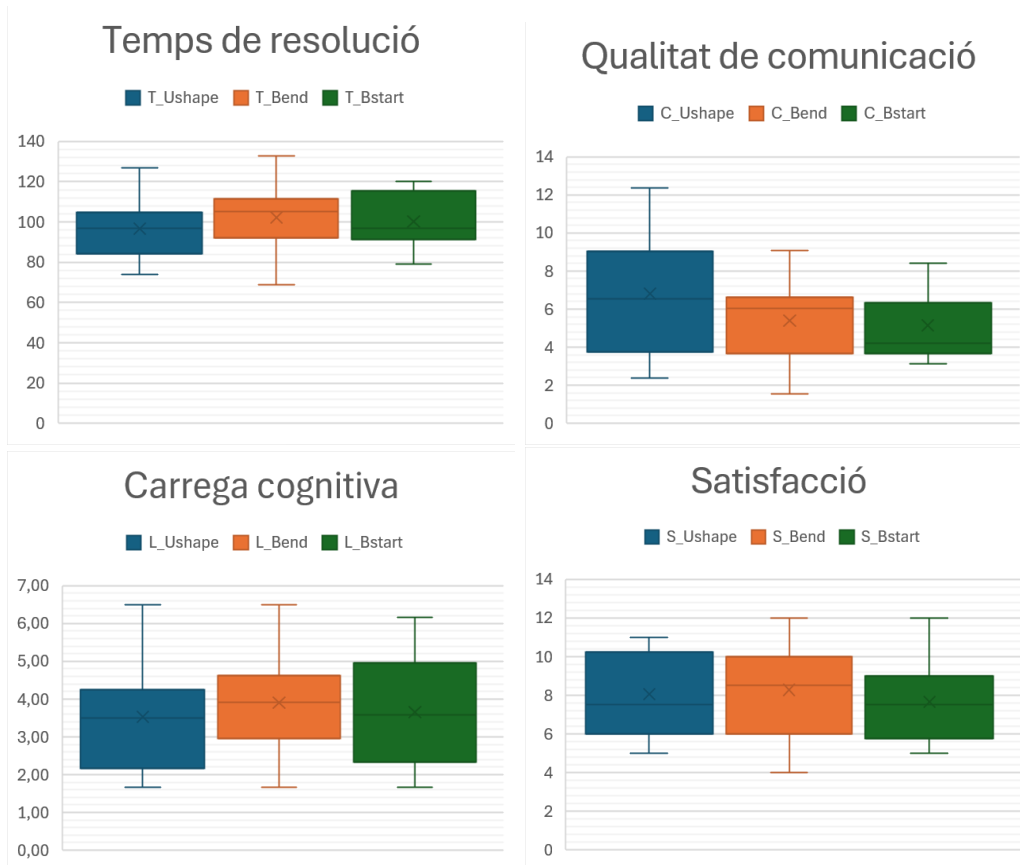


Figura 8.3: Box plots de les variables principals per condició experimental.

8.4.2 Anàlisi estadística i validació d'hipòtesis

Per validar les hipòtesis plantejades, s'ha dut a terme una anàlisi bàsica basada en les estadístiques descriptives i les proves de normalitat i esfericitat prèvies. Atès que la majoria de les variables no compleixen els supòsits de normalitat, s'han utilitzat proves no paramètriques per mesures repetides per contrastar les diferències entre les configuracions espacials.

Els resultats obtinguts permeten confirmar o refutar les hipòtesis, basant-se en la comparació directa de les mesures i les diferències significatives detectades amb les proves post-hoc i la grandària de l'efecte. Aquest enfocament ofereix una validació sòlida dels efectes observats sense entrar en anàlisis estadístiques complexes, adient per a l'estudi exploratori que s'ha dut a terme.

Per futurs treballs, es podrien aplicar anàlisis més avançades per aprofundir en la interpretació i generalització dels resultats.

8.5 Interpretació de resultats i interpretació

A continuació es presenta la resolució de les hipòtesis formulades, basant-se en les dades recollides i les anàlisis fetes.

- **H1 – Temps de resolució:** Els resultats mostren que el temps de resolució és menor en la configuració A (Distribució en “U”) en comparació amb les configuracions B i C, confirmant la hipòtesi. La visibilitat directa i compartida de la solució facilita la coordinació, reduint els desplaçaments i les esperes.
- **H2 – Quantitat i qualitat de la comunicació verbal:** Tal com s’esperava, la comunicació verbal és més intensa en la configuració C (Distribució objectiu-rere destí), on la solució és menys accessible visualment. Això provoca un major intercanvi d’informació entre usuaris. La configuració B presenta nivells intermedis i la A la mínima, reflectint la influència de l’accessibilitat visual en la necessitat de comunicar-se.
- **H3 – Càrrega cognitiva:** La càrrega cognitiva percebuda segueix la mateixa tendència prevista: menor en A, on la informació està sempre a la vista, i augmenta a B i C degut a la demanda de memorització i processament d’informació en absència de visibilitat constant.
- **H4 – Satisfacció global:** Els usuaris manifesten major satisfacció amb la disposició en “U” (A), destacant la facilitat de col·laboració i l’ergonomia. Les valoracions són intermèdies per a B i més baixes per a C, on la frustració i l’esforç cognitiu són percebuts com més alts.

Els resultats obtinguts reforcen la importància de la configuració espacial en el disseny d’entorns de realitat virtual multiusuari. La disposició en “U”, que permet una visibilitat compartida i directa dels elements clau, no només redueix el temps de resolució i la càrrega cognitiva, sinó que també facilita una comunicació més fluida i una major satisfacció entre els usuaris. Aquestes conclusions suggereixen que, en aplicacions educatives, de formació o col·laboratives, la planificació acurada de l’espai pot potenciar significativament l’eficàcia i l’experiència d’usuari. D’altra banda, quan la visibilitat és limitada, com en les distribucions B i C, es requereix un esforç addicional de coordinació i comunicació, que pot afectar el rendiment i la percepció subjectiva, fent-les perfectes per activitats dirigides a la construcció d’equips. Per a futurs dissenys de sistemes VR col·laboratius, es recomana prioritzar configuracions que maximitzin l’accessibilitat visual i la interacció natural entre participants, tot considerant l’adaptació a les necessitats específiques de cada context d’ús.

Capítol 9

Conclusions i treball futur

Aquest treball ha explorat l'impacte de diferents configuracions espacials en la col·laboració multiusuari dins un entorn de realitat virtual. Mitjançant el desenvolupament i implementació d'una aplicació de VR que simula un puzzle cooperatiu, s'ha pogut analitzar com la disposició física de l'espai afecta el rendiment, la comunicació, la càrrega cognitiva i la satisfacció dels usuaris.

Les conclusions principals que s'extreuen són:

- **Importància de la configuració espacial:** La distribució en “U” ha demostrat ser la més eficaç per reduir el temps de resolució, minimitzar la càrrega cognitiva i fomentar una comunicació més eficient i satisfactòria. Això es deu a la visibilitat compartida i la facilitat de coordinació que ofereix, confirmant les hipòtesis plantejades i els principis de proxèmica aplicada a VR.
- **Sincronització i immersió:** La implementació d'una arquitectura modular basada en Photon i OpenXR ha garantit una sincronització en temps real dels avatars i objectes, aconseguint una experiència immersiva amb baixa latència, fonamental per a la col·laboració efectiva.
- **Gestió i registre d'esdeveniments:** El sistema de *logs* ha permès un seguiment detallat del comportament dels usuaris, facilitant anàlisis posteriors i corroborant la influència de la configuració espacial en la dinàmica de treball en equip.
- **Suport en metodologies d'anàlisi senzilles i interpretables:** L'ús d'anàlisis descriptives combinades amb proves no paramètriques ha estat suficient per validar les hipòtesis en aquest estudi exploratori, que permet una interpretació clara i pragmàtica dels resultats obtinguts.

Pel que fa al treball futur, diverses línies es poden explorar per aprofundir i ampliar els resultats:

- **Diversificació de tasques i escenaris:** Implementar altres tipus d'activitats col·laboratives amb diferents graus de complexitat per comprovar la generalitat dels resultats i identificar patrons específics d'interacció.
- **Anàlisi qualitativa i d'interacció verbal:** Integrar la recollida i anàlisi automàtica de la comunicació verbal per vincular-la quantitativament a la dinàmica col·laborativa i millorar el model de coordinació.
- **Optimització de l'arquitectura i escalabilitat:** Explorar models de xarxa més avançats per permetre més usuaris i situacions més riques, mantenint la baixa latència i sincronització precisa.
- **Personalització adaptativa:** Desenvolupar sistemes que ajustin automàticament la configuració espacial segons les necessitats, perfil o rendiment dels usuaris per maximitzar l'eficiència i la satisfacció.
- **Validació amb mostres més àmplies i heterogènies:** Realitzar estudis amb més participants i diferents perfils per augmentar la validesa externa i explorar factors com l'experiència prèvia o les diferències culturals.

Aquest projecte posa les bases per a un disseny conscient i basat en evidència d'entorns virtuals col·laboratius, on la configuració espacial i la sincronització efectiva són claus per facilitar la cooperació i la productivitat en VR. Els avenços en aquests àmbits obriran camí a aplicacions més immersives i eficients en educació, treball en equip, formació i entreteniment multiusuari.

En definitiva, es tracta d'un camp emergent i apassionant, amb un gran potencial per transformar la manera com les persones treballen i interactuen en espais virtuals compartits, i aquest estudi aporta una contribució sòlida i pràctica per avançar cap a aquesta fita.

Bibliografia

- [1] Dom Barnard. The whole history of vr. <https://virtualspeech.com/blog/history-of-vr>. Història completa de la VR. Accés: marc 2025.
- [2] Lei Chen, Hai-Ning Liang, Feiyu Lu, Jialin Wang, Wenjun Chen, and Yong Yue. Effect of collaboration mode and position arrangement on immersive analytics tasks in virtual reality: A pilot study. *Applied Sciences*, 11:10473, 2021.
- [3] VR Compare. Meta quest 3 specifications. <https://vr-compare.com/headset/metaquest3>. Especificacions de les Meta Quest 3. Accés: marc 2025.
- [4] VR Compare. Oculus rift mk1 specifications. <https://vr-compare.com/headset/oculusriftdk1>. Especificacions de l'Oculus Rift MK1. Accés: marc 2025.
- [5] VR Compare. Pico 4 specifications. <https://vr-compare.com/headset/pico4>. Especificacions del Pico 4. Accés: marc 2025.
- [6] VR Compare. Vpl eyephone specifications. <https://vr-compare.com/headset/vpleyephone>. Especificacions del VPL Eyephone. Accés: marc 2025.
- [7] Refactoring Guru. Patrò d'observador explicat. <https://refactoring.guru/design-patterns/observer>. Explicació del patró de comportament 'observador'. Accés: maig 2025.
- [8] Martin Guy, Jean-Marie Normand, Camille Jeunet-Kelway, and Guillaume Moreau. The sense of embodiment in virtual reality and its assessment methods. *Frontiers in Virtual Reality*, 4:1141683, 2023. Accés: maig 2025.
- [9] Zhenyi He, Karl Rosenberg, and Ken Perlin. Exploring configurations for multi-user communication in virtual reality. arXiv preprint arXiv:1911.06877, 2019.
- [10] Jason Jerald. *The VR Book: Human-Centered Design for Virtual Reality*. Morgan & Claypool, 2015.
- [11] Carlos Chuan Lleonart. Repositori del projecte. Repositori del projecte a Github. https://github.com/CarlosChuan/escena_multiusuari_VR.
- [12] Carlos Chuan Lleonart. Video demo - distribució objectiu-rere origen. Video penjat a Youtube. <https://youtu.be/XEP8DqpqKz4>.

- [13] Microsoft. Pagina oficial de l'editor visual studio. <https://visualstudio.microsoft.com/>.
- [14] Nanome. Nanome. <https://nanome.ai/>. Pàgina oficial de Nanome. Accés: maig 2025.
- [15] 3D Organon. Vr confort guide. <https://www.3dorganon.com/vr-comfort-guide/>. Guia de configuració a projectes VR per al confort dels usuaris. Accés: maig 2025.
- [16] Oxford. Oxford medical simulation. <https://oxfordmedicalsimulation.com/>. Pàgina oficial de Oxford Medical Simulation. Accés: maig 2025.
- [17] Nina Jane Patel. Reality or fiction? <https://medium.com/kabuni/fiction-vs-non-fiction-98aa0098f3b0>. Post a Medium explicant experiència de abus sexual a la realitat virtual. Accés: maig 2025.
- [18] Photon. Photon engine. <https://www.photonengine.com/>. Plataforma que ofereix eines per facilitar la connectivitat d'usuaris. Accés: maig 2025.
- [19] Photon. Pun. <https://www.photonengine.com/pun>. Pàgina web del producte PUN de Photon. Accés: maig 2025.
- [20] Pico. Sdk de pico para openxr. <https://developer.picoxr.com/document/unity-openxr/>. Documentació del SDK de Pico dedicat a OpenXR. Accés: maig 2025.
- [21] Pimax. Screen door effect. [https://pimax.com/blogs/blogs/what-is-the-screen-door-effect-in-vr#:~:text=The%20screen%20door%20effect%20\(SDE,screen%2C%20resembling%20a%20screen%20door](https://pimax.com/blogs/blogs/what-is-the-screen-door-effect-in-vr#:~:text=The%20screen%20door%20effect%20(SDE,screen%2C%20resembling%20a%20screen%20door). Explicació del screen door effect i maneres per solucionar-ho. Accés: maig 2025.
- [22] Centre psicològic Bonanova. Teràpia amb realitat virtual. <https://www.centrobonanova.com/tipos-de-tratamiento/realidad-virtual-psicologia/>. Explicació de teràpia amb realitat virtual al centre psicològic Bonanova. Accés: maig 2025.
- [23] Sol Rogers. Forbes 2019: The year virtual reality gets real. <https://www.forbes.com/sites/solrogers/2019/06/21/2019-the-year-virtual-reality-gets-real/>. Forbes, 2019. Accés: marc 2025.
- [24] Carlos Trilnick. The first vr experience: Sensorama. <https://proyectoidis.org/sensorama/>. Prototip de la primera experiència VR. Accés: marc 2025.
- [25] Unity. Pagina oficial de unity. <https://unity.com/>.
- [26] Unity. Sdk de meta para openxr. <https://docs.unity3d.com/Packages/com.unity.xr.meta-openxr@1.0/manual/index.html>. Documentació del SDK de Meta dedicat a OpenXR, desenvolupat per Unity. Accés: maig 2025.

- [27] Unity. Sdk de openxr per unity. <https://docs.unity3d.com/Packages/com.unity.xr.core-utils@2.3/manual/index.html>. Documentació del SDK de Unity per OpenXR. Accés: maig 2025.
- [28] victoryxr. Victory xr. <https://www.victoryxr.com/>. Pàgina web de Victory XR. Accés: maig 2025.
- [29] Viquipèdia. Cinetosi. <https://ca.wikipedia.org/wiki/Cinetosi>. Pàgina de Viquipèdia de la Cinetosi. Accés: maig 2025.
- [30] Viquipèdia. Estereopsia. <https://ca.wikipedia.org/wiki/Estere%C3%B2psia>. Viquipèdia. Accés: marc 2025.
- [31] Viquipèdia. Latin square. https://ca.wikipedia.org/wiki/Quadrat_llat%C3%AD. Explicació del quadrat llatí. Accés: marc 2025.
- [32] Viquipèdia. Listado motores de videojuegos. https://es.wikipedia.org/wiki/Anexo:Motores_de_videojuegos. Listado de motores de videojuegos més utilitzats, per ordre alfabètic. Accés: maig 2025.
- [33] Viquipèdia. Raw-tlx. <https://en.wikipedia.org/wiki/NASA-TLX>. Descripció del NASA-TLX, incloent la versió reduïda: RAW-TLX. Accés: maig 2025.
- [34] Viquipèdia. The sword of damocles (virtual reality). [https://en.wikipedia.org/wiki/The_Sword_of_Damocles_\(virtual_reality\)](https://en.wikipedia.org/wiki/The_Sword_of_Damocles_(virtual_reality)). Viquipèdia. Accés: marc 2025.
- [35] Wikipedia. Carryover effect. Explicació del Carryover effect. https://en.wikipedia.org/wiki/Carryover_effect.
- [36] Haijun Xia, Sebastian Herscher, Ken Perlin, and Daniel Wigdor. Spacetime: Enabling fluid individual and collaborative editing in virtual reality. In *Proceedings of the 2018 UIST Conference*, 2018.
- [37] Wenge Xu, Ruichen Zheng, Diego Monteiro, Vijayakumar Nanjappan, Yihong Wang, and Hai-Ning Liang. Exploring the effect of display type on co-located multiple player gameplay performance, immersion, social presence, and behavior patterns. In *Proceedings of the 19th International Joint Conference on Computer Vision, Imaging and Computer Graphics Theory and Applications (VISIGRAPP 2024) - Volume 1: GRAPP, HUCAPP and IVAPP*, pages 159–169, 2024.
- [38] Lei Zhang, Ashutosh Agrawal, Steve Oney, and Anhong Guo. Vrgit: A version control system for collaborative content creation in virtual reality. In *Proceedings of the 2023 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 2023.

Apèndix A

Qüestionaris utilitzat

Formulari d'evaluación de distribucions

Després de cada prova (cada distribució), a cada participant se li demanarà omplir un formulari RAW-TLX tal i els que hi ha en aquest formulari (seccions 2, 3 i 4 d'aquest formulari). I un cop finalitzada la sessió se'ls hi demanarà omplir un formulari personalitzat (última secció d'aquest formulari).

Aquests formularis els ompliran a paper i boli, tant per relaxar la vista de pantalles entre sessions VR, com per facilitar i agilitzar qualsevol possible problema generat pels formularis digitals. Un cop omplerts i acabada la sessió, l'organitzador omplirà aquest formulari amb la informació omplerta per l'usuari per tal de digitalitzar els resultats.

Explicació prèvia als usuaris

Primer de tot, moltes gràcies per participar en aquest estudi.

La sessió funcionarà de la següent manera: haureu de resoldre conjuntament un trencaclosques com més ràpidament millor. El fareu tres vegades, i en cada repetició la distribució de l'espai serà diferent. Podeu treballar i organitzar-vos com vulgueu.

El trencaclosques funciona així: trobareu dues taules —una de verda i una de lila. A la taula verda hi apareixeran peces, i haureu de col·locar-les a les plataformes de la taula lila, en l'ordre que es mostra a la paret blava. L'ordre va d'esquerra a dreta.

És important tenir en compte que alguns dels objectes de la paret poden estar formats per més d'una peça. En aquests casos, cal col·locar les peces en el mateix ordre que apareixen a la paret per tal que sigui vàlid.

Pot semblar confús, però no patiu: tot seguit fareu un petit tutorial per familiaritzar-vos amb el sistema.

Abans, però, teniu algun dubte?

(S'espera resposta)

Explicació del funcionament abans de posar-vos les ulleres

Com veureu, tindreu dos controladors. Amb el joystick esquerre podeu moure el vostre personatge, i amb el joystick dret podeu moure la càmera.

Amb el botó de l'índex (de qualsevol dels controladors) podeu seleccionar opcions tant dels menús del sistema (Pico/Meta) com dels menús propis de l'aplicació.

Amb el botó del dit del cor és amb el que interactueu amb els objectes de l'escena. Aquest botó us permet agafar objectes des de qualsevol controlador.

És important: quan agafeu un objecte amb un dels controladors, el joystick d'aquell

controlador queda "bloquejat". És a dir, deixa de servir per moure o girar la càmera i passa a controlar només el moviment i la rotació de l'objecte que teniu agafat. Si, mentre el teniu agafat, moveu el joystick endavant o enrere, apropareu o allunyareu l'objecte. Si el moveu cap als costats, fareu girar l'objecte cap a la dreta o cap a l'esquerra.

Dit això, ho provem tot amb un petit tutorial.

Nom del participant

Tu respuesta

Edat

Tu respuesta

Gènere

- ☐ Home
- ☐ Dona
- ☐ No binari
- ☐ Prefereixo no dir-ho

Has fet servir un dispositiu de VR abans?

- ☐ No, mai
- ☐ Sí, però molt puntualment (1-2 vegades)
- ☐ Sí, de forma ocasional (he provat diverses experiències)
- ☐ Sí, força sovint (jocs, aplicacions, etc.)

Com et consideres en relació amb la tecnologia?

- ☐ Poc habituat/da
- ☐ Usuari/ària mitjà/na
- ☐ Molt habituat/da o expert/a

Distribució _____

Exigencia mental *

Quina exigència mental ha suposat la tasca?

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

Bajo ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ Alto

Exigencia física *

Quina exigència física ha suposat la tasca?

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

Bajo ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ Alto

Exigencia temporal *

Fins a quin punt el ritme de la tasca era accelerat?

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

Bajo ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ Alto

Rendimento *

Amb quin nivell d'èxit has aconseguit el que t'havien demanat?

[illegible]

Esforç *

Com de dur has hagut de treballar per aconseguir el nivell de rendiment?

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

Bajo ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ Alto

Frustració *

Com d'insegur, desanimat, irritat, estressat i molest vas estar?

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

Bajo ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ Alto

Pregunta general

Quina distribució t'ha **agradat mes**? *

- ☐ Distribució A - Forma de "U"
- ☐ Distribució B - Solució rere origen
- ☐ Distribució C - Solució rere destí

Quina distribució t'ha **agradat menys**? *

- ☐ Distribució A - Forma de "U"
- ☐ Distribució B - Solució rere origen
- ☐ Distribució C - Solució rere destí

A quina distribució has sentit que has completat **mes rapid** el puzzle? *

- ☐ Distribució A - Forma de "U"
- ☐ Distribució B - Solució rere origen
- ☐ Distribució C - Solució rere destí

A quina distribució has sentit que has completat **mes lent** el puzzle? *

- ☐ Distribució A - Forma de "U"
- ☐ Distribució B - Solució rere origen
- ☐ Distribució C - Solució rere destí

A quina distribució has sentit que la **comunicació** ha sigut **mes fluida**? *

- ☐ Distribució A - Forma de "U"
- ☐ Distribució B - Solució rere origen
- ☐ Distribució C - Solució rere destí

A quina distribució has sentit que la **comunicació** ha sigut **menys fluida**? *

- ☐ Distribució A - Forma de "U"
- ☐ Distribució B - Solució rere origen
- ☐ Distribució C - Solució rere destí

A quina distribució has sentit que els dos heu **participat** de forma **mes equitativa**? *

- ☐ Distribució A - Forma de "U"
- ☐ Distribució B - Solució rere origen
- ☐ Distribució C - Solució rere destí

A quina distribució has sentit que els dos heu **participat** de forma **menys equitativa**? *

- ☐ Distribució A - Forma de "U"
- ☐ Distribució B - Solució rere origen
- ☐ Distribució C - Solució rere destí