



ENTRENADOR VIRTUAL DE PÀDEL PER ASPECTES TÀCTICS

MARC VALLS CAMPS

Director/a

CARLOS ANDUJAR GRAN (Departament de Ciències de la Computació)

Codirector/a

MOHAMMADREZA JAVADIHA (Departament de Ciències de la Computació)

Titulació

Grau en Enginyeria Informàtica (Computació)

Memòria del treball de fi de grau

Facultat d'Informàtica de Barcelona (FIB)

Universitat Politècnica de Catalunya (UPC) - BarcelonaTech

23/10/2024

Resum

Actualment, la realitat virtual és una tecnologia molt més barata del que ho solia ser en el passat. Això ha permès que s'estengui a moltes àrees de les nostres vides quotidianes, i en el món de l'esport els entrenadors虚拟 ja no són ciència-ficció.

Tot i així, moltes eines de les que existeixen actualment només busquen avaluar la tècnica de l'usuari, i ignoren completament l'estrategia del joc.

L'objectiu d'aquest projecte és el desenvolupament d'una eina que valori les respostes de l'usuari des d'un punt de vista exclusivament tàctic en pàdel.

Basant-me en un partit de dobles masculins professional, he implementat amb Unity i Open XR una aplicació capaç de recrear situacions de joc que motivin una decisió estratègica. L'usuari és posicionat a la pista en el lloc d'un dels jugadors, i ha de respondre a un cop de l'ponent. Posteriorment, la seva resposta és avaluada d'acord amb les posicions dels enemics i la trajectòria escollida, i també s'ofereix la possibilitat de visualitzar la resposta professional.

Abstract

Currently, virtual reality is a much more affordable technology than it used to be in the past. This has allowed its expansion to many areas of our daily lives, and in the world of sports, virtual coaches are no longer science-fiction.

However, many existing tools only seek to evaluate the user's technique and completely ignore game strategy.

The aim of this project is to develop a tool that assesses the user's responses from an exclusively tactical point of view in padel.

Based on a professional men's doubles match, I have implemented an application using Unity and Open XR capable of recreating game situations that encourage strategic decision-making. The user is positioned on the court in the place of one of the players and must respond to an opponent's shot. Subsequently, their response is evaluated according to the positions of the opponents and the chosen path, and there is also the possibility of visualizing the professional response.

Resumen

Actualmente, la realidad virtual es una tecnología mucho más barata de lo que solía ser en el pasado. Esto ha permitido que se extienda a muchas áreas de nuestras vidas cotidianas, y en el mundo del deporte los entrenadores virtuales ya no son ciencia-ficción.

Sin embargo, muchas herramientas de las que existen actualmente solo buscan evaluar la técnica del usuario y ignoran completamente la estrategia del juego.

El objetivo de este proyecto es el desarrollo de una herramienta que valore las respuestas del usuario desde un punto de vista exclusivamente táctico en pádel.

Basándome en un partido de dobles masculinos profesional, he implementado con Unity y Open XR una aplicación capaz de recrear situaciones de juego que motiven una decisión estratégica. El usuario es posicionado en la pista en el lugar de uno de los jugadores y debe responder a un golpe del oponente. Posteriormente, su respuesta es evaluada de acuerdo con las posiciones de los enemigos y la trayectoria elegida, y también se ofrece la posibilidad de visualizar la respuesta profesional.

Agraïments

Aquest projecte només ha estat possible gràcies a l'ajuda i suport de moltes persones en les diferents etapes del procés, i sense les quals no hagués arribat al lector aquesta iniciativa, ni cap dels seus fruits.

En primer lloc vull agrair la guia, el compromís, el coneixement i tots els recursos oferits pel meu director, el Carlos Andújar, i el meu codirector, el MohammadReza Javadiha.

També ha estat indispensable el suport del Centre de Realitat Virtual per permetre'm utilitzar l'equipament de realitat virtual, i la incansable ajuda del Jordi Moyés afrontant els problemes derivats d'aquest maquinari.

Finalment, no puc deixar de dedicar aquest projecte a la meva parella, família i amics. Gràcies per compartir amb mi tots els moments bons, i animar-me en aquells més dolents.

Índex

1	Introducció i contextualització	1
1.1	Context	1
1.2	Definició de conceptes	2
1.3	Motivació i identificació del problema	3
1.4	Actors implicats	4
2	Justificació	5
2.1	Estat de l'art	5
2.1.1	Resum de l'estudi de mercat	8
2.2	Eines de desenvolupament	8
3	Abast	9
3.1	Objectius i subobjectius	9
3.2	Requisits no funcionals	10
3.3	Obstacles i riscs	11
4	Metodologia i rigor	12
4.1	Eines de seguiment i validació	13
5	Planificació temporal inicial	14
5.1	Esquema de la planificació temporal	14
5.2	Desglossament de les tasques	14
5.3	Recursos	19
5.4	Justificació de les estimacions temporals	19
5.5	Diagrama de Gantt inicial	20
6	Gestió del risc	22
7	Gestió econòmica	23
7.1	Estimació dels costos	23
7.1.1	Costos de personal	23
7.1.2	Costos genèrics	25
7.1.3	Costos d'imprevists	25
7.1.4	Costos de contingència	26
7.1.5	Pressupost final previst	26
7.2	Control de gestió	27
8	Desenvolupament de l'eina	28
8.1	Disseny de l'escena i models	28
8.1.1	Importació dels models	29
8.1.2	Il·luminació de l'escena	30
8.2	Implementació del motor de les físiques	31
8.2.1	Càcul de la força resultant	32
8.2.2	Gestió de les col·lisions	35

8.3	Recreació de situacions de partit	37
8.3.1	Anàlisi de les dades i disseny de l'algorisme	37
8.3.2	Generació aleatòria de trajectòries	40
8.3.3	Implementació d'un KDTree	41
8.3.4	Serialització de les dades	42
8.3.5	Assignació de trajectòries en temps real	43
8.4	Interacció amb l'usuari	44
8.4.1	Interacció en realitat virtual	45
8.4.2	Traçat de trajectòries i efectes especials	47
8.4.3	Disseny dels menús i diagrama de flux	48
8.5	Animació dels avatars	50
8.5.1	Màquina d'estats	52
8.6	Avaluació tàctica del cop	53
8.6.1	Discussió de les variables implicades	53
8.6.2	Entrenament d'un model intel·ligent	55
8.6.3	Representació del model i inferència	57
8.6.4	Visualització de la jugada experta	58
9	Planificació i pressupost finals	59
10	Informe de sostenibilitat	61
10.1	Autoavaluació	61
10.2	Dimensió econòmica	61
10.3	Dimensió ambiental	62
10.4	Dimensió social	63
11	Integració de coneixements	64
12	Normativa i regulacions	65
13	Resultats i conclusions	66
13.1	Assoliment dels objectius i requisits no funcionals	66
13.2	Limitacions i treball futur	68
13.3	Reflexió personal	69

Índex de figures

1	Partit amateur a PadelVIC	4
2	PadelVR	6
3	Eleven VR	6
4	CleanSheet Soccer	7
5	Seguiment de les tasques	13
6	Diagrama de Gantt previst	21
7	Model de la pista	30
8	Diagrama de forces	34
9	Tipus de cops	38
10	Exemple d'arbre tridimensional	41
11	Equipament Meta Quest 2	44
12	Interactor de teleportació	46
13	Tria de l'objectiu	46
14	Tria de l'alçada màxima	47
15	Menú inicial	48
16	Menú d'avaluació	49
17	Diagrama de flux	49
18	Esquelet de l'avatar	51
19	Màquina d'estats de les animacions	52
20	Matriu de confusió del model final	56
21	Reproducció del cop expert	58
22	Diagrama de Gantt final	60

Índex de taules

1	Comparació de les diferents aplicacions	8
2	Resum de les tasques	20
3	Salaris per hora dels rols	23
4	Cost de personal	24
5	Costos genèrics	25
6	Costos dels imprevists	26
7	Costos de contingència	26
8	Pressupost final previst	26
9	Propietats i constants físiques	32
10	Tipus de cops segons la seqüència de rebots	39
11	Rendiment dels models de classificació	55
12	Pressupost final	59
13	Consum energètic del desenvolupament	62

1 Introducció i contextualització

En l'era digital en la qual vivim, la tecnologia està transformant cada aspecte de les nostres vides, i el món de l'esport no n'és una excepció. La realitat virtual és una tecnologia relativament recent, i amb molt de potencial i possibles aplicacions.

Una d'elles són els entrenadors d'esports en realitat virtual, una nova forma innovadora d'entrenament esportiu. Aquesta tecnologia ofereix experiències immersives i personalitzades d'entrenament a atletes i entusiastes de l'esport en diversos camps, que van des del fitness fins als esports d'equip.

Els entrenadors d'esports en realitat virtual combinen el coneixement tradicional de l'entrenament esportiu amb les eines de la realitat virtual per crear programes d'entrenament que són tan efectius com ho serien en la modalitat tradicional.

Utilitzant equips com ara ulleres i auriculars de realitat virtual, sensors de moviment i programari especialitzat, aquests entrenadors poden simular escenaris d'entrenament realistes i proporcionar retroalimentació instantània sobre el rendiment de l'usuari.

Des de la millora de les habilitats tècniques i tàctiques fins a l'entrenament mental i la rehabilitació de lesions [1], els entrenadors d'esports en realitat virtual estan redefinint la forma en què els atletes es preparen i milloren en les seves disciplines esportives.

1.1 Context

Aquest treball de fi de grau de modalitat A es realitza en el context dels meus estudis en el Grau d'Enginyeria Informàtica (GEI), especialitzats en la menció de Computació. Serà dirigit pel professor Carlos Andújar, i codirigit per l'estudiant de doctorat Mohammadreza Javadiha.

El projecte es farà en el marc de desenvolupament del Centre d'Investigació per la Visualització, Realitat Virtual i la Interacció Gràfica (ViRVIG) [2], un grup d'investigació centrat en temàtiques relacionades amb gràfics i realitat virtual associat amb el departament de ciències de la computació de la UPC i amb la UdG.

1.2 Definició de conceptes

En aquesta secció explico alguns conceptes complexos que cal definir per a que el lector no expert pugui entendre aquest treball.

Realitat virtual

La **realitat virtual** (RV) fa referència a qualsevol entorn generat per ordinador que simula la presència física de l'usuari en un lloc imaginari o real. Particularment cal entendre la distinció que es fa entre l'espai físic, que fa referència al món real que envolta l'usuari, i l'espai virtual, que és la representació digital o simulada en la qual l'usuari interactua mitjançant dispositius de realitat virtual.

Quan el desplaçament en aquests dos espais és incoherent, podem causar mareig a l'usuari, a vegades anomenat **motion sickness**.

Equip RV autònom

Quan parlem d'un **equip RV autònom** o *standalone* normalment parlem d'unes ulleres de realitat virtual que no requereixen connexió a un ordinador extern. Les ulleres standalone incorporen tots els components necessaris per a l'experiència de realitat virtual de manera autònoma, cosa que permet una major mobilitat i facilitat d'ús.

Tàctica i tècnica

En l'àmbit esportiu, la **tècnica** fa referència a les habilitats individuals i als gestos tècnics, com ara la manera de colpejar una pilota. La **tàctica**, en canvi, es relaciona amb les estratègies globals i les decisions preses durant el joc, com ara la disposició i el moviment dels jugadors.

Entrenador virtual

Un **entrenador virtual** és un sistema o programa que proporciona orientació, consell o entrenament en una àrea específica sense la presència física d'un instructor humà. Això pot ser de múltiples formes diferents, i fins i tot algunes de les aplicacions mòbils de salut que tots tenim podrien ser considerades com a tal. En aquest treball es considera l'opció de plantejar situacions on cal una decisió tàctica amb l'ús de realitat virtual.

1.3 Motivació i identificació del problema

Actualment ja no es pot dir que la realitat virtual sigui una tecnologia recent. El 2016 es comptabilitzaven més de 230 empreses treballant en l'àrea de la realitat virtual [3], i de fet el camp ha tingut un progrés descomunal en els últims anys.

L'any 2018 l'empresa Oculus VR treu al mercat Oculus Go i Oculus Quest, els primers cascs de realitat virtual standalone, en altres paraules, que no requereixen altres dispositius per funcionar. Des de l'any següent la tendència ha estat el progressiu abaratiment del hardware necessari i un increment en l'eficiència de les aplicacions i del software.

Actualment a Catalunya ja hi ha 153 empreses dedicades a les tecnologies immersives que facturen 136,6 milions d'euros i que donen feina a prop de 900 treballadors [4], segons la Generalitat de Catalunya.

Des del punt de vista d'entrenadors虚拟s però, val a dir que en alguns esports se n'ha fet ús més que en altres, dels que sobretot destaquen el futbol i el tenis. També són comuns entrenadors virtuals en l'àrea del fitness i el gimnàs, sovint en la forma d'aplicacions mòbils per a la salut [5].

Ara bé, no són tan comunes aplicacions centrades en la tàctica d'esports més atípics de raqueta com podria ser pàdel, i molt menys que siguin de codi obert. Així doncs, en aquest treball de fi de grau em proposo desenvolupar una aplicació *open source* capaç de proposar diverses situacions a l'usuari, en un escenari atractiu i realista en realitat virtual que simularà una pista de pàdel, on calgui prendre una decisió tàctica que el sistema ha de poder avaluar des del punt de vista d'un expert.

1.4 Actors implicats

A partir del problema que es planteja abordar en aquest projecte, en trec alguns actors que se'n beneficiarien directament.

- **Jugadors professionals de pàdel:** Els professionals de pàdel serien els principals beneficiaris de l'aplicació, ja que podrien utilitzar-la per millorar les seves habilitats tàctiques i prendre decisions més informades durant els partits.
- **Entrenadors de pàdel:** Els entrenadors podrien utilitzar l'aplicació com a eina d'entrenament per als seus jugadors, proporcionant-los situacions simulades per a la presa de decisions i millorant així el seu rendiment tàctic.
- **Aficionats al pàdel:** Les persones aficionades al pàdel també podrien beneficiar-se de l'aplicació com a eina d'aprenentatge i entreteniment relacionat amb el seu esport preferit.
- **Desenvolupadors de programari lliure:** La comunitat de desenvolupadors de programari lliure també es beneficiaria, ja que l'aplicació es desenvoluparà com a *open source*, permetent la col·laboració i millora contínua per part de la comunitat.

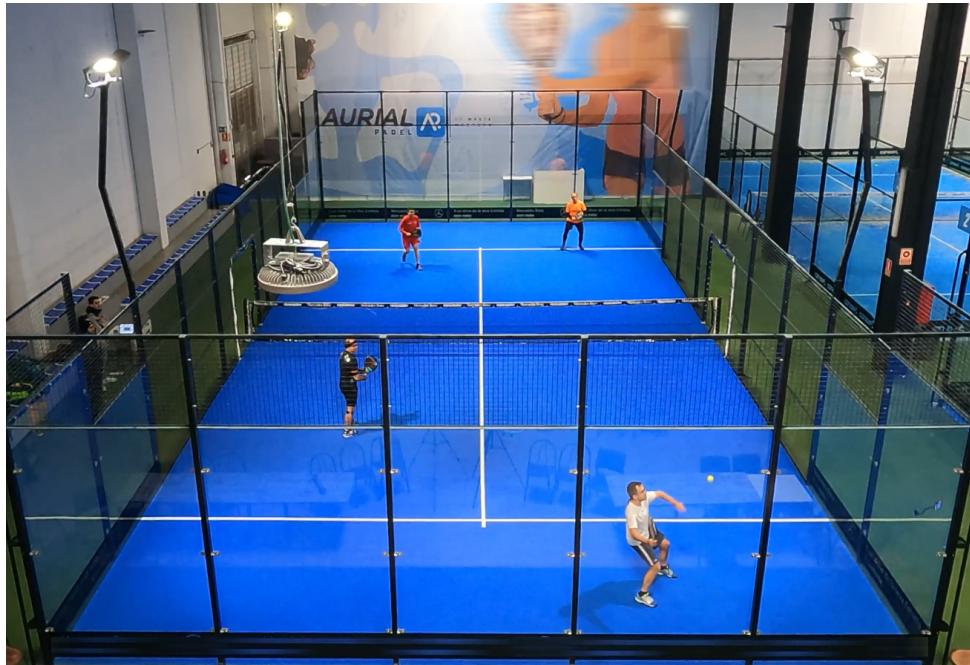


Figura 1: Partit amateur a PadelVIC
Imatge extreta del repositori de dades¹ del ViRVIG amb PadelVIC

¹<https://github.com/UPC-ViRVIG/PadelVic>

2 Justificació

En aquesta secció he comparat el projecte amb altres projectes similars, i justifico perquè s'ha apostat per aquesta idea. Addicionalment també justifico les eines de desenvolupament que faré servir en el procés d'implementació.

2.1 Estat de l'art

Amb tal de decidir si el projecte té sentit, cal fer un estudi de mercat d'aquelles eines que ja existeixen actualment, que s'utilitzen com a entrenadors虚拟, i que comparteixen algunes de les característiques descrites anteriorment.

Per trobar aplicacions que puguem comparar amb el projecte, he fet una cerca a Google amb les paraules clau “pàdel”, “virtual reality” i “coach”. D'aquesta manera he trobat PadelVR, l'única aplicació actual que entrena pàdel en realitat virtual.

He decidit tenir en compte aplicacions d'altres esports per completar aquest estudi de mercat, fent una recerca a la botiga d'aplicacions de realitat virtual Meta², amb les paraules clau “sports” i “coach”. He seleccionat les més ben valorades pel públic.

PadelVR

PadelVR és un simulador de pàdel en realitat virtual, i és probablement l'aplicació més semblant al projecte que es vol desenvolupar en aquest treball. La versió beta va sortir a mitjans del 2023, i la primera versió comercial s'ha llançat l'abril del 2024.

PadelVR està molt ben valorada i sembla que promet molt. En la seva versió final comptarà amb un mode de joc més lliure d'escalfament, joc contra una intel·ligència artificial i mini-jocs centrats en practicar els diferents cops del pàdel que puntuen al jugador [6], però només des del punt de vista tècnic.

Així doncs, PadelVR podríem dir que és un joc per passar-ho bé i practicar la tècnica, i fins i tot dona retroalimentació a l'usuari, però no té exercicis de caire tàctic ni que motivin la presa de decisions estratègiques.

A la Figura 2 trobareu una imatge de mostra publicada pels autors de l'aplicació.

²<https://www.meta.com/es-la/experiences/>



Figura 2: PadelVR
Pantalla extreta de la pàgina web del projecte³

Eleven VR

Eleven VR es tracta d'un joc en realitat virtual per a jugar a tenis de taula. Destaca pel seu multijugador online, que molts usuaris puntuen molt bé i és classificat com a “molt realista”, sobretot en quant al motor de físiques.

Igual que PadelVR, té modes d'entrenament individuals en els que majoritàriament el joc llença pilotes i es repeteix el mateix cop per entrenar la tècnica, però també té algun exercici per entrenar estratègia i tàctica en ping pong [7]. A més a més alguns exercicis retornen també una puntuació d'acord amb l'actuació del jugador.

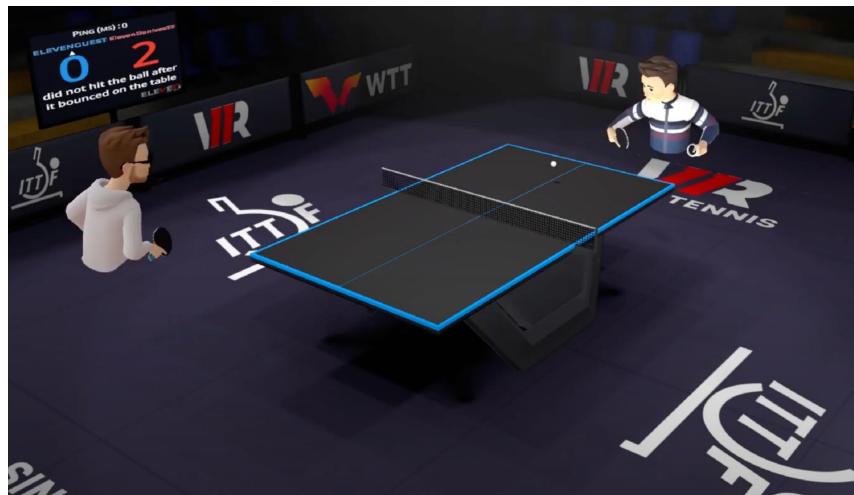


Figura 3: Eleven VR
Pantalla extreta de la pàgina web del projecte⁴

³<https://www.padelvrgame.com/>

CleanSheet Soccer

CleanSheet Soccer és un altre joc en realitat virtual per entrenar futbol especialitzat en condició física i tècnica, en cap cas és per entrenar tàctica [8]. Té la limitació de no poder fer servir els peus per falta de sensors, així que se centra en la parada i l'ús de les mans per al control del xut. D'altra banda, té un càlcul de la trajectòria prevista a diferència de molts altres jocs similars.

Compta amb un mode multijugador, però també amb un mode d'entrenament que reporta el consum de calories i una mica de feedback en quant a la correctesa del moviment del nostre cos.



Figura 4: CleanSheet Soccer
Pantalla extreta de la pàgina web del projecte a SideQuest⁵

⁴<https://elevenvr.com/>

⁵<https://sidequestvr.com/app/6132>

2.1.1 Resum de l'estudi de mercat

El lector trobarà un resum del que he vist en l'anterior estudi de mercat a la Taula 1, de la que es conclou que té sentit apostar per la nostra idea perquè conté un seguit de funcionalitats que no hem trobat juntes en qualsevol altre projecte existent.

	PadelVR	Eleven VR	CleanSheet	Aquest TFG
Entrena pàdel	Sí	No	No	Sí
Entrena tàctica	No	Sí	No	Sí
Simula l'esport	Sí	Sí	Sí	Sí
Retorna feedback	Sí	Sí	Sí	Sí
És de codi obert	No	No	No	Sí

Taula 1: Comparació de les diferents aplicacions

Elaboració pròpria

2.2 Eines de desenvolupament

En aquest projecte, utilitzaré el motor de videojocs **Unity**, amb programació en el llenguatge C#. La seva flexibilitat i suport actiu per part de la comunitat fan que sigui una elecció idònia per a aquesta tasca. Però principalment la raó per la qual he escollit aquesta tecnologia és la possibilitat de fer servir la llibreria **Open XR**. Aquesta llibreria ofereix funcionalitats específiques per a la interacció amb dispositius de realitat virtual, facilitant el desenvolupament d'experiències immersives.

Una alternativa viable era el motor **Unreal**, que compta amb una mica de suport per a realitat virtual, però no tan versàtil com la que ofereix Unity. A més, no té tant de suport de la comunitat, ni existeixen tants recursos d'autoaprenentatge amb Unreal.

En quant al dispositiu de realitat virtual seleccionat per a poder fer el testing, hem decidit que serà les ulleres **Meta Quest 2** per les seves característiques standalone, que el converteixen en una opció eficient i accessible. Aquesta elecció està orientada a garantir una implementació eficaç de l'aplicació, amb una atenció especial a la comoditat i a la qualitat de l'experiència de realitat virtual per als usuaris finals.

El Centre de Realitat Virtual també disposa d'altres equips de realitat virtual molt bons com ara **HTC Vive**, però s'ha descartat perquè no poden funcionar independents d'un ordinador com ho fan les Meta Quest 2.

3 Abast

En aquesta secció plantejo els objectius del projecte, què s'espera del producte final i quins possibles obstacles em podria trobar en el transcurs del treball.

3.1 Objectius i subobjectius

A continuació el lector trobarà la llista d'objectius i subobjectius del projecte. Aquests són justament els requisits funcionals que ha de tenir l'aplicació.

1. Disseny d'una interfície interactiva per a situacions de pàdel

- Disseny d'una pista de pàdel en realitat virtual
- Implementació de les físiques i col·lisions de la pilota
- Disseny de la interfície necessària per plantejar situacions tàctiques de pàdel a l'usuari, i presentar-li un rang d'opcions possibles
- Implementació de la previsualització de la trajectòria de la pilota
- Implementació del processament de l'entrada de l'usuari
- Disseny d'una seqüència on d'alentiment i amb retorn de retroalimentació

2. Disseny de l'avatar dels jugadors

- Obtenció dels models dels avatars
- Desenvolupament d'una animació realista per l'avatar

3. Refinament de l'experiència d'usuari

- Implementació d'alguna mesura per evitar mareig per moviment⁶

4. Disseny d'un sistema d'avaluació

- Anàlisi de les dades facilitades pels codirectors extretes d'un partit
- Decidir les dades implicades en l'avaluació de la jugada
- Implementació d'un sistema capaç d'avaluar la jugada a partir de les dades seleccionades i la base de dades, i notificar-ho al jugador

⁶Podria ser causat per desplaçaments forçats a la posició a on s'ha de colpejar la pilota

3.2 Requisits no funcionals

En aquesta secció, detallo els requeriments no funcionals que han de ser tinguts en compte en el desenvolupament de l'aplicació. Donat que un test d'usabilitat està fora de l'abast d'aquest projecte, molts d'ells els verificaré fent una petita enquesta a un grup reduït de persones.

- **Estètica de la GUI:** La interfície gràfica de l'aplicació ha de ser atractiva i estèticament agradable per proporcionar una experiència d'usuari positiva.

Caldrà que el 70% dels enquestats l'avaluï com a atractiva i agradable.

- **Realisme dels avatars dels jugadors:** Els avatars dels jugadors a la simulació han de comptar amb un mínim nivell de realisme i detall per millorar la immersió i proporcionar una representació fidel als usuaris, en la mesura que el temps ho permeti.

Caldrà que s'hagi implementat com a mínim una cara i unes mans, i que el 70% dels enquestats consideri que l'avatar és prou realista.

- **Evitar motion sickness:** Cal assegurar que el moviment i les transicions siguin suaus i confortables per als usuaris. Desplaçar automàticament l'avatar en el món virtual sense un corresponent desplaçament en el món físic pot causar malestar a l'usuari.

Caldrà verificar en el codi que no existeix cap desplaçament en el món virtual no coherent amb un d'equivalent en el món real.

- **Usabilitat:** L'aplicació ha de ser fàcil d'utilitzar, amb una interfície intuïtiva i respostes immediates a les accions de l'usuari, per assegurar una experiència de navegació i interacció sense problemes.

Caldrà que el 70% dels enquestats decideixi que és prou intuïtiva i usable.

- **Eficiència:** També s'ha de posar èmfasi en l'eficiència de l'aplicació, i garantir sempre una qualitat mínima del codi, sense comprometre la qualitat del producte final.

Caldrà que l'aplicació assoleixi els 72 fps requerits per les Meta Quest 2.

3.3 Obstacles i riscs

He identificat diversos obstacles i riscs que podrien comprometre l'èxit del desenvolupament de l'aplicació. A més de reconèixer aquests elements, proposo plans alternatius per abordar-los de manera efectiva. Addicionalment a la Secció 6 he especificat una probabilitat associada a cada risc, així com mesures addicionals al respecte a nivell de planificació i pressupost.

- **Desconeixement del domini:** La manca de coneixement específic sobre alguna tecnologia, sobre algun concepte de pàdel o bé sobre realitat virtual. Per superar aquesta barrera, m'he plantejat començar el projecte amb alguna sessió d'autoaprenentatge sobre la temàtica del projecte, i fer ús dels abundants recursos que es troben a internet.
- **Limitacions de temps:** Les restriccions de temps implícites al tractar-se d'un treball de fi de grau podrien afectar el desenvolupament. Per mitigar aquest risc, em proposo establir un calendari de projecte realista amb marges de temps addicionals per imprevistos, prioritant les tasques essencials i segmentant el desenvolupament en etapes manejables. S'han parlat amb el director del treball un seguit d'extensions que únicament es realitzarien en cas de disposar del temps necessari, com per exemple la possibilitat d'afegir efectes als cops.
- **Material:** Limitacions en els recursos materials, com maquinari o eines específiques, podrien ser un obstacle, sobretot si es tracta de les ulleres de realitat virtual necessàries per al testing, que idealment seran proporcionades per el ViRVIG. Un pla alternatiu seria investigar alternatives viables per a aconseguir els recursos necessaris.
- **Complexitat del projecte:** No es tracta d'un projecte gens senzill, i algunes parts podrien ser fàcilment projectes independents, com per exemple aconseguir una animació realista per als avatars. Per abordar aquesta qüestió, el plantejament serà partir d'un mínim producte viable, i anar iterant per a millor tot allò que pugui ser perfeccionat.

4 Metodologia i rigor

La *metodologia àgil* ha estat la utilitzada en aquest treball de fi de grau. Aquesta metodologia ha provat ser efectiva en totes les fases del projecte, i no ha fet falta modificar-la durant les etapes d'implementació.

La metodologia àgil [9] és un enfocament de desenvolupament de software que prioritza la flexibilitat, la interacció constant amb el client i la capacitat d'adaptació a canvis en els requisits del projecte. La metodologia es basa en valors com la col·laboració, la comunicació directa i la entrega incremental de productes.

Es tracta d'una metodologia ideal per un projecte com aquest donada la gran flexibilitat que ofereix davant dels canvis, i perquè té l'adaptabilitat necessària per afrontar un projecte en un camp on el meu coneixement és només parcial [10].

Dins del marc de la metodologia àgil, l'enfoc escollit estarà basat en Scrum.

Scrum proposa un desenvolupament iteratiu i incremental, treballant en etapes anomenades “esprints”, per entregar de manera contínua i ràpida funcionalitats operatives. Considero que és un gran plantejament per enfocar el treball de fi de grau, i facilita l'obtenció de retroalimentació si s'estableixen reunions periòdiques amb el director al finalitzar els esprints.

Particularment, aplicaré la metodologia al meu projecte dividint-lo en esprints d'un cert nombre de setmanes. A cada esprint es faran les reunions pertinents amb el director de planificació, seguiment i avaluació, amb tal de corregir desviacions.

A més a més, segmentaré les tasques de manera que en els primers tres esprints obtindré el producte mínim viable (PMV). En les següents iteracions es perfecciarà i detallarà el producte final.

4.1 Eines de seguiment i validació

Amb la finalitat de donar suport a aquesta metodologia anteriorment descrita, i per mantenir un cert rigor en tot el projecte, utilitzaré un conjunt d'eines.

Per al seguiment de les tasques utilitzaré [Trello](#)⁷, una eina en línia que em permetrà definir les tasques per a cada esprint en la forma de targetes en un tauler virtual. D'aquesta manera les targetes representaran les tasques de l'esprint associat i seran associades a la llista que els pertoqui segons el seu progrés. Les columnes creades seran **To Do**, **In Progress**, **Validation Pending** i **Done**.

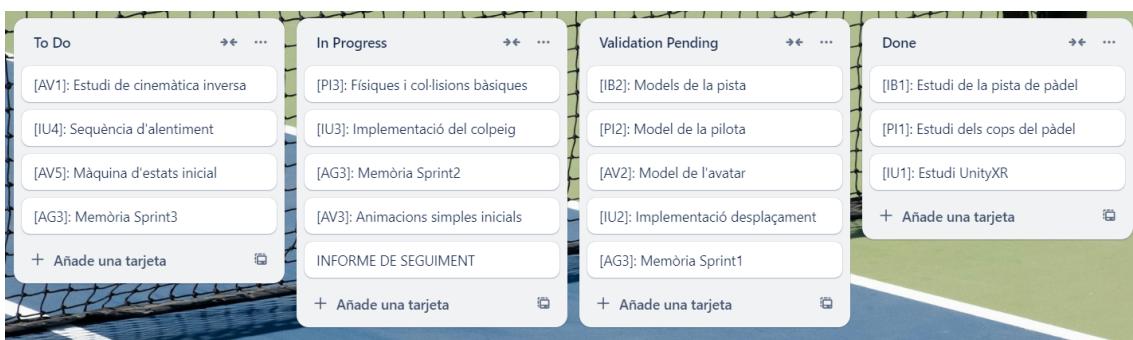


Figura 5: Seguiment de les tasques
Elaboració pròpia

D'altra banda per al control de versions i allotjament del codi faré servir [GitHub](#)⁸, una eina que facilita la gestió de repositoris mitjançant Git. Per afavorir el progrés incremental, partiré d'una branca base de la que ramificaré per al disseny de cada funcionalitat, i només s'incorporarà a la principal quan l'hagi finalitzat.

Addicionalment, per l'organització del temps a llarg termini utilitzaré [GanttProject](#)⁹. Aquesta eina servirà per validar el temps dedicat a cada tasca des del punt de vista del projecte en general, i per establir una planificació original i una de final que incorpori les desviacions un cop finalitzada l'etapa de desenvolupament.

Finalment, tot i que no es tracta de programari, serà necessari tot l'equip de realitat virtual facilitat pel ViRVIG per al testing. En aquest context, són sobretot indispensables les ulleres de realitat virtual Meta Quest 2, per provar iterativament tot el que es vagi implementant.

⁷<https://trello.com/>

⁸<https://github.com/>

⁹<https://www.ganttproject.biz/>

5 Planificació temporal inicial

5.1 Esquema de la planificació temporal

Aquest projecte va començar el 19 de febrer de 2024, i actualment està previst que acabi el 23 de juny d'aquest mateix any¹⁰.

Així doncs, es preveuen un total de 18 setmanes de treball, i hi dedicaré unes 30 hores per setmana, admetent flexibilitat. En total seran 540 hores de feina.

Cal tenir en compte que seguiré la metodologia àgil, i per tant s'inclouen en les tasques totes aquelles tasques relacionades amb la metodologia [11].

S'organitzarà el projecte en 7 esprints bi-setmanals començant el 18 de març [12]. Per cada iteració, s'han assignat tasques, i es faran les reunions corresponents.

5.2 Desglossament de les tasques

A continuació es llisten les tasques en les que es divideix el projecte.

Les tasques etiquetades [PMV] les prioritzaré per enllistar-les en els tres primers esprints amb tal d'obtenir un producte mínim viable.

- **Gestió del projecte** (65 h)

1. [GP1] Contextualització i abast

Contingut: Definició del context, els objectius i subobjectius del projecte, justificació del treball i explicació de la metodologia.

Durada: 25 hores.

Dependències: Cap.

2. [GP2] Planificació temporal

Contingut: La planificació i distribució de les tasques aquí mateix feta, i la gestió dels riscs associats al projecte.

Durada: 20 hores.

Dependències: [GP1]

3. [GP3] Gestió econòmica

Contingut: Càcul del pressupost total del projecte.

Durada: 10 hores.

Dependències: [GP2]

¹⁰Finalment no ha estat així, consulteu la Secció 9 on s'expliquen les desviacions temporals.

4. [GP4] Anàlisi de sostenibilitat
Contingut: Anàlisi de l'impacte ambiental, social i econòmic del treball.
Durada: 10 hores.
Dependències: [GP2]

- Metodologia àgil i recurrents (54 h)

1. [AG1] Reunions de planificació
Contingut: Organització de sessions per orientar i planificar l'esprint.
Durada: 3,5 hores.
Dependències: [GP2]
2. [AG2] Reunions de seguiment
Contingut: Sessions periòdiques per revisar l'estat del projecte, trobar possibles problemes i ajustar la planificació de l'esprint si és necessari.
Durada: 7 hores.
Dependències: [AG1] d'aquest mateix esprint.
3. [AG3] Redacció de la memòria
Contingut: Escriptura de la memòria associada al projecte, documentant els processos i les decisions preses.
Durada: 28 hores.
Dependències: [AG2] d'aquest mateix esprint.
4. [AG4] Reunions de revisió
Contingut: Sessions per revisar els resultats del esprint i rebre retroalimentació del director.
Durada: 3,5 hores.
Dependències: [AG3] d'aquest mateix esprint.
5. [AG5] Implementació de retroalimentació
Contingut: Implementació de les millors suggerides pel director.
Durada: 12 hores.
Dependències: [AG4] d'aquest mateix esprint.

- Disseny de la interfície base (20 h)

1. [IB1] [PMV] Estudi de la pista de pàdel
Contingut: Anàlisi de les característiques de la pista de pàdel per definir els requisits de disseny, i decidir quins models caldran.
Durada: 10 hores.
Dependències: [GP2]
2. [IB2] [PMV] Obtenció dels models de la pista
Contingut: Selecció o creació dels models 3D de la pista de pàdel.
Durada: 10 hores.
Dependències: [IB1]

- **Implementació del comportament de la pilota (95 h)**
 1. **[PI1] [PMV]** Estudi dels cops del pàdel
Contingut: Anàlisi dels diferents cops de pàdel per comprendre les possibles interaccions que afectaran la pilota.
Durada: 10 hores.
Dependències: [GP2]
 2. **[PI2] [PMV]** Obtenció del model de la pilota
Contingut: Selecció o creació del model 3D de la pilota.
Durada: 5 hores.
Dependències: [PI1]
 3. **[PI3] [PMV]** Implementació bàsica de les físiques i col·lisions
Contingut: Desenvolupament de l'algorisme inicial que gestionarà les físiques de la pilota i les col·lisions amb la pista i les raquetes.
Durada: 15 hores.
Dependències: [PI2]
 4. **[PI4]** Perfeccionament de les físiques i col·lisions
Contingut: Perfeccionament de l'algorisme que gestionarà les físiques de la pilota i les col·lisions amb la pista i les raquetes.
Durada: 35 hores.
Dependències: [PI3]
 5. **[PI5]** Implementació de la previsualització de la trajectòria
Contingut: Creació d'un sistema que mostri al jugador la trajectòria estimada de la pilota abans de cada cop.
Durada: 30 hores.
Dependències: [PI4]
- **Implementació de l'avatar (120 h)**
 1. **[AV1] [PMV]** Estudi de tècniques d'animació i cinemàtica inversa
Contingut: Investigació de tècniques d'animació i cinemàtica inversa per implementar els moviments realistes dels jugadors.
Durada: 10 hores.
Dependències: [GP2]
 2. **[AV2] [PMV]** Obtenció del model de l'avatar
Contingut: Selecció o creació del model 3D de l'avatar del jugador.
Durada: 5 hores.
Dependències: [AV1]
 3. **[AV3] [PMV]** Obtenció de les animacions simples
Contingut: Adquisició o creació d'animacions bàsiques per representar els moviments dels jugadors, que combinarem amb la màquina d'estats.
Durada: 20 hores.
Dependències: [AV2]

4. [AV4] Perfeccionament de les animacions simples
Contingut: Perfeccionament de les animacions bàsiques escollides.
Durada: 25 hores.
Dependències: [AV3]
 5. [AV5] [PMV] Disseny de la màquina d'estats inicial
Contingut: Creació d'una màquina d'estats senzilla que gestionarà els diferents estadis i transicions de les animacions de l'avatar.
Durada: 10 hores.
Dependències: [AV3]
 6. [AV6] Perfeccionament de la màquina d'estats
Contingut: Perfeccionament de la màquina d'estats amb tal d'aconseguir uns resultats més realistes.
Durada: 50 hores.
Dependències: [AV5]
- Interacció amb l'usuari (90 h)
 1. [IU1] [PMV] Estudi de la llibreria Open XR
Contingut: Investigació de la llibreria Open XR per determinar com implementar les interaccions amb l'usuari en l'espai 3D.
Durada: 15 hores.
Dependències: [GP2]
 2. [IU2] [PMV] Implementació del desplaçament
Contingut: Creació del sistema que permetrà als jugadors desplaçar-se dins de l'entorn virtual.
Durada: 15 hores.
Dependències: [IU1]
 3. [IU3] [PMV] Implementació del colpeig
Contingut: Desenvolupament de la funcionalitat que permetrà als jugadors colpejar la pilota amb les raquetes dins de l'entorn virtual.
Durada: 30 hores.
Dependències: [IU2], [PI3]
 4. [IU4] Disseny de la seqüència d'alentiment del joc
Contingut: Creació d'una seqüència visual en la que alentim el temps per suggerir a l'usuari que cal prendre una decisió, tenint en compte que s'ha d'evitar marejos per moviments i teleportacions.
Durada: 10 hores.
Dependències: [IU3]
 5. [IU5] [PMV] Disseny de la interfície per motivar decisions tàctiques
Contingut: Desenvolupament d'un sistema que plantegi decisions tàctiques i d'una interfície que presenti diferents opcions a l'usuari.
Durada: 20 hores.
Dependències: [IU3]

- **Implementació de l'avaluació (60 h)**
 1. [EV1] Estudi de les dades d'un partit expert
Contingut: Anàlisi de les dades proporcionades pels codirectors d'un partit de pàdel model, que utilitzaré per la avaluació de l'usuari.
Durada: 5 hores.
Dependències: [GP2]
 2. [EV2] Decisió de les dades implicades
Contingut: Selecció final de les dades utilitzades en l'avaluació.
Durada: 20 hores.
Dependències: [EV1]
 3. [EV3] Implementació del matching a la base de dades
Contingut: Desenvolupament del sistema que contrastarà les dades de la jugada amb les dades del partit professional per poder fer l'avaluació.
Durada: 20 hores.
Dependències: [EV2]
 4. [EV4] Disseny del càcul del resultat
Contingut: Creació de la fórmula o mètode que convertirà les dades en una puntuació d'avaluació.
Durada: 15 hores.
Dependències: [EV3]
 5. [EV5] Disseny de la interfície per a notificar el resultat
Contingut: Desenvolupament d'una interfície que informarà al jugador de la seva puntuació i avaluació després de la jugada.
Durada: 10 hores.
Dependències: [EV4]
- **Tancament del projecte (36 h)**
 1. [TP1] Tancament de la memòria
Contingut: Finalització i refinament de la memòria del projecte.
Durada: 26 hores.
Dependències: Tots els altres grups de tasques.
 2. [TP2] Preparació de la lectura
Contingut: Preparació del suport visual i la defensa davant del tribunal.
Durada: 10 hores.
Dependències: [TP1]

5.3 Recursos

A la Taula 2 he resumit els recursos humans i materials associats a cada tasca.

- **Recursos materials**

Per a totes les tasques caldrà un portàtil (P) i unes Meta Quest 2 (MQ2). També faré ús d'un escriptori, amb una taula, una cadira i una pantalla (SCR).

L'equip de RV és cedit pel ViRVIG, i compartit amb més usuaris.

- **Recursos personals**

Com a autor d'aquest treball, tindré múltiples rols en el seu desenvolupament: cap de projecte (CP), desenvolupador de software (DS), dissenyador d'interfícies (DI), tester (T) i investigador (I).

També col·laboraran amb el seu suport el director (D) i el codirector del treball.

- **Software**

Les eines software que utilitzaré durant el projecte, totes amb llicència gratuïta:

- Overleaf: per la redacció de documentació
- Unity: per la implementació de l'eina
- Blender: pel disseny de models quan s'escaigui
- GitHub: per l'allotjament i versionat del codi
- Trello: gestió temporal en temps real de les tasques
- GanttProject: per la confecció del diagrama de Gantt

5.4 Justificació de les estimacions temporals

Les estimacions temporals associades a cada tasca les he fet tenint en compte la complexitat de la tasca, la meva experiència en el tema, l'impacte que té en el projecte i el nombre de rols implicats. Aquestes estimacions han estat aprovades pel meu director, que considero un referent en la matèria.

En alguns casos, sobretot en aquelles tasques més complexes com ara [PI3] el temps ha sigut sobreestimat amb l'objectiu de considerar possibles entrebancs i imprevists.

Són també difícils de predir els temps dedicats a les tasques d'estudi, que segurament podrien ser inferiors però he donat marge per si cal alguna ampliació.

Codi	Nom de la tasca	Durada (h)	Dependències	Rols	Material
GP	Gestió del projecte	65	-	-	-
GP1	Contextualització i abast	25	-	CP, D	P, SCR
GP2	Planificació temporal	20	GP1	CP, D	P, SCR
GP3	Gestió econòmica	10	GP2	CP, D	P, SCR
GP4	Anàlisi de sostenibilitat	10	GP2	CP, D	P, SCR
AG	Metodologia àgil	54	-	-	-
AG1	Reunions de planificació	3.5	GP2	CP, D, DS, DI, I, T	P, SCR, MQ2
AG2	Reunions de seguiment	7	AG1	CP, D, DS, DI, I, T	P, SCR, MQ2
AG3	Redacció de la memòria	28	AG2	CP, D	P, SCR, MQ2
AG4	Reunions de revisió	3.5	AG3	CP, D, DS, DI, I, T	P, SCR, MQ2
AG5	Aplicació de feedback	12	AG4	DS, DI	P, SCR, MQ2
IB	Disseny de la intereficie base	20	-	-	-
IB1	Estudi de la pista de pàdel	10	GP2	I	P, SCR, MQ2
IB2	Models de la pista	10	IB1	DI	P, SCR, MQ2
PI	Comportament de la pilota	95	-	-	-
PI1	Estudi dels cops del pàdel	10	GP2	I	P, SCR, MQ2
PI2	Model de la pilota	5	PI1	DI	P, SCR, MQ2
PI3	Físiques i col·lisions bàsiques	15	PI2	DS, I	P, SCR, MQ2
PI4	Perfeccionament de físiques	35	PI3	DS, I	P, SCR, MQ2
PI5	Previsió de la trajectòria	30	PI4	DS, I	P, SCR, MQ2
AV	Implementació de l'avatar	120	-	-	-
AV1	Estudi de cinemàtica inversa	10	GP2	I	P, SCR, MQ2
AV2	Obtenció del model de l'avatar	5	AV1	DI	P, SCR, MQ2
AV3	Animacions simples inicials	20	AV2	DS, DI	P, SCR, MQ2
AV4	Perfeccionament d'animacions	25	AV3	DS, DI	P, SCR, MQ2
AV5	Màquina d'estats inicial	10	AV3	DS, DI	P, SCR, MQ2
AV6	Perfeccionament de la màquina	50	AV5	DS, DI	P, SCR, MQ2
IU	Interacció amb l'usuari	90	-	-	-
IU1	Estudi de la llibreria Open XR	15	GP2	I	P, SCR, MQ2
IU2	Implementació del desplaçament	15	IU1	DS	P, SCR, MQ2
IU3	Implementació del colpeig	30	IU2, PI3	DS, I	P, SCR, MQ2
IU4	Seqüència d'alentiment del joc	10	IU3	DS, DI	P, SCR, MQ2
IU5	Interfície per decisions tàctiques	20	IU3	DS, DI	P, SCR, MQ2
EV	Implementació de l'avaluació	60	-	-	-
EV1	Estudi de les dades d'un partit	5	GP2	I	P, SCR, MQ2
EV2	Decisió de les dades implicades	20	EV1	I	P, SCR, MQ2
EV3	Matching a la BD	15	EV2	DS, I	P, SCR, MQ2
EV4	Càcul del resultat	10	EV3	DS, I	P, SCR, MQ2
EV5	Interfície per mostrar puntuació	10	EV4	DS, DI	P, SCR, MQ2
TP	Tancament del projecte	36	-	-	-
TP1	Tancament de la memòria	26	Totes les tasques	CP, D	P, SCR
TP2	Preparació de la lectura	10	TP1	CP, D	P, SCR
-	Total	540			

Taula 2: Resum de les tasques
Elaboració pròpia
Tasques lligades al producte mínim viable marquades en blau

5.5 Diagrama de Gantt inicial

El diagrama de Gantt l'he elaborat fent servir l'eina **GanttProject**.

Després de la gestió del projecte, a partir del dia 18 de març, comencen els esprints.

A l' acabar el tercer esprint espero tenir el producte mínim viable.

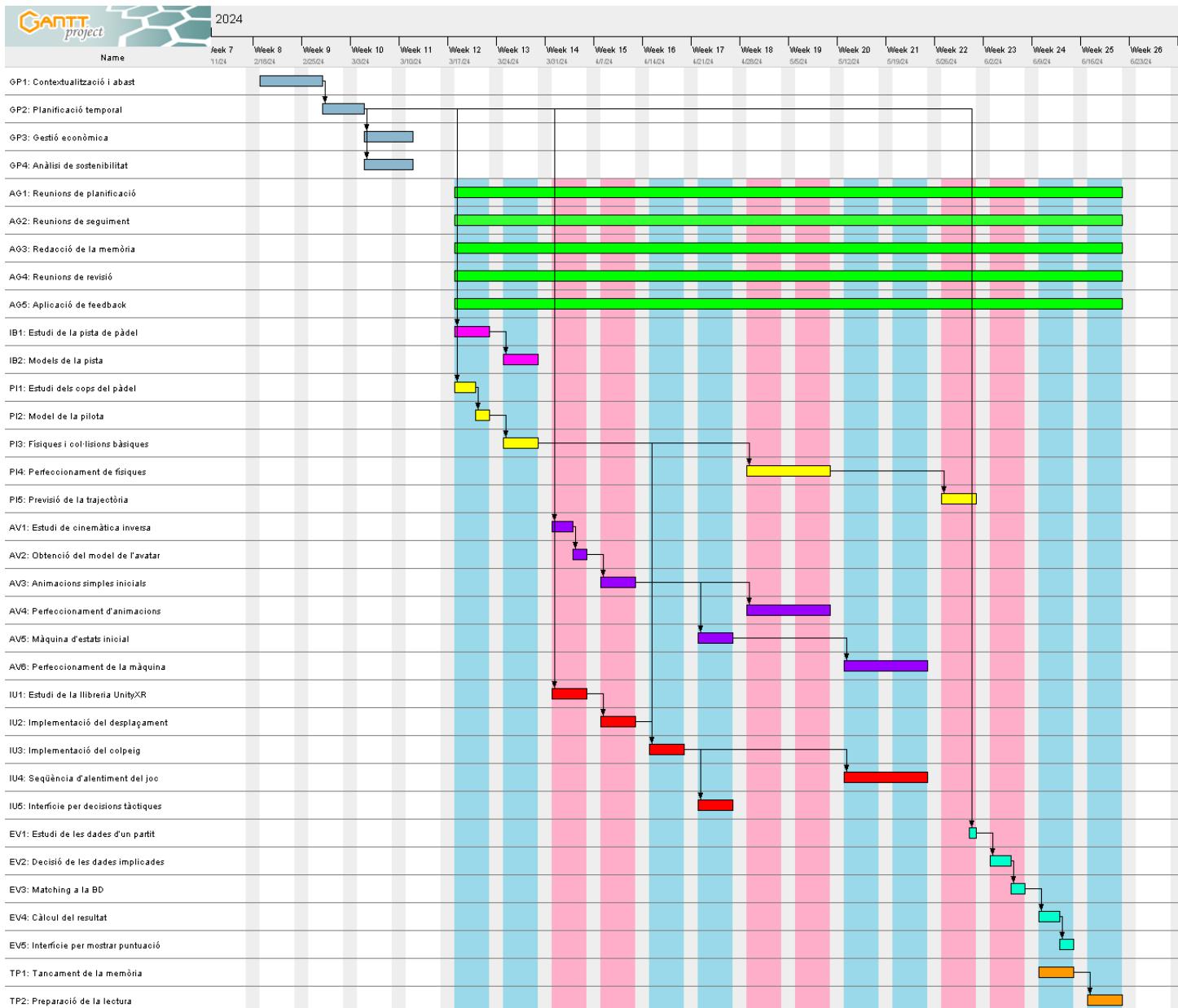


Figura 6: Diagrama de Gantt previst

6 Gestió del risc

A continuació aprofundeixo en els potencials obstacles que pugui provocar desviacions respecte de la planificació original, i intento trobar alternatives viables.

- **Desconeixement del domini:** Tenint en compte la gran quantitat de recursos que es poden trobar en biblioteques i a Internet, la planificació inclou tasques que són estrictament de formació i estudi sobre el domini.

El risc de que això causi un increment en el temps de realització és alt (70%), donats els meus pocs coneixement en realitat virtual. Per resoldre-ho si fos necessari, afegiré l'equivalent a dues setmanes addicionals a la planificació, repartides entre els rols d'investigador i desenvolupador de software.

Com a mesura addicional s'ha sobreestimat lleugerament el temps requerit en aquelles tasques que exigeixen un coneixement profund del domini, com per exemple amb la tasca [PI3].

- **Limitacions de temps:** Per combatre les limitacions temporals he intentat ser el màxim d'exigent possible amb la planificació. A cada esprint es revisarà si hi ha hagut desviacions respecte de la planificació, i es destinarà hores addicionals en cas d'haver-hi retards.

La probabilitat de que calgui assignar temps addicional a cada esprint l'aproximada al 50%, ja que el temps per iteració és lleugerament ajustat. En els esprints que això faci falta, afegiré 5 hores fora de la planificació per al rol de desenvolupador de software, i 5 més per al de dissenyador d'interfícies.

- **Material:** Donada l'alta quantitat de personal utilitzant les Meta Quest 2 proporcionades pel ViRVIG, és possible que hi hagi problemes de disponibilitat o fins i tot es trenqui algun equip.

En cas que això passés, serà possible ser més flexible amb la planificació i realitzar altres tasques que es puguin fer en paral·lel d'estudi o disseny que no requereixin les ulleres. Amb una probabilitat molt baixa del 5% l'equip de realitat virtual es podria trencar irreparablement i caldria comprar unes noves Meta Quest 2.

- **Complexitat del projecte:** Per abordar aquesta qüestió, el plantejament per aquelles tasques més complexes serà partir d'un mínim producte viable, i anar iterant per a millorar tot allò que pugui ser perfeccionat.

7 Gestió econòmica

En aquesta secció analitzo els elements econòmics associats al projecte, així com les despeses que implica la seva realització. També calculo els preus i costos per l'aproximació i justificació d'un pressupost final. Acabo avaluant possibles plans alternatius que responguin a riscs que afecten a la fiabilitat d'aquesta estimació, amb l'objectiu d'evitar imprevists.

7.1 Estimació dels costos

7.1.1 Costos de personal

Com a actor principal del projecte, portaré a terme múltiples rols de treballadors, realitzant una gran varietat de tasques. Addicionalment, comptaré amb l'ajuda del meu director, tot i que no ho tindré en compte dins del càlcul donat que és una figura molt concreta d'un treball de fi de grau però no d'un projecte real.

Amb tal d'aproximar el salari de tots els rols que representaré durant el projecte, utilitzaré [InfoJobs](#)¹¹ seleccionant la ciutat de Barcelona i assumint que un any de treball equivalen a 1820 hores per un treballador habitual. A més, sumaré un 30% addicional com a cost en seguretat social a pagar per l'empresa.

Posició	Salari brut (€/h)	Salari brut amb SS (€/h)
Cap de projecte	22.81	29.65
Desenvolupador de software	16.48	21.42
Dissenyador d'interfícies	17.03	22.14
Investigador TIC	18.13	23.57
Tester	15.93	20.71

Taula 3: Salaris per hora dels rols

Informació extreta de InfoJobs

Fent ús dels salaris bruts calculats a la Taula 3, i tenint en compte que cal distribuir les hores de cada tasca entre els diferents rols, calcularé els costos de personal.

Així he obtingut el cost final per al personal que podeu observar a la Taula 4.

¹¹<https://salarios.infojobs.net>

Codi	Nom de la tasca	Durada (h)	Durada per rol (h)					Cost (€)
			CP	DS	DI	I	T	
GP	Gestió del projecte	65	65	0	0	0	0	1927.25
GP1	Contextualització i abast	25	25	0	0	0	0	741.25
GP2	Planificació temporal	20	20	0	0	0	0	593.00
GP3	Gestió econòmica	10	10	0	0	0	0	296.50
GP4	Anàlisi de sostenibilitat	10	10	0	0	0	0	296.50
AG	Metodologia àgil	54	30.8	8.8	8.8	2.8	2.8	1420.52
AG1	Reunions de planificació	3.5	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	82.24
AG2	Reunions de seguiment	7	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	164.48
AG3	Redacció de la memòria	28	28	0	0	0	0	830.20
AG4	Reunions de revisió	3.5	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	82.24
AG5	Aplicació de feedback	12	0	6	6	0	0	261.36
IB	Disseny de la interfície base	20	0	0	10	10	0	457.10
IB1	Estudi de la pista de pàdel	10	0	0	0	10	0	235.70
IB2	Models de la pista	10	0	0	10	0	0	221.40
PI	Comportament de la pilota	95	0	60	5	30	0	2103.00
PI1	Estudi dels cops del pàdel	10	0	0	0	10	0	235.70
PI2	Model de la pilota	5	0	0	5	0	0	110.70
PI3	Físiques i col·lisions bàsiques	15	0	10	0	5	0	332.05
PI4	Perfeccionament de físiques	35	0	25	0	10	0	771.20
PI5	Previsió de la trajectòria	30	0	25	0	5	0	653.35
AV	Implementació de l'avatar	120	0	55	55	10	0	2631.50
AV1	Estudi de cinemàtica inversa	10	0	0	0	10	0	235.70
AV2	Obtenció del model de l'avatar	5	0	0	5	0	0	110.70
AV3	Animacions simples inicials	20	0	5	15	0	0	439.20
AV4	Perfeccionament d'animacions	25	0	5	20	0	0	549.90
AV5	Màquina d'estats inicial	10	0	5	5	0	0	217.80
AV6	Perfeccionament de la màquina	50	0	40	10	0	0	1078.20
IU	Interacció amb l'usuari	90	0	50	15	25	0	1992.35
IU1	Estudi de la llibreria Open XR	15	0	0	0	15	0	353.55
IU2	Implementació del desplaçament	15	0	15	0	0	0	321.30
IU3	Implementació del colpeig	30	0	20	0	10	0	664.10
IU4	Seqüència d'alentiment del joc	10	0	5	5	0	0	217.80
IU5	Interfície per decisions tàctiques	20	0	10	10	0	0	435.60
EV	Implementació de l'avaluació	60	0	20	5	35	0	1364.05
EV1	Estudi de les dades d'un partit	5	0	0	0	5	0	117.85
EV2	Decisió de les dades implicades	20	0	0	0	20	0	471.40
EV3	Matching a la BD	15	0	10	0	5	0	332.05
EV4	Càcul del resultat	10	0	5	0	5	0	224.95
EV5	Interfície per mostrar puntuació	10	0	5	5	0	0	217.80
TP	Tancament del projecte	36	36	0	0	0	0	1067.40
TP1	Tancament de la memòria	26	26	0	0	0	0	770.90
TP2	Preparació de la lectura	10	10	0	0	0	0	296.50
Total		540						12963.17

Taula 4: Cost de personal
Elaboració pròpia

7.1.2 Costos genèrics

Cal tenir en compte que tot el software que utilitzo és gratuït i accessible a tothom, i per tant no suposarà cap cost addicional.

Els recursos materials emprats sí que són una despesa que caldrà tenir en compte. Per cada ítem, aproximo la seva vida útil i a partir de les hores d'ús en el projecte calculo el preu de l'amortització.

A la Taula 5 el lector veurà els costos de les amortitzacions. He calculat les hores de vida aproximant per tots els ítems 4 anys de vida, 240 dies laborables i un ús de 8 hores al dia. Els preus s'han extret de les respectives pàgines web^{12 13 14}.

A tot això cal afegir també el cost del lloc de treball, un coworking a Barcelona moblat amb internet, electricitat i servei de neteja. El preu l'he extret de Attico¹⁵, aproximant la mitjana de diferents ubicacions reals a Barcelona.

Material	Preu (€)	Temps de vida (h)	Temps d'ús (h)	Amortització (€)
Asus ROG Flow X16 (GV601R)	1787.15	7680	540	125.66
Monitor Samsung LED	119.00	7680	540	8.37
Meta Quest 2	299.99	7680	439	17.15
Oficina i serveis	Preu (€/mes)	-	Temps d'ús (mes)	Cost (€)
Coworking a Barcelona	220.00	-	4	880.00
Total	-	-	-	1031.18

Taula 5: Costos genèrics
Preus extrets de les respectives pàgines web

7.1.3 Costos d'imprevists

En alguns casos, els factors de risc els he tingut tingut en compte per estimar la duració de la tasca. En altres casos, el risc comportarà una certa quantitat d'hores de treball addicionals, i en altres la compra imprevista de material.

Evidentment, en els dos casos caldrà cobrir el sobrecost de la mesura aplicada.

¹²<https://rog.asus.com/es/laptops/rog-flow/rog-flow-x16-2022-series/>

¹³<https://www.samsung.com/es/monitors/>

¹⁴<https://www.meta.com/es/quest/products/quest-2/>

¹⁵<https://aticco.com/coworking-barcelona/>

Imprevist	Probabilitat	Mesura aplicada	Cost (€)
Desconeixement del domini	Alta (70%)	30h I + 30h DS addicionals	944.79
Limitacions de temps	Mitjana (50%)	5h DS + 5h DI per esprint	762.30
Indisponibilitat del material	Molt baixa (5%)	Compra d'unes Meta Quest 2	15.00
Total	-	-	1722.09

Taula 6: Costos dels imprevists
Elaboració pròpia

7.1.4 Costos de contingència

Tenint en compte que es tracta d'un projecte tecnològic basat en realitat virtual, he decidit guardar una contingència del 15% sobre el cost del personal i del material.

Això és perquè si bé la realitat virtual és complexa i poden sorgir múltiples adversitats, la tecnologia ja no és tan innovadora com fa uns anys i ja s'ha explorat molt. A més a més, l'anàlisi de riscs en aquest document ja és prou exhaustiu.

Disposar d'aquest pressupost extra em permetrà gestionar possibles riscs imprevisibles que no hagin sortit en l'anàlisi anterior, en un projecte on estaré treballant amb tecnologies relativament innovadores.

Despesa	Cost (€)	Contingència (€)
Costos de personal	12963.17	1944.48
Costos genèrics	1031.18	154.68
Total	-	2099.16

Taula 7: Costos de contingència
Elaboració pròpia

7.1.5 Pressupost final previst

Tenint-ho tot en compte, el pressupost final que en resulta el trobareu a la Taula 8.

Despesa	Cost (€)
Costos de personal	12963.17
Costos genèrics	1031.18
Imprevists	1722.09
Contingència	2099.16
Total	17815.60

Taula 8: Pressupost final previst
Elaboració pròpia

7.2 Control de gestió

Al finalitzar cada esprint, calcularé una sèrie d'indicadors per verificar que no hi ha una desviació del pressupost. Actualitzaré el pressupost amb les dades reals a cada iteració, i aplicaré mesures si hi ha massa desviació respecte de la previsió.

Per fer-ho tindré un històric d'hores reals dedicades a cada tasca, així com hores per rol, que compararé el cost estimat per la tasca inicialment. També m'apuntaré qualsevol despesa extraordinària que es produeixi, i assignaré pressupost d'imprevistes i contingència per a cobrir-los.

Els indicadors proposats són els següents:

- Desviació d'hores per tasca
$$(Hores_estimades - Hores_reals) \times Cost_estimat$$
- Desviació del cost del personal per hora
$$(Cost_estimat - Cost_real) \times Hores_reals$$
- Desviació total del cost del personal
$$Costos_personals_estimats - Costos_personals_reals$$
- Desviació total del cost del material
$$Costos_materials_estimats - Costos_materials_reals$$
- Desviació total dels imprevist
$$Costos_impervist_estimats - Costos_impervist_reals$$
- Desviació total d'hores
$$Hores_totals_estimades - Hores_totals_reals$$
- Desviació total dels costos
$$Costos_estimats - Costos_reals$$

Cal tenir en compte que ja he assignat molt de pressupost per afrontar diversos riscs, prevists i inesperats. Si els indicadors fan entendre que estic sobrepassant el pressupost esperat en més d'un 10%, caldrà prendre mesures més severes.

En aquest cas, si s'arriba a fer necessari, redefiniré l'abast del projecte i replantejaré les tasques amb tal de mantenir la major quantitat de funcionalitats possibles en el producte final. A més, caldrà reunir els interessats per analitzar l'arrel del problema.

8 Desenvolupament de l'eina

El procés de desenvolupament ha involucrat una gran part de recerca i investigació sobre les tecnologies i els coneixements requerits per dur a terme el projecte, abans de començar la implementació de cada funcionalitat.

La presa de decisions i el compromís amb una solució concreta han estat necessaris en la majoria de circumstàncies que ha calgut resoldre durant el desenvolupament, i a vegades he optat per recórrer per aproximacions als problemes plantejats.

En aquesta secció explicaré en detall en què ha consistit aquest procediment de recerca i implementació en cada vessant del producte final. A més justificaré totes les decisions preses en cada pas, especialment quan la millor solució només era una aproximació per al problema plantejat.

El lector trobarà al meu repositori¹⁶ de GitHub tot el programari implementat, les dades utilitzades, i una guia d'instal·lació per executar el projecte localment.

8.1 Disseny de l'escena i models

L'escenari en el qual l'usuari podrà participar en seqüències de joc i ser avaluat des del punt de vista tàctic consisteix en una típica pista de pàdel. Les mides són les corresponents a una pista habitual, de 20×10 metres, dividida per la meitat de manera que cada equip juga en un quadrat de 10 metres de costat.

Com que les situacions de joc simulades són d'un partit de dobles en aquest esport, l'usuari haurà de percebre tres jugadors a la pista: un aliat i una parella d'oponents. He optat per no representar l'avatar propi de l'usuari per evitar oclusions amb la trajectòria de la pilota, que acostuma a passar a prop. Per això, he inclòs tres humanoides a la pista, que apareixeran per a representar les jugades necessàries.

També he necessitat un model per la pilota de joc, així com una raqueta per cada humanoide i una per l'usuari de l'aplicació. Les mides d'aquestes també són les normals dels seus anàlegs físics.

La il·luminació és un altre aspecte important de l'escena, que cal tenir controlat per una òptima concentració i experiència de l'usuari.

¹⁶<https://github.com/mvalls2/VRPadelTactics>

8.1.1 Importació dels models

El primer pas per desenvolupar una eina en Unity és evidentment la creació d'un nou projecte en blanc. És freqüent en projectes de realitat virtual l'ús de la **Universal Render Pipeline** per al renderitzat de l'escena perquè és una mica més flexible i personalizable, i és ideal per uns gràfics de qualitat. Tot i així, he decidit optar per la **Built-in Pipeline** clàssica de Unity per raons d'eficiència.

He obtingut tots els models en el format natiu de Blender per si calia fer-hi alguna modificació. Blender permet l'exportació al format **FBX**, reconegut per la majoria de motors de videojocs, en els que s'inclou Unity.

Els models de la pista i la pala els he obtingut de **Sketchfab¹⁷**, publicats per **arca_done** sota una llicència **Creative Commons Attribution**. L'humanoide prové del repositori d'avatars **Microsoft Rocketbox Avatar Library¹⁸**, compartit sota una llicència **MIT**. Finalment, el model de la pilota és de la **Unity Asset Store¹⁹**, amb llicència segons les regles de la **Standard Unity Asset Store EULA**.

La pista l'he posicionada de manera que el centre de la superfície de la cara superior del terra coincideix amb l'origen de coordenades. A sobre hi ha col·locats tres humanoides i la pilota en posicions arbitràries, per a que es posicionin correctament durant l'execució.

Cada objecte consta d'un col·lisionador i una etiqueta de manera que les col·lisions siguin fàcilment tractables des del codi i pugui reconèixer cada objecte. Particularment són importants les distincions entre les següents classes, per a la validació de les regles del joc i les físiques:

- Terra
- Paret de fons
- Paret lateral
- Malla metà·lica
- Xarxa

¹⁷<https://skfb.ly/osnny>

¹⁸<https://github.com/microsoft/Microsoft-Rocketbox>

¹⁹<https://assetstore.unity.com/packages/3d/props/free-sport-balls-293937>

- Pala
- Pilota

Alguns exemples on aquestes etiquetes resulten importants són: assegurar un únic rebot al terra per a respectar les normes del pàdel, o reduir el coeficient de restitució en cas de col·lisió amb la xarxa.

8.1.2 Il·luminació de l'escena

El model de la pista de pàdel incorpora quatre focus de llum per a il·luminar tota l'escena. No he considerat que fos necessària cap altra font de llum. Tot i que un focus direccional zenithal potser hagués aconseguit una il·luminació més homogènia, d'aquesta manera les condicions són més fidels a les que trobaríem en una pista interior de pàdel real.

La intensitat dels focus és configurable des del codi, i això permet encendre-les per transmetre a l'usuari la noció d'inici del joc quan comença la simulació.

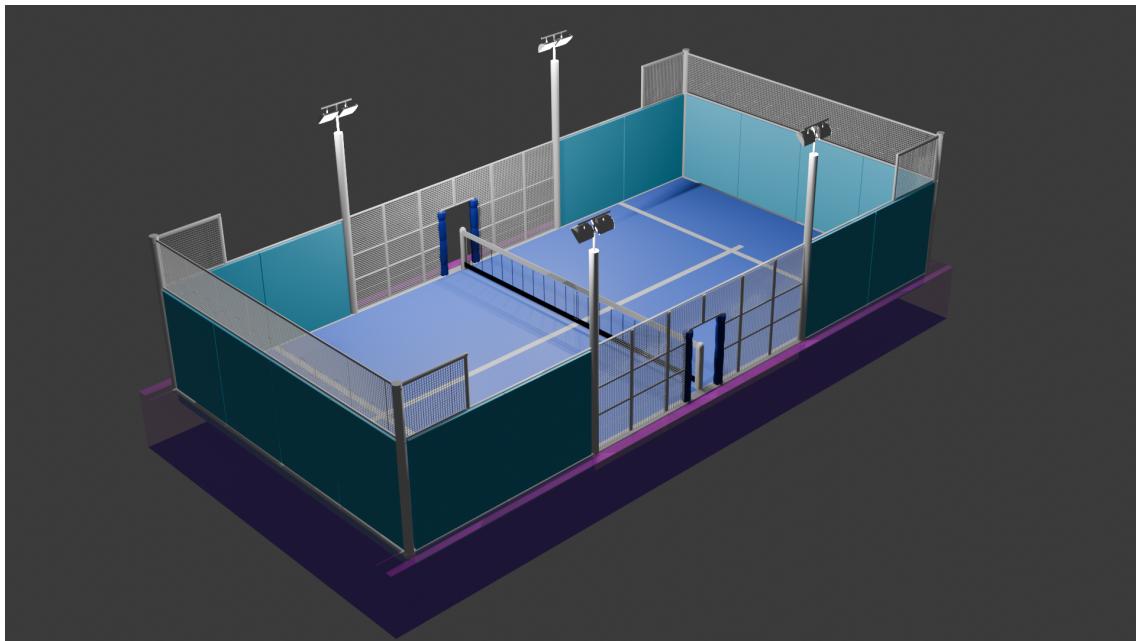


Figura 7: Model de la pista
Model obtingut de Sketchfab, publicat per arca_done

8.2 Implementació del motor de les físiques

El càcul de trajectòries de la pilota és un requisit essencial de l'eina. Per aquesta raó he considerat que la millor opció és desenvolupar el meu propi motor de físiques per al projecte, que permeti simular trajectòries de la pilota quan sigui necessari.

Una altra avantatge d'aquesta decisió és que això permet tenir en compte forces addicionals implicades en els efectes que es poden donar a la pilota, que el motor de Unity ignora.

La classe que controla el comportament de la pilota és la principal del projecte, i actua de mediadora entre totes les altres. Aquesta classe hereta de `MonoBehavior` i és un component que he afegit a la pilota de l'escena. És responsable de la seva posició i rotació dins de l'escena, i on es resolen les diferents col·lisions cada frame, a més de realitzar simulacions donades les condicions inicials sota petició.

Essencialment aquesta classe emmagatzema la posició, el vector de la velocitat i el vector de la velocitat angular, i les actualitza a cada crida del mètode `FixedUpdate`. Amb aquest objectiu el codi calcula les forces que actuen sobre la pilota exceptuant col·lisions, i n'actualitza la posició, la velocitat lineal i la velocitat angular. Finalment gestiona les col·lisions si el pas anterior n'ha produït cap.

És important la distinció entre la freqüència de renderitzat, que he configurat als 72 fps requerits per l'equip de realitat virtual, i la freqüència d'actualització de les físiques. És habitual en jocs dissenyats amb Unity tenir la segona una mica inferior a la primera.

Tot i així, com que no resultava un compromís per al rendiment de l'aplicació, per afavorir la precisió de les trajectòries de la pilota he decidit que s'actualzin les físiques cada centèsima de segon.

8.2.1 Càcul de la força resultant

Per al càlcul de les forces que actuen sobre la pilota s'han decidit els valors d'una sèrie de propietats, assignant-los els valors habituals per una pilota i una raqueta normals. Tots aquests valors són fàcilment configurables des de l'editor de Unity per canviar el comportament de la pilota.

Constant	Valor
Massa de la pilota (m)	0.057 kg
Gravetat (g)	9.81 m/s ²
Coeficient de fregament de la raqueta (μ)	0.5
Coeficient d'arrossegament (C_d)	0.5
Coeficient de sustentació (C_l)	0.5
Densitat de l'aire (ρ)	1.2 kg/m ³
Decaiguda de la velocitat angular (s)	0.999
Coeficient de restitució (e_{normal})	0.8

Taula 9: Propietats i constants físiques
Valors de referència extrets de [13]

Addicionalment, el radi de la pilota s'obté a partir del col·lisionador que incorpora l'objecte en l'escena per fer que sigui un únic radi coherent. El valor per defecte és també l'habitual per una pilota en aquest esport, uns 66 mil·límetres.

Ignorant les forces externes introduïdes per les col·lisions amb altres cossos, les forces que he decidit tenir en compte per la pilota en suspensió són:

- **Força de la gravetat**

És la força d'atracció exercida per la Terra sobre la pilota.

$$\vec{F}_g = m \cdot \vec{g}$$

on

\vec{F}_g : Força de la gravetat

m : Massa de la pilota

\vec{g} : Constant d'acceleració gravitacional

Aquesta força és l'única que és constant durant tota l'execució.

- **Força de fregament amb l'aire**

És la força de la resistència que oposa l'aire a ser travessat [14].

$$\vec{F}_d = -\frac{1}{2} \cdot C_d \cdot \rho \cdot \pi \cdot r^2 \cdot |\vec{v}|^2 \cdot \hat{v}$$

on

\vec{F}_d : Força de fregament

C_d : Coeficient d'arrossegament

ρ : Densitat de l'aire

r : Radi de la pilota

$|\vec{v}|$: Magnitud de la velocitat

\hat{v} : Vector unitari de la velocitat

És una força que actua en el sentit contrari de la velocitat lineal, i que és proporcional a la superfície que obtenim al llescar la pilota per la meitat, i al mòdul de la velocitat al quadrat.

- **Força de Magnus**

És la força generada per la rotació de la pilota que dóna efecte al cop [15].

$$\vec{F}_m = \frac{1}{2} \cdot C_l \cdot \rho \cdot \pi \cdot r^2 \cdot |\vec{v}|^2 \cdot \hat{\omega} \times \hat{v}$$

on

\vec{F}_m : Força de Magnus

C_l : Coeficient de sustentació

ρ : Densitat de l'aire

r : Radi de la pilota

$|\vec{v}|$: Magnitud de la velocitat lineal

$\hat{\omega}$: Vector unitari de la velocitat angular

\hat{v} : Vector unitari de la velocitat lineal

És una força que actua en el sentit del producte vectorial d'ambdues velocitats i és proporcional a les mateixes magnituds que la força de fregament.

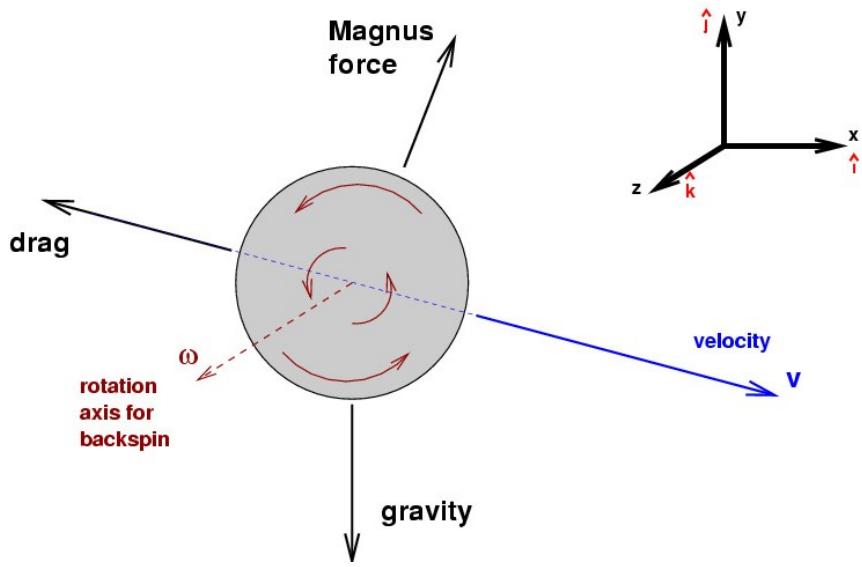


Figura 8: Diagrama de forces
Imatge extreta de la pàgina de Richmond [15]

Aquestes tres forces són les que em permeten calcular l'acceleració de la pilota, segons la segona llei de Newton. A partir d'aquesta s'actualitza la velocitat lineal:

$$\vec{F}_{total} = \vec{F}_g + \vec{F}_d + \vec{F}_m$$

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}_{total}}{m}$$

$$\vec{v}_i = \vec{v}_{i-1} + \Delta t \cdot \vec{a}$$

La velocitat angular simplement pateix una decaiguda percentual en mòdul:

$$\vec{\omega}_i = s \cdot \vec{\omega}_{i-1}$$

Les noves velocitats em permeten al seu torn calcular la nova posició i rotació:

$$\vec{x}_i = \vec{x}_{i-1} + \Delta t \cdot \vec{v}$$

$$\vec{R}_i = \text{Quaternion.Euler}(\Delta t \cdot \vec{\omega}) \cdot \vec{R}_{i-1}$$

On \vec{R} representa la rotació de la pilota i $\text{Quaternion.Euler}()$ retorna el quaternió que representa la rotació necessària donada la velocitat angular.

8.2.2 Gestió de les col·lisions

Les col·lisions es gestionen just després del càlcul descrit prèviament, corregint la posició de la pilota en cas d'haver travessat cap objecte.

Mitjançant la tècnica de **raycasting** de Unity, en cas de col·lisió obtinc el punt de contacte i la normal \vec{n} de la superfície col·lisionada. Addicionalment calculo la velocitat d'aquesta superfície en el punt de contacte, que només és rellevant si es tracta de la raqueta.

Disposo de la velocitat lineal i angular de la raqueta calculades des de 15 centímetres a la dreta i sota la càmera, on es pressuposa que comença el braç que mou la raqueta, perquè una classe especialitzada s'encarrega d'actualitzar-ne els valors.

Així doncs, podem calcular les contribucions de la velocitat lineal i angular en la velocitat d'impacte de la raqueta en el punt de contacte:

$$\vec{v}_{sup} = \begin{cases} \vec{v}_{raq} + \vec{\omega}_{raq} \times \vec{r}, & sup = "raqueta" \\ (0, 0, 0), & sup \neq "raqueta" \end{cases}$$

On \vec{r} és el vector que parteix de l'origen del braç fins al punt de contacte.

$$\vec{v}_{rel} = \vec{v} - \vec{v}_{sup}$$

La nova velocitat lineal és la velocitat relativa reflectida respecte la normal, mitigada per un coeficient de restitució. Quan la col·lisió és amb la xarxa, aquest coeficient és només una quarta part del seu valor definit a la taula de la secció anterior:

$$\vec{v} \leftarrow e \cdot (\vec{v}_{rel} - 2 \cdot (\vec{v}_{rel} \cdot \vec{n}) \cdot \vec{n})$$

Addicionalment si la col·lisió ha estat amb la malla metàl·lica, s'afegeix soroll d'acord amb una distribució normal:

$$n_i \sim \mathcal{N}(0, 0.1^2)$$

$$\vec{v}_{noise} = \begin{cases} (n_x, n_y, n_z), & sup = "malla" \\ (0, 0, 0), & sup \neq "malla" \end{cases}$$

$$\vec{v} \leftarrow \vec{v} + \vec{v}_{noise}$$

Les col·lisions també modifiquen la velocitat angular de la pilota. La fricció amb la superfície introduceix un impuls angular que cal afegir a la velocitat angular [16].

L'impuls angular generat per la fricció es proporcional al radi de la pilota i de la velocitat relativa de la col·lisió. Sigui \vec{r}_b el vector del centre de la pilota al punt de contacte:

$$\vec{tg} = \vec{n} \times \vec{r}_b$$

En l'anterior equació \vec{tg} representa un vector tangent a la col·lisió, i que té direcció perpendicular al pla dels vectors radi i normal.

$$\begin{aligned}\vec{f}_{impulse} &= \mu \cdot \hat{tg} \cdot (\vec{v}_{rel} \cdot \hat{tg}) \\ \vec{\omega} &\leftarrow \vec{\omega} + \frac{\vec{f}_{impulse}}{|\vec{r}_b|}\end{aligned}$$

D'aquesta manera queden actualitzades la velocitat lineal i la velocitat angular, i per aquesta raó les forces implicades en la col·lisió no participen en el càlcul de l'acceleració a partir de la segona llei de Newton.

8.3 Recreació de situacions de partit

Un dels recursos més importants en aquest projecte ha estat les dades facilitades pels codirectors d'un partit professional de pàdel. Aquest partit és concretament la final de dobles masculins de la **World Padel Tour's Estrella Damm Open 2020**²⁰. L'objectiu de l'eina que m'he proposat desenvolupar és simular situacions d'aquest partit i avaluar la resposta de l'usuari coneixent prèviament la resposta professional.

Aquestes dades consisteixen en el resum fotograma a fotograma del partit, amb les dades de la posició de la pilota i tots els jugadors, i fins i tot el tipus de cop realitzat en aquells en què la pilota està sent colpejada.

Però les dades tenen algunes limitacions:

- Totes les posicions són en **dues dimensions**, i es corresponen a la projecció al terra de les coordenades en tres dimensions, de manera que l'altura es perd.
- Les dades rellevants són només en aquells fotogrames on la pilota està sent colpejada, les **dades intermèdies són el resultat d'una interpolació**. Això causa que malgrat saber la posició de llançament, la posició de recepció i el tipus del cop, les posicions exactes on la pilota col·lisiona amb el terra i les parets en el partit real són desconegudes.

La naturalesa de les dades fa impossible una representació totalment fidel al partit original, i converteix la recreació aproximada d'aquestes jugades en un repte.

8.3.1 Anàlisi de les dades i disseny de l'algorisme

Per aquelles files on es fa un cop, els camps de que disposo són els següents:

- **Frame**: ordinal del fotograma
- **Temps**: instant de temps
- **Rol i posició (x4)**: posició i etiqueta ("teammate", "receiver", "opponent")
- **Posició de la pilota**: coordenades en dues dimensions de la pilota
- **Velocitat (x4)**: velocitat dels jugadors
- **Destí**: coordenades d'on serà rebuda la pilota

²⁰<https://www.youtube.com/watch?v=7s55wB9dR78>

- **Origen:** coordenades d'on parteix la pilota
- **Duració:** diferència entre els instants de llançament i recepció
- **Tipus de cop:** classificació del cop [17]
- **Rally:** ordinal del punt en el partit

La classificació del cop és la usada per Almonacid-Cruz, resumida a la Figura 9, a la que addicionalment s'hi ha afegit una categoria específica pel servei.

DEFENSA	FONDO	D	Derecha
		R	Revés
		AD	Alambrada derecha
		AR	Alambrada revés
	PARED	PLD	Pared lateral de derecha
		PLR	Pared lateral de revés
		SPD	Salida pared de derecha
		SPR	Salida pared de revés
		BPD	Bajada pared de derecha
		BPR	Bajada pared de revés
		DPA	Doble pared que abre
		DPAG	Doble pared que abre con giro
		DPC	Doble pared que cierra
		CP	Contra pared
ATAQUE	RED	VD	Volea de derecha
		VR	Volea de revés
		B	Bandeja
		DJD	Dejada
	DEFINICIÓN	R1	Remate
		R2	Finta de remate
		R3	Remate por 3
		R4	Remate por 4
		CD	Contra de derecha
		CR	Contra de revés

Figura 9: Tipus de cops
Classificació extreta d'Almonacid-Cruz [17]

Així doncs, tot i que no tenim l'altura de la pilota en cap moment, el tipus de cop caracteritza perfectament la seqüència de rebots abans de la recepció.

Seqüència	Abreviatura
-	VD, VR, B, DJD
Terra	D, R, R1, R2, R3, R4
Terra → Lateral	AD, AR, PLD, PLR
Terra → Fons	SPD, SPR, BPD, BPR, CD, CR
Terra → Lateral → Fons	DPA, DPAG
Terra → Fons → Lateral	DPC, DPCG

Taula 10: Tipus de cops segons la seqüència de rebots
Elaboració pròpia

La idea per reconstruir la jugada en tres dimensions es basa en seleccionar una trajectòria aleatòria que respecti la seqüència dels rebots associada al tipus de cop. A més cal que comenci des d'un lloc proper d'on comença la jugada real i tingui alguna posició retornable propera a la posició de recepció. He considerat que una pilota és retornable quan la seva altura es troba entre els 0.2 metres i els 2.2 metres.

Per aconseguir-ho, l'eina precomputa una gran quantitat de trajectòries simulades vàlides que respecten les lleis de l'esport. A més genera un arbre KD (**KD Tree**) per categoria de cop a la Taula 10, on emmagatzema un parell clau-valor per cada posició retornable de cada trajectòria simulada.

La clau és el vector de quatre dimensions que concatena les coordenades de llançament d'aquesta trajectòria i la posició actual de la pilota. El valor és simplement l'identificador de la trajectòria corresponent.

Cada punt de la seva trajectòria es classifica en funció dels rebots que porta acumulats fins al moment, i en funció d'això es tria l'arbre KD corresponent i s'hi guarda el seu parell clau-valor.

8.3.2 Generació aleatòria de trajectòries

L’estratègia per resoldre el problema consisteix en la generació d’un total de deu mil trajectòries aleatòries sota la premissa que respectin les normes del joc des del punt de vista dels rebots.

Amb aquest objectiu la classe que controla la pilota guarda amb quins objectes col·lisiona durant la simulació d’una trajectòria. La lògica que realitza la simulació demana una posició inicial, i unes velocitats lineals i angulars inicials, i si la simulació no verifica les regles del pàdel lanza una excepció.

La dificultat és que abans de realitzar la simulació no se sap si la trajectòria descrita per aquests valors inicials és bona. Per això cal controlar l’aleatorietat per aconseguir una bona probabilitat d’èxit de simulació, i evitar que el càcul de les trajectòries precomputades s’allargue indefinidament.

Com el lector haurà observat, he ignorat el contraparet (CP) en la classificació de la Taula 10. Això és justament perquè dificulta aconseguir un bon rendiment en la generació de les trajectòries. Els histogrames dels tipus de cops de múltiples partits professionals [18] demostren que el contraparet normalment no representa més del 1.5% de les jugades. Com que es tracta d’un cop molt infreqüent, sobretot en partits professionals, no consideraré aquest cop en aquest projecte.

En qualsevol altre tipus de cop, la velocitat inicial és en direcció a la meitat de la pista de l’oponent, i per tant es pot acotar molt més. Els valors inicials són aleatoris dins dels rangs següents:

$$\vec{x} = (x_x, x_y, x_z)$$

$$\vec{v} = (v_x, v_y, v_z)$$

$$\vec{\omega} = (\omega_x, \omega_y, \omega_z)$$

$$x_x \in [-4.5, 4.5], \quad x_y \in [0.3, 2], \quad x_z \in [-9.5, 9.5]$$

$$v_x \in [-6, 6], \quad v_y \in [-0.5, 6], \quad v_z \in -\text{sign}(x_z)[5, 12]$$

$$\omega_x \in [-5, 5], \quad \omega_y \in [-5, 5], \quad \omega_z \in [-5, 5]$$

8.3.3 Implementació d'un KDTree

Els arbres KD no acostumen a estar en les llibreries estàndards de cap llenguatge, i he hagut d'implementar l'estructura de dades per a un projecte en Unity.

Un arbre KD és un tipus d'arbre binari arrelat que s'utilitza freqüentment per trobar les coordenades més properes a un punt objectiu. Es basa en la divisió de l'espai fent servir la mediana del conjunt de coordenades d'entrada, fent ús a cada nivell de l'arbre una dimensió diferent per a particionar [19].

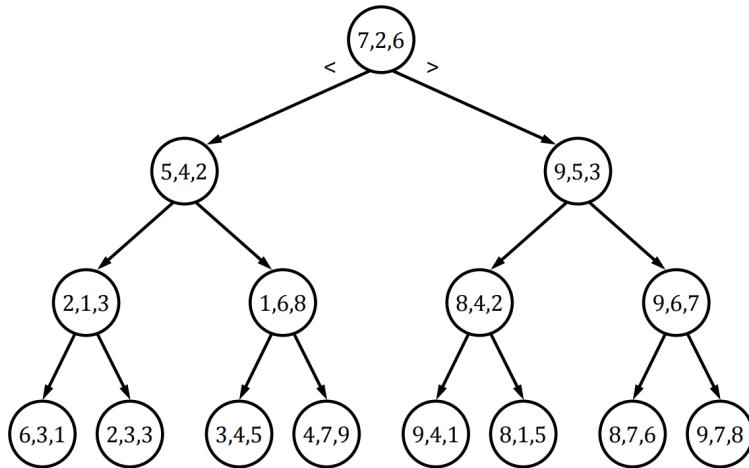


Figura 10: Exemple d'arbre tridimensional
Imatge extreta de l'article de Brown [19]

En la Figura 10 s'observa com l'arrel és la mediana de tots els elements en la primera dimensió. Tots els nodes a l'esquerra tenen un valor inferior en aquesta dimensió, i tots els nodes a la dreta tenen un valor menor o igual que l'arrel.

El segon nivell segueix el mateix raonament per a cada subarbre ordenant segons la segona dimensió, i en general el nivell i -èssim està classificat segons la dimensió $(i \bmod N)$ -èssima on N és el total de dimensions.

La cerca en l'arbre per trobar la coordenada més propera a una d'objectiu s'aconsegueix buscant recursivament el node més pròxim segons la distància euclidiana a l'objectiu sempre en la branca que es correspon a la classe a la que pertanyeria la coordenada objectiu segons la partició de la mediana, comparant amb el node arrel la dimensió necessària.

En alguns casos la coordenada objectiu serà més pròxima a l'hiperplà que separa les coordenades d'ambdues branques que al punt més proper trobat en la branca escollida. Quan això passi existeix la possibilitat de trobar un node més proper en la branca contrària, i cal fer una segona crida recursiva.

L'arbre que he implementat es construeix un sol cop amb totes les dades, i no suporta insercions individuals. D'aquesta manera assegurem que l'arbre sigui perfectament balancejat en tot moment, i no degeneri a causa de les noves insercions, cosa que garanteix que cada crida recursiva tracta només una meitat dels elements.

La creació de l'arbre requereix la cerca de la mediana, i la creació recursiva de cada subarbre. Trobar la mediana té cost $O(n)$ fent servir l'algorisme de Quickselect amb l'optimització de la mediana de medianes per triar el pivot, i es fan dues crides recursives amb la meitat dels elements cada una.

En resum, les operacions a l'arbre i els seus costos temporals mitjans són:

- **Construcció de l'arbre**

Entrada: (array clau-valor)

Cost: $O(n \log n)$

Retorn: -

- **Cerca de la coordenada més propera**

Entrada: (clau)

Cost: $O(\log n)$

Retorn: (valor)

8.3.4 Serialització de les dades

Les dades obtingudes durant el càlcul són emmagatzemades localment per fer-se servir en múltiples execucions del projecte, en format JSON.

Si l'eina troba els fitxers amb les estructures serialitzades, les deserialitza i les constueix per l'ús durant l'execució amb un petit cost temporal. En cas contrari genera les dades i les serialitza localment.

La quantitat de memòria necessària és elevada, arribant a superar 1 GB, però permet estalviar el cost temporal de les simulacions amb la pilota i la construcció dels arbres.

8.3.5 Assignació de trajectòries en temps real

En temps real, la classe especialitzada en la gestió de la base de dades selecciona un parell de cops consecutius del partit professional, assegurant que cap sigui un contraparell o un servei.

Aleshores es busca en l'arbre KD corresponent la trajectòria més propera a les posicions de llançament i recepció. A partir dels identificadors d'ambdues trajectòries, se'n recupera la posició i les velocitats inicials, i es retorna aquestes dades al controlador de la pilota perquè pugui encuar els cops i començar el joc.

8.4 Interacció amb l'usuari

La realitat virtual ha revolucionat la manera en què interactuem amb les tecnologies digitals, permetent als usuaris submergir-se en entorns虚拟 que simulen la realitat.

En aquest context, la interacció amb l'usuari esdevé un element fonamental, ja que determina l'experiència i la seva immersió en el món virtual. En general cal tenir en compte tots els detalls, i evitar causar mareig a l'usuari quan cal desplaçar-lo.

Les interaccions amb els menús i la pilota també són molt diferents a com serien en una eina digital però no virtual, i evidentment les accions d'entrada són unes altres.

Les ulleres de realitat virtual **Meta Quest 2** estan equipades d'un sensor de moviment, i compten amb un controlador per cada mà. Els controladors projecten rajos cap endavant, que mitjançant **raycasting** permeten interactuar amb el món virtual.



Figura 11: Equipament Meta Quest 2
Imatge extreta de la pàgina oficial de Meta

8.4.1 Interacció en realitat virtual

La llibreria *Open XR* és la que he utilitzat en aquest projecte per a la interacció en realitat virtual, i ja dóna suport a moltes operacions habituals.

En tot cas en aquest projecte només he utilitzat el controlador dret per al control de la pilota i la interacció amb els menús. El desplaçament per la pista de l'usuari, o en altres paraules el desplaçament de la càmera, és automàtic fent servir la llibreria de realitat virtual.

El raig interactòr per defecte associat al controlador que ofereix la llibreria només m'ha servit per la interacció amb els menús, però no per la interacció amb la pilota.

Una possibilitat per implementar la interacció de l'usuari amb la pilota consisteix en equipar a l'usuari amb una raqueta i deixar que el motor de físiques s'encarregui de la resta. Vaig descartar aquesta opció perquè requereix habilitat i tècnica de l'usuari que no vull avaluar amb la meva eina, només l'estratègia i la tàctica.

En comptes d'això, he implementat els meus propis rajos interactors, mentre que una classe especialitzada controla quin d'ells és visible per l'usuari segons l'acció.

La interacció de l'usuari amb l'aplicació l'he dissenyat de manera que la tècnica és completament irrellevant, i no cal que l'usuari piqui ell mateix la pilota amb la raqueta. En comptes d'això, el sistema permet triar la trajectòria de la resposta en tres passos diferents. Així només l'estratègia és avaluada.

Quan el sistema recrea una situació de joc, la simulació comença amb el cop de l'ponent, que es reconstrueix a partir de les dades reals del partit. Els esdeveniments a continuació defineixen segons l'entrada de l'usuari el cop de resposta i són:

1. Posició de recepció

La velocitat comença a alentir-se fins a aturar-se del tot en el moment en que la pilota ha travessat un metre dins del camp aliat per donar temps de reacció a l'usuari.

Aleshores cal que faci servir un raig interactòr per indicar on vol fer la recepció, i teleportar-s'hi amb el gatell del controlador. A la Figura 12 es pot apreciar el punt de vista de l'usuari.

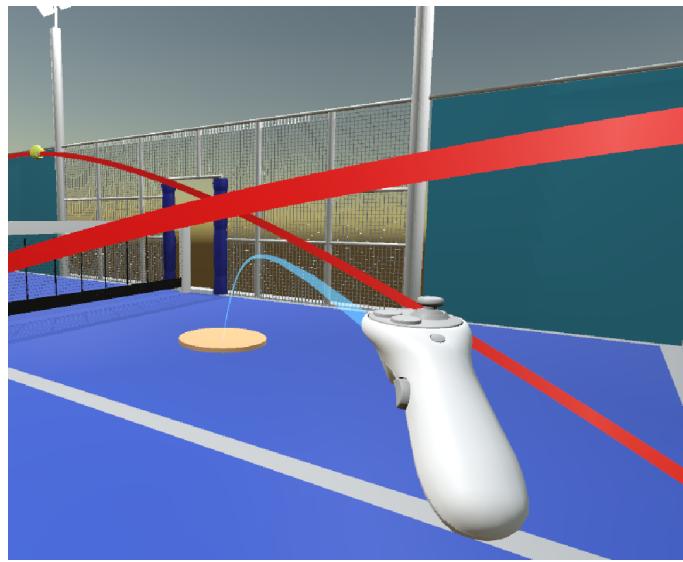


Figura 12: Interactor de teleportació
Elaboració pròpia

2. Posició de colpeig

L'usuari és equipat amb una raqueta, i la velocitat de la pilota és inversament proporcional a la distància amb aquesta. Quan l'usuari acosta suficientment la raqueta, la pilota s'atura del tot i serà des d'aquí que es realitzarà el colpeig.

3. Definició de l'objectiu

L'usuari recupera el controlador dret i es llança un raig que es projecta al camp enemic, però amb origen des de la pilota. Aquest raig desapareix sempre que l'usuari intenta apuntar a una posició invàlida com ara la paret, i prémer el gatell del controlador fixa la posició on la pilota tocarà el terra en el retorn.

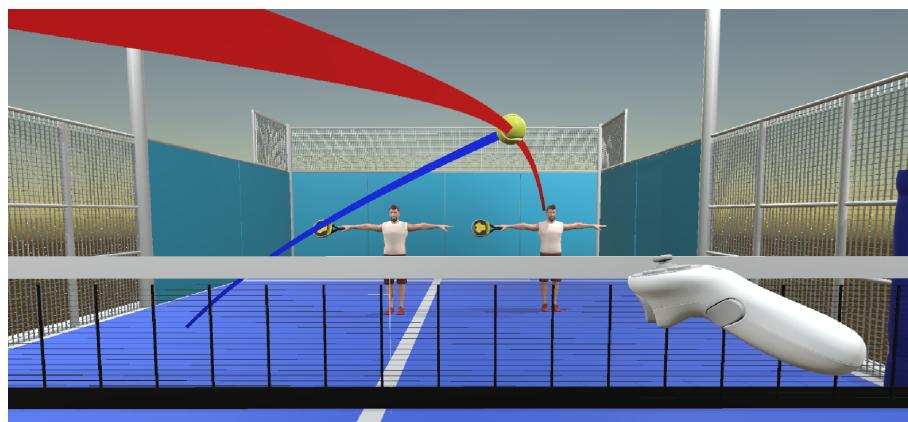


Figura 13: Tria de l'objectiu
Elaboració pròpia

4. Definició de l'alçada màxima

El raig emès de la pilota ara quedarà fixat en objectiu, i la inclinació del controlador permetrà seleccionar una alçada màxima. Aquest raig desapareix sempre que l'alçada indicada és invàlida, és a dir que no és suficient per travessar la xarxa, i prémer el gatell del controlador fixa la trajectòria de resposta.

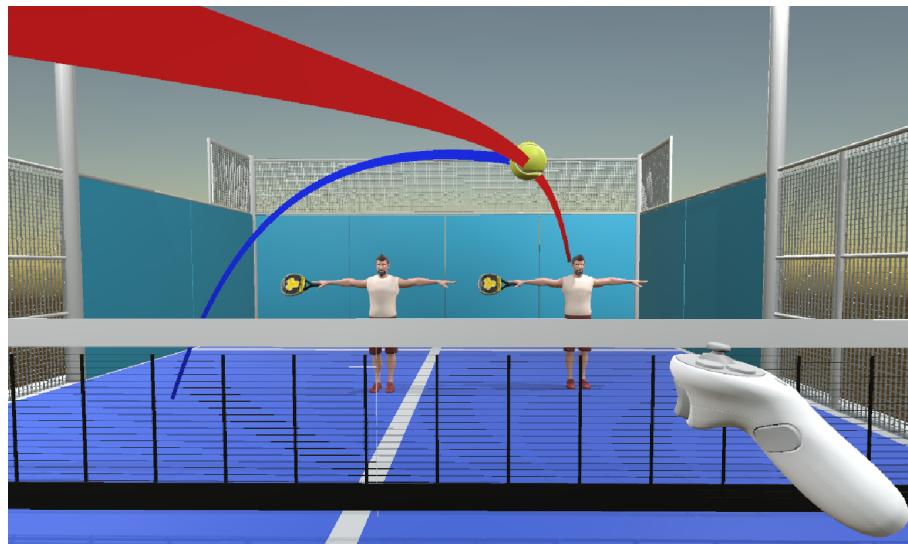


Figura 14: Tria de l'alçada màxima
Elaboració pròpia

Resumint, només és necessari inclinar el controlador i prémer el gatell per interaccionar amb la pilota i els menús. D'altra banda, el desplaçament de la ulleres en el món físic es tradueix en desplaçament en el món virtual.

8.4.2 Traçat de trajectòries i efectes especials

Per optimitzar l'experiència de l'usuari he implementat alguns recursos:

- **Traçat de trajectòries**

A més dels rajos d'interacció emesos en la seqüència d'alentiment, també es tracen les trajectòries quan es realitza un cop, ja sigui aliat o enemic.

- **Estela de la pilota**

Per fer una mica més visible la pilota, la pilota deixa al seu pas una estela.

- **Transició de teleportació**

Sempre que cal teleportar l'usuari, ja sigui per començar una nova jugada o quan tria on rebre un cop, es reproduceix una animació que fa que la pantalla s'enfosqueixi durant la teleportació per evitar causar mareig a l'usuari.

8.4.3 Disseny dels menús i diagrama de flux

Per guiar l'usuari en el flux esperat de l'aplicació, he dissenyat una parella de menús que comencen i acaben la interacció de joc.

El menú inicial apareix quan s'inicia el sistema i permet:

- Començar amb una situació de joc aleatòria
- Sortir de l'aplicació

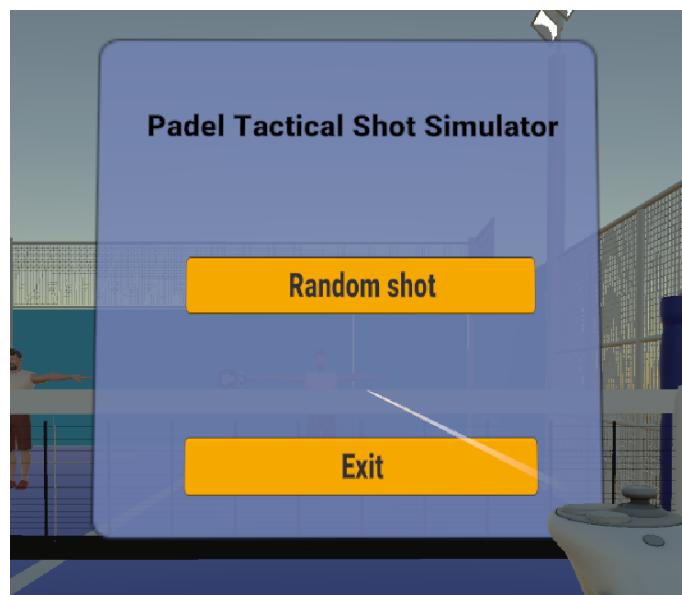


Figura 15: Menú inicial
Elaboració pròpia

El menú d'avaluació es fa visible al acabar una interacció de joc i presenta una animació amb el resultat de l'avaluació. Les accions que permet són:

- Visualitzar la resposta professional a la situació que acaba de jugar
- Començar amb una situació de joc aleatòria
- Sortir de l'aplicació

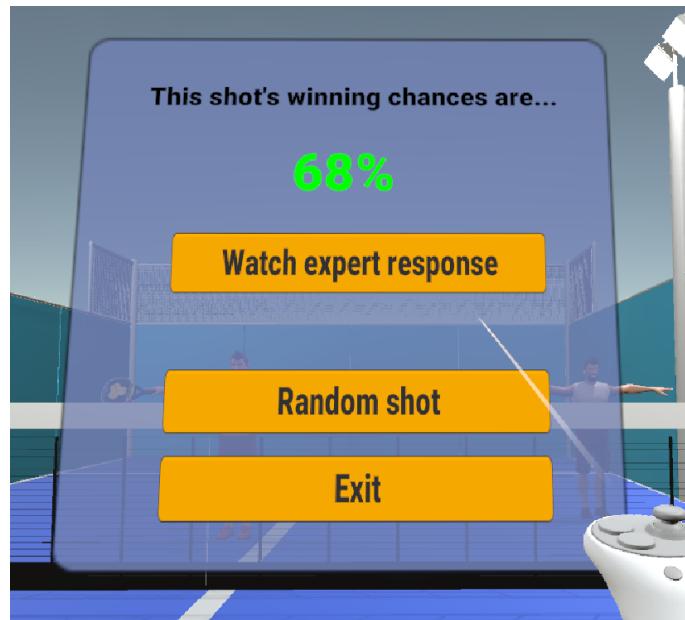


Figura 16: Menú d'avaluació
Elaboració pròpria

Tots els botons poden interactuar amb els rajos interactors del controlador, i estan connectats a la classe especialitzada que gestiona el esdeveniments.

Resumint, el diagrama de flux de l'eina és el de la Figura 17:

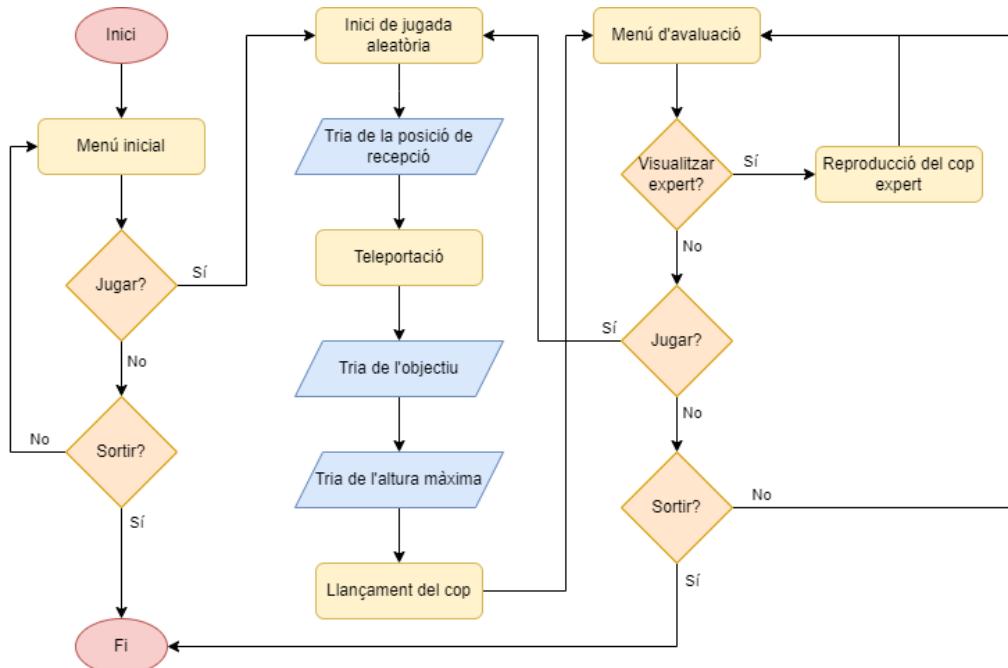


Figura 17: Diagrama de flux
Elaboració pròpria

8.5 Animació dels avatars

Tot i que no és una necessitat per avaluar a l'usuari, les animacions poden ajudar a entendre més fàcilment les accions dels avatars. Amb aquest propòsit, he implementat unes animacions per quan els avatars colpegen la pilota, es desplacen entre cops i descansen quan ja s'han posicionat i esperen la resposta de l'usuari.

La cinemàtica inversa és una tècnica usual quan es vol fixar una restricció per a alguns dels ossos d'un cos animat, normalment fixant la seva posició i rotació, i utilitzant algun algorisme que calculi configuracions viables per la resta de l'esquelet que garanteixin que es compleixen aquestes condicions [20].

L'ús de cinemàtica inversa podria haver estat una bona solució, especialment en els casos on calia que els avatars colpegessin la pilota. Malgrat tot, l'ús d'aquest tipus de tècniques avançades escapa de l'abast d'aquest projecte, sobretot tenint en compte que les animacions no són el més rellevant.

Per això, he optat per una solució molt més senzilla fent servir una màquina d'estats per a la gestió de les transicions entre els diferents clips d'animació. L'objectiu és aconseguir que els avatars que representen els oponents i l'aliat siguin capaços de colpejar la pilota, desplaçar-se per la pista i adoptar una posició de repòs quan sigui apropiat, i de manera realista.

La gravació amb `motion capture` proporcionada pel meus codirectors d'un avatar jugant a pàdel [21] ha sigut un material molt valuós per aquesta tasca. Es tracta d'una gravació de qualitat on mitjançant l'ús d'un vestit replet de sensors s'han capturat els moviments d'una persona realitzant diferents cops i desplaçaments de pàdel.

Per animar un cos tridimensional de manera complexa, normalment cal dotar-lo d'esquelet mitjançant un procés que anomenem `rigging`. Aquest mètode genera una estructura òssia que queda lligat a cada vèrtex de la malla, fent que es desplacin solidàriament amb un o mes ossos mitjançant l'assignació de pesos.

Gràcies al material, no he necessitat generar l'esquelet per al meu model. En comptes d'això, he adoptat el model utilitzat en la gravació, i he identificat tres seqüències útils per al meu projecte. Aquests clips són bones representacions de les següents accions:

- Reposar
- Desplaçar-se cap endavant
- Colpejar la pilota

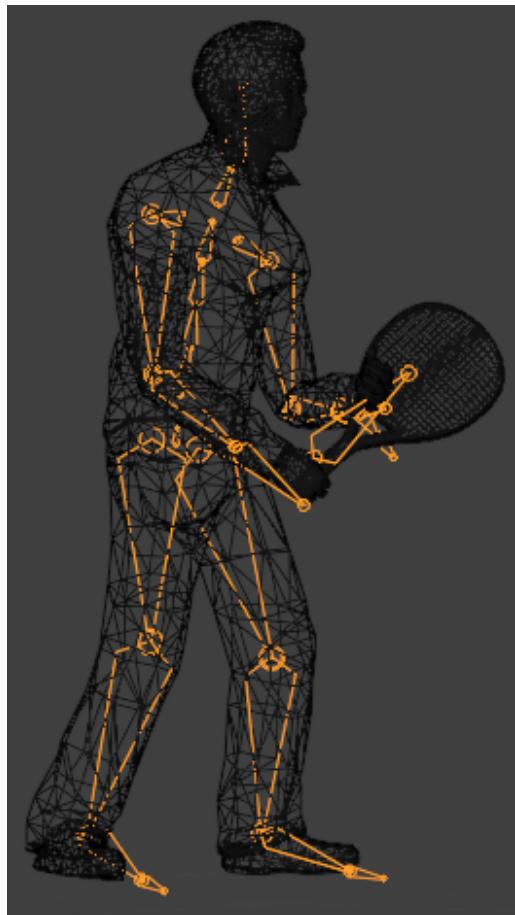


Figura 18: Esquelet de l'avatar
Malla i esquelet extrets de la gravació

Aquestes tres animacions són suficients pels requisits del meu projecte. El clip escoltit pel colpeig de la pilota és un **drive** tens, jugat de dalt a baix gairebé com un **smash**. Es tracta d'un cop versàtil que en funció de la força pot representar una gran varietat de jugades.

Cal tenir en compte que la posició inicial de la pilota en una simulació és uns metres per sobre de l'ponent que fa el cop, i per tant és molt fàcil sincronitzar l'animació amb la caiguda de la pilota. Sempre és possible posicionar l'avatar sense necessitat d'obligar-lo a fer un cop de revés.

L'animació corresponent al desplaçament pot correspondre a un moviment en qualsevol direcció, però no m'ha semblat natural que els avatars donin l'esquena a l'usuari. Per això, en aquests casos l'avatar reproduceix l'animació de córrer al revés, per representar un desplaçament cap enrere d'esqueses.

8.5.1 Màquina d'estats

La màquina d'estats final té quatre estats, i permet totes les transicions possibles. L'ús d'aquesta màquina d'estats permet definir l'estat inicial, i s'encarrega de les transicions entre animacions mitjançant la interpolació de **keyframes** d'ambdues.

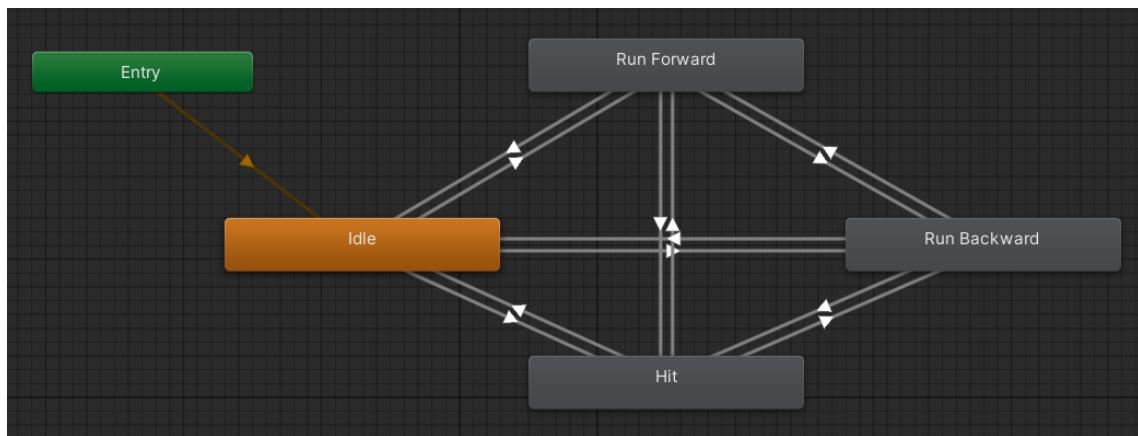


Figura 19: Màquina d'estats de les animacions
Elaboració pròpria

8.6 Avaluació tàctica del cop

L’avaluació del cop de l’usuari des d’un punt de vista tàctic és la funcionalitat principal que distingeix aquesta eina d’altres de semblants com PadelVR.

És sabut abans de la jugada de l’usuari quin havia estat el cop del jugador expert, gràcies a les dades facilitades del partit professional facilitades pel ViRVIG. La possibilitat de mostrar a l’usuari aquest cop just després de la seva jugada és un gran mètode d’autoavaluació visual, que ja satisfà els objectius desitjats.

A més he volgut poder oferir una retroacció numèrica orientativa per complementar l’autoavaluació visual. Amb aquest fi, utilitzo una regressió logística per proporcionar una probabilitat de guanyar el punt amb el cop executat, però que cal prendre’s amb cautela i només com a dada orientativa.

8.6.1 Discussió de les variables implicades

Entrenar un model d’intel·ligència artificial és possible gràcies a les dades del partit professional. Com que existeix un camp que indica l’ordinal del punt que s’està jugant, puc saber si l’equip que juga el cop ha acabat guanyant el punt o no.

Però aquestes dades tenen nombroses limitacions, sobretot que la trajectòria és desconeguda més enllà de les coordenades del cop i de recepció, i les assumpcions basades en el tipus de cop. Com a recordatori, aquestes són les variables de les que disposem per cada cop del partit professional són:

- **Frame:** ordinal del fotograma
- **Temps:** instant de temps
- **Rol i posició (x4):** posició i etiqueta ("teammate", "receiver", "opponent")
- **Posició de la pilota:** coordenades en dues dimensions de la pilota
- **Velocitat (x4):** velocitat dels jugadors
- **Destí:** coordenades d'on serà rebuda la pilota
- **Origen:** coordenades d'on parteix la pilota
- **Duració:** diferència entre els instants de llançament i recepció
- **Tipus de cop:** classificació del cop segons

- **Rally:** ordinal del punt en el partit

Algunes de les variables podrien semblar prometedores de cara a l'avaluació, com per exemple la duració del cop, però a la pràctica no es gaire útil perquè quantifica el temps entre el llançament i la recepció. D'altra banda, en la simulació en realitat virtual només podria calcular el temps des del llançament fins al primer bot al terra.

A més, una resposta ràpida pot representar a parts iguals situacions tan diferents com que l'atacant ha jugat un smash guanyador i que el defensant s'ha anticipat al cop de l'atacant i està aplicant pressió.

Des del punt de vista tàctic, les posicions dels oponents són especialment rellevants, així com les coordenades objectiu de la trajectòria. Les coordenades objectiu són les fixades per l'usuari per ser les coordenades del primer bot de la pilota. És raonable aproximar-les fent servir la posició de recepció del cop en el partit professional per entrenar el model.

La tàctica de molts esports de raqueta usualment té a veure amb buscar el forat a la pista enemiga. Algunes metavariables podrien ser útils per guiar el model a una bona predicció. He trobat particularment interessants la distància de les coordenades objectiu al centre del camp enemic, i la distància mitjana de l'objectiu a cada un dels oponents.

Per totes aquestes raons, les variables d'entrada del model són:

- Objectiu (coordenada x)
- Objectiu (coordenada z)
- Oponent esquerre (coordenada x)
- Oponent esquerre (coordenada z)
- Oponent dret (coordenada x)
- Oponent dret (coordenada z)
- Distància de l'objectiu al centre del camp enemic
- Distància mitjana de l'objectiu als oponents

8.6.2 Entrenament d'un model intel·ligent

Amb l'objectiu d'entrenar un model d'intel·ligència artifical, he decidit utilitzar la llibreria Scikit Learn²¹, en una Jupyter Notebook²² que he inclòs al repositori del projecte.

El primer pas ha estat netejar les dades, eliminant les files de dades interpolades entre els diferents cops. També ha calgut calcular les metavariables escollides.

A més, aprofitant que els cops estan ordenats seqüencialment, he determinat a partir de l'últim cop del punt qui el va guanyar. Així he generat l'etiqueta binària de sortida classificant cada entrada com a cop guanyador o no.

El següent pas ha estat la normalització de totes les variables. Aquest pas garanteix que totes les variables tinguin mitjana nul·la i una desviació estàndard d'una unitat. Això és especialment important en els alguns models, i evita que algunes variables agafin més pes que altres.

Finalment, he particionat les dades per reservar-ne una desena part per la validació de l'entrenament. Aleshores he entrenat quatre tipus de models amb els seus hiperparàmetres per defecte, per comprovar quins aconsegueixen capturar millor els patrons i correlacions de les dades, i els he provat contra el conjunt de test.

Model	Classe	Precisió	Recall	F1-Score
Regressió Logística	Perdre	0.57	0.50	0.53
	Guanyar	0.67	0.73	0.70
	Precisió global	0.63		
Random Forest	Perdre	0.45	0.38	0.41
	Guanyar	0.59	0.67	0.63
	Precisió global	0.54		
XGBoost	Perdre	0.45	0.42	0.43
	Guanyar	0.60	0.64	0.62
	Precisió global	0.54		
Màquina de Suport Vectorial	Perdre	0.55	0.46	0.50
	Guanyar	0.65	0.73	0.69
	Precisió global	0.61		

Taula 11: Rendiment dels models de classificació

²¹<https://scikit-learn.org/>

²²<https://jupyter.org/>

Definitivament el millor model de tots és la regressió logística, que a més de tenir la millor precisió global també és el que més casos de cops dolents identifica.

Les regressions logístiques conceptualment són com una regressió lineal en el sentit de que busquen assignar un pes a cada variable i sumar-hi un biaix generant una recta en l'espai [22]. L'única diferència és que el resultat que s'obté es fa passar per la funció **sigmoide** σ :

$$\sigma(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}$$

$$\hat{y} = \sigma(w^T x + b)$$

Durant l'entrenament els pesos w_i i el biaix b s'optimitzen mitjançant algun algoritme d'optimització com **Gradient Descent**, minimitzant l'error quadràtic mitjà.

En realitat la funció d'error pot incorporar factors per guiar el procés d'optimització a evitar el sobreajustament del model. Per intentar millorar la regressió logística, he provat d'optimitzar els hiperparàmetres del model, però no he aconseguit millorar significativament el model.

El model resultant és el definitiu, i l'he incorporat a l'aplicació per fer prediccions i avaluar les respostes de l'usuari.

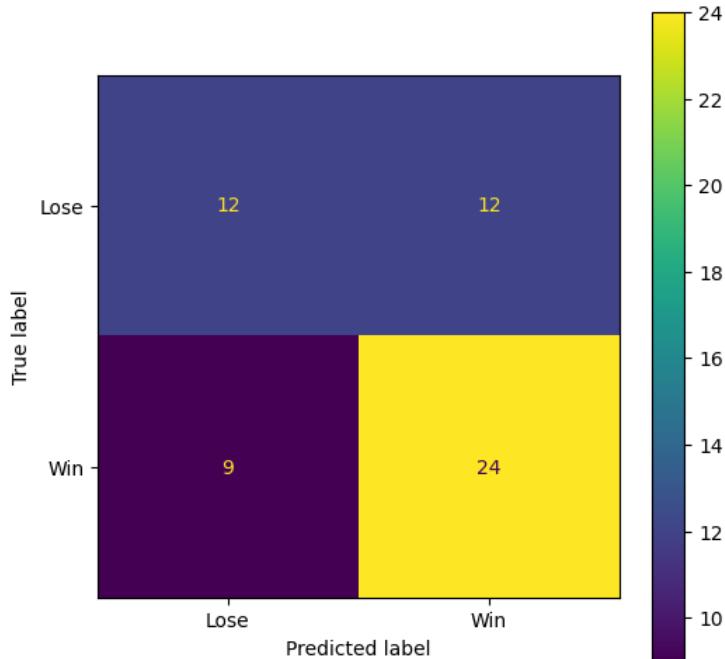


Figura 20: Matriu de confusió del model final
Elaboració pròpia

En general cap model no té un bon rendiment, però això és natural donades les limitacions de les dades disponibles. A més, és pràcticament impossible en general determinar qui guanyarà el punt només tenint en compte una sola interacció.

Tot i així, tenint en compte que és només una dada orientativa, he considerat que aporta un gran valor al projecte. En els casos on el model s'equivoca classificant, la probabilitat és propera al llindar de 0.5, i és un bon mètode de retroacció immediata.

Una altra aproximació igualment vàlida hagués estat assumir que les accions dels jugadors professionals en situacions similars són bones, i basar la puntuació donada en la similitud del cop jugat amb el del jugador professional en la situació anàloga.

8.6.3 Representació del model i inferència

Tot i que Unity disposa de llibreries que permeten importar xarxes neuronals, no existeix cap manera d'importar models no basats en l'aprenentatge profund.

Però una regressió logística és un model raonablement petit, amb una quantitat lineal de paràmetres, i amb un càcul senzill per a la inferència. És viable simular-la en temps real sense cap tipus d'esforç ni cost computacional.

Per fer-ho, només ha sigut necessari extreure els coeficients de la regressió del model, i calcular la funció donades les entrades aplicant la funció **sigmoide** en temps real. El resultat és la probabilitat de que l'entrada pertanyi a la classe positiva, o en altres paraules, de que el cop faci guanyar el punt.

8.6.4 Visualització de la jugada experta

La retroacció numèrica és instantània, però és imprecisa i basada en la poca informació disponible per a fer prediccions al respecte de l'èxit del punt. Segurament és més constructiva la retroacció visual que la reproducció de la jugada experta ofereix.

De la mateixa manera que s'ha assignat una trajectòria aleatòria aproximada al cop de l'ponent al començar la situació de joc, també és possible fer-ho amb el cop de resposta. D'aquesta manera es pot recrear una seqüència de dos cops del partit real a partir de les dades en dues dimensions.

Així doncs, l'aplicació torna a preparar la situació de joc, però aquest cop l'usuari és només un espectador. La pilota torna automàticament al camp enemic, i queda traçada de color verd la trajectòria de la pilota tornada pel jugador expert.

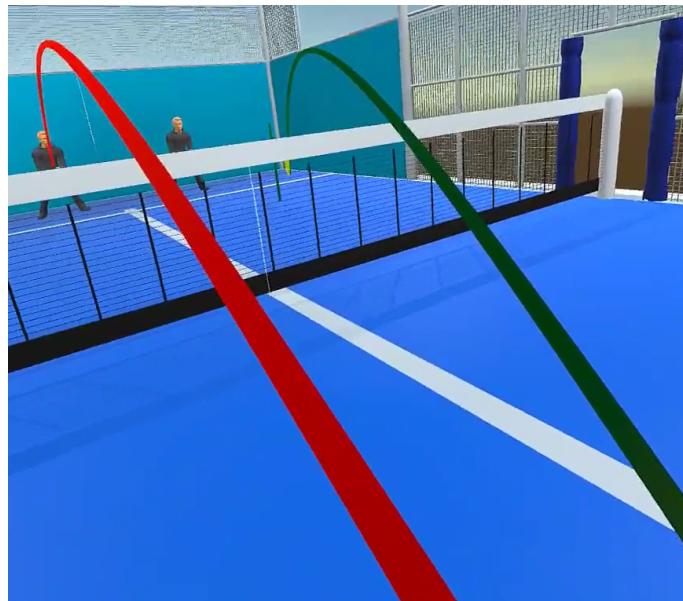


Figura 21: Reproducció del cop expert
Elaboració pròpia

Aquestes recreacions no deixen de ser aproximacions dels cops originals, perquè no disposo de l'altura del cop i només disposem d'una base de dades de trajectòries finita. Aquesta funcionalitat revela les limitacions d'aquesta estratègia, i cal tenir en compte que la reproducció del cop expert no és del tot acurada.

9 Planificació i pressupost finals

Degut a circumstàncies personals, no he pogut dedicar al projecte les hores previsites cada setmana, i he hagut de duplicar la duració dels esprints. A més, durant el projecte ha tingut més sentit ordenar les tasques d'una manera diferent a la prevista.

Tot i així, les hores totals dedicades no han estat superiors a les previstes, només distribuïdes en un termini més llarg de temps. La data definitiva de finalització del projecte és el 15 d'octubre de 2024.

Els esprints han esdevingut mensuals, i la càrrega de treball mitjana per setmana s'ha situat al voltant de les 15 hores. El producte mínim viable es va assolir de la mateixa manera al finalitzar el tercer esprint a mitjans de juny.

Cal tenir en compte que algunes tasques han derivat en algun objectiu amortitzat entre més d'una d'elles. És sobretot el cas de l'assignació de trajectòries a partir de les dades el partit professional, amortitzat entre les diferents tasques associades.

El diagrama de Gantt final el trobareu a la Figura 22, i reflecteix tots aquests canvis.

Com que el total d'hores invertides no ha augmentat realment, no hi ha hagut cap desviació respecte la planificació econòmica, i el pressupost final és justament el que s'havia previst inicialment.

No ha calgut aplicar cap de les mesures designades per imprevists, ni tampoc utilitzar el marge de contingència econòmic destinat a emergències.

Despesa	Cost (€)
Costos de personal	12963.17
Costos genèrics	1031.18
Despesa total	13994.35
Estalvis	3821.25

Taula 12: Pressupost final
Elaboració pròpia

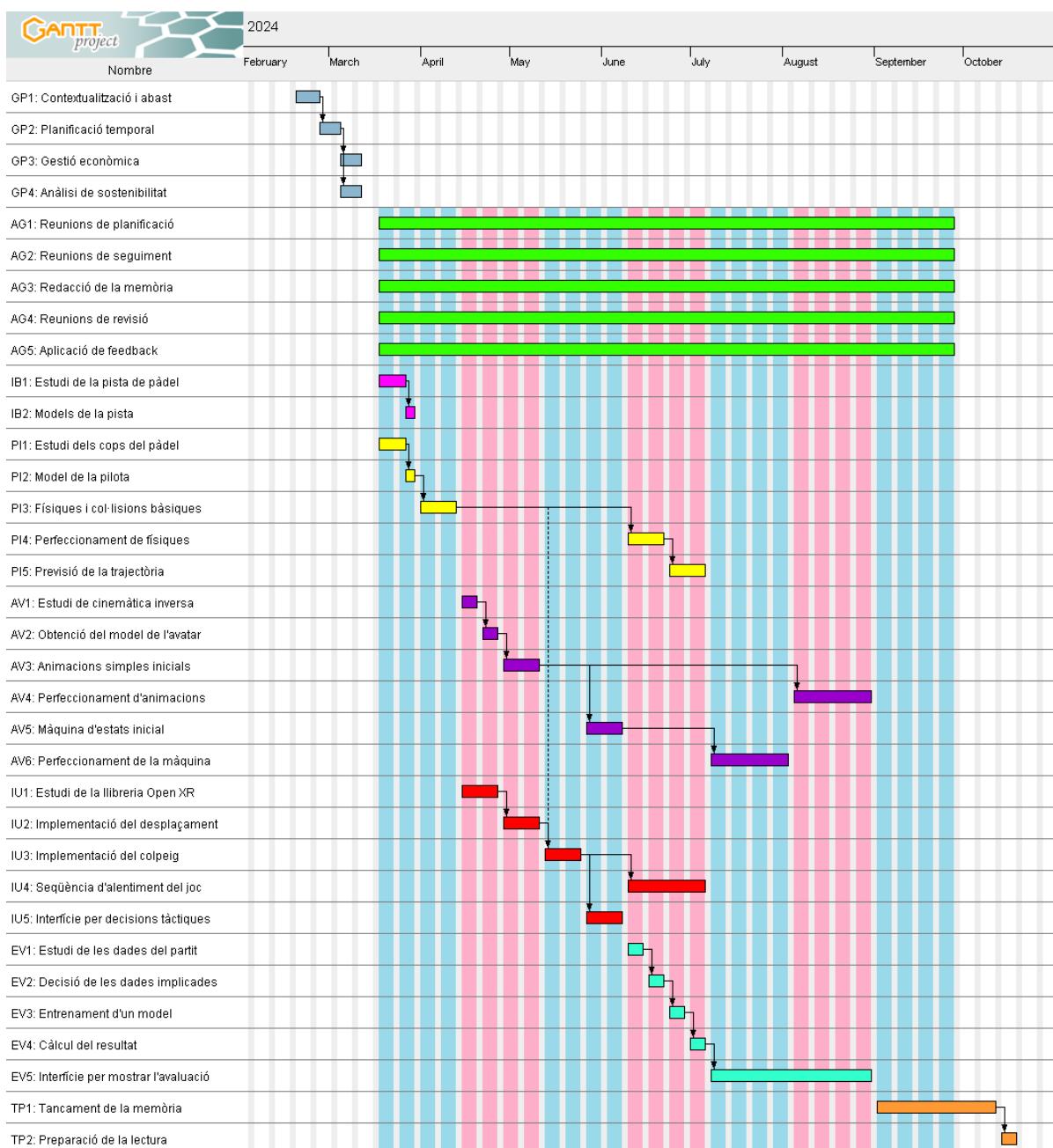


Figura 22: Diagrama de Gantt final

10 Informe de sostenibilitat

10.1 Autoavaluació

La sostenibilitat en general és una matèria molt oblidada que no he tractat gaire, ni a la universitat ni en projectes personals. Així ho ha pal·lesat el qüestionari d'autoavaluació, que m'ha fet adonar de la meva falta de coneixement al respecte.

Particularment, és evident que la vessant més considerada és l'econòmica, però la social és pràcticament inexistent en el pla d'estudis d'Enginyeria Informàtica. En algunes assignatures de hardware es plantegen qüestions ambientals, com ara la quantitat de recursos consumits en la fabricació d'un xip.

La dimensió social no es menciona en general, i no he tingut mai en compte en un projecte problemes socials latents que he descobert en l'autoaprenentatge realitzat per abordar aquesta secció, com ara la desigualtat digital [23], o els problemes causats al Congo per l'extracció de coltan [24].

La conclusió que n'extrec és que moltes vegades cometem l'error de considerar només l'impacte immediat dels projectes, i tendim a ignorar els efectes a llarg plaç, que poden ser molt perjudicials.

10.2 Dimensió econòmica

Inicialment vaig realitzar una estimació de la despesa d'aquest projecte, resumida a la Taula 8, tenint en compte costos humans i materials, i possibles imprevists.

Al finalitzar el projecte, he calculat el pressupost consumit realment, i he quantificat els estalvis respecte del pressupost previst, a la Taula 12.

He estat molt generós amb algunes partides, incrementant les hores de personal i els costos per tenir la capacitat d'assumir imprevists i inconvenients. Tot i així trobo que el pressupost és adequat i gens exagerat per un projecte com aquest. En general he buscat evitar el malbaratament dels recursos econòmics.

En general els costos de desenvolupament han estat baixos, i tot i que no puc saber amb seguretat el pressupost destinat a projectes semblants com PadelVR, es tracta d'un pressupost difícil d'igualar. Normalment un projecte d'aquesta magnitud

requereix d'un equip gran, i en conseqüència una assignació de pressupost elevada.

De part de l'usuari de l'aplicació, només és necessari disposar d'unes ulleres de realitat virtual i electricitat, donat que el producte final tindrà l'avantatge de ser de codi obert i per tant gratuït totalment.

De part dels desenvolupadors, un cop llançat al mercat, aquest projecte no hauria de requerir cap tipus de manteniment, a excepció que es desitgi una expansió de les seves funcionalitats.

No existeix cap risc que pugui comprometre la viabilitat econòmica del projecte.

10.3 Dimensió ambiental

Els recursos mediambientals necessaris en el desenvolupament del projecte han estat molt minimalistes. Només ha calgut l'ús d'un ordinador i un únic equip de realitat virtual, tot i que també cal tenir en compte el consum de la llum i l'aire condicionat.

Les especificacions sobre les bateries dels dispositius utilitzats^{23 24 25} i el temps que he percepbut que tarden a consumir-se permeten calcular la potència que he exigit a cada un durant l'etapa de desenvolupament.

La potència aproximada dissipada per unes quantes bombetes LED i un equip estàndard d'aire condicionat es pot obtenir amb una cerca ràpida. D'aquesta manera he pogut quantificar el consum del desenvolupament de la meva eina:

Recurs	Potència (kW)	Temps d'ús (h)	Consum (kWh)
Asus ROG Flow X16 (GV601R)	0.025	540	13.50
Monitor Samsung LED	0.021	540	11.34
Meta Quest 2	0.007	439	3.07
Il·luminació amb bombetes LED	$4 \times \sim 0.012$	540	25.92
Aire condicionat	~ 1.000	60	60.00
Consum total	-	-	113.83

Taula 13: Consum energètic del desenvolupament
Elaboració pròpia

²³<https://rog.asus.com/es/laptops/rog-flow/rog-flow-x16-2022-series/>

²⁴<https://www.samsung.com/es/monitors/>

²⁵<https://www.meta.com/es/quest/products/quest-2/>

Algunes de les mesures que he aplicat per controlar l'impacte ambiental durant l'etapa de desenvolupament han estat:

- Apagar la llum sempre que abandonava la sala.
- Ús d'aire condicionat només el mes més calorós a l'estiu.
- Ús d'un portàtil, ja que un ordinador d'escriptori consumeix més [25].

En qualsevol cas és molt probable que l'equip de desenvolupament del PadelVR, al ser molt més nombrós, hagi requerit més equipament i per tant el seu projecte haurà tingut una empremta ambiental molt superior.

A nivell del consum energètic del producte en la seva vida útil, malgrat que quantitativament no m'he plantejat cap objectiu a nivell de repercussió ambiental, alguns dels requisits no funcionals indirectament ja són ambientalment amigables.

Particularment, he treballat en l'eficiència del codi de la solució, que farà que l'execució de l'eina tingui un millor rendiment i alhora sigui més ecològica. Tot i així, evidentment l'ús de l'eina té un pes ecològic irrefutuable, ni que sigui pel consum de l'equipament de realitat virtual.

No hi ha cap risc que pugui fer que l'empremta ecològica es dispari inesperadament.

10.4 Dimensió social

A nivell personal, el desenvolupament de l'eina ha contribuït al meu aprenentatge en el marc dels meus estudis d'Enginyeria Informàtica, en una matèria que m'enriquix molt tractar. També complementa la meva carrera professional i les pràctiques que he fet a Gameloft en el camp dels videojocs, fomentant el meu interès en gràfics.

A nivell de societat, cal recordar que aquest projecte respon implícitament a una necessitat social, perquè cap altra aplicació entrena tàctica de pàdel, i molt menys sent de codi obert. Aquesta serà la primera eina que permetrà a entrenadors, jugadors professionals i aficionats entrenar la tàctica en aquest esport des de la comoditat de casa seva, sent aquest el grup social beneficiat per aquesta eina.

No hi ha risc de que l'aplicació pugui perjudicar a un col·lectiu o segment específic de la població, ni generar cap tipus de dependència a curt o llarg plaç. Aquesta eina no pot substituir completament als entrenadors humans, i per tant no són perjudicats.

11 Integració de coneixements

Sempre dins del camp de la informàtica, aquest projecte involucra una gran diversitat de disciplines, integrant diferents coneixements i experiència adquirits en múltiples assignatures del grau.

- **Programació 1:** m'ha equipat amb mecanismes per aprendre sobre llenguatges de programació nous, en aquest cas C#.
- **Matemàtiques 1:** m'ha ensenyat sobre operacions en espais vectorials, indispensables en gràfics i realitat virtual.
- **Estructures de Dades i Algorismes:** d'on he obtingut les eines per l'anàlisi de costos asimptòtics i els meus coneixements sobre les estructures de dades més comunes.
- **Sistemes Operatius:** m'ha conscienciat sobre l'anàlisi de l'entorn d'execució, i a tenir-lo en compte per afavorir els requisits no funcionals desitjats.
- **Interacció i Disseny d'Interfícies:** d'on he après els fonaments dels gràfics, i el disseny d'interfícies usables.
- **Introducció a l'Enginyeria del Software:** m'ha aportat coneixements i principis indispensables en arquitectura de software.
- **Projectes de Programació:** m'ha donat experiència amb projectes grans on caldrà fer servir tecnologies poc conegudes, i amb gestió de projectes en general.
- **Gràfics:** d'on coneix els fonaments de la il·luminació d'escenes, transformades geomètriques d'objectes, i el renderitzat realista de models en tres dimensions.
- **Algorísmia:** m'ha familiaritzat amb estratègies per abordar algorismes costosos, i a fer-los més eficients.
- **Aprendentatge Automàtic:** m'ha equipat amb els coneixements necessaris per entrenar eficientment models d'intel·ligència artificial.
- **Videojocs:** m'ha introduït a Unity, i al disseny de software audiovisual.

A més a més, les meves pràctiques a **Gameloft**, una empresa de videojocs, com a desenvolupador de software, m'han donat un gran bagatge en el camp de gestió de projectes, l'enginyeria de requisits i l'elaboració de codi mantenible.

12 Normativa i regulacions

Com tot projecte de software, hi ha tres pilars legals fonamentals que cal respectar: la protecció i privacitat de dades personals, la normativa del comerç electrònic i la propietat privada del software.

Al tractar-se d'un simulador en realitat virtual sense connexió a cap tipus de servidor com a mínim dins el marc d'aquest treball de fi de grau, la normativa de protecció de dades personals recollida a la **Llei Orgànica 3/2018** no és aplicable en aquest cas. De qualsevol manera, l'aplicació tampoc recull localment cap dada de caire personal, i no és necessari registrar-se.

De la mateixa manera, no és un projecte que monetitzi en cap instància, i no planteja cap transacció econòmica a l'usuari. Com a tal, el producte final no està subjecte a aquest tipus de regulacions.

Així doncs només és rellevant la protecció de la propietat privada de software, i la propietat intel·lectual i artística. En aquest sentit, compto amb la llicència personal de **Unity**. Aquesta llicència s'atorga automàticament a individus o petites empreses amb ingressos o finançament inferiors a 100.000 dòlars en els últims 12 mesos.

A més, faig ús de múltiples llibreries de codi obert, com ara **Open XR** per al control del personatge. Es tracta de codi obert i accessible al públic, i que per tant no denota cap responsabilitat legal.

També he utilitzat diferents models tridimensionals de diferents fonts. Els models de la pista i la pala els he adquirit sota una llicència **Creative Commons Attribution**, l'humanoide sota una llicència **MIT**, i la distribució del model de la pilota està regu-lada per les regles de la **Standard Unity Asset Store EULA**. En cap cas, sempre i quan siguin explícites les referències a les fonts respectives, l'ús acadèmic d'aquests models infringeix cap clàusula legal.

Finalment, cal destacar que he decidit publicar el projecte amb una llicència **MIT**, amb l'objectiu de fer aprofitable el resultat final per la comunitat acadèmica.

13 Resultats i conclusions

Com tot projecte, aquest té els seus punts més forts i més fluixos.

En aquesta secció reflexiono sobre l'assoliment dels objectius i requisits inicials. També identifico limitacions del resultat i possibles extensions del projecte per al futur, i analitzo des d'un punt de vista personal la meva experiència.

13.1 Assoliment dels objectius i requisits no funcionals

Per sobre de qualsevol altra cosa, en aquest projecte em proposava elaborar una eina capaç de recrear situacions de pàdel, i avaluar a l'usuari des del punt de vista tàctic.

En general, el producte final satisfà plenament els objectius designats inicialment:

1. Disseny d'una interfície interactiva per situacions de pàdel

L'eina permet a l'usuari interactuar en una pista de pàdel virtual, i he implementat satisfactòriament un motor de físiques que integra les forces principals implicades en el pàdel.

La interfície presenta a l'usuari diferents situacions de joc a les quals ha de respondre, i les seves decisions són processades satisfactòriament mitjançant l'equipament de realitat virtual.

Per a donar suport a l'usuari l'eina també incorpora un sistema de traçat de trajectòries, i alenteix el temps per acompanyar-lo en les seves decisions.

2. Disseny de l'avatar dels jugadors

Tot i que les animacions són millorables, i s'han priorititzat altres objectius, el resultat és coherent amb les accions realitzades pels avatars.

D'aquesta manera, l'usuari pot entendre què estan fent els oponents, i així interpretar quina és la situació de joc.

3. Refinament de l'experiència d'usuari

He posat especial èmfasi en una bona experiència d'usuari, evitant desplaçaments bruscos que puguin causar malestar. A més en el cas de la teleportació es fa servir un efecte visual per mitigar la impressió.

Addicionalment també he implementat alguns efectes visuals per atraure l'atenció on és necessari, com ara l'estela de la pilota.

4. Disseny d'un sistema d'avaluació

Posteriorment a l'anàlisi de les dades disponibles, he triat raonadament aquelles variables que participen en l'avaluació de l'usuari.

A partir de les dades, el sistema és capaç de retroalimentar l'usuari al respecte de la seva jugada de manera visual i amb una puntuació numèrica. Si bé per si sols serien mètodes d'avaluació molt limitats, presenten informació complementària, fent que la retroacció sigui molt rica.

Amb l'objectiu de validar els requisits no funcionals establerts inicialment, he fet una enquesta²⁶ sobre una gravació curta de l'eina, amb un total de cinc participants graduats en Enginyeria Informàtica, amb experiència en tests d'usabilitat.

Idealment caldria que hagués fet un test d'usabilitat complet i amb les ulleres de realitat virtual, però això queda fora de l'abast del projecte.

Tot i que l'estudi seria més fiable amb l'ús de l'equipament especialitzat de realitat virtual, el consens global suggereix un bon assoliment de tots ells:

- **Estètica de la GUI**

Tots els enquestats han donat una puntuació **superior o igual a 4/5** a l'estètica general de la interfície visual de l'eina.

- **Realisme dels avatars dels jugadors**

Tots els enquestats han donat una puntuació **superior o igual a 4/5** al realisme dels avatars animats.

²⁶<https://docs.google.com/forms/d/1r6eb6ukkLpavLWcgqh700svnFnwUVJRXwkY9pvxiCcc>

- **Evitar motion sickness**

En cap moment es força un desplaçament de l'usuari que no sigui iniciat per ell. Quan es fa ús de la teleportació s'utilitzen efectes per mitigar el mareig.

- **Usabilitat**

Tots els enquestats han donat una puntuació **superior o igual a 4/5** a la usabilitat de l'eina, com a mínim a partir del material audiovisual.

- **Eficiència**

Sempre he tingut en compte els costos asymptòtics dels algorismes dissenyats. Particularment l'aplicació assoleix perfectament els **72 fps** exigits per l'equip de realitat virtual.

13.2 Limitacions i treball futur

A més de la possibilitat de millora i perfeccionament de les funcionalitats actuals, he identificat extensions que enriquirien l'eina més enllà de l'abast d'aquesta entrega:

- **Addició de so**

Tot i que no es fa necessari per la comprensió dels esdeveniments, especialment perquè és realitat virtual podria ser bo afegir el so dels rebots de la pilota.

- **Joc lliure**

Fent ús del motor de físiques dissenyat, seria una possibilitat permetre als usuaris fer els cops directament amb la pala.

Això faria que implícitament l'eina estigués avaluant també la tècnica, que no era l'objectiu del projecte, però seria igualment interessant.

- **Suport a jugadors esquerrans**

Només s'utilitza el controlador dret durant la simulació, i caldria implementar la possibilitat de canviar la mà dominant per ajudar els jugadors esquerrans.

- **Editor de situacions de joc**

Aprofitant el sistema d'assignació de trajectòries a partir de les posicions de llançament i recepció, es podria permetre que l'usuari posicioni lliurement els oponents i l'aliat per recrear situacions de joc personalitzades.

- **Enriquiment de les dades del partit**

Per afavorir l'eficiència en temps real, es podrien enriquir les dades del partit professional amb una trajectòria assignada a cada cop prèviament a l'execució.

- **Perfeccionar la usabilitat**

Si bé tots els requisits no funcionals han estat ben puntuats per tots els enquestats, molts han coincidit que la usabilitat és millorable.

Fent servir els recursos disponibles, com per exemple la vibració del controlador, es podria ajudar a l'usuari a entendre més fàcilment com fer servir l'eina.

- **Perfeccionar les animacions**

La màquina d'estats que controla els avatars es podria estendre amb nous estats per permetre que facin més accions, i més tipus de cops.

També es podria considerar l'ús de tècniques com cinemàtica inversa.

13.3 Reflexió personal

Personalment aquest projecte ha sigut un gran repte en tots els sentits, i fins i tot ha sigut dur en alguns moments, però sovint les lliçons més vitals tenen un cost.

He après que el més important d'un projecte és la planificació inicial, i actuar d'acord amb ella és crucial per assolir les dates marcades, especialment en aquells casos on la investigació i l'ús de tecnologies noves són una part inherent de la feina.

D'altra banda, a vegades cal acceptar les limitacions del projecte, sobretot quan la perfecció és pràcticament impossible i es podria seguir millorant una funcionalitat indefinidament. Fallar sempre és part del procés.

Durant els mesos que ha durat el projecte he guanyat un volum de coneixements que no es pot comparar amb el que he après en cap assignatura; en moltes disciplines, però sobretot en gràfics. Sens dubte és cap on vull enfocar la meva carrera professional, i vull poder recordar orgullosament aquest projecte com el principi de tot això.

Finalment, aquest projecte no seria possible sense les dades i l'ajuda proporcionada pels codirectors. També ha estat inestimable el suport de la meva parella i la meva família. Estic molt agraït amb tots ells, i no podien faltar en aquesta reflexió.

Referències

- [1] G. Nambi, W. K. Abdelbasset, S. H. Elsayed, A. Verma, J. S. George, and A. K. Saleh, “Clinical and physical efficiency of virtual reality games in soccer players with low back pain,” *Revista Brasileira de Medicina do Esporte*, vol. 27, pp. 597–602, 2021.
- [2] “ViRVIG: Grup de Recerca en Visualització, Realitat Virtual i Interacció Gràfica (UPC).” <https://virvig.eu>. Accedit: 25 de febrer de 2024.
- [3] K. Kelly, “Magic leap: The world’s most secretive startup,” *Wired*, 4 2016.
- [4] Generalitat de Catalunya, “Eic tecnologies immersives catalunya.” <https://www.accio.gencat.cat/ca/serveis/banc-coneixement/cercador/BancConeixement/eic-tecnologies-immersives-catalunya>. Accedit: 27 de febrer de 2024.
- [5] O. R. Farley, K. Spencer, and L. Baudinet, “Virtual reality in sports coaching, skill acquisition and application to surfing: A review,” 2019.
- [6] Padel VR Game, “Welcome to padel vr game.” <https://www.padelvrgame.com/>. Accedit: 25 de febrer de 2024.
- [7] Eleven VR, “Eleven vr - table tennis.” <https://elevenvr.com/>. Accedit: 25 de febrer de 2024.
- [8] CleanSheet Soccer, “Cleansheet soccer.” <https://www.meta.com/en-gb/experiences/5005632286166834/>. Accedit: 25 de febrer de 2024.
- [9] “Fundamentos de la metodología agile.” <https://www.wrike.com/es/project-management-guide/fundamentos-de-la-metodologia-agile/>. Accedit: 27 de febrer de 2024.
- [10] J. Rasmusson, *The Agile Samurai: How Agile Masters Deliver Great Software*. 2010.
- [11] “Fundamentos de la metodología agile.” <https://www.wrike.com/es/project-management-guide/fundamentos-de-la-metodologia-agile/>. Accedit: 4 de març de 2024.
- [12] Atlassian, “Todo lo que necesitas saber sobre los sprints de scrum.” <https://www.atlassian.com/es/agile/scrum/sprints>. Accedit: 4 de març de 2024.

- [13] R. Cross and C. Lindsey, “Measurements of drag and lift on tennis balls in flight,” *Sports Engineering*, vol. 17, pp. 89–96, 2014.
- [14] M. Sadraey and D. Müller, “Drag force and drag coefficient,” *M. Sadraey, Aircraft Performance Analysis. VDM Verlag Dr. Müller*, 2009.
- [15] M. Richmond, “Baseball trajectory.” <http://spiff.rit.edu/richmond/baseball/traj/traj.html>. Accedit: 7 d’octubre de 2024.
- [16] R. Cross, “Behaviour of a bouncing ball,” *Physics Education*, vol. 50, no. 3, p. 335, 2015.
- [17] B. Almonacid-Cruz, *Perfil de juego en pádel de alto nivel*. Jaén: Universidad de Jaén, 2011.
- [18] B. A. Cruz and J. M. Pérez, *Esto es pádel*. Aula Magna Proyecto clave McGraw Hill, 2021.
- [19] R. A. Brown, “Building a balanced kd tree in $O(kn \log n)$ time,” *arXiv preprint arXiv:1410.5420*, 2014.
- [20] S. Kucuk and Z. Bingul, *Robot kinematics: Forward and inverse kinematics*. INTECH Open Access Publisher London, UK, 2006.
- [21] M. Javadiha, C. A. Andújar Gran, M. Calvanese, E. Lacasa Claver, J. Moyes Ardiaca, J. L. Pontón Martínez, A. Susín Sánchez, and J. Wang, “Padelvic: Multicamera videos and motion capture data in padel matches,” *Padel scientific journal*, vol. 2, no. 1, pp. 89–106, 2024.
- [22] J. S. Cramer, “The origins of logistic regression,” 2002.
- [23] A. J. Van Deursen, E. Helsper, R. Eynon, and J. A. Van Dijk, “The compoundness and sequentiality of digital inequality,” *International Journal of Communication*, vol. 11, pp. 452–473, 2017.
- [24] M. Nest, *Coltan*, vol. 3. Polity, 2011.
- [25] W. M. Achten, J. Almeida, and B. Muys, “Carbon footprint of science: More than flying,” *Ecological indicators*, vol. 34, pp. 352–355, 2013.