

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO

FACULTAD DE INGENIERÍA EN SISTEMAS, ELECTRÓNICA E INDUSTRIAL

CARRERA DE SOFTWARE

Tema:

APLICACIÓN DE REALIDAD VIRTUAL PARA EVALUACIÓN DE FUNDAMENTOS TÉCNICOS DE TAE KWON DO

Trabajo de Titulación Modalidad: Proyecto de Investigación, presentado previo a la obtención del título de Ingeniero de Software

ÁREA: Tecnologías de Información y Comunicación
LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: Software, Tecnologías de la Información y Ciencia de Datos

AUTORES: Josué Sebastián Moreira Sarcos
Adrian Israel Jurado Gonzalez
TUTOR: Ing. Edwin Hernando Buenaño Valencia, Mg.

Ambato – Ecuador
julio – 2026

APROBACIÓN DEL TUTOR

En calidad de Tutor del Trabajo de Titulación con el tema: "APLICACIÓN DE REALIDAD VIRTUAL PARA EVALUACIÓN DE FUNDAMENTOS TÉCNICOS DE TAE KWON DO", desarrollado bajo la modalidad Proyecto de Investigación por los señores Josué Sebastián Moreira Sarcos, Adrian Israel Jurado Gonzalez, estudiantes de la Carrera de Software, de la Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial, de la Universidad Técnica de Ambato, me permito indicar que los estudiantes han sido tutorados durante todo el desarrollo del trabajo hasta su conclusión, conforme a lo establecido en el Artículo 15 del Reglamento para obtener el Título de Tercer Nivel, de Grado de la Universidad Técnica de Ambato, y en el numeral 7.4 del instructivo correspondiente.

Ambato, julio 2026



Ing. Edwin Hernando Buenaño Valencia, Mg.
TUTOR

AUTORÍA

El presente proyecto de Titulación denominado “APLICACIÓN DE REALIDAD VIRTUAL PARA EVALUACIÓN DE FUNDAMENTOS TÉCNICOS DE TAE KWON DO”, es absolutamente original, autentico y personal y ha observado los preceptos establecidos en la Disposición General Quinta del Reglamento para la Titulación de Grado en la Universidad Técnica de Ambato. En tal virtud, el contenido, efectos legales y académicos que se desprenden del mismo son de exclusiva responsabilidad de los autores.

Ambato, julio 2026

Josue Sebastian Moreira Sarcos
Time Stamping Security Data

Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
ADRIAN ISRAEL JURADO GONZALEZ

Josué Sebastián Moreira Sarcos
CI. 0550318505
AUTOR

Adrian Israel Jurado Gonzalez
CI. 1805805411
AUTOR

DERECHOS DE AUTOR

Autorizamos a la Universidad Técnica de Ambato para que reproduzca total o parcialmente este trabajo de titulación dentro de las regulaciones legales e institucionales correspondientes. Además, cedemos todos nuestros derechos de autor a favor de la institución con el propósito de su difusión publica, por lo tanto, autorizamos su publicación en el repositorio virtual institucional como un documento disponible para la lectura y uso con fines académicos e investigativos de acuerdo con la Disposición General Cuarta del Reglamento para la Titulación de Grado en la Universidad Técnica de Ambato.

Ambato, julio 2026

Josue Sebastian Moreira Sarcos
Time Stamping Security Data

Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
ADRIAN ISRAEL JURADO GONZALEZ

Josué Sebastián Moreira Sarcos
CI. 0550318505
AUTOR

Adrian Israel Jurado Gonzalez
CI. 1805805411
AUTOR

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO

En calidad de par calificador del Informe Final del Trabajo de Titulación presentado por los señores Josue Sebastian Moreira Sarcos, Adrian Israel Jurado Gonzalez, estudiantes de la Carrera de Software, de la Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial, bajo la Modalidad Proyecto de Investigación, titulado APLICACIÓN DE REALIDAD VIRTUAL PARA EVALUACIÓN DE FUNDAMENTOS TÉCNICOS DE TAE KWON DO, nos permitimos informar que el trabajo ha sido revisado y calificado de acuerdo al Artículo 17 del Reglamento para obtener el Título de Tercer Nivel, de Grado de la Universidad Técnica de Ambato, y al numeral 7.6 del respectivo instructivo. Para cuya constancia suscribimos, conjuntamente con el señor Presidente de Tribunal.

Ambato, julio 2026.

Validar sólo en FirmaEC.
Firmado Electrónicamente por:
FRANKLIN OSWALDO MAYORGA MAYORGA

Ing. Franklin Oswaldo Mayorga Mayorga, Mg.
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
OSCAR FERNANDO IBARRA TORRES

Ing. Oscar Fernando Ibarra Torres , Mg.
PROFESOR CALIFICADOR

Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
DANIEL ALEJANDRO MALDONADO RUIZ

Ing. Daniel Alejandro Maldonado Ruiz, PhD
PROFESOR CALIFICADOR

DEDICATORIA

Dedico el presente Trabajo de Titulación a Dios, por darme vida, salud, sabiduría y fortaleza para avanzar en cada etapa de mi formación académica y personal.

A mi familia, por ser mi principal apoyo, por su amor, paciencia, comprensión y motivación constante. Su confianza y respaldo han sido fundamentales para alcanzar esta meta.

Finalmente, me dedico este logro a mí mismo, por la perseverancia, el esfuerzo y la constancia demostrados durante este camino, a pesar de los retos y dificultades presentados.

Josué Sebastián Moreira Sarcos

AGRADECIMIENTO

A Dios, por ser mi guía constante y el faro en los momentos más complejos de este trayecto universitario; gracias por otorgarme la paciencia y la fortaleza necesarias para no rendirme en las adversidades, y por brindarme la sabiduría indispensable para resolver cada problema, tanto a lo largo de la carrera como en el desarrollo de este trabajo de titulación.

A mi madre, con todo mi amor y gratitud, por haber sido mi pilar fundamental durante toda la carrera y, de manera aún más profunda, en la culminación de este proyecto. Su apoyo incondicional, sacrificio y fe en mí fueron el motor que me permitió salir adelante. Asimismo, a mis hermanos, por brindarme su ayuda desinteresada, su respaldo y su apoyo constante en cada etapa de este camino.

Expreso mi sincero agradecimiento a la Universidad Técnica de Ambato, a la Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial, y a la Carrera de Ingeniería en Software, por la formación académica y profesional brindada durante estos años de estudio.

Agradezco a mi tutor, el Ing. Edwin Hernando Buenaño Valencia, Mg., quien con su conocimiento, paciencia y oportunos consejos guió de manera acertada el desarrollo de este trabajo.

De igual manera, agradezco al Ing. Mentor Javier Sánchez Guerrero, Mg., por su apoyo y gestión en la vinculación de este trabajo al proyecto de investigación en el que se enmarca.

Finalmente, agradezco a los docentes de la carrera, quienes contribuyeron con sus conocimientos y experiencias a mi crecimiento profesional. Ademas, extiendo mi gratitud a la Academia “Villalba’s Tigers”, a sus instructores y estudiantes, y a todas las personas que colaboraron activamente con su tiempo y participación para hacer posible el desarrollo de esta investigación.

Josué Sebastián Moreira Sarcos

ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS

PORTADA . . . . . **i**
APROBACIÓN DEL TUTOR . . . . . **ii**
AUTORÍA . . . . . **iii**
DERECHOS DE AUTOR . . . . . **iv**
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO . . . . . **v**
DEDICATORIA . . . . . **vi**
AGRADECIMIENTO . . . . . **vii**
ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS . . . . . **viii**
ÍNDICE DE TABLAS . . . . . **xi**
ÍNDICE DE FIGURAS . . . . . **xiii**
ÍNDICE DE ANEXOS . . . . . **xvii**
RESUMEN EJECUTIVO . . . . . **xviii**
ABSTRACT . . . . . **xix**
CAPÍTULO I **1**
MARCO TEÓRICO **1**
1.1 Tema de Investigación 1
1.1.1 Planteamiento del problema 1
1.2 Antecedentes investigativos 2
1.2.1 Efectividad Pedagógica de Realidad Virtual en Deportes de Combate 2
1.2.2 Implementaciones Específicas en Taekwondo Universitario . . 3
1.2.3 Sistemas de Realidad Aumentada y Retroalimentación en Tiempo Real 4
1.2.4 Entrenamiento Adaptativo con Inteligencia Artificial 4
1.2.5 Datasets Especializados y Reconocimiento Automatizado . . . 5
1.2.6 Análisis Biomecánico Mediante Simulación Virtual 5
1.2.7 Aplicaciones Terapéuticas y Rehabilitación 5
1.2.8 Factibilidad y Análisis de Necesidades del Usuario 6

1.2.9 Visión de Sistemas Integrados y Tecnologías Emergentes . . . 6
1.3 Fundamentación teórica . . . 7
1.3.1 Fundamentos Técnicos y Biomecánicos del Taekwondo . . . 7
1.3.2 Técnicas de Pie / Patadas Fundamentales (Chagi) . . . 7
1.3.3 Técnicas de Mano / Golpes Fundamentales . . . 10
1.3.4 Realidad Virtual Inmersiva para Entrenamiento Motor . . . 11
1.3.5 Sistemas de Captura de Movimiento Corporal . . . 12
1.3.6 Análisis de Ángulos Articulares en Técnicas de Taekwondo . . 13
1.3.7 Bases de Datos Relacionales para Almacenamiento de Sesiones 13
1.3.8 Frameworks de Desarrollo de Aplicaciones de Realidad Virtual 14
1.4 Objetivos . . . 15
1.4.1 Objetivo general . . . 15
1.4.2 Objetivos específicos . . . 15
CAPÍTULO II . . . 17
METODOLOGÍA . . . 17
2.1 Materiales . . . 17
2.2 Métodos . . . 17
2.2.1 Modalidad de la investigación . . . 18
2.2.2 Poblacion y muestra . . . 18
2.2.3 Recolección de información . . . 19
2.2.4 Procesamiento y analisis de datos . . . 35
CAPÍTULO III . . . 37
RESULTADOS Y DISCUSIÓN . . . 37
3.1 Fundamentos Tecnicos de Taekwondo . . . 37
3.1.1 Movimientos . . . 37
3.1.2 Golpes . . . 38
3.2 Especificación de Requisitos de Software . . . 43
3.2.1 Requisitos Funcionales . . . 45
3.2.2 Requisitos No Funcionales . . . 46
3.2.3 Casos de Uso e Historias de Usuario . . . 47
3.3 Selección de la Metodología . . . 57
3.3.1 Criterios de Evaluación . . . 57
3.3.2 Matriz de Selección de Simon . . . 58
3.3.3 Justificación de la selección . . . 59
3.4 Seleccion del Stack Tecnológico . . . 59
3.4.1 Motor Gráfico . . . 60
3.4.2 Tecnologías de Seguimiento de Movimiento (FBT) . . . 62

3.4.3 Herramientas de modelado 3D 64
3.4.4 Backend 66
3.4.5 Base de datos 67
3.4.6 Hardware de Visualización 69
3.4.7 Software de Conexión y Runtime 69
3.5 Resumen Selección de Metodologia y Herramientas de Desarrollo VR 69
3.6 Desarrollo de la Aplicación de Realidad Virtual 71
3.6.1 Diseño Arquictectura del Sistema 71
3.6.2 Diseño Base de Datos 72
3.6.3 Planificación de iteraciones 72
3.7 Resultados 121
3.7.1 Acorde al Objetivo Especifico 1 121
3.7.2 Acorde al Objetivo Especifico 2 122
3.7.3 Acorde al Objetivo Especifico 3 123
CAPÍTULO IV 125
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 125
4.1 Conclusiones 125
4.2 Recomendaciones 126
Bibliografía 128
Anexos 133
Anexo A: Registro fotográfico de las instalaciones de la academia 134
Anexo B: Calibración de Quaternions en el Sistema de Tracking para Realidad Virtual 137
Anexo C: Registro de métricas de rendimiento del servidor bajo carga . . . 139
Anexo D: Registro de logs y trazabilidad del microservicio 141

ÍNDICE DE TABLAS

1 Entrevista a Profesora Principal, Experta en Taekwondo 19
2 Entrevista a Experta en Taekwondo – Competidora 21
3 Entrevista a Instructor Secundario (Subinstructor de Academia de Taekwondo) 22
4 Valores y resultados del Alfa de Cronbach 24
5 Distribución porcentual de la frecuencia de uso de apps tecnológicas en entrenamientos deportivos 25
6 Distribución porcentual de uso de visores VR 25
7 Distribución porcentual sobre el uso de aplicaciones nuevas 26
8 Distribución porcentual sobre la importancia de retroalimentación en aplicaciones VR 27
9 Distribución porcentual sobre la utilidad de la retroalimentación de errores en la ejecución 28
10 Distribución porcentual sobre la comparativa de ejecución con un modelo 3D 28
11 Distribución porcentual sobre la importancia de una navegación clara . 29
12 Distribución porcentual sobre cómo la excesiva cantidad de menús en una app dificulta su uso 30
13 Distribución porcentual sobre la importancia de una app funcional durante su uso 31
14 Distribución porcentual sobre el entrenamiento de técnicas por separado dentro de la aplicación 31
15 Distribución porcentual sobre la consideración en el entrenamiento de Taekwondo en una app VR 32
16 Distribución porcentual sobre la confianza en la tecnología VR para evaluaciones precisas dentro de la app 33

17 Distribución porcentual sobre la frecuencia de uso en establecimientos de entrenamiento 34
18 Distribución porcentual sobre la recomendación del uso de una app VR 35

19 Requisitos funcionales del sistema 45
20 Requisitos no funcionales del sistema 46
21 US-01: Crear cuenta de usuario 52
22 US-02: Iniciar sesión 53
23 US-03: Cerrar sesión 53
24 US-04: Visualizar avatar guía 54
25 US-05: Captura de movimientos corporales en tiempo real 54
26 US-06: Retroalimentación sobre la ejecución del movimiento 55
27 US-07: Puntaje al finalizar movimiento 55
28 US-08: Movimientos organizados por categoría 56
29 US-09: Historial de sesiones 56
30 US-10: Cerrar aplicación VR 57
31 Matriz de selección de metodologías 59
32 Matriz de selección del motor gráfico 61
33 Matriz de selección de tecnología de seguimiento de movimiento . . . 63
34 Matriz de selección de herramienta de modelado 3D 65
35 Matriz de selección del backend 67
36 Matriz de selección de base de datos 68
37 Consolidado cuantitativo de selección de componentes 70
38 Planificación de iteraciones y distribución de Historias de Usuario . . 73
39 Checklist de verificación de la configuración inicial 81
40 Resumen de revisión bibliográfica 121
41 Clasificación de técnicas fundamentales recopiladas 122
42 Consolidado cuantitativo de selección de componentes 123
43 Evaluación por juicio de expertos 124

44 Resumen de métricas de rendimiento obtenidas durante la prueba de carga 140
45 Eventos registrados por el microservicio 143
46 Variación del tiempo interno de ejecución según el tamaño de entrada 143
47 Trazabilidad de solicitudes concurrentes 144

ÍNDICE DE FIGURAS

1 Distribución porcentual de la frecuencia de uso de apps tecnológicas en entrenamientos deportivos 24
2 Distribución porcentual de uso de visores VR 25
3 Distribución porcentual sobre el uso de aplicaciones nuevas 26
4 Distribución porcentual sobre la importancia de retroalimentación en aplicaciones VR 27
5 Distribución porcentual sobre la utilidad de la retroalimentación de errores en la ejecución 27
6 Distribución porcentual sobre la comparativa de ejecución con un modelo 3D 28
7 Distribución porcentual sobre la importancia a de una clara navegación 29
8 Distribución porcentual sobre como la excesiva cantidad de menús en una app dificulta su uso 30
9 Distribución porcentual sobre la importancia de una app funcional durante su uso 30
10 Distribución porcentual sobre el entrenamiento de técnicas por separado dentro de la aplicación 31
11 Distribución porcentual sobre la consideración en el entrenamiento de taekwondo en una app VR 32
12 Distribución porcentual sobre la confianza en la tecnología VR para evaluaciones precisas dentro de la app 33
13 Distribución porcentual sobre la frecuencia de uso en establecimientos de entrenamiento 34
14 Distribución porcentual sobre la recomendación del uso de una app VR 34

15 Representación del mapeo de puntos biomecánicos en estados estático y dinámico para la reconstrucción digital 38
16 Técnica de puño Jirugi [19] 39

17 Tecnia de puño Palkup Chigi [20] 39
18 Técnica de patada Ap Chagi [21] 40
19 Técnica de patada Dollyo Chagi [21] 40
20 Técnica de patada Yop Chagi [21] 41
21 Técnica de patada Naeryo Chagi [21] 41
22 Técnica de patada Bandal Chagi [22] 42
23 Técnica de patada Mireo Chagi [21] 42
24 Diagrama de proceso del flujo de enseñanza-aprendizaje 44
25 CU-01: Registrarse 48
26 CU-02: Iniciar Sesión 49
27 CU-03: Visualización del movimiento 50
28 CU-04: Consultar Historial 51
29 CU-05: Cerrar Sesión 51
30 CU-06: Cerrar Aplicación 52
31 Diagrama arquitectonico del sistema 71
32 Diagrama de Base de Datos 72
33 Diagrama Ubicación Base Station 74
34 Repositorio Backend 75
35 Repositorio App VR 75
36 Base Station 1 76
37 Base Station 2 77
38 Meta Horizon Link Integración 78
39 Configuración Trackers en SteamVR 78
40 Referencia configuración sistema Guard [54] 79
41 Configuración sistema Guard 79
42 Configuración del espacio para el sistema Guard 80
43 Configuración SteamVR Room Setup 81
44 Menú principal 82
45 Flujo de Navegación 83
46 Exterior de la Academia Villalba Tiger's 84
47 Nivel Inicial 84
48 Interior de la Academia Villalba Tiger's 85
49 Nivel del Dojo 85
50 Implementación de seguimiento en el Blueprint Pawn 86

51 Implementación de la creacion de widgets 86
52 Estructura de Clase del Pawn 87
53 Subsistemas del Pawn 88
54 Iniciar Sesión (Código) 89
55 Registrarse (Código) 90
56 Widget para iniciar sesión 91
57 Widget para registro 91
58 Iniciar Sesión servicio del backend 92
59 Registrase servicio del backend 93
60 Widget de Main Menu en Ejecución 94
61 Widget de Iniciar Sesión en Ejecución 94
62 Arquitectura del Character 95
63 Skeletal Mesh Character 96
64 Diagrama del flujo del tracking en el Character 97
65 Blueprint configuracion del tracking 97
66 Diagrama del flujo para la calibración de los trackers 98
67 Nodos blueprints para la calibración de los trackers 98
68 Comparativo Funcional de los Characters 99
69 Acciones del Character Recorder 100
70 Comparativo Funcional de los Characters 100
71 Comparativo Funcional de los Characters 101
72 Demostración de la ejecución por parte de un Instructor 102
73 Demostración de la ejecución por parte de un Instructor 102
74 Almacenamiento de los movimientos en formato sav 103
75 Flujo de la generación movimiento del avatar guía 103
76 Widget selección de categoría 104
77 Widget de la lista de movimientos correspondiente a puño y patada . . 104
78 Widget “Comenzar” 105
79 Widget para visualización de resultados 105
80 Estructura de la información 106
81 Tabla con la secuencia de los movimientos 106
82 Creación y Configuración del Avatar Guía 107
83 Animation Blueprint del Avatar Guía 107
84 Creación widget de selección 108

85 Creación widget movimiento (Lista) 108
86 Creación widget movimiento (Item) 109
87 Creación de Widget “Comenzar” 109
88 Clase Blueprint Manager 110
89 Menú selección de categoría (ejecución) 110
90 Avatar guia ejecutándose 111
91 Flujo comparación del movimiento 112
92 Obtención de la información para json a comparar 112
93 Implementación grabación para json a comparar 113
94 Formato Json Resultante 113
95 Código de comparación (distancias euclidiana y quaternion) 114
96 Código de comparación de Jsons 115
97 Servicio para historial 116
98 Frontend (Tabla) 117
99 Frontend (Movimientos) 117
100 Frontend (Detalle) 117
101 Ejecución del movimiento pose inicial 118
102 Ejecución del movimiento primera parte 119
103 Ejecución del movimiento segunda parte 119
104 Avatar guía ejecutando el movimiento de puño (Jirugi) 120
105 Ejecución completa 120

106 Exterior de la Academia Villalba Tiger’s 134
107 Interior (Foto 1) de la Academia Villalba Tiger’s 134
108 Interior (Foto 2) de la Academia Villalba Tiger’s 135
109 Interior (Foto 3) de la Academia Villalba Tiger’s 135
110 Interior (Foto 4) de la Academia Villalba Tiger’s 135
111 Interior (Foto 5) de la Academia Villalba Tiger’s 136
112 Interior (Foto 6) de la Academia Villalba Tiger’s 136
113 Métricas de rendimiento del servidor bajo carga (HTTP Overview) . . 139
114 Métricas de rendimiento del servidor bajo carga 139
115 Métricas de rendimiento del servidor bajo carga (Tiempos parte 1) . . 140
116 Métricas de rendimiento del servidor bajo carga (Tiempos parte 2) . . 140
117 Registro de una comparación exitosa en los logs de Render 141
118 Registro de validación de entrada incompleta en Render 142

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo A: Registro fotográfico de las instalaciones de la academia 134
Anexo B: Calibración de Quaternions en el Sistema de Tracking para Realidad Virtual 137
Anexo C: Registro de métricas de rendimiento del servidor bajo carga 139
Anexo D: Registro de logs y trazabilidad del microservicio 141

RESUMEN EJECUTIVO

El presente trabajo de titulación aborda el desarrollo de una aplicación de realidad virtual para la evaluación de fundamentos técnicos de Taekwondo en la Academia Villalba's Tigers. La investigación se enmarca en el proyecto "Sistema Innovador de Entrenamiento basado en Realidad Virtual e Inteligencia Artificial Generativa como factor para el Rendimiento Técnico, Psicológico e Intercultural en Estudiantes Universitarios de la Zona 3", aprobado mediante Resolución Nro. UTA-CONIN-2025-0405-R. Se propone una herramienta inmersiva que complemente la enseñanza tradicional y apoye la evaluación del desempeño técnico.

La metodología integró investigación bibliográfica, encuestas a 33 estudiantes y entrevistas a 3 instructores, 36 participantes como poblacion total. Los resultados mostraron que el 81.8 % considera importante identificar errores técnicos, el 93.9 % valora separar el entrenamiento entre puños y patadas, y el 90.9 % recomendaría una aplicación VR de Taekwondo. Las entrevistas confirmaron que las técnicas básicas son esenciales y que la tecnología puede apoyar la corrección sin reemplazar al instructor.

Se clasificaron 8 técnicas fundamentales: 2 de puño, Jirugi y Palgup Chigi, y 6 de patada, Ap Chagi, Dollyo Chagi, Yop Chagi, Naeryo Chagi, Bandal Chagi y Mireo Chagi. Para el desarrollo se seleccionó Desarrollo IID, Unreal Engine, HTC Vive 3.0, Blender, NestJS y PostgreSQL. La aplicación integró autenticación, selección de técnicas, avatar guía, Full Body Tracking, comparación de movimientos, retroalimentación e historial. La validación por expertos consideró 5 dimensiones y 15 criterios, obteniendo 3.78/5.00, nivel Bueno. Los resultados evidencian una solución funcional, aunque con recomendaciones en el espacio y sistema de trackeo.

Palabras clave: realidad virtual, retroalimentación Taekwondo, Full Body Tracking, HTC Vive, Oculus, academia Villalba's Tigers.

ABSTRACT

This degree project addresses the development of a virtual reality application for the assessment of Taekwondo technical fundamentals at Villalba's Tigers Academy. The research is framed within the project "Innovative Training System Based on Virtual Reality and Generative Artificial Intelligence as a Factor for Technical, Psychological, and Intercultural Performance in University Students of Zone 3", approved through Resolution No. UTA-CONIN-2025-0405-R. The proposed solution is an immersive tool designed to complement traditional teaching methods and support the evaluation of technical performance.

The methodology combined bibliographic research, surveys conducted with 33 students, and interviews with 3 instructors, resulting in a total population of 36 participants. The results showed that 81.8 % of participants consider it important to identify technical mistakes, 93.9 % value separating training sessions into punching and kicking techniques, and 90.9 % would recommend a Taekwondo VR application. The interviews confirmed that basic techniques are essential and that technology can support technique correction without replacing the instructor.

Eight fundamental techniques were classified: two punching techniques, Jirugi and Palgup Chigi, and six kicking techniques, Ap Chagi, Dollyo Chagi, Yop Chagi, Naeryo Chagi, Bandal Chagi, and Mireo Chagi. For the development process, the IID Development methodology, Unreal Engine, HTC Vive 3.0, Blender, NestJS, and PostgreSQL were selected. The application integrated user authentication, technique selection, a guide avatar, Full Body Tracking, motion comparison, feedback, and performance history features. Expert validation considered five dimensions and fifteen evaluation criteria, achieving a score of 3.78/5.00, corresponding to a "Good" level. The results demonstrate a functional solution, although recommendations were identified regarding the physical training space and the tracking system.

Keywords: virtual reality, Taekwondo feedback, Full Body Tracking, HTC Vive, Oculus, Villalba's Tigers Academy.

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

1.1 Tema de Investigación

APLICACIÓN DE REALIDAD VIRTUAL PARA EVALUACIÓN DE FUNDAMENTOS TÉCNICOS DE TAE KWON DO

1.1.1 Planteamiento del problema

A nivel global, los métodos tradicionales de evaluación técnica en el entrenamiento de Taekwondo presentan deficiencias significativas en múltiples dimensiones. Estudios comparativos demuestran que la capacidad de detección correcta de errores técnicos mediante observación humana convencional alcanza únicamente el 58 % de precisión, evidenciando limitaciones inherentes en la evaluación visual subjetiva [1]. Las técnicas de Taekwondo involucran secuencias de movimiento complejas que ocurren en planos tridimensionales, resultando difícil para los estudiantes comprender completamente los cambios de ángulos, rotaciones de cadera y trayectorias espaciales mediante demostraciones bidimensionales estáticas [2]. Asimismo, los métodos convencionales carecen de capacidad para generar métricas cuantitativas sobre aspectos críticos del desempeño, incluyendo precisión de movimientos, velocidad de ejecución, ángulos articulares y trayectorias de impacto [1].

En academias de artes marciales, la observación directa del instructor está condicionada por múltiples factores que comprometen la efectividad del proceso formativo. Grupos numerosos de 20 a 25 estudiantes dificultan la retroalimentación individual detallada, las limitaciones de espacio físico en horarios pico reducen la capacidad de supervisión cercana, y los errores técnicos repetitivos no se corrigen oportunamente por falta de observación constante [3]. Las metodologías pedagógicas convencionales exhiben deficiencias específicas en la transmisión de conocimiento técnico: las expli-

caciones verbales resultan insuficientes para corregir aspectos complejos que requieren ajustes precisos en postura, equilibrio y trayectoria, mientras que la demostración magistral presenta restricciones de visualización desde ángulos únicos e imposibilidad de observar simultáneamente todos los detalles biomecánicos del movimiento [2].

Investigaciones revelan que los métodos convencionales alcanzan únicamente el 45 % de corrección inmediata de errores técnicos, frente al 85 % logrado mediante sistemas tecnológicos asistidos, lo que representa una brecha crítica del 40 % en precisión diagnóstica [4]. Asimismo, la evaluación basada exclusivamente en la observación subjetiva del instructor presenta variaciones significativas según su experiencia, fatiga y posición de observación, mientras que la documentación manual del progreso técnico dificulta el seguimiento longitudinal del desarrollo de habilidades individuales [3]. Esta problemática se replica en la Academia de Taekwondo Villalba Tigers, ubicada en el sector de Izamba, cantón Ambato, donde los instructores carecen de herramientas tecnológicas que permitan evaluar objetivamente las técnicas fundamentales, registrar el progreso individual de los estudiantes y proporcionar retroalimentación cuantitativa, evidenciando la necesidad de una solución tecnológica adaptada a su contexto formativo.

1.2 Antecedentes investigativos

La investigación en realidad virtual aplicada a artes marciales ha experimentado un crecimiento exponencial, revelando una convergencia en hardware inmersivo, inteligencia artificial para análisis automatizado y metodologías pedagógicas innovadoras.

1.2.1 Efectividad Pedagógica de Realidad Virtual en Deportes de Combate

Pastel et al. [1] implementaron un riguroso estudio experimental con 83 estudiantes deportivos (edad media 22.92 ± 3.11 años; 33 mujeres y 50 hombres) para el aprendizaje de la técnica Soto Uke en Zenkutsu Dachi de Karate. Los participantes fueron divididos en cuatro grupos para aislar variables de visualización: VR-WB (n=20) con visualización de cuerpo completo mediante 63 marcadores ópticos, VR-FA (n=22) con visualización exclusiva de antebrazos mediante controladores HTC Vive, un grupo de video (VB, n=20) y un grupo control (n=21). La intervención consistió en 4 sesiones

de 15-20 minutos, evaluadas mediante un sistema de puntuación validado por expertos en una escala de 96 puntos.

Los resultados demostraron que todos los grupos de entrenamiento mejoraron significativamente. El grupo VR-WB mejoró su puntuación total del 48.83 % al 71.43 %, mientras que el grupo VR-FA mejoró del 45.93 % al 68.64 %. El grupo de video mostró una mejora similar (44.05 % a 70.85 %). Al no encontrarse diferencias significativas entre los métodos de realidad virtual y el video convencional, se concluye que la VR es una herramienta pedagógica tan efectiva como los métodos tradicionales, y que la visualización reducida de los antebrazos es suficiente para facilitar un aprendizaje motor complejo sin la necesidad logística de renderizar el cuerpo completo.

En el ámbito del Wushu, Pu y Yang [2] investigaron la enseñanza situacional con 40 estudiantes (edad promedio 19.55 ± 0.76 años en grupo experimental) divididos equitativamente. Utilizando visores picoG24k y Xiaomi VR, el grupo experimental obtuvo puntuaciones técnicas un 15 % superiores al grupo de control. El instrumento validado por 6 expertos (con coeficientes R1=0.87, R2=0.89, R3=0.85) confirmó que las diferencias más notables fueron psicológicas: se observaron aumentos estadísticamente significativos ($P<0.05$) en el interés de aprendizaje, la motivación y la autoconfianza de los estudiantes, sugiriendo que la inmersión virtual potencia la disposición del alumno hacia la práctica repetitiva.

1.2.2 Implementaciones Específicas en Taekwondo Universitario

Liu y Tian [3] llevaron la tecnología al campo universitario desarrollando un modelo basado en Unity 3D y una red neuronal VT-AGCN para la limpieza de datos de movimiento. En su experimento de tres meses con 40 estudiantes de danza, aunque no hubo diferencias significativas en la condición física básica ($P>0.05$), las habilidades técnicas especiales mostraron un avance drástico en el grupo experimental. Las diferencias fueron altamente significativas ($P<0.01$): la patada horizontal alta mejoró un 21.73 % y la compleja patada doble en salto mejoró un 85.21Ådemás, en la técnica de patada circular de 360°, el grupo experimental masculino obtuvo una puntuación media de 9.52 frente a los 8.13 del grupo control. Las pruebas de equilibrio (Star Excursion Balance Test) confirmaron una mejora significativa en la estabilidad postural del grupo que entrenó con VR, demostrando transferencia de habilidades al mundo físico.

1.2.3 Sistemas de Realidad Aumentada y Retroalimentación en Tiempo Real

Yang y Wang [4] desarrollaron un sistema inteligente utilizando gafas AR Microsoft HoloLens 2, tres cámaras RGB-D Intel RealSense D435i y una unidad de procesamiento NVIDIA RTX 4080 para garantizar fluidez. Validado con 47 practicantes de niveles novato, intermedio y avanzado, el sistema implementó algoritmos de aprendizaje profundo (CNN) para la estimación de pose 3D. Los resultados fueron sobresalientes: se logró una precisión general superior al 95 % en nueve categorías de técnicas fundamentales, alcanzando un 97.8 % en la Posición hacia adelante y un 95.9 % en la Patada frontal. La eficiencia del sistema permitió una latencia de movimiento a fotón (M2P) de 56.7 ± 8.4 ms. Aunque la calificación de efectividad del aprendizaje fue alta (8.9/10), el estudio reportó fatiga visual en el 23 % de los participantes tras sesiones prolongadas superiores a 90 minutos, un dato clave para el diseño de sesiones de entrenamiento.

1.2.4 Entrenamiento Adaptativo con Inteligencia Artificial

Chen et al. [5] presentaron VCoach, un sistema de boxeo en VR que personaliza las rutinas basándose en el rendimiento en tiempo real utilizando rastreadores adicionales HTC Vive. Validado con 15 principiantes (9 hombres, 6 mujeres), el estudio comparó el sistema contra video y entrenamiento manual durante sesiones de 15 minutos. En métricas de rendimiento, el grupo VCoach aumentó su velocidad de golpe en 0.468 m/s, superando al grupo de video (0.384 m/s). Más notablemente, en tiempo de reacción, el grupo VCoach mejoró 6 ms, mientras que el grupo de video empeoró significativamente (aumentó su tiempo en 38.5 ms), lo que sugiere que el video pasivo no estimula los reflejos adecuadamente. La postura mejoró en 0.272 puntos y la IA del sistema demostró robustez técnica con precisiones de clasificación del 99.23 % para jab, 99.45 % para cross y 96.45 % para hook.

Complementariamente, Ghazi et al. [6] diseñaron una propuesta conceptual para Karate utilizando las bibliotecas MediaPipe y OpenCV para detección de puntos de referencia corporales. Aunque su estudio es una propuesta de diseño con un cronograma de 8 semanas, proyectan que la asistencia de IA podría elevar la precisión técnica del rango tradicional de 70-90 % a un rango de 95-100 %, además de aumentar el compromiso del atleta en un 50-100 % gracias a la gamificación y la retroalimentación inmediata, transformando la experiencia de “limitada” a “abundante”.

1.2.5 Datasets Especializados y Reconocimiento Automatizado

La base de cualquier sistema de IA son los datos. Lee y Jung [7] abordaron la escasez de datos en artes marciales creando el dataset TUHAD. Con la participación de 10 expertos (4to-6to dan), capturaron 1,936 muestras de 8 técnicas fundamentales (golpes, patadas, bloqueos) utilizando Kinect v2, generando cerca de 100,000 cuadros de imagen RGB-D. Su análisis determinó que la arquitectura de red neuronal convolucional basada en fotogramas clave funciona mejor con la vista lateral (precisión promedio 88.8 %) que con la frontal (81.9 % debido a la oclusión que ocurre al golpear hacia la cámara. Utilizando fotogramas clave en las posiciones 50 % y 100 % de la secuencia temporal, su método alcanzó una precisión máxima del 95.83 %, siendo un 24.7 % más preciso y dos veces más rápido que los algoritmos genéricos previos.

1.2.6 Análisis Biomecánico Mediante Simulación Virtual

Zhong y Xu [8] se enfocaron en la fidelidad biomecánica, utilizando algoritmos de simplificación adaptativa para llevar modelos CAD complejos a entornos VR en tiempo real usando OpenGL. Su análisis cinemático de la patada horizontal cuantificó parámetros invisibles al ojo humano: un ángulo de rodilla de apoyo de 1.32 grados y una rotación externa de tobillo de 1.8 grados. El estudio destacó que la fase de recuperación de la pierna ofensiva consume el 35 % del tiempo total de la técnica, identificando matemáticamente el momento exacto de mayor riesgo táctico para el atleta.

1.2.7 Aplicaciones Terapéuticas y Rehabilitación

La utilidad de estas tecnologías se extiende a la salud y la inclusión. Li et al. [9], en su revisión de 18 estudios de bases de datos Web of Science y Scopus, establecieron que los deportes de combate en VR son herramientas potentes para la rehabilitación neurológica. El boxeo en VR exige un gasto metabólico de 4.1 METs, superior al tenis virtual, y ha demostrado beneficios clínicos tangibles en condiciones como Ictus, Parálisis Cerebral y Parkinson. Se reportaron mejoras en el procesamiento visual, control postural, rango de movimiento y calidad de vida, sugiriendo que la plataforma desarrollada podría tener aplicaciones secundarias valiosas en terapia física adaptada.

1.2.8 Factibilidad y Análisis de Necesidades del Usuario

Para entender la viabilidad de implementación a gran escala, Song et al. [10] realizaron un estudio de factibilidad sobre la popularización del Tai Chi mediante VR. Ante una población estimada de 1,500 millones de practicantes con niveles técnicos inconsistentes, concluyeron que la VR soluciona el problema de la bidimensionalidad del video, permitiendo observación multi-ángulo y facilitando la implementación de sistemas de evaluación de grados en línea.

Sin embargo, la aceptación depende de la calidad de la experiencia. Xie [11], utilizando el modelo Kano en 7 universidades de Chengdu, jerarquizó las prioridades: la interacción humano-computadora (0.9410) y la calidad óptica (0.9269) son los determinantes críticos de la satisfacción. Ma [12] advierte sobre las barreras persistentes en el entrenamiento universitario: aunque la simulación ofrece escenarios de combate complejos y reduce la necesidad de múltiples recintos físicos, los costos elevados de equipos de alta gama y los problemas de "cybersickness" en estudiantes sensibles siguen siendo desafíos operativos que deben mitigarse desde el diseño del software.

1.2.9 Visión de Sistemas Integrados y Tecnologías Emergentes

Finalmente, Shin et al. [13] delinean el futuro inmediato de estas tecnologías tras una revisión de literatura de 2016 a 2023. Su propuesta aboga por el abandono de los sensores portátiles en favor de sistemas de visión por computadora. Proponen una arquitectura que utiliza algoritmos de reconstrucción 3D (como NeRF y fotogrametría) y librerías de estimación de pose (OpenPose/MediaPipe) para convertir video 2D en objetos 3D. Su diseño conceptual de un simulador en el metaverso permitiría la evaluación automatizada de competencias de Poomsae, deduciendo penalizaciones con objetividad algorítmica y prediciendo probabilidades de victoria en combate mediante simulación de datos, marcando el camino hacia la digitalización total del arbitraje y entrenamiento deportivo.

1.3 Fundamentación teórica

1.3.1 Fundamentos Técnicos y Biomecánicos del Taekwondo

El Taekwondo es un arte marcial de origen coreano que se ha consolidado como uno de los deportes de combate más practicados a nivel mundial [14]. Su nombre se traduce literalmente como "el camino del pie y el puño" (Tae: pie o patada; Kwon: puño o bloqueo; Do: camino o filosofía), lo cual describe de manera precisa la esencia de su práctica enfocada en el equilibrio dinámico [14]. A diferencia de otras artes marciales que priorizan el uso de las extremidades superiores o la lucha en el suelo, el Taekwondo se distingue por su énfasis biomecánico en las técnicas de pateo rápido y de alto impacto, complementadas con un arsenal sólido de golpes de mano y bloqueos defensivos [15]. Esta disciplina exige un alto nivel de coordinación corporal, flexibilidad activa y rotación de cadera para la correcta ejecución de su doctrina [15].

Dentro de la pedagogía de esta disciplina, los "movimientos básicos" o "fundamentales" conforman el alfabeto motriz que todo practicante debe dominar antes de avanzar a etapas competitivas y de combate libre [16]. Estos movimientos consisten en acciones aisladas de ataque y defensa que se practican de manera repetitiva para establecer una memoria muscular correcta y posturas estandarizadas [16]. La literatura especializada define a estos movimientos como "fundamentales" porque constituyen los cimientos sobre los cuales se construyen todas las técnicas avanzadas, garantizando el entendimiento de principios físicos cruciales como la fuerza de reacción, el uso del centro de gravedad y la aceleración [17]. Sin el dominio de estos elementos, un practicante sería incapaz de generar la fuerza centrífuga necesaria, aumentando significativamente el riesgo de lesiones deportivas al forzar posiciones anatómicamente perjudiciales [18].

1.3.2 Técnicas de Pie / Patadas Fundamentales (Chagi)

Ap Chagi (Patada Frontal) El Ap Chagi se consolida como el movimiento rectilíneo por excelencia dentro de la disciplina, siendo frecuentemente la primera técnica ofensiva que se imparte en la progresión pedagógica del estudiante [15]. Su ejecución mecánica inicia con una elevación controlada de la rodilla trasera hacia la zona del pecho, estableciendo el vector de ataque antes de proyectar la extremidad. Esta fase de pre-

paración resulta absolutamente crucial para asegurar que la transferencia de energía se dirija de manera frontal, directa y sin dispersiones hacia el objetivo.

Una vez posicionada la articulación, se produce una extensión rápida y explosiva de la pierna para impactar al oponente, utilizando idealmente la zona del metatarso como punto de contacto primario [15]. Inmediatamente después del impacto, el practicante debe recoger la extremidad a su posición original con la misma velocidad para evitar ser atrapado o desequilibrado. Esta acción de retroceso inmediato exige un control absoluto del equilibrio dinámico y previene aperturas en la guardia defensiva del atleta.

Dollyo Chagi (Patada Circular) Reconocida ampliamente en la instrucción deportiva como la técnica ofensiva más utilizada en el Taekwondo moderno, el Dollyo Chagi destaca por su enorme versatilidad táctica y velocidad de ejecución en el área de combate [18]. Su fundamentación biomecánica se basa en un movimiento de naturaleza centrífuga, donde la generación de potencia no proviene únicamente de la pierna, sino que depende directamente de la capacidad del atleta para rotar su cuerpo de manera armónica [18].

Durante su desarrollo, la rodilla ofensiva se eleva de forma lateral al mismo tiempo que el pie de apoyo pivota estratégicamente sobre el suelo [18]. Esta acción articular combinada permite que la cadera libere la energía acumulada y proyecte la pierna en un arco horizontal preciso hacia el objetivo. De este modo, la técnica introduce al practicante en el dominio avanzado de la mecánica del torque corporal y la aceleración angular [18].

Yop Chagi (Patada Lateral) El Yop Chagi se clasifica como un movimiento de empuje lateral que se distingue fundamentalmente por su inmensa capacidad para generar un alto nivel de poder de penetración estructural [15]. A diferencia de las técnicas percusivas de trayectoria curva que buscan el impacto veloz, esta patada requiere una alineación milimétrica de las cadenas musculares para transferir la masa corporal total directamente hacia el punto de impacto.

La clave para lograr una ejecución biomecánica óptima reside en efectuar el giro completo del pie de base, acompañado del empuje simultáneo de la cadera y el glúteo en la misma dirección vectorial del golpe [15]. Al conectar con el canto externo del pie, conocido anatómicamente como Balnal, el estudiante desarrolla y fortalece de manera significativa la fuerza isométrica, consolidando una postura que previene lesiones articulares derivadas del impacto [15].

Naeryo Chagi (Patada Descendente) Esta técnica superior, comúnmente conocida en el ámbito deportivo como patada de hacha, se caracteriza visualmente por describir una trayectoria de elevación ascendente seguida de una precipitada y potente caída vertical [16]. La pierna ofensiva se eleva completamente extendida, buscando sobrepasar la altura de la cabeza del oponente, un movimiento que demanda un nivel excepcionalmente alto de flexibilidad dinámica y elongación muscular por parte del ejecutante [16].

Una vez alcanzado el punto máximo de elevación, la extremidad se deja caer de manera explosiva, aprovechando la aceleración de la gravedad para multiplicar exponencialmente la fuerza final del impacto [16]. El área de contacto principal durante este descenso es el talón del pie, el cual va dirigido estratégicamente hacia zonas anatómicamente vulnerables como la clavícula o el pecho del rival, convirtiéndola en un ataque contundente [16].

Bandal Chagi (Patada Semicircular) El Bandal Chagi se define estructuralmente como un movimiento de carácter intermedio, cuya trayectoria espacial se sitúa de forma estratégica entre la estricta linealidad del Ap Chagi y el arco amplio y pronunciado del Dollyo Chagi [17]. Su fase inicial se ejecuta levantando la rodilla de manera diagonal hacia el objetivo, acortando así la distancia de recorrido y minimizando el tiempo de respuesta visual del adversario [17].

Esta técnica se consolida en la doctrina deportiva como la opción ofensiva más eficiente para atacar la zona media (tronco) durante situaciones de intercambio rápido [17]. Al requerir un menor grado de rotación de cadera en comparación con las patadas circulares completas, permite al practicante impactar con firmeza y recuperar su postura de balance de forma casi inmediata, facilitando el encadenamiento de nuevos ataques [17].

Mireo Chagi (Patada de Empuje) A diferencia de las patadas percusivas tradicionales cuyo propósito central es generar daño físico por impacto balístico, el Mireo Chagi persigue un objetivo fundamentalmente táctico orientado al control espacial [16]. Esta herramienta defensiva y ofensiva busca alterar drásticamente la distancia operativa, permitiendo al ejecutante neutralizar la iniciativa de ataque del contrario de manera preventiva e inteligente [16].

El procedimiento físico consiste en que el practicante presione firmemente la planta del pie contra el cuerpo del adversario, extendiendo la pierna de forma progresiva y sostenida para empujarlo hacia atrás [16]. Esta acción constante enseña al estudiante

a gestionar eficazmente el entorno sin comprometer la estabilidad de su propio centro de gravedad, interrumpiendo el ritmo combativo del atacante de forma segura [16].

1.3.3 Técnicas de Mano / Golpes Fundamentales

Jirugi (Golpes Rectilíneos de Puño) Los golpes catalogados bajo el término Jirugi representan los ataques directos y más económicos de las extremidades superiores, diseñados para alcanzar el objetivo recorriendo la distancia espacial más corta posible [15]. La fase de ejecución inicia con la energía impulsada desde el núcleo del cuerpo, demostrando que las técnicas de mano dependen intrínsecamente de la rotación de la cadera para generar una potencia real y medible [15].

Mientras el brazo ofensivo se extiende velozmente, el puño rota 180 grados sobre su propio eje instantes antes del punto de impacto para maximizar la penetración en el objetivo [15]. De manera simultánea y coordinada, el brazo contrario se retrae violentamente hacia la cadera opuesta, aplicando el principio biomecánico de acción y reacción, lo que multiplica el poder destructivo y garantiza la estabilidad del torso [15].

Palgup Chigi (Golpes de Codo) Esta técnica especializada de contacto cercano consiste en emplear la punta y la densa estructura ósea del codo como un arma contundente frente a la guardia del adversario [15]. Debido a la alta densidad de la articulación implicada, se considera uno de los recursos ofensivos más severos dentro del arsenal marcial, siendo su correcta asimilación un motivo de estudio minucioso en la etapa de formación deportiva [15].

La biomecánica del Palgup Chigi comparte ciertos principios fundamentales con los golpes rectilíneos, al requerir la flexión controlada del brazo y apoyarse fuertemente en la rotación violenta del torso para proyectar la extremidad [15]. Su utilidad pedagógica resulta indispensable para resolver situaciones de combate a muy corta distancia (clinch), donde el rango operativo no permite la extensión necesaria para ejecutar patadas o puños convencionales [15].

1.3.4 Realidad Virtual Inmersiva para Entrenamiento Motor

La realidad virtual inmersiva genera entornos simulados tridimensionales que permiten interacción mediante dispositivos especializados. Estudios demuestran que el entrenamiento en realidad virtual inmersiva genera mejoras del 15 % en precisión de ejecución de movimientos deportivos complejos, junto con retención de aprendizaje del 85 % en evaluaciones diferidas, significativamente superior al 68 % observado en grupos control con entrenamiento tradicional [1]. Los dispositivos de visualización montados en cabeza crean experiencias donde el usuario puede practicar movimientos deportivos en espacios virtuales sin limitaciones físicas del entorno real, ofreciendo tracking de posición con múltiples grados de libertad, frecuencias de actualización elevadas para fluidez visual, y campos de visión amplios.

La inmersión visual completa facilita el aprendizaje motor porque el cerebro procesa la experiencia virtual como real, permitiendo desarrollar memoria muscular mediante práctica repetitiva en entorno seguro. En contextos específicos de artes marciales, sistemas virtuales inmersivos han demostrado mejoras significativas en rendimiento técnico, alcanzando 76 puntos versus 66 puntos en métodos convencionales [10]. Investigaciones reportan que dispositivos de realidad virtual integrados con metodologías pedagógicas innovadoras generan incrementos significativos en motivación estudiantil de 4.2 a 5.8 puntos en escala de medición, junto con mejoras en rendimiento académico que superan al grupo control con 87 % versus 76 % en métricas de exámenes teóricos [12].

El sistema implementará un entorno virtual donde practicantes ejecutarán técnicas de Taekwondo contra objetivos interactivos. El entorno incluirá modelos tridimensionales de referencia que demuestran la ejecución correcta de movimientos.Implementaciones en enseñanza situacional de artes marciales utilizando dispositivos de realidad virtual con contenido tridimensional pregrabado evidencian superioridad del 15 % en evaluación técnica final con 82.3±5.2 puntos versus 71.5±6.8 puntos en grupo control, junto con experiencia positiva donde 94 % de estudiantes reportó satisfacción muy positiva versus 68 % en control [2].

1.3.5 Sistemas de Captura de Movimiento Corporal

Los sistemas de captura de movimiento utilizan sensores externos posicionados en extremidades para registrar posiciones y orientaciones corporales en tiempo real. Los dispositivos de tracking inalámbricos se fijan mediante correas en brazos, piernas y cintura, transmitiendo coordenadas tridimensionales al sistema de realidad virtual. Esta tecnología complementa el tracking integrado del visor, permitiendo captura precisa de movimientos de patadas y golpes que ocurren fuera del campo de visión de las cámaras del dispositivo. Sistemas de entrenamiento utilizando tracking de alta precisión han demostrado mejoras significativas en velocidad de golpe de 0.468 m/s (22 % de incremento) versus 0.384 m/s (16 %) en grupo con video instructivo tradicional, y mejoras en tiempo de reacción de 6 ms de reducción comparado con 38.5 ms de empeoramiento en grupo control [5].

Los sensores inerciales combinan acelerómetros, giroscopios y magnetómetros para calcular posición y rotación en el espacio tridimensional. Los sistemas comerciales de tracking corporal alcanzan precisión elevada con latencia mínima, suficiente para análisis de movimientos deportivos rápidos. La frecuencia de muestreo elevada permite captura detallada de trayectorias de extremidades durante ejecución de técnicas. Tecnologías de reconstrucción tridimensional desde video bidimensional están ampliando las posibilidades de análisis técnico sin requerir sistemas costosos. Implementaciones utilizando estimación de coordenadas tridimensionales mediante cámara única, implementando modelos humanos simplificados con algoritmos de estimación de pose basados en aprendizaje profundo, permitieron incremento en tasa de detección correcta de errores técnicos de 58 % a 85 %, con costos significativamente inferiores comparados con sistemas profesionales de captura de movimiento tradicionales [4].

El sistema utilizará dispositivos de tracking externos fijados para capturar movimientos completos de patadas y golpes. Las coordenadas capturadas incluirán posiciones tridimensionales y rotaciones de cada punto de tracking, permitiendo reconstrucción de la postura corporal durante ejecución de técnicas. Los datos se procesarán para generar retroalimentación al practicante. Conjuntos de datos especializados para reconocimiento de acciones en Taekwondo mediante redes neuronales convolucionales basadas en fotogramas clave, conteniendo 1,936 muestras de acción de técnicas unitarias fundamentales capturadas con sensores de profundidad, han demostrado precisión de reconocimiento del 95.83 % en casos óptimos con precisión promedio del 88 %, superando en 24.7 % a métodos anteriores [6].

1.3.6 Análisis de Ángulos Articulares en Técnicas de Taekwondo

Los ángulos articulares cuantifican la configuración espacial del cuerpo durante ejecución de movimientos deportivos. En Taekwondo, los ángulos críticos incluyen flexión de rodilla en posición de cámara, extensión de rodilla en impacto, rotación de cadera, y elevación de pierna respecto al torso. Estas métricas determinan la efectividad técnica, potencia generada y riesgo de lesión. Investigaciones sobre diseño de acciones mediante simulación virtual en Taekwondo reportan incrementos de comprensión biomecánica del 65 % al 88 %, junto con mejoras del 40 % en capacidad de detección de errores técnicos por parte de los practicantes [8].

Las técnicas de patada básicas requieren rangos angulares específicos para ejecución correcta. En patada frontal, la rodilla debe flexionarse aproximadamente en ángulo recto en posición de cámara antes de extenderse completamente en impacto. La pierna de apoyo mantiene flexión reducida para estabilidad. En patada circular, la cadera rota sustancialmente mientras la rodilla mantiene flexión hasta el momento de impacto, extendiendo súbitamente. Sistemas de inteligencia artificial aplicados al análisis biomecánico en artes marciales han demostrado tasas de corrección inmediata de errores del 85 % versus 45 % en métodos tradicionales, acelerando el dominio técnico en 30 % [6].

El sistema calculará ángulos articulares a partir de coordenadas tridimensionales obtenidas mediante los dispositivos de tracking, utilizando quaternions para la representación y procesamiento de las rotaciones articulares. Para cada técnica, se definirán rangos aceptables de ángulos en la ejecución del movimiento. El sistema comparará los ángulos medidos del usuario con estos rangos de referencia, identificando desviaciones que indiquen errores técnicos. Estudios demuestran que la evaluación tradicional mediante observación humana convencional alcanza únicamente el 58 % de precisión en detección correcta de errores técnicos, mientras que sistemas tecnológicos asistidos elevan esta capacidad hasta el 85 %, representando una mejora crítica del 27 % en precisión diagnóstica [8].

1.3.7 Bases de Datos Relacionales para Almacenamiento de Sesiones

Las bases de datos relacionales estructuran información en tablas con relaciones mediante claves foráneas, permitiendo consultas eficientes mediante lenguajes de consul-

ta estructurados. Este modelo es adecuado para almacenar sesiones de entrenamiento, ejecuciones individuales, y progreso temporal de usuarios. Las bases de datos relacionales garantizan integridad mediante propiedades de atomicidad, consistencia, aislamiento y durabilidad. La capacidad de documentar y analizar progreso longitudinal es fundamental, ya que estudios en entrenamiento con realidad virtual demuestran reducciones sostenidas de ansiedad del 12.5 %, disminución de miedo del 11.5 % y aumento de confianza del 60 al 80 % a través del seguimiento temporal de sesiones [2].

Los sistemas de gestión de bases de datos ofrecen soporte para tipos de datos complejos, indexación avanzada, y capacidad de almacenar datos estructurados y semiestructurados. El análisis de datos históricos permite identificar patrones de mejora y áreas de intervención prioritarias, similar a cómo plataformas de realidad virtual a gran escala han documentado progreso de 1.5 millones de usuarios distribuidos en más de 150 países, con promedio de 4.2 sesiones semanales comparado con 2.1 sesiones en formato presencial tradicional [10].

El esquema de base de datos incluirá tabla de usuarios, tabla de sesiones registrando fecha, porcentaje de precision y técnicas practicadas, tabla de ejecuciones documentando cada intento evaluado, y tabla de métricas históricas agregando estadísticas. Las consultas permitirán generar reportes de evolución individual, identificar patrones de error recurrentes, y comparar desempeño entre sesiones. El seguimiento longitudinal facilita la identificación de cambios sustanciales en aproximación técnica, como incrementos en enfoque hacia aspectos específicos del entrenamiento del 23.17 % al 68.11 % documentados en estudios de intervención prolongada [3].

1.3.8 Frameworks de Desarrollo de Aplicaciones de Realidad Virtual

Los motores gráficos especializados en tridimensional abstraen la complejidad de programación gráfica y gestión de dispositivos de realidad virtual, acelerando el desarrollo. Los frameworks de desarrollo dominantes en el mercado de aplicaciones de realidad virtual y realidad aumentada ofrecen paquetes compatibles con múltiples dispositivos, repositorios de componentes reutilizables, y exportación multiplataforma. Algunos frameworks proporcionan calidad gráfica avanzada mediante iluminación realista y materiales físicamente basados, con herramientas de prototipado visual sin programación extensa. La democratización del acceso mediante plataformas compatibles con dispositivos económicos ha permitido implementaciones exitosas en contextos educa-

tivos universitarios, evidenciando que incluso sistemas de bajo costo pueden generar resultados significativos en evaluación técnica y satisfacción estudiantil [3].

Estos frameworks incluyen sistemas de física para colisiones realistas, renderizado optimizado para mantener frecuencias de actualización elevadas requeridas en realidad virtual, e interfaces de programación para integración con dispositivos de tracking. La arquitectura de componentes reutilizables facilita desarrollo modular separando lógica de negocio, visualización y controladores de entrada. La optimización de rendimiento es crítica, ya que estudios reportan que dispositivos con frecuencias de actualización elevadas y latencia mínima son fundamentales para prevenir malestar del usuario y garantizar experiencia inmersiva efectiva [11, 12].

La aplicación se desarrollará sobre motor gráfico tridimensional con soporte nativo para realidad virtual, implementando arquitectura modular con separación entre captura de datos y visualización. La escena principal contendrá el entorno virtual con nivel de detalle optimizado, iluminación precalculada para reducir cómputo en tiempo real. El sistema de animación mostrará modelos de referencia ejecutando técnicas correctas con opción de volver a reproducir. La experiencia de usuario se diseñará considerando la navegación clara y la obtención de datos de movimiento como factores determinantes en la efectividad del aprendizaje motor mediante realidad virtual [7, 13].

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Desarrollar una aplicación de realidad virtual para evaluar los fundamentos técnicos de Taekwondo en la Academia Villalba's Tigers.

1.4.2 Objetivos específicos

- Investigar los fundamentos técnicos de Taekwondo en movimientos y golpes de puño y pie.

- Comparar las metodologías y herramientas de desarrollo de aplicaciones de realidad virtual.
- Implementar una aplicación de realidad virtual para evaluar los fundamentos técnicos de Taekwondo en la Academia Villalba's Tigers

CAPÍTULO II

METODOLOGÍA

2.1 Materiales

Los instrumentos utilizados en la presente investigación fueron un formulario de encuesta en línea y una guía de entrevista estructurada. El formulario fue estructurado y administrado mediante la plataforma Google Forms, herramienta seleccionada debido a su accesibilidad, facilidad de distribución remota y capacidad para registrar respuestas de forma automática y ordenada. El formulario fue diseñado con el propósito de recopilar información diagnóstica sobre el perfil tecnológico de los estudiantes, los requerimientos funcionales que consideran prioritarios para una aplicación de entrenamiento, y su percepción y disposición hacia el uso de la realidad virtual como herramienta de apoyo en el Taekwondo, previo al uso de la aplicación de realidad virtual. La guía de entrevista, por su parte, estuvo dirigida al personal docente, lo que permitió triangular la información obtenida y enriquecer el análisis con la visión de quienes lideran el proceso de enseñanza dentro de la academia.

2.2 Métodos

La metodología de esta investigación integra de manera independiente los enfoques cualitativo y cuantitativo para asegurar que la solución tecnológica responda a las necesidades reales de los usuarios en la academia. Se emplea el enfoque cualitativo con el fin de capturar la experiencia biomecánica y los criterios de evaluación de los instructores, permitiendo que el software no sea una herramienta arbitraria, sino que replique fielmente los estándares de ejecución exigidos en el dojang. Complementariamente, el enfoque cuantitativo es indispensable para medir estadísticamente el enfoque cuantitativo es indispensable para identificar, a través de datos estadísticos, los patrones de uso tecnológico de los estudiantes, incluyendo su experiencia previa con dispositivos móviles como apoyo al entrenamiento, su familiaridad con entornos de realidad vir-

tual y sus percepciones en torno a la usabilidad de interfaces digitales en contextos deportivos, transformando sus percepciones en datos objetivos que guíen el diseño y la efectividad de la aplicación de realidad virtual.

2.2.1 Modalidad de la investigación

El presente trabajo se desarrolla bajo la modalidad de investigación de campo, dado que la recolección de datos se llevó a cabo directamente en el entorno natural donde se desarrolla el fenómeno estudiado, es decir, en la Academia de Taekwondo Villalba Tigers. Esta modalidad permitió obtener información de primera fuente a través de encuestas aplicadas a los estudiantes y entrevistas dirigidas a los instructores, garantizando que los datos reflejen las condiciones reales del proceso de entrenamiento y las necesidades concretas de sus actores.

Complementariamente, el trabajo se apoya en la modalidad de Investigación Aplicada, enfocada en resolver un problema real mediante una solución tecnológica funcional en la Academia de Taekwondo Villalba Tigers, transformando teorías y metodologías en herramientas concretas que responden a las necesidades del entrenamiento de Taekwondo.

2.2.2 Poblacion y muestra

La población objeto de estudio está conformada por 33 estudiantes activos de Taekwondo pertenecientes a la Academia de Taekwondo Villalba Tigers, ubicada en el sector de Izamba, cantón Ambato, provincia de Tungurahua, Ecuador. Adicionalmente, se consideraron 3 docentes con diferentes cargos dentro de la academia, quienes fueron sujetos de una entrevista estructurada, conformando así una población total de 36 participantes. Dado que la población es de tamaño reducido y resulta accesible en su totalidad, se prescinde del proceso de muestreo y se opta por un censo poblacional, aplicando el instrumento a la totalidad de los individuos. Este criterio se sustenta en que trabajar con la población completa elimina el error muestral y otorga mayor validez y representatividad a los datos recolectados.

2.2.3 Recolección de información

La recolección de información se llevó a cabo durante el mes de marzo de 2026, mediante la aplicación de un formulario de encuesta en línea diseñado para los estudiantes de la Academia de Taekwondo Villalba Tigers. El instrumento fue distribuido de forma virtual a través de la plataforma Google Forms, permitiendo que los participantes respondieran de manera autónoma y asincrónica desde sus dispositivos personales.

Al cierre del periodo de recolección, se obtuvieron 33 respuestas válidas. Complementariamente, se aplicó una entrevista estructurada a 3 docentes de la academia con diferentes cargos institucionales, con el fin de obtener una perspectiva cualitativa desde el personal formativo.

a. Entrevistas

Tabla 1: Entrevista a Profesora Principal, Experta en Taekwondo

Pregunta	**Respuesta**
1. "Usted cuenta con una vasta trayectoria en la enseñanza del Taekwondo. Bajo su criterio, ¿por qué considera que técnicas como el Ap Chagi, Dollyo Chagi, Yop Chagi, Naeryo Chagi, Bandal Chagi, Mireo Chagi, Jirugi y Palgup Chigi constituyen el pilar fundamental para un practicante en etapa de iniciación, y qué riesgos técnicos implica ignorar este núcleo?"	Las técnicas básicas son fundamentales porque permiten que el estudiante desarrolle coordinación, equilibrio y control corporal desde las primeras etapas. Además, son movimientos que forman parte de la base técnica del Taekwondo. Cuando estas técnicas no se aprenden correctamente, suelen aparecer errores que con el tiempo son más difíciles de corregir y terminan afectando el desempeño general del practicante.
2. "Al trabajar con alumnos principiantes, ¿cuáles son las mayores barreras o dificultades que enfrenta al intentar transmitir la correcta ejecución de estas técnicas, y dónde detecta que fallan con mayor frecuencia?"	Una de las principales dificultades es que muchos estudiantes quieren ejecutar las técnicas rápidamente sin comprender primero la mecánica del movimiento. Los errores más frecuentes aparecen en la postura, el equilibrio y la coordinación corporal. También es común observar falta de control durante la ejecución.

Pregunta	Respuesta
3. "Desde su experiencia docente, ¿qué elementos considera indispensables al momento de corregir a un alumno?"	Considero importante combinar explicaciones claras con demostraciones visuales y práctica guiada. El estudiante necesita comprender qué está realizando incorrectamente para poder mejorar progresivamente la ejecución de la técnica.
4. "Históricamente, el Taekwondo se ha transmitido mediante la observación directa. ¿Cuál es su postura respecto a la integración de herramientas tecnológicas, como realidad virtual o sensores de movimiento, para apoyar la evaluación técnica del estudiante?"	Pienso que la tecnología puede convertirse en una herramienta de apoyo bastante útil dentro del proceso de enseñanza. Este tipo de sistemas podrían ayudar a identificar errores técnicos y brindar una evaluación más objetiva sobre el desempeño del estudiante.
5. "¿Considera que, en un sistema orientado a la evaluación técnica de movimientos, sería útil que el practicante reciba información sobre los errores cometidos durante la ejecución y algún indicador o porcentaje que refleje qué tan precisa fue la técnica realizada?"	Sí, considero que sería de gran ayuda para el practicante. Recibir retroalimentación sobre los errores y contar con algún indicador de precisión permitiría comprender mejor el desempeño y observar el progreso técnico de una manera más clara.
6. "Pensando en la proyección a largo plazo, ¿cómo cree que un sistema que proporcione una evaluación técnica constante y objetiva podría influir en la evolución de un estudiante?"	Una evaluación constante permitiría detectar errores desde etapas tempranas y ayudaría al estudiante a mejorar progresivamente. Además, podría complementar la enseñanza tradicional brindando información objetiva sobre la evolución técnica del practicante.

Tabla 2: Entrevista a Experta en Taekwondo – Competidora

Pregunta	Respuesta
1. "Usted cuenta con una vasta trayectoria en la enseñanza del Taekwondo. Bajo su criterio, ¿por qué considera que técnicas como el Ap Chagi, Dollyo Chagi, Yop Chagi, Naeryo Chagi, Bandal Chagi, Mireo Chagi, Jirugi y Palgup Chigi constituyen el pilar fundamental para un practicante en etapa de iniciación, y qué riesgos técnicos implica ignorar este núcleo?"	Las técnicas básicas representan la estructura principal del Taekwondo. Movimientos como el Ap Chagi o el Dollyo Chagi continúan utilizándose incluso en niveles avanzados y competencias. Cuando un estudiante no domina correctamente estas bases, desarrolla errores técnicos que afectan su rendimiento y luego resultan difíciles de corregir.
2. "Al trabajar con alumnos principiantes, ¿cuáles son las mayores barreras o dificultades que enfrenta al intentar transmitir la correcta ejecución de estas técnicas, y dónde detecta que fallan con mayor frecuencia?"	Los principiantes suelen presentar dificultades relacionadas con la estabilidad y el control corporal. Aunque comprendan la explicación, muchas veces pierden precisión durante la ejecución o no logran mantener una postura adecuada mientras realizan la técnica.
3. "Desde su experiencia docente, ¿qué elementos considera indispensables al momento de corregir a un alumno?"	Considero importante realizar correcciones inmediatas y acompañarlas con demostraciones prácticas. Cuando el estudiante observa la técnica correctamente y recibe indicaciones claras mientras practica, logra identificar mejor sus errores.
4. "Históricamente, el Taekwondo se ha transmitido mediante la observación directa. ¿Cuál es su postura respecto a la integración de herramientas tecnológicas, como realidad virtual o sensores de movimiento, para apoyar la evaluación técnica del estudiante?"	Creo que la tecnología puede aportar bastante al proceso de evaluación técnica. Herramientas como sensores o sistemas de realidad virtual podrían ayudar a detectar errores repetitivos y ofrecer información más precisa sobre cómo se ejecutan los movimientos.

Pregunta	Respuesta
5. "¿Considera que, en un sistema orientado a la evaluación técnica de movimientos, sería útil que el practicante reciba información sobre los errores cometidos durante la ejecución y algún indicador o porcentaje que refleje qué tan precisa fue la técnica realizada?"	Sí, porque permitiría que el estudiante tenga una referencia más clara sobre su desempeño. Muchas veces el practicante cree que ejecuta correctamente una técnica, pero al recibir retroalimentación objetiva puede identificar aspectos específicos que necesita mejorar.
6. "Pensando en la proyección a largo plazo, ¿cómo cree que un sistema que proporcione una evaluación técnica constante y objetiva podría influir en la evolución de un estudiante?"	Considero que ayudaría bastante en el proceso de formación, especialmente para corregir errores desde etapas tempranas y mejorar progresivamente la calidad técnica del estudiante. También serviría como complemento al entrenamiento tradicional.

Tabla 3: Entrevista a Instructor Secundario (Subinstructor de Academia de Taekwondo)

Pregunta	Respuesta
1. "Usted cuenta con una vasta trayectoria en la enseñanza del Taekwondo. Bajo su criterio, ¿por qué considera que técnicas como el Ap Chagi, Dollyo Chagi, Yop Chagi, Naeryo Chagi, Bandal Chagi, Mireo Chagi, Jirugi y Palgup Chigi constituyen el pilar fundamental para un practicante en etapa de iniciación, y qué riesgos técnicos implica ignorar este núcleo?"	Las técnicas básicas son importantes porque ayudan al estudiante a desarrollar coordinación, control y estabilidad corporal. Además, sirven como preparación para técnicas más avanzadas. Si estas bases no se aprenden correctamente desde el inicio, el practicante puede presentar dificultades técnicas más adelante.
2. "Al trabajar con alumnos principiantes, ¿cuáles son las mayores barreras o dificultades que enfrenta al intentar transmitir la correcta ejecución de estas técnicas, y dónde detecta que fallan con mayor frecuencia?"	Los principiantes suelen tener problemas para coordinar correctamente los movimientos y mantener estabilidad durante la ejecución de las técnicas. También es frecuente que les cueste controlar la fuerza y dirección del movimiento.

Pregunta	Respuesta
3. "Desde su experiencia docente, ¿qué elementos considera indispensables al momento de corregir a un alumno?"	Pienso que es importante explicar las técnicas de manera sencilla y acompañar las indicaciones con demostraciones visuales. La práctica constante también ayuda a que el estudiante comprenda mejor el movimiento y pueda corregir errores poco a poco.
4. "Históricamente, el Taekwondo se ha transmitido mediante la observación directa. ¿Cuál es su postura respecto a la integración de herramientas tecnológicas, como realidad virtual o sensores de movimiento, para apoyar la evaluación técnica del estudiante?"	Considero que este tipo de herramientas podrían utilizarse como apoyo dentro del entrenamiento, ya que ayudarían a identificar errores técnicos y proporcionarían información más objetiva sobre el desempeño del practicante.
5. "¿Considera que, en un sistema orientado a la evaluación técnica de movimientos, sería útil que el practicante reciba información sobre los errores cometidos durante la ejecución y algún indicador o porcentaje que refleje qué tan precisa fue la técnica realizada?"	Sí, porque permitiría que el estudiante tenga una idea más clara sobre qué tan correctamente realizó la técnica. Además, contar con métricas o porcentajes ayudaría a observar el progreso técnico con el paso del tiempo.
6. "Pensando en la proyección a largo plazo, ¿cómo cree que un sistema que proporcione una evaluación técnica constante y objetiva podría influir en la evolución de un estudiante?"	Una evaluación constante ayudaría a que los estudiantes detecten errores más rápidamente y puedan mejorar su técnica de forma progresiva. También serviría como apoyo complementario para reforzar la evaluación realizada por el instructor durante las prácticas.

b. Encuestas

Validación de la encuesta

Para determinar la fiabilidad del instrumento, se aplicó el coeficiente Alfa de Cronbach utilizando la siguiente fórmula:

$$\alpha = \frac{K}{K-1}\left(1 - \frac{\sum \sigma_i^2}{\sigma_t^2}\right) \tag{II.1}$$

Donde:

- K: número de ítems del instrumento, correspondiente a 14 preguntas.
- $\sum \sigma_i^2$: suma de las varianzas de los ítems.
- σ_t^2: varianza total de la escala.

Tabla 4: Valores y resultados del Alfa de Cronbach

Indicador	**Valor**
K (número de preguntas)	14
Suma de varianzas	9.52
Varianza total	32.18
Alfa de Cronbach	0.83

El coeficiente obtenido de 0.83 certifica la fiabilidad del instrumento para los fines de esta tesis.

Tabulacion de preguntas

1. ¿Con qué frecuencia utiliza aplicaciones tecnológicas para apoyar su entrenamiento deportivo?

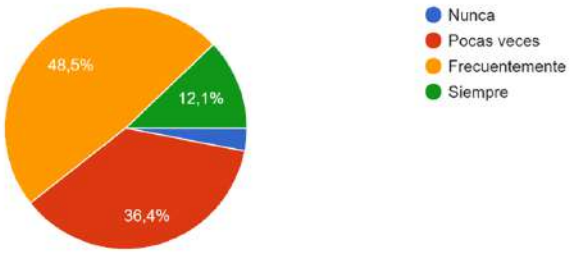


Figura 1: Distribución porcentual de la frecuencia de uso de apps tecnológicas en entrenamientos deportivos

Tabla 5: Distribución porcentual de la frecuencia de uso de apps tecnológicas en entrenamientos deportivos

Respuesta	Frecuencia	Porcentaje
Nunca	1	3.0 %
Pocas veces	12	36.4 %
Frecuentemente	14	42.4 %
Siempre	6	18.2 %
Total	33	100 %

Análisis: Los datos revelan que un significativo 61 % de la población encuestada utiliza tecnología de manera frecuente o constante como apoyo a sus actividades deportivas. Este hallazgo establece una línea base de alfabetización digital sumamente favorable para el proyecto, indicando que la mayoría de los usuarios finales ya poseen un ecosistema tecnológico integrado en su rutina de entrenamiento. Esta alta receptividad reduce el riesgo de rechazo hacia la adopción de una nueva plataforma y confirma la pertinencia de introducir soluciones de software avanzadas en el dojang.

2. ¿Ha utilizado alguna vez un visor o dispositivo de Realidad Virtual (Meta Quest, PlayStation VR, etc.)?

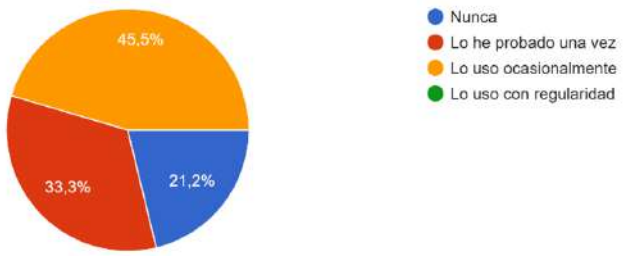


Figura 2: Distribución porcentual de uso de visores VR

Tabla 6: Distribución porcentual de uso de visores VR

Respuesta	Frecuencia	Porcentaje
Nunca	8	24.2 %
Lo he probado una vez	13	39.4 %
Lo uso ocasionalmente	12	36.4 %
Total	33	100 %

Análisis: Si bien existe una apertura general hacia la tecnología, los resultados evidencian que el 24.2 % de los estudiantes nunca ha interactuado con dispositivos de Realidad Virtual, y un 39.4 % lo ha hecho apenas una vez. Esta métrica es vital para la ingeniería de la aplicación, ya que demanda que el entorno virtual se diseñe con una curva de aprendizaje mínima. La interfaz de usuario (UI) dentro del casco inmersivo deberá ser altamente intuitiva, evitando controles complejos y previniendo la fatiga visual o el mareo por movimiento (motion sickness) en usuarios novatos.

3. ¿Qué tan cómodo se siente al usar una aplicación nueva sin haber recibido instrucciones previas?

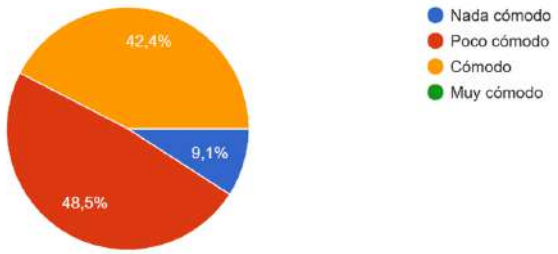


Figura 3: Distribución porcentual sobre el uso de aplicaciones nuevas

Tabla 7: Distribución porcentual sobre el uso de aplicaciones nuevas

Respuesta	Frecuencia	Porcentaje
Nada cómodo	3	9.1 %
Poco cómodo	17	51.5 %
Cómodo	13	39.4 %
Total	33	100 %

Análisis: El 61 % de los participantes (sumando los que se sienten poco o nada cómodos) expresa resistencia a operar aplicaciones nuevas sin una guía previa. Este es un requerimiento no funcional crítico para la fase de diseño de Experiencia de Usuario (UX). La plataforma requerirá de forma ineludible la integración de un tutorial de inicio interactivo y claro antes de permitir el acceso al entorno de entrenamiento libre, asegurando así que el estudiante comprenda el esquema de controles y el propósito de las métricas presentadas sin generar frustración temprana.

4. ¿Qué tan importante considera que una aplicación VR identifique errores en la ejecución de técnicas básicas?

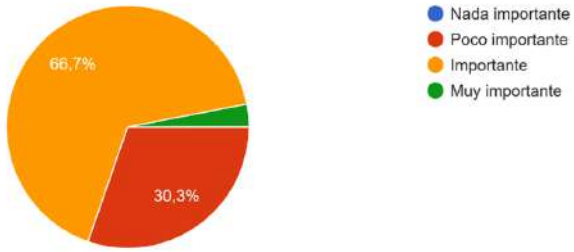


Figura 4: Distribución porcentual sobre la importancia de retroalimentación en aplicaciones VR

Tabla 8: Distribución porcentual sobre la importancia de retroalimentación en aplicaciones VR

Respuesta	**Frecuencia**	**Porcentaje**
Poco importante	6	18.2 %
Importante	26	78.8 %
Muy importante	1	3.0 %
Total	33	100 %

Análisis: Existe un consenso abrumador (81.8 % considerando importante y muy importante) sobre la necesidad de que el sistema identifique errores técnicos. Esto valida el propósito central de la investigación: el software no debe ser un mero visualizador 3D, sino una herramienta analítica activa. A nivel técnico, esto exige programar lógicas de colisión precisas y cálculos de ángulos en tiempo real mediante el motor gráfico, asegurando que la evaluación automática posea el rigor suficiente para ser percibida como útil por el estudiante.

5. ¿Qué tan útil le resultaría recibir retroalimentación sobre las fallas en la ejecución de una técnica?

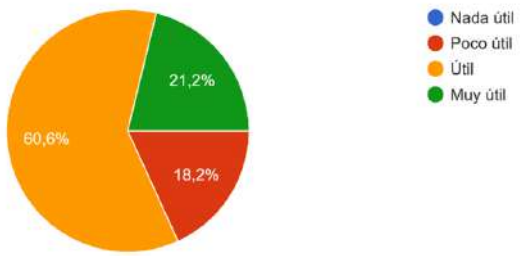


Figura 5: Distribución porcentual sobre la utilidad de la retroalimentación de errores en la ejecución

Tabla 9: Distribución porcentual sobre la utilidad de la retroalimentación de errores en la ejecución

Respuesta	Frecuencia	Porcentaje
Poco útil	6	18.2 %
Útil	21	63.6 %
Muy útil	6	18.2 %
Total	33	100 %

Análisis: El 81.8 % de los encuestados considera útil o muy útil recibir retroalimentación sobre los errores cometidos durante la ejecución de una técnica. Este resultado respalda la incorporación de un sistema de retroalimentación que, al finalizar cada movimiento, comunique al usuario de forma clara en qué segmentos corporales de la técnica se produjeron desviaciones respecto al patrón de referencia, acompañado de un indicador de precisión numérico. De este modo, el practicante puede identificar sus puntos de mejora sin depender de la supervisión constante de un instructor.

6. ¿Qué tan importante sería poder comparar su ejecución con un modelo de referencia (animación 3D o demostración experta)?

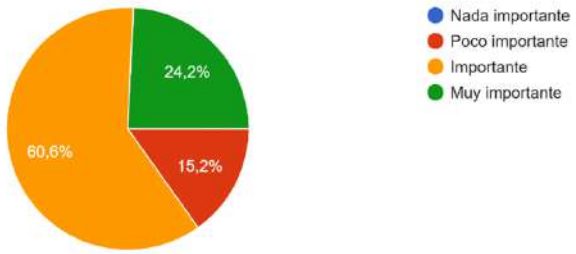


Figura 6: Distribución porcentual sobre la comparativa de ejecución con un modelo 3D

Tabla 10: Distribución porcentual sobre la comparativa de ejecución con un modelo 3D

Respuesta	Frecuencia	Porcentaje
Poco importante	4	12.1 %
Importante	24	72.7 %
Muy importante	5	15.2 %
Total	33	100 %

Análisis: Un destacado 87.9 % de los alumnos considera importante o muy importante contar con un modelo de referencia para comparar su ejecución. Este requerimiento consolida la necesidad de integrar animaciones 3D de alta fidelidad basadas en expertos. El sistema deberá ofrecer modalidades de "espejo" o proyección de un avatar guía que demuestre la técnica perfecta, otorgando al estudiante un estándar visual claro que sirva como punto de comparación directo contra sus propios movimientos monitoreados.

7. ¿Qué tan importante es para usted que una aplicación tenga una estructura de navegación clara y ordenada?

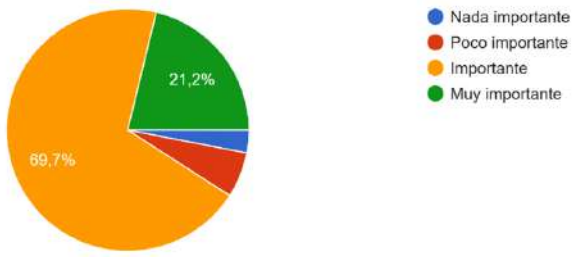


Figura 7: Distribución porcentual sobre la importancia a de una clara navegación

Tabla 11: Distribución porcentual sobre la importancia de una navegación clara

Respuesta	Frecuencia	Porcentaje
Poco importante	1	3.0 %
Importante	22	66.7 %
Muy importante	10	30.3 %
Total	33	100 %

Análisis: La inmensa mayoría de la población (97 %) prioriza de manera casi unánime una estructura de navegación clara y ordenada. En el contexto de aplicaciones de Realidad Virtual, donde la navegación puede resultar cognitivamente más demandante que en pantallas tradicionales, este dato obliga a implementar una "arquitectura plana". Los diseñadores deberán evitar submenús profundos u opciones ocultas, garantizando que el acceso a los módulos de entrenamiento sea directo, visible y ejecutable con la menor cantidad de interacciones espaciales posibles.

8. ¿Con qué frecuencia la cantidad de pasos o menús dentro de una aplicación le ha dificultado encontrar lo que necesita?

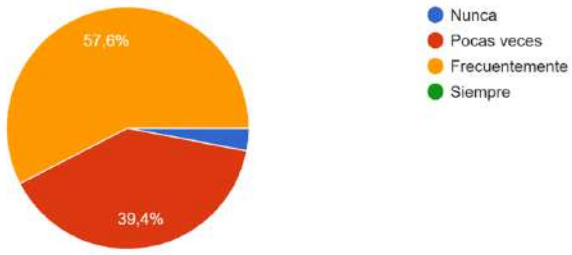


Figura 8: Distribución porcentual sobre como la excesiva cantidad de menús en una app dificulta su uso

Tabla 12: Distribución porcentual sobre cómo la excesiva cantidad de menús en una app dificulta su uso

Respuesta	**Frecuencia**	**Porcentaje**
Nunca	1	3.0 %
Pocas veces	14	42.4 %
Frecuentemente	18	54.5 %
Total	33	100 %

Análisis: Más de la mitad de los usuarios (54.5 %) reporta frustración frecuente ante la excesiva cantidad de pasos o menús en las aplicaciones. Este hallazgo refuerza contundentemente el análisis de la pregunta anterior. La experiencia de usuario debe regirse por el principio del minimalismo funcional; la interfaz principal (hub) del dojang virtual debe presentar únicamente las opciones esenciales para iniciar el entrenamiento, revisar el progreso y salir, mitigando la carga cognitiva y el abandono de la plataforma por confusión en la interfaz.

9. ¿Qué tan importante es para usted que la aplicación funcione sin interrupciones ni errores durante toda la sesión?

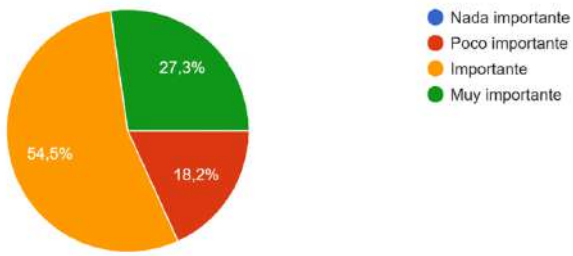


Figura 9: Distribución porcentual sobre la importancia de una app funcional durante su uso

Tabla 13: Distribución porcentual sobre la importancia de una app funcional durante su uso

Respuesta	Frecuencia	Porcentaje
Poco importante	3	9.1 %
Importante	20	60.6 %
Muy importante	10	30.3 %
Total	33	100 %

Análisis: El 90.9 % de los encuestados califica como importante o muy importante que la aplicación carezca de interrupciones o errores técnicos (“bugs”) durante su uso. Este requerimiento no funcional es de máxima prioridad. Para asegurar un rendimiento óptimo y mantener las altas tasas de fotogramas por segundo (FPS) exigidas por la realidad virtual, el modelado 3D del entorno debe estar rigurosamente optimizado, garantizando que la carga de procesamiento se concentre en el seguimiento de los movimientos y no en renderizados innecesarios que provoquen latencia o caídas del sistema.

10. ¿Qué tan útil le parecería entrenar técnicas de puño y técnicas de patada de forma separada dentro de la aplicación?

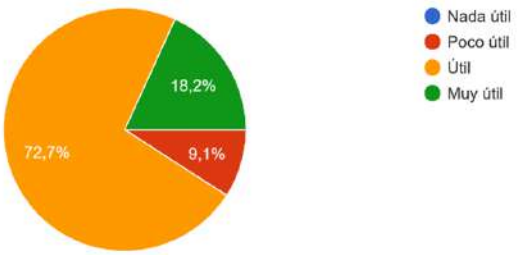


Figura 10: Distribución porcentual sobre el entrenamiento de técnicas por separado dentro de la aplicación

Tabla 14: Distribución porcentual sobre el entrenamiento de técnicas por separado dentro de la aplicación

Respuesta	Frecuencia	Porcentaje
Poco útil	2	6.1 %
Útil	24	72.7 %
Muy útil	7	21.2 %
Total	33	100 %

Análisis: El 93.9 % de la muestra encuentra útil la separación del entrenamiento entre técnicas de puño y patada. Este dato proporciona una directriz clara para el diseño de la arquitectura del software, validando un enfoque modular. Desde la perspectiva de la programación, desarrollar módulos independientes para miembros superiores e inferiores facilita la gestión de colisionadores (colliders), optimiza el uso de la memoria al cargar solo las rutinas necesarias y permite al usuario personalizar su sesión de estudio enfocándose en sus debilidades específicas.

11. ¿En qué medida considera que un simulador VR puede ser un complemento efectivo para el entrenamiento presencial en el dojang?

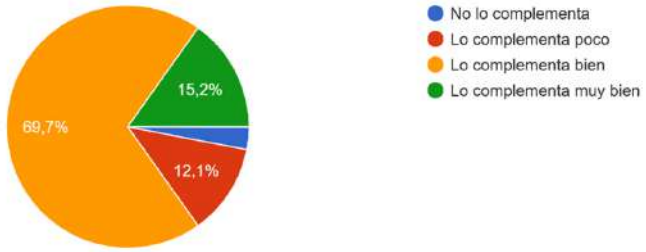


Figura 11: Distribución porcentual sobre la consideración en el entrenamiento de taekwondo en una app VR

Tabla 15: Distribución porcentual sobre la consideración en el entrenamiento de Taekwondo en una app VR

Respuesta	**Frecuencia**	**Porcentaje**
No lo complementa	1	3.0 %
Lo complementa poco	4	12.1 %
Lo complementa bien	23	69.7 %
Lo complementa muy bien	5	15.2 %
Total	33	100 %

Análisis: El 84.9 % de los participantes percibe que un simulador VR complementará bien o muy bien el trabajo físico presencial. Esta estadística es fundamental, ya que valida la premisa teórica de la tesis de que la tecnología actúa como un soporte pedagógico y no como un elemento disruptivo o un reemplazo del instructor. Confirma la aceptación del producto dentro de la comunidad de la academia, garantizando que existe un terreno fértil para su implementación como recurso extracurricular o de refuerzo técnico.

12. ¿Qué tanta confianza tiene en que la tecnología VR puede evaluar su técnica de forma precisa y objetiva?

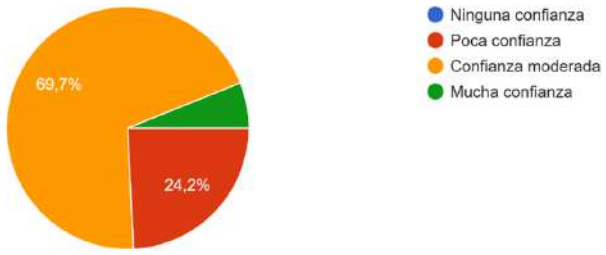


Figura 12: Distribución porcentual sobre la confianza en la tecnología VR para evaluaciones precisas dentro de la app

Tabla 16: Distribución porcentual sobre la confianza en la tecnología VR para evaluaciones precisas dentro de la app

Respuesta	**Frecuencia**	**Porcentaje**
Poca confianza	6	18.2 %
Confianza moderada	25	75.8 %
Mucha confianza	2	6.1 %
Total	33	100 %

Análisis: El 81.9 % de la población demuestra niveles de confianza moderada a alta en la objetividad evaluativa de la Realidad Virtual. Este alto índice de confianza impone una responsabilidad técnica significativa en el desarrollo; si el sistema emite falsos positivos (aprobar una mala técnica) o falsos negativos (marcar error en una técnica correcta), esa confianza se perderá rápidamente. Por ende, los márgenes de tolerancia de los ángulos y tiempos de respuesta en la programación del motor físico deben ser calibrados con extrema precisión junto a los instructores.

13. Si tuviera acceso a esta aplicación en su academia, ¿con qué frecuencia la utilizaría?

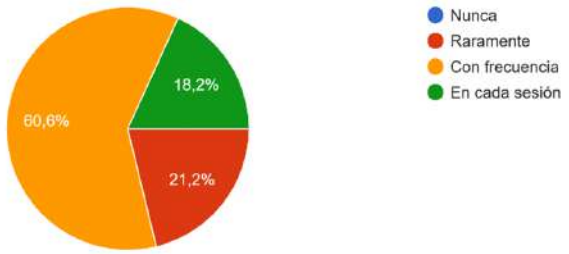


Figura 13: Distribución porcentual sobre la frecuencia de uso en establecimientos de entrenamiento

Tabla 17: Distribución porcentual sobre la frecuencia de uso en establecimientos de entrenamiento

Respuesta	**Frecuencia**	**Porcentaje**
Raramente	7	21.2 %
Con frecuencia	23	69.7 %
En cada sesión	3	9.1 %
Total	33	100 %

Análisis: La proyección de uso es sumamente alentadora, con un 78.8 % indicando que utilizarían la aplicación con frecuencia o en cada sesión si estuviera disponible en su academia. Esta alta intención de recurrencia demanda que la aplicación cuente con un sistema robusto de persistencia de datos y bases de datos. Si los usuarios van a interactuar continuamente, el sistema debe ser capaz de guardar historiales de rendimiento, puntajes y progreso a lo largo del tiempo, de modo que el estudiante perciba una evolución tangible en su entrenamiento.

14. ¿Recomendaría el uso de una aplicación VR de Taekwondo a sus compañeros o instructores?

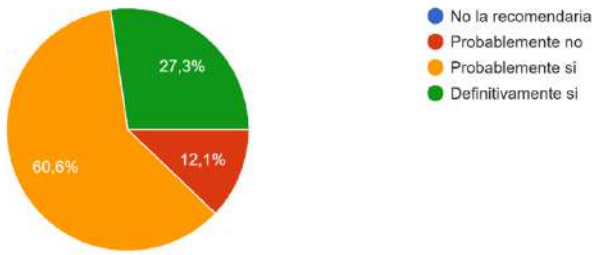


Figura 14: Distribución porcentual sobre la recomendación del uso de una app VR

Tabla 18: Distribución porcentual sobre la recomendación del uso de una app VR

Respuesta	**Frecuencia**	**Porcentaje**
Probablemente no	3	9.1 %
Probablemente sí	21	63.6 %
Definitivamente sí	9	27.3 %
Total	33	100 %

Análisis: El 90.9 % de los estudiantes encuestados estaría dispuesto a recomendar la herramienta tecnológica a otros compañeros. Este alto nivel de promotoría proyectada indica que el diseño de una solución VR aborda un problema sentido ('pain point') genuino dentro de la academia. A nivel de implementación de proyecto, asegura que una vez desplegada la versión funcional, la adopción de la aplicación podrá darse de manera orgánica, sustentada en la validación social entre los propios practicantes del dojang.

2.2.4 Procesamiento y analisis de datos

El análisis de las entrevistas realizadas a los expertos e instructores de Taekwondo permitió identificar que las técnicas fundamentales, como patadas y golpes básicos, constituyen la base principal para el desarrollo técnico del practicante.(Vease en Entrevistas) Los entrevistados coinciden en que una ejecución incorrecta durante etapas iniciales puede generar errores biomecánicos, problemas de postura y hábitos técnicos difíciles de corregir posteriormente, afectando el rendimiento y la estabilidad del estudiante durante la práctica.

Asimismo, las entrevistas evidencian la necesidad de incorporar herramientas tecnológicas que complementen el proceso tradicional de enseñanza. Los especialistas señalaron que tecnologías como realidad virtual y sistemas de seguimiento corporal pueden contribuir a la detección de errores relacionados con equilibrio, postura, coordinación y ejecución de movimientos, además de proporcionar retroalimentación que facilite el aprendizaje progresivo del estudiante.

Esta problemática se ve validada por la perspectiva del estudiante. Según la Pregunta 4 de la encuesta, el 82 % de la población considera fundamental que una aplicación identifique errores de forma automática. Existe, por tanto, una demanda explícita de objetividad técnica. Sin embargo, se detectó una barrera de entrada importante: el 61 %

de los estudiantes manifestó no sentirse cómodo utilizando nuevas aplicaciones sin una guía previa (Pregunta 3). Este hallazgo redirige el enfoque del desarrollo de la tesis no solo hacia la efectividad del tracking de movimiento, sino hacia la simplificación de la Experiencia de Usuario (UX) en el entorno virtual.

La correlación entre la Pregunta 5 (82 % de interés en feedback) y la Pregunta 6 (88 % de interés en modelos de referencia) establece el marco funcional de la aplicación: la solución debe proyectar un avatar experto que sirva de guía visual y al final obtener una retroalimentacion sobre la ejecucion realizada. Este enfoque modular, apoyado por el 94 % de los encuestados que prefieren entrenar puños y patadas por separado (Pregunta 10), permite una arquitectura de software escalable y eficiente.

En términos de viabilidad de implementación, el 85 % de los usuarios (Pregunta 11) visualiza la realidad virtual como un complemento directo al entrenamiento presencial, no como un reemplazo. Esto garantiza que la introducción del sistema en la academia no enfrentará resistencia pedagógica, sino que será adoptado como una herramienta de modernización. Finalmente, el alto porcentaje de intención de uso frecuente (79 % según Pregunta 13) asegura que el impacto de la tesis será longitudinal y no una simple novedad tecnológica.

En conclusión, el procesamiento de datos justifica el desarrollo de la aplicación VR como una solución necesaria para objetivizar la evaluación técnica, optimizar el tiempo de los instructores y empoderar al estudiante mediante la retroalimentación, cerrando la brecha entre la instrucción tradicional y la formación deportiva asistida por computador.

CAPÍTULO III

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Fundamentos Tecnicos de Taekwondo

Con base en la fundamentación teórica desarrollada previamente sobre los principios biomecánicos y técnicos del Taekwondo, se realizó un análisis orientado a identificar los aspectos técnicos necesarios para la implementación del sistema de realidad virtual. A partir del estudio de los movimientos y golpes fundamentales, se determinaron características relacionadas con el desplazamiento corporal, rotación de articulaciones, posición de extremidades, equilibrio dinámico y trayectorias de ejecución, elementos que intervienen directamente en la correcta práctica de las técnicas marciales.

Este análisis permitió establecer parámetros técnicos asociados a la interpretación y evaluación de movimientos dentro del entorno virtual, considerando variables como ángulos articulares, orientación corporal, posición espacial y sincronización motriz. Debido a ello, para llevar a cabo la captura e interpretación de dichos aspectos técnicos, resulta necesario el uso de herramientas tecnológicas como el Full Body Tracking o sistemas de seguimiento corporal, el cual permite obtener información relacionada con la postura, movimiento y ejecución técnica del practicante en tiempo real.

3.1.1 Movimientos

Al igual que lo anterior, con base en los fundamentos tecnicos y biomecanicos del taekwondo, se identificó que la ejecución de movimientos involucra distintos elementos relacionados como: el cálculo de ángulos, desplazamiento corporal, posición de las extremidades y coordinación entre las diferentes partes del cuerpo durante la ejecución de una técnica. Estos aspectos permiten trasladar el movimiento desde un enfoque teórico hacia un enfoque técnico y computacional, considerando variables necesarias para su interpretación dentro del entorno virtual.

Desde el área técnica, el movimiento puede representarse mediante puntos de referencia distribuidos en distintas partes del cuerpo, los cuales permiten identificar posiciones, rotaciones y trayectorias durante la ejecución de una técnica.

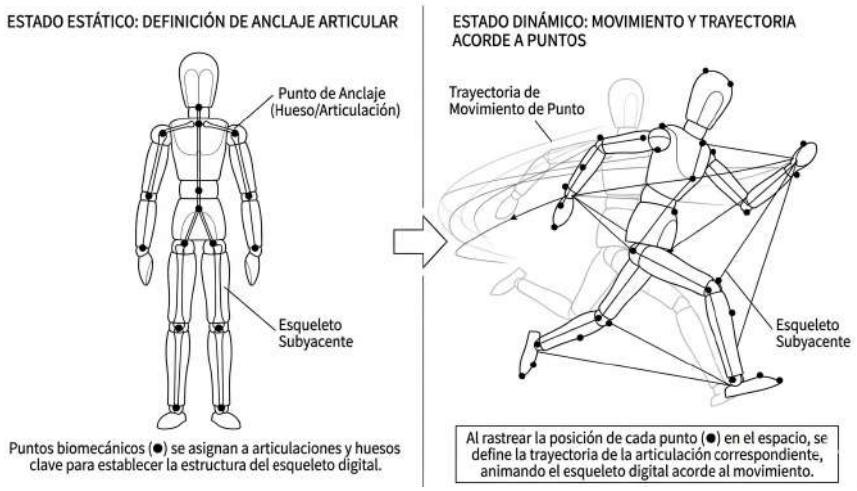


Figura 15: Representación del mapeo de puntos biomecánicos en estados estático y dinámico para la reconstrucción digital

Asi como se lo muestra en la Figura 15, a partir de estos puntos, el sistema puede interpretar información relacionada con el movimiento corporal y la interacción entre extremidades, facilitando la implementación de mecanismos de seguimiento corporal (Full Body Tracking) dentro de la aplicación de realidad virtual.

3.1.2 Golpes

Al igual que en el análisis de los movimientos, las técnicas de golpeo mantienen una relación directa con aspectos como la orientación corporal, desplazamiento de las extremidades, posición articular y coordinación motriz durante la ejecución de las técnicas ofensivas. Estos elementos influyen en la correcta realización de golpes y permiten interpretar técnicamente la ejecución realizada por el practicante.

Los golpes fundamentales considerados para el desarrollo del sistema se dividen en técnicas de puño y técnicas de patada.

1. **Técnicas de Puño**
    - Jirugi

Como se observa en la Figura 16, la técnica Jirugi consiste en un golpe de puño ejecutado mediante una extensión rápida del brazo hacia el frente. Durante su realización se mantiene estabilidad corporal, coordinación entre el desplazamiento y alineación del tronco para generar precisión en el impacto.

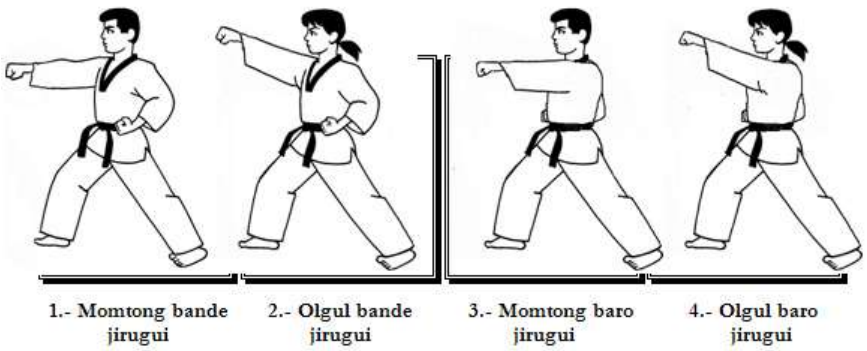


Figura 16: Técnica de puño Jirugi [19]

- Palkup Chigi

  La técnica Palkup Chigi, mostrada en la Figura 17, corresponde a un ataque realizado con el codo a corta distancia. Este movimiento requiere una rotación parcial del cuerpo y un control adecuado del equilibrio para incrementar la potencia durante la ejecución.



Figura 17: Tecnia de puño Palkup Chigi [20]

2. **Técnicas de Patada**

- Ap Chagi

  La Figura 18 presenta la técnica Ap Chagi, una patada frontal ejecutada mediante la elevación de la rodilla y la extensión de la pierna hacia adelante.



Figura 18: Técnica de patada Ap Chagi [21]

- Dollyo Chagi

  En la técnica Dollyo Chagi se realiza un movimiento circular de la pierna acompañado de rotación de cadera, como puede apreciarse en la Figura 19. La correcta coordinación corporal permite generar mayor potencia y alcance durante la patada.



Figura 19: Técnica de patada Dollyo Chagi [21]

- Yop Chagi

  Como se muestra en la Figura 20, la técnica Yop Chagi consiste en una patada lateral ejecutada mediante la extensión de la pierna de forma horizontal. Durante su desarrollo intervienen la estabilidad del cuerpo y el control del equilibrio para mantener precisión en el ataque.



Figura 20: Técnica de patada Yop Chagi [21]

- Naeryo Chagi

  La técnica Naeryo Chagi, ilustrada en la Figura 21, corresponde a una patada descendente donde la pierna se eleva y posteriormente desciende de manera controlada hacia el objetivo. Este movimiento requiere flexibilidad y coordinación motriz para su correcta ejecución.

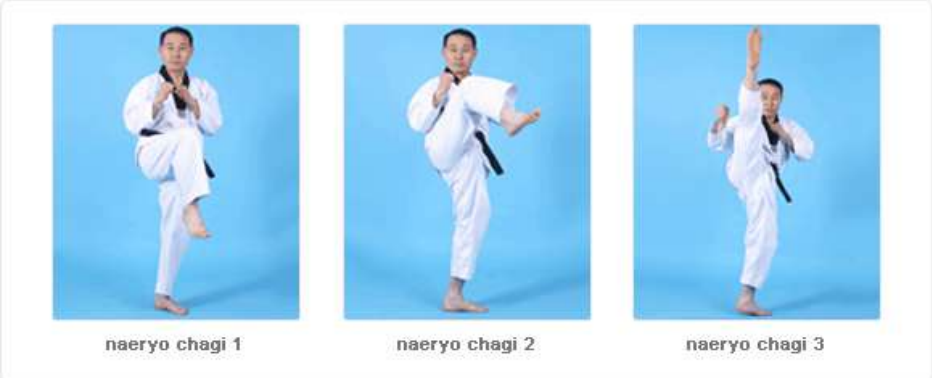


Figura 21: Técnica de patada Naeryo Chagi [21]

- Bandal Chagi

  En la Figura 22 se observa la técnica Bandal Chagi, caracterizada por una trayectoria semicircular de la pierna orientada hacia la zona media del oponente. La ejecución adecuada de esta técnica depende de la coordinación entre la rotación corporal y el impulso de la pierna.



Figura 22: Técnica de patada Bandal Chagi [22]

- Mireo Chagi

  La Figura 23 muestra la técnica Mireo Chagi, una patada de empuje realizada mediante la extensión frontal de la pierna. Esta técnica enfatiza el desplazamiento de fuerza hacia adelante y el mantenimiento de estabilidad corporal durante el contacto.



Figura 23: Técnica de patada Mireo Chagi [21]

3.2 Especificación de Requisitos de Software

La definición de los requisitos del sistema se obtuvo mediante el análisis de tres fuentes principales: encuestas, entrevistas a actores clave y el modelado del proceso de enseñanza aplicado dentro de la academia de Taekwondo.

Las encuestas y entrevistas permitieron identificar las necesidades de los usuarios y las restricciones técnicas del entorno. De manera complementaria, el análisis del proceso convencional de enseñanza y ejecución de técnicas, representado en la Figura 24, permitió identificar actividades, interacciones y mecanismos de retroalimentación presentes durante las sesiones de entrenamiento, facilitando así la determinación de las funcionalidades que la aplicación debía incorporar.

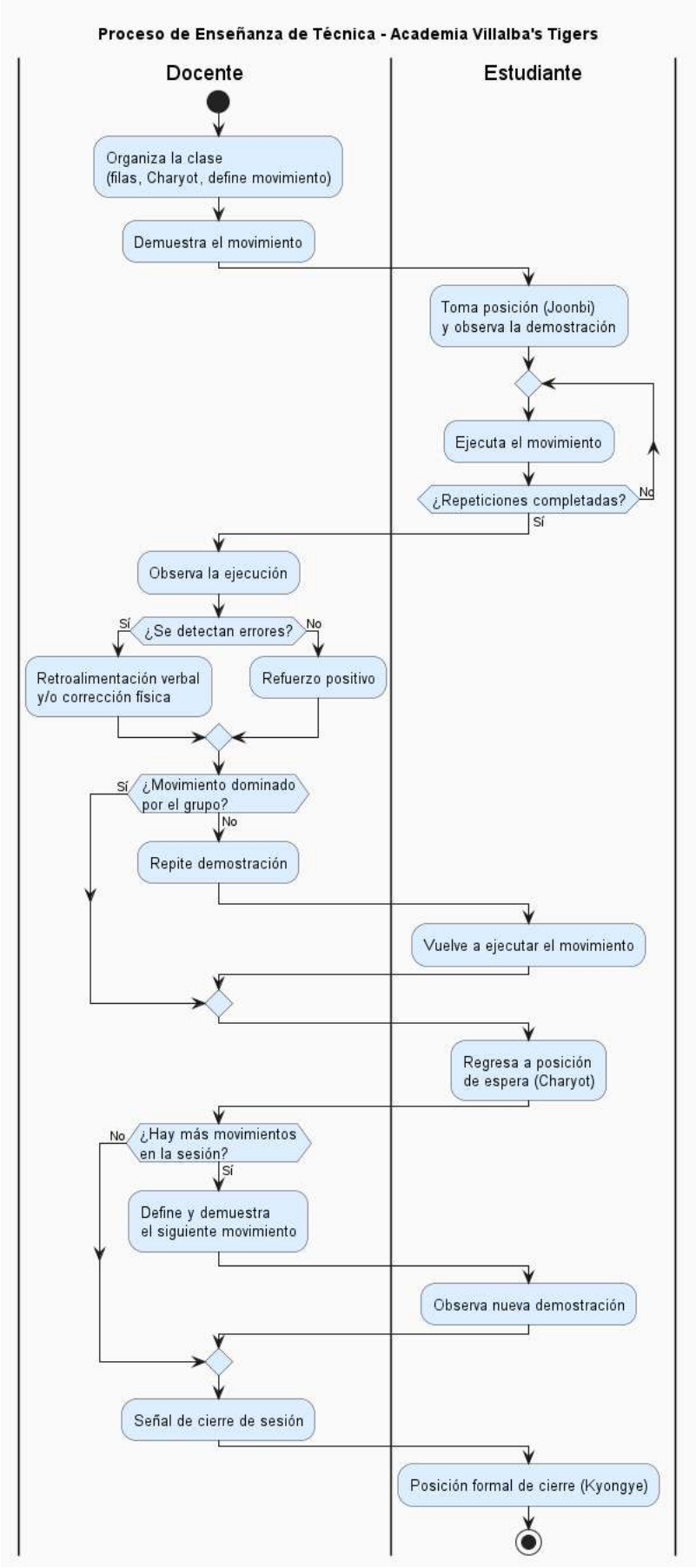


Figura 24: Diagrama de proceso del flujo de enseñanza-aprendizaje

Con base en el levantamiento de información realizado, se establecen los siguientes requisitos funcionales y no funcionales del sistema.

3.2.1 Requisitos Funcionales

Tabla 19: Requisitos funcionales del sistema

ID	Descripción	Actor Principal	Prioridad
RF-01	El sistema debe permitir al usuario registrarse con nombre, correo electrónico y contraseña.	Usuario no registrado	Alta
RF-02	El sistema debe validar que el correo electrónico no esté ya registrado al momento del registro.	Usuario no registrado	Alta
RF-03	El sistema debe permitir al usuario iniciar sesión con su correo electrónico y contraseña.	Usuario registrado	Alta
RF-04	El sistema debe permitir al usuario cerrar sesión desde cualquier pantalla del menú principal.	Usuario autenticado	Media
RF-05	El sistema debe mostrar al usuario un avatar o modelo 3D ejecutando correctamente el movimiento de Taekwondo seleccionado antes de que el usuario lo intente.	Usuario autenticado	Alta
RF-06	El sistema debe capturar en tiempo real los movimientos corporales del usuario mediante los dispositivos de seguimiento del headset VR y los trackers HTC Vive 3.0.	Usuario autenticado	Alta
RF-07	El sistema debe comparar los movimientos del usuario con el patrón de referencia correcto del movimiento de Taekwondo.	Sistema	Alta
RF-08	El sistema debe proporcionar retroalimentación sobre la ejecución del movimiento.	Sistema	Alta
RF-09	El sistema debe mostrar métricas acorde a la precisión de cada movimiento ejecutado basado en la comparación con el patrón de referencia.	Sistema	Alta
RF-10	El sistema debe organizar los movimientos de Taekwondo en las categorías de puño y patada.	Sistema	Media

ID	Descripción	Actor Principal	Prioridad
RF-11	El sistema debe permitir al usuario salir del nivel actual en cualquier momento y regresar al menú principal.	Usuario autenticado	Alta
RF-12	El sistema debe mostrar al usuario un historial de su desempeño por sesión.	Usuario autenticado	Alta
RF-13	El sistema debe permitir al usuario cerrar la aplicación VR desde el menú principal.	Usuario autenticado	Alta
RF-14	El sistema debe sincronizar los datos de progreso con el backend al iniciar y cerrar sesión.	Sistema	Alta
RF-15	El sistema debe mantener la sesión del usuario activa durante toda la duración del entrenamiento sin requerir re-autenticación.	Sistema	Media

3.2.2 Requisitos No Funcionales

Tabla 20: Requisitos no funcionales del sistema

ID	Nombre	Descripción técnica adaptada
RNF-01	Seguridad de contraseñas	Las contraseñas almacenadas deben aplicar hashing con bcrypt. No se almacenará texto plano en ninguna capa.
RNF-02	Validez del token de sesión	El token JWT debe tener expiración máxima de 8 horas e invalidarse al cerrar sesión.
RNF-03	Latencia de retroalimentación	El tiempo entre el movimiento del usuario y la retroalimentación visual no debe exceder los 200 ms en condiciones normales de hardware objetivo.

ID	Nombre	Descripción técnica adaptada
RNF-04	Funcionalidad del seguimiento corporal	El sistema debe distinguir correctamente entre movimientos distintos, por ejemplo, puño vs. patada. No se requiere medición angular exacta.
RNF-05	Tiempo de carga del entorno VR	El entorno virtual debe cargarse antes de iniciar el entrenamiento, mostrando indicador de progreso si supera los 8 segundos.
RNF-06	Tiempo de respuesta del historial	La consulta y visualización del historial debe completarse en un tiempo razonable sin bloquear la interfaz.
RNF-07	Compatibilidad de hardware	La aplicación debe funcionar con el headset VR seleccionado sin requerir instalación de drivers adicionales.

3.2.3 Casos de Uso e Historias de Usuario

a) Casos de Uso

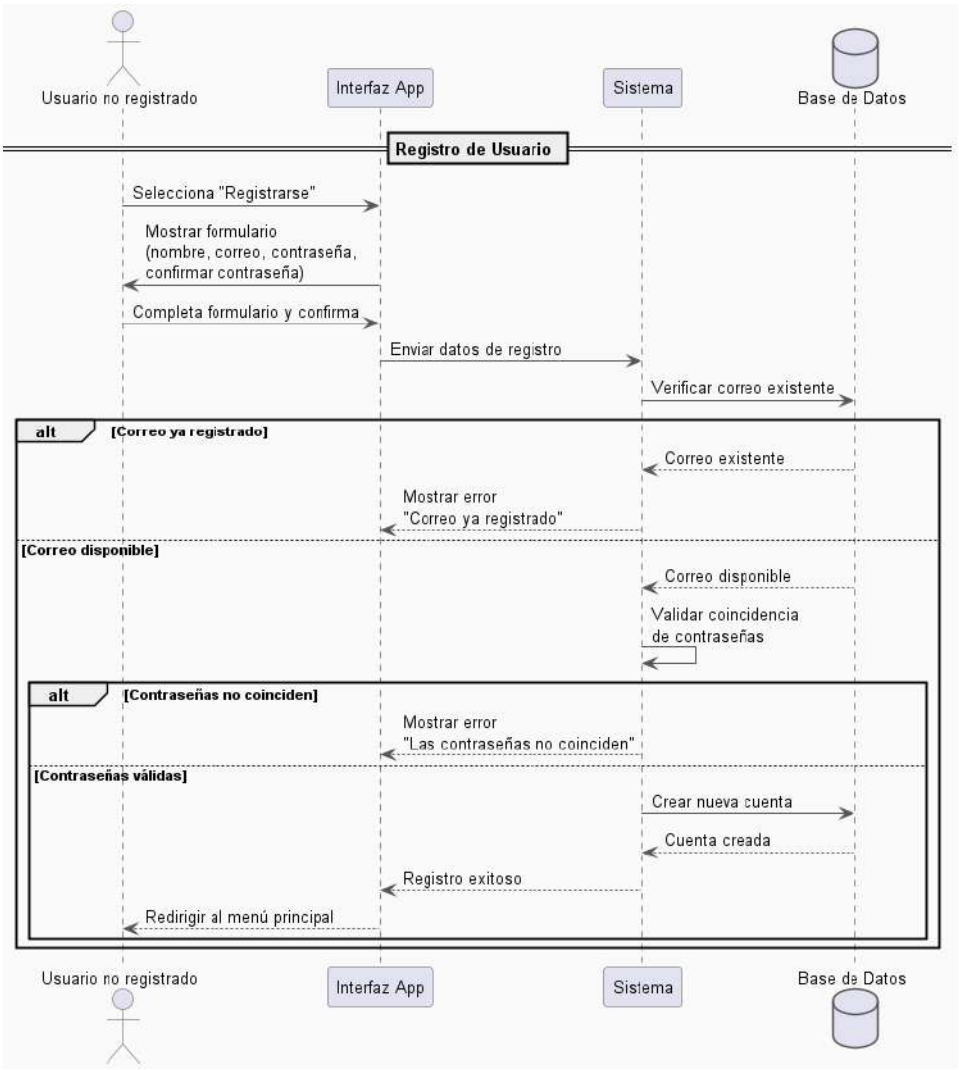


Figura 25: CU-01: Registrarse

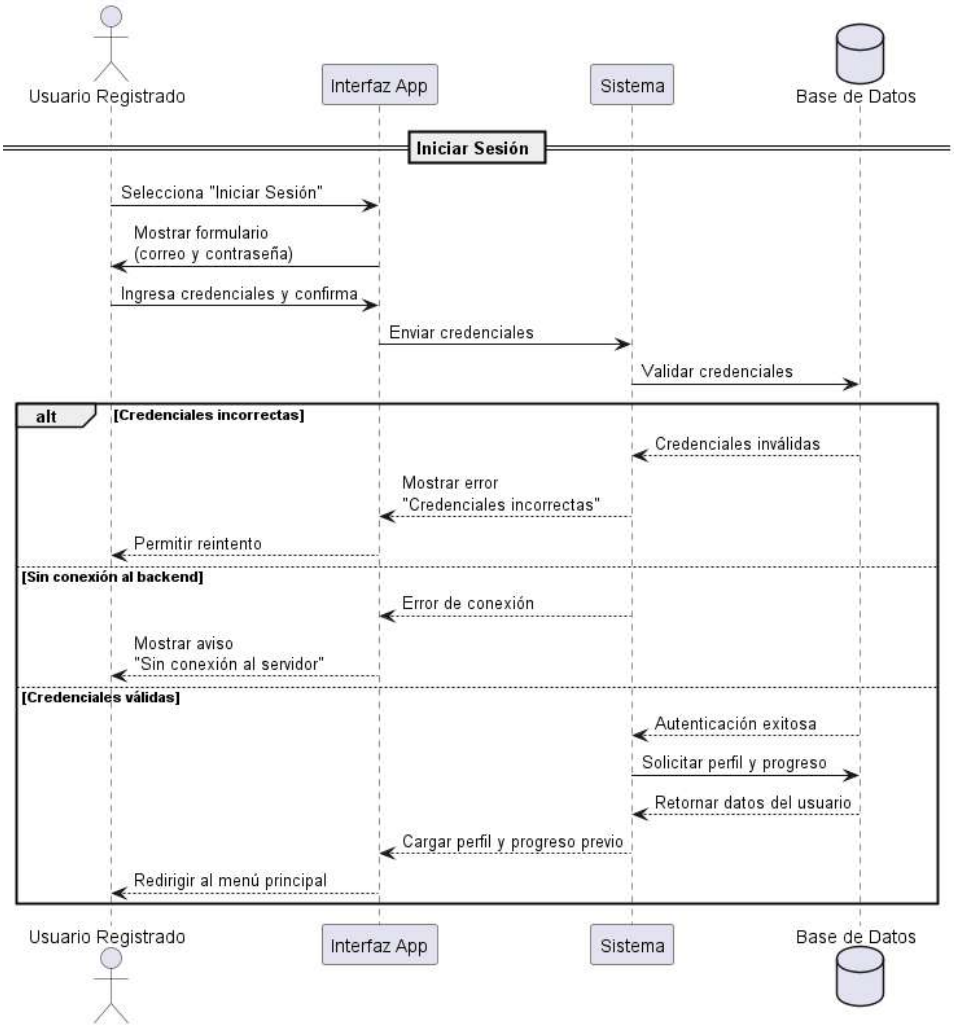


Figura 26: CU-02: Iniciar Sesión

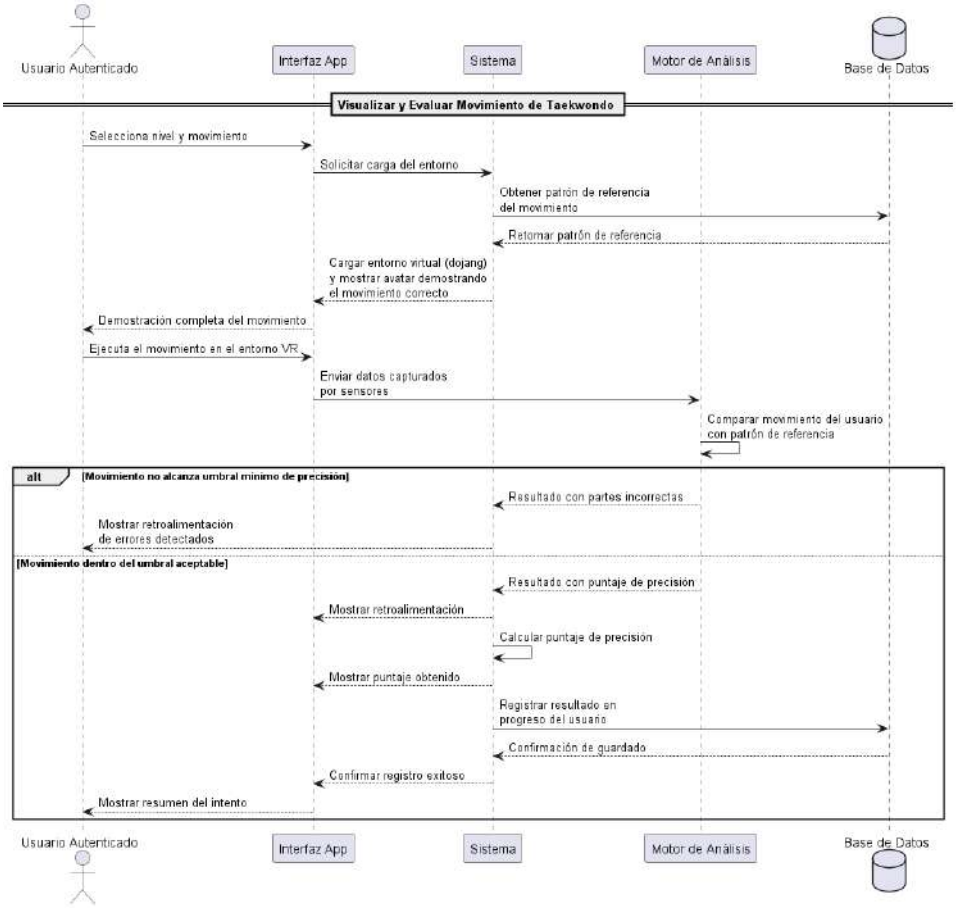


Figura 27: CU-03: Visualización del movimiento

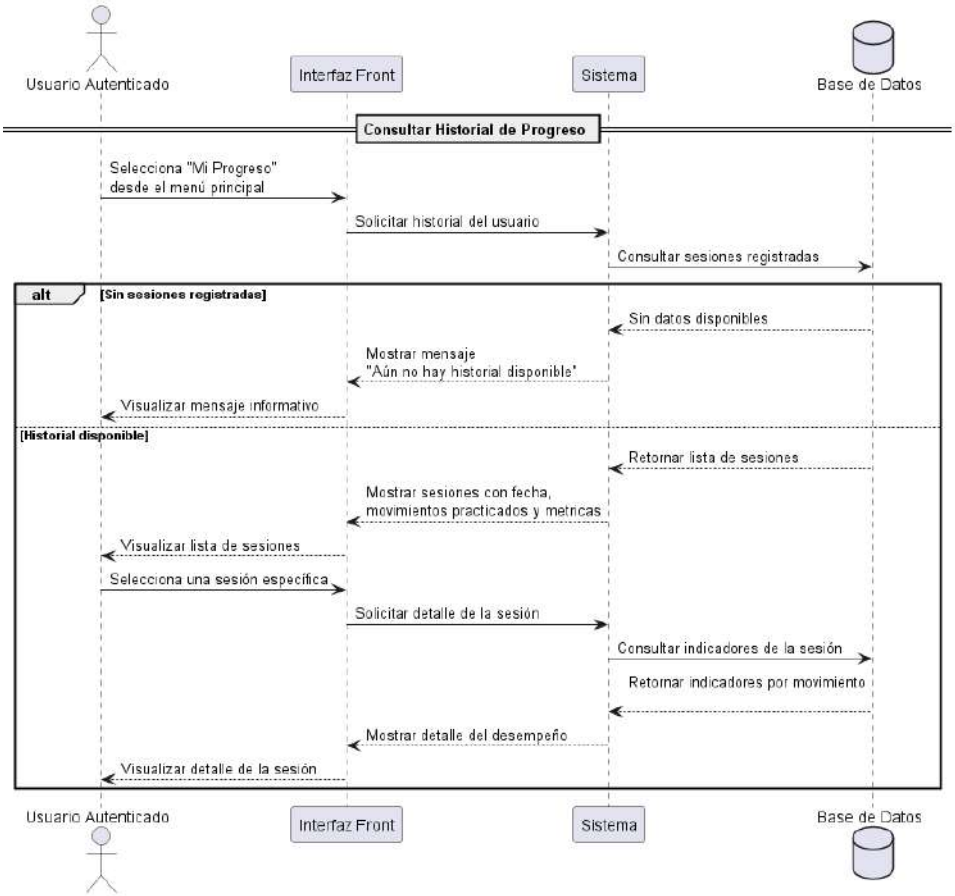


Figura 28: CU-04: Consultar Historial

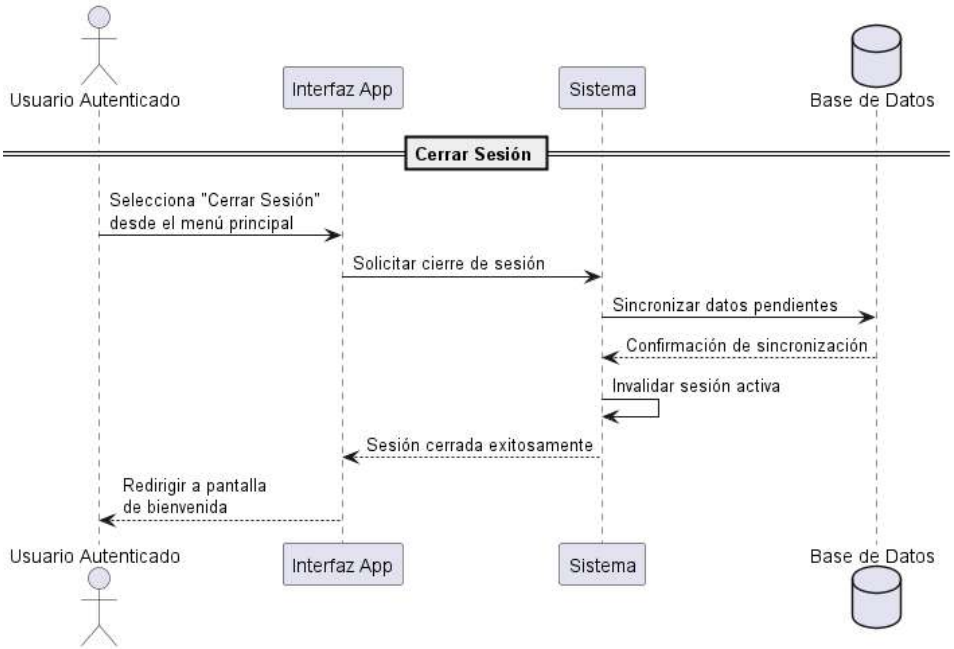


Figura 29: CU-05: Cerrar Sesión

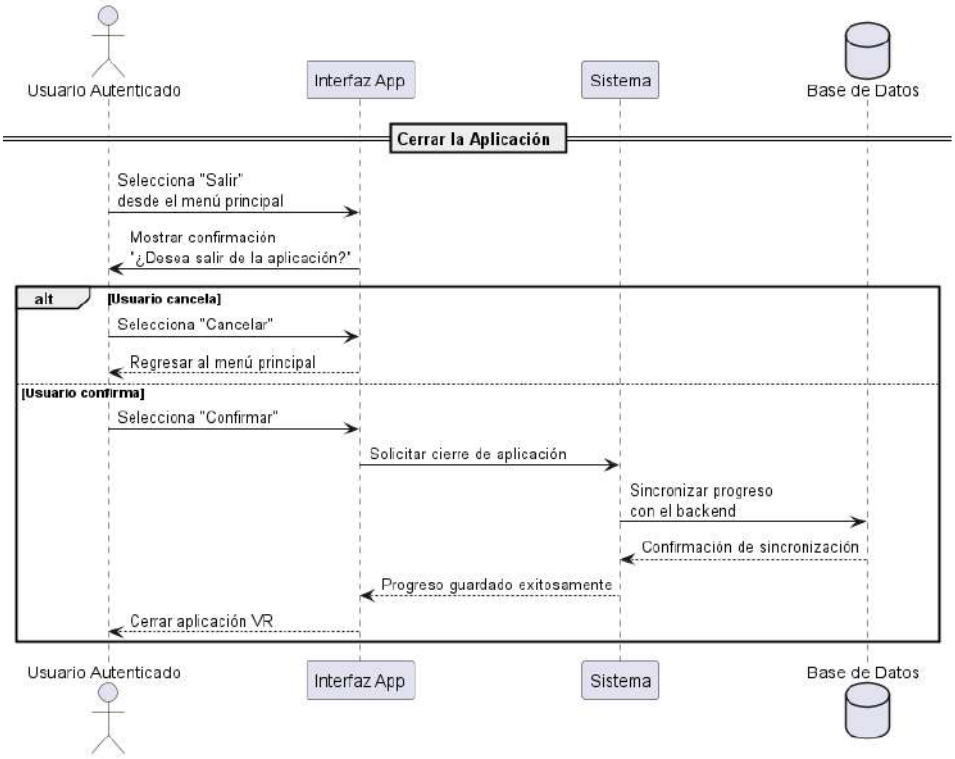


Figura 30: CU-06: Cerrar Aplicación

b) Historias de Usuario

Tabla 21: US-01: Crear cuenta de usuario

Campo	Descripción
ID	US-01
Perfil de Usuario	Usuario no registrado
Quiero…	Poder crear una cuenta ingresando mi nombre, correo y contraseña.
Para…	Acceder al sistema de entrenamiento VR con mi perfil personal y llevar un historial propio.
Criterio de Aceptación	El formulario valida que el correo no esté duplicado y que las contraseñas coincidan (muestra error si no es así). Al registrarse con éxito, redirige al menú principal.
RF Asociado	RF-01, RF-02
Prioridad	Alta

Tabla 22: US-02: Iniciar sesión

Campo	Descripción
ID	US-02
Perfil de Usuario	Usuario registrado
Quiero…	Iniciar sesión con mi correo y contraseña.
Para…	Retomar mi entrenamiento sin perder el progreso previo y acceder a todas las funcionalidades.
Criterio de Aceptación	Credenciales incorrectas muestran un mensaje de error. Credenciales válidas inician la sesión y cargan el menú principal de forma fluida.
RF Asociado	RF-03, RF-14
Prioridad	Alta

Tabla 23: US-03: Cerrar sesión

Campo	Descripción
ID	US-03
Perfil de Usuario	Usuario autenticado
Quiero…	Cerrar mi sesión desde el menú principal.
Para…	Proteger mi cuenta cuando comparto el dispositivo VR con otros practicantes.
Criterio de Aceptación	El botón es visible en el menú principal. Al pulsarlo, el sistema me redirige inmediatamente a la pantalla de inicio de sesión.
RF Asociado	RF-04, RF-14
Prioridad	Media

Tabla 24: US-04: Visualizar avatar guía

Campo	Descripción
ID	US-04
Perfil de Usuario	Usuario autenticado
Quiero…	Ver un avatar 3D ejecutando el movimiento de Taekwondo de manera correcta al iniciar el ejercicio.
Para…	Comprender la postura y secuencia exacta del movimiento visualmente antes de ejecutarlo yo mismo.
Criterio de Aceptación	Al presionar "Comenzar", el avatar guía aparece en el entorno virtual y ejecuta la animación completa de la técnica seleccionada una vez, tras lo cual el sistema queda listo para capturar el movimiento del usuario.
RF Asociado	RF-05
Prioridad	Alta

Tabla 25: US-05: Captura de movimientos corporales en tiempo real

Campo	Descripción
ID	US-05
Perfil de Usuario	Usuario autenticado
Quiero…	Que el sistema capture mis movimientos corporales en tiempo real a través del headset VR, los controladores y los trackers FBT.
Para…	Que el sistema pueda evaluar mi técnica de forma completa utilizando el equipamiento de rastreo configurado.
Criterio de Aceptación	El sistema reconoce y vincula correctamente el movimiento del headset, los dos controladores y los trackers FBT, reflejando la postura del usuario de manera fluida dentro del entorno virtual.
RF Asociado	RF-06
Prioridad	Alta

Tabla 26: US-06: Retroalimentación sobre la ejecución del movimiento

Campo	Descripción
ID	US-06
Perfil de Usuario	Usuario autenticado
Quiero…	Recibir una retroalimentación al finalizar mi ejecución que me indique en qué me equivoqué y qué precisión tuve.
Para…	Entender con claridad qué aspectos de mi técnica debo corregir en la siguiente repetición.
Criterio de Aceptación	Al concluir el movimiento, el sistema muestra un resumen textual con los errores detectados en la ejecución y el porcentaje de precisión alcanzado respecto al patrón de referencia.
RF Asociado	RF-07, RF-08, RF-09
Prioridad	Alta

Tabla 27: US-07: Puntaje al finalizar movimiento

Campo	Descripción
ID	US-07
Perfil de Usuario	Usuario autenticado
Quiero…	Ver mi puntaje al finalizar cada movimiento ejecutado.
Para…	Saber con un número concreto qué tan cercana estuvo mi ejecución al patrón ideal y motivarme a mejorar.
Criterio de Aceptación	Al terminar la secuencia del movimiento, el sistema calcula la precisión y despliega en la interfaz un puntaje numérico en el rango de 0 a 100.
RF Asociado	RF-09
Prioridad	Alta

Tabla 28: US-08: Movimientos organizados por categoría

Campo	Descripción
ID	US-08
Perfil de Usuario	Usuario autenticado
Quiero…	Acceder a los movimientos organizados por categoría de patada y puño.
Para…	Progresar de forma ordenada, comenzando por técnicas básicas antes de abordar las avanzadas.
Criterio de Aceptación	El menú principal divide los movimientos en las categorías de puño y patada, permitiendo al usuario seleccionar y practicar cualquier técnica disponible dentro de cada categoría.
RF Asociado	RF-10
Prioridad	Media

Tabla 29: US-09: Historial de sesiones

Campo	Descripción
ID	US-09
Perfil de Usuario	Usuario autenticado
Quiero…	Consultar mi historial de sesiones anteriores con puntajes y movimientos practicados.
Para…	Evaluar mi evolución a lo largo del tiempo y decidir qué técnicas necesito reforzar.
Criterio de Aceptación	La sección “Mi Progreso” despliega una lista ordenada por fecha que detalla de forma clara el día, los movimientos entrenados y la puntuación obtenida en cada uno.
RF Asociado	RF-12
Prioridad	Alta

Tabla 30: US-10: Cerrar aplicación VR

Campo	Descripción
ID	US-10
Perfil de Usuario	Usuario autenticado
Quiero…	Poder cerrar la aplicación VR desde el menú principal con una confirmación previa.
Para…	Evitar cierres accidentales y asegurarme de que el progreso quede sincronizado antes de salir.
Criterio de Aceptación	El botón “Salir” muestra un cuadro de diálogo de confirmación. Al confirmar, el sistema cierra la aplicación por completo. Al cancelar, el diálogo se cierra y mantiene al usuario en el menú.
RF Asociado	RF-13, RF-14
Prioridad	Alta

3.3 Selección de la Metodología

Para garantizar la eficiencia operativa y la calidad técnica del producto final, es imperativo seleccionar un marco de trabajo que se alinee con la naturaleza dinámica de la Realidad Virtual (RV). La presente sección emplea la Matriz de Selección de Simon para evaluar tres enfoques metodológicos: Modelo en V, Prototipado Evolutivo y Desarrollo Iterativo e Incremental (IID). Este análisis permite fundamentar la elección técnica basándose en la cuantificación de capacidades críticas para el proyecto.

3.3.1 Criterios de Evaluación

A continuación, se definen los criterios técnicos y operativos seleccionados para el análisis, fundamentados en estándares de ingeniería de software:

- Adaptabilidad al Cambio (Peso: 15 %): Capacidad del marco de trabajo para integrar modificaciones en los requisitos sin comprometer la integridad del proyecto. En entornos de RV, la flexibilidad es vital ante hallazgos imprevistos durante la fase de despliegue [23].
- Enfoque en la Experiencia de Usuario (UX) (Peso: 15 %): Priorización de la interacción humano-computadora. Dado que la RV depende de la presencia e inmersión, la metodología debe permitir pruebas de usabilidad constantes [24].
- Gestión de Riesgos (Peso: 20 %): Capacidad para identificar, analizar y mitigar fallos técnicos o de diseño en etapas tempranas. Un enfoque proactivo reduce el costo de corrección en arquitecturas complejas [25].
- Escalabilidad (Peso: 15 %): Aptitud del sistema para crecer en funciones o volumen de datos sin degradar su rendimiento o requerir una reestructuración total de la base de código [26].
- Compatibilidad con Flujos de Trabajo VR (Peso: 25 %): Grado de sincronización entre la metodología y los ciclos de renderizado e iteración rápida propios de motores graficos. [27].
- Documentación y Colaboración (Peso: 10 %): Equilibrio entre el registro formal de procesos y la comunicación fluida entre equipos multidisciplinarios (diseñadores 3D y programadores) [23].

3.3.2 Matriz de Selección de Simon

La evaluación se fundamenta en una escala ordinal de cinco niveles, diseñada para medir el grado de cumplimiento de cada criterio analizado. La interpretación de la escala se establece de la siguiente manera:

- **1. Deficiente:** El criterio no cumple con los requerimientos establecidos.
- **2. Limitado:** El criterio presenta un cumplimiento parcial, asociado a un alto nivel de riesgo o restricciones significativas.
- **3. Satisfactorio:** El criterio cumple adecuadamente con los estándares mínimos requeridos.

- **4. Sobresaliente:** El criterio supera las expectativas básicas y aporta valor agregado al proceso o sistema evaluado.
- **5. Óptimo:** El criterio evidencia un nivel de excelencia técnica y desempeño superior en el área evaluada.

Tabla 31: Matriz de selección de metodologías

Criterio de Selección	**Peso**	**Modelo en V**	**Proto. Evo.**	**Desarrollo IID**	**Modelo V (Pond.)**	**Prototipado (Pond.)**	**IID (Pond.)**
Adaptabilidad al cambio	0.15	1	4	5	0.15	0.60	0.75
Enfoque en UX	0.15	1	5	4	0.15	0.75	0.60
Gestión de riesgos	0.20	2	3	5	0.40	0.60	1.00
Escalabilidad del desarrollo	0.15	2	2	5	0.30	0.30	0.75
Compatibilidad con flujos VR	0.25	1	4	5	0.25	1.00	1.25
Documentación y colaboración	0.10	4	2	4	0.40	0.20	0.40
Total Ponderado	**1.00**				**1.65**	**3.45**	**4.75**

3.3.3 Justificación de la selección

De acuerdo con los resultados obtenidos en la matriz de ponderación, se identifica que la metodología Desarrollo Iterativo e Incremental (IID) obtiene la mayor puntuación, lo que indica que es la más adecuada para el desarrollo del presente proyecto. Esta selección se sustenta en que el IID logra el equilibrio óptimo entre la estructuración de requisitos y la flexibilidad técnica que exige la Realidad Virtual. Mientras que el Modelo en V presenta una puntuación baja debido a su rigidez secuencial, la cual resulta incompatible con la necesidad de ajustes tempranos en la experiencia inmersiva, el Prototipado Evolutivo, aunque fuerte en exploración visual, muestra debilidades críticas en escalabilidad y gestión de riesgos arquitectónicos. Por el contrario, el IID maximiza la compatibilidad con los flujos de trabajo de motores gráficos y permite una mitigación proactiva de riesgos técnicos en cada fase de construcción, asegurando así un desarrollo robusto y adaptable sin sacrificar la trazabilidad de los requerimientos iniciales.

3.4 Seleccion del Stack Tecnológico

La selección de herramientas tecnológicas en proyectos de realidad virtual (VR) es crítica, ya que condiciona tanto el rendimiento técnico como la dinámica del equipo.

Debido a exigencias específicas como el renderizado en tiempo real y la compatibilidad con visores inmersivos, esta sección emplea la Matriz de Selección de Simon para evaluar las alternativas en cada categoría técnica. Para garantizar la objetividad, cada herramienta se califica en una escala del 1 al 5: el valor 1 representa una opción inviable; 2, deficiencias significativas; 3, un desempeño aceptable con riesgos moderados; 4, una adaptación satisfactoria; y 5, la solución óptima frente a los requerimientos de VR. Este enfoque estructurado permite fundamentar la elección final bajo criterios técnicos medibles.

3.4.1 Motor Gráfico

Para la selección del motor gráfico, se evaluaron a: Unreal Engine, Unity y Godot mediante los criterios definidos a continuación, utilizando la matriz de Simon para su ponderación.

a) Criterios

- Compatibilidad y Soporte VR (Peso: 20 %): Grado de integración del motor con el estándar OpenXR para garantizar la interoperabilidad con diversos visores y controladores. Una compatibilidad nativa reduce la complejidad en la capa de abstracción del hardware [28].
- Calidad de Renderizado Gráfico (Peso: 15 %): Capacidad de procesar algoritmos avanzados de iluminación y sombreado (PBR). En RV, la fidelidad visual es determinante para alcanzar el umbral de "presencia" del usuario en el entorno digital [29].
- Herramientas de Optimización (Peso: 15 %): Disponibilidad de utilitarios para el análisis de rendimiento (profiling) y gestión de recursos (LOD, Occlusion Culling). Son críticas para mantener la carga computacional dentro de los límites del hardware [30].
- Flexibilidad de Programación (Peso: 15 %): Versatilidad de los lenguajes de scripting y acceso a la API del motor. Permite a los desarrolladores implementar lógicas de interacción complejas y personalizadas esenciales en simulaciones técnicas [30].
- Rendimiento en Tiempo Real (Peso: 25 %): Estabilidad del framerate (90 FPS) y minimización de la latencia "motion-to-photon". Es el criterio de

mayor peso, pues un rendimiento inconsistente provoca cinetosis y rompe la inmersión [31].

- Licenciamiento y Accesibilidad (Peso: 10 %): Términos legales y costos asociados al uso del software. Evalúa la soberanía sobre el código fuente y la viabilidad económica del proyecto a largo plazo bajo modelos comerciales o de código abierto [32].

b) Matriz de selección

Tabla 32: Matriz de selección del motor gráfico

Criterio de Selección	**Peso**	**Unreal Engine**	**Unity**	**Godot**	**UE (Pond.)**	**Unity (Pond.)**	**Godot (Pond.)**
Compatibilidad VR	0.20	5	4	3	1.00	0.80	0.60
Calidad de Renderizado	0.15	5	4	3	0.75	0.60	0.45
Herramientas Optimización	0.15	5	4	2	0.75	0.60	0.30
Flexibilidad Programación	0.15	5	4	4	0.75	0.60	0.60
Rendimiento Real-Time	0.25	4	5	4	1.00	1.25	1.00
Licenciamiento	0.10	4	3	5	0.40	0.30	0.50
Total	**1.00**				**4.65**	**4.15**	**3.45**

c) Justificación

La evaluación realizada permitió identificar a Unreal Engine como la opción más adecuada para el desarrollo del entorno virtual, debido a que obtuvo la mayor valoración ponderada dentro de la matriz de selección (4.65). Su desempeño sobresale en aspectos fundamentales como la compatibilidad con tecnologías VR, la calidad de renderizado y las herramientas de optimización, elementos necesarios para mantener una experiencia inmersiva estable, fluida y visualmente realista. Además, sus capacidades de programación brindan mayor flexibilidad para implementar funcionalidades e interacciones complejas dentro del sistema.

Si bien Unity presentó resultados competitivos, especialmente en rendimiento en tiempo real, Unreal Engine ofrece un conjunto de herramientas más robusto para escenarios que demandan alta fidelidad gráfica y procesamiento avanzado. En contraste, Godot representa una alternativa accesible y flexible en términos de licenciamiento, aunque sus limitaciones técnicas en compatibilidad VR y optimización reducen su adecuación frente a los requerimientos definidos para la investigación.

3.4.2 Tecnologías de Seguimiento de Movimiento (FBT)

Se evaluo a: HTC Vive 3.0, Tundra y SlimeVR para la seleccion de la Tecnologia de Seguimiento de Movimiento mediante los criterios definidos a continuación, utilizando la matriz de Simon para su ponderación

a) Criterios

- Precisión Posicional (6DoF) (Peso: 25 %): Se refiere a la capacidad de un sistema para determinar con exactitud la ubicación y orientación de un objeto en el espacio tridimensional. Este criterio evalúa el error estático y dinámico, donde una desviación sub-milimétrica es fundamental para asegurar la congruencia entre el movimiento real y el virtual, evitando discrepancias perceptuales [33].
- Compatibilidad VR / SDK (Peso: 15 %): Consiste en la capacidad de integración técnica entre el hardware de seguimiento y las interfaces de programación de aplicaciones (API) estándar de la industria. Implica la existencia de controladores y librerías que permitan una comunicación fluida con motores gráficos y entornos de ejecución, garantizando la interoperabilidad sin capas de traducción que degraden el rendimiento [34].
- Latencia de Respuesta (Peso: 20 %): Define el retardo temporal existente desde que se detecta un movimiento físico hasta que este se procesa y se refleja en el entorno digital. Valores de latencia extremadamente bajos son imperativos para mantener el determinismo del sistema y prevenir la desincronización sensorial, la cual es la causa principal de la cinetosis inducida por tecnología inmersiva [35].
- Área de Cobertura y Estabilidad (Peso: 20 %): Representa el volumen físico delimitado en el cual los sensores pueden mantener el rastreo sin pérdida de señal. La estabilidad implica la resistencia al fenómeno de "deriva" (drift), asegurando que el sistema de coordenadas mantenga su punto de origen fijo durante periodos prolongados de operación continua [36].
- Durabilidad Física (Peso: 10 %): Evalúa la integridad estructural y la calidad de construcción de los componentes del hardware. Se centra en la capacidad de los dispositivos para soportar el estrés mecánico, aceleraciones bruscas e impactos derivados del uso intensivo en entornos de pruebas, asegurando una vida útil prolongada de los transductores y carcasas [37].

- Costo y Escalabilidad (Peso: 10 %): Analiza la relación entre la inversión económica inicial y la viabilidad de expandir el sistema mediante la adición de múltiples puntos de seguimiento. Un sistema escalable permite incrementar la complejidad de la captura de movimiento sin que el costo marginal o la carga computacional crezcan de forma desproporcionada [38].

b) Matriz de selección

Tabla 33: Matriz de selección de tecnología de seguimiento de movimiento

Criterio de Selección	**Peso**	**HTC Vive 3.0**	**Tundra**	**SlimeVR**	**HTC Vive 3.0 (Pond.)**	**Tundra (Pond.)**	**SlimeVR (Pond.)**
Precisión Posicional	0.25	5	5	2	1.25	1.25	0.50
Compatibilidad SDK	0.15	5	4	3	0.75	0.60	0.45
Latencia	0.20	5	5	2	1.00	1.00	0.40
Estabilidad Espacial	0.20	5	5	1	1.00	1.00	0.20
Resistencia Física	0.10	5	4	3	0.50	0.40	0.30
Facilidad Escalamiento	0.10	2	3	5	0.20	0.30	0.50
TOTAL	**1.00**	**27**	**26**	**16**	**4.70**	**4.55**	**2.35**

c) Justificación

Con base en los resultados obtenidos en la matriz de selección, se determinó que HTC Vive 3.0 es la alternativa más adecuada para el sistema de seguimiento de movimiento, al alcanzar la mayor puntuación ponderada (4.70). Su desempeño sobresale en criterios críticos como precisión posicional, baja latencia y estabilidad espacial, factores esenciales para garantizar una experiencia de realidad virtual precisa, fluida y consistente. Además, su alta compatibilidad con SDK y motores gráficos facilita la integración con las herramientas de desarrollo utilizadas en el proyecto.

Aunque tecnologías como Tundra presentan un rendimiento competitivo y SlimeVR ofrece ventajas en costo y escalabilidad, estas alternativas no alcanzan el nivel de precisión y estabilidad requerido para los objetivos de la investigación. Por ello, HTC Vive 3.0 se selecciona como la opción más confiable y técnicamente adecuada para la implementación del sistem

3.4.3 Herramientas de modelado 3D

Con el propósito de determinar la alternativa más adecuada en cuanto a modelado 3D, se consideraron las herramientas de Blender, Maya y Houdini, tomando como referencia los siguientes criterios:

a) Criterios

- Modelado y Escultura (Peso: 10 %): Se define como el proceso de creación de topología geométrica y el moldeado digital de superficies de alta densidad. Según [29], el modelado poligonal eficiente es la base para la creación de activos que mantengan la fidelidad visual sin comprometer la tasa de cuadros por segundo.
- Compatibilidad de Exportación (Peso: 15 %): Este criterio evalúa la capacidad del software para transferir datos mediante formatos estándar (FBX, glTF, USD). La interoperabilidad es crítica en flujos de trabajo de VR, donde la integridad de las mallas y metadatos debe preservarse al transitar hacia motores de renderizado en tiempo real [39].
- Curva de Aprendizaje (Peso: 10 %): Se refiere al tiempo y esfuerzo cognitivo requerido para alcanzar la competencia técnica. En entornos académicos, una curva de aprendizaje pronunciada puede derivar en cuellos de botella operativos si la herramienta demanda conocimientos avanzados de programación o lógica nodal para tareas básicas [40].
- Rigging y Animación (Peso: 10 %): Es la construcción de estructuras jerárquicas (esqueletos) y la definición de deformaciones para el movimiento. Un sistema de rigging robusto es esencial para garantizar que las interacciones dentro del entorno virtual sean anátomicamente coherentes y fluidas [41].
- Optimización VR (Peso: 20 %): Consiste en la reducción de la complejidad computacional de los modelos (retopología y simplificación). Para la VR, la optimización es un mandato técnico para evitar la latencia, la cual es la principal causa de la desorientación y el mareo cinético (motion sickness) [42].
- Licenciamiento y Costo (Peso: 15 %): Evalúa la viabilidad económica y legal para la utilización del software en proyectos de investigación. El uso de software de código abierto frente a modelos de suscripción comercial

impacta directamente en la sostenibilidad financiera y en la libertad de distribución del producto final de la tesis [43].

- Texturizado y Shading (Peso: 10 %): Es el proceso de definir las propiedades visuales y de materiales mediante modelos de renderizado físico (PBR). El sombreado eficiente permite que los objetos reaccionen de forma realista a la iluminación dinámica, un factor determinante para la inmersión en VR [44].
- Rendimiento de Escenas (Peso: 10 %): Evalúa la gestión de recursos de hardware (CPU/RAM) al procesar entornos con alta densidad de objetos. La estabilidad del software bajo carga masiva asegura que el desarrollo no se vea interrumpido por fallos técnicos o inestabilidad del sistema [45].

b) Matriz de selección

Tabla 34: Matriz de selección de herramienta de modelado 3D

Criterio de Selección	**Peso**	**Blender**	**Maya**	**Houdini**	**Blender (Pond.)**	**Maya (Pond.)**	**Houdini (Pond.)**
Modelado y Escultura	0.10	5	4	3	0.50	0.40	0.30
Compatibilidad Exportación	0.15	5	5	4	0.75	0.75	0.60
Curva de Aprendizaje	0.10	4	3	2	0.40	0.30	0.20
Rigging y Animación	0.10	4	5	3	0.40	0.50	0.30
Optimización VR	0.20	5	4	4	1.00	0.80	0.80
Licenciamiento y Costo	0.15	5	2	2	0.75	0.30	0.30
Texturizado y Shading	0.10	4	4	5	0.40	0.40	0.50
Rendimiento de Escenas	0.10	3	5	5	0.30	0.50	0.50
Total	**1.00**				**4.50**	**3.95**	**3.50**

c) Justificación

Los resultados de la matriz de selección evidencian que Blender representa la alternativa más conveniente para el desarrollo de los modelos 3D del proyecto, al este tener la puntuación ponderada más alta (4.50). Su elección se sustenta en el equilibrio entre capacidades de modelado, compatibilidad de exportación y herramientas de optimización orientadas a entornos de realidad virtual, permitiendo generar activos visuales eficientes sin comprometer el rendimiento del sistema. Adicionalmente, su modelo de código abierto y ausencia de costos de licenciamiento favorecen la viabilidad económica y académica de la investigación.

3.4.4 Backend

Para identificar el framework para backend que mejor se ajusta a los requisitios del proyecto, se llevó a cabo un análisis entre Spring Boot, FastAPI y NestJS a partir de los criterios descritos a continuación:

a) Criterios

- Arquitectura (Peso: 15 %): Se refiere al patrón estructural que rige la organización de los componentes. Las arquitecturas basadas en inyección de dependencias permiten el desacoplamiento, facilitando la testabilidad y el mantenimiento del software [46].
- Rendimiento (Peso: 15 %): Evaluación de la eficiencia en el procesamiento de peticiones y latencia. Los modelos asíncronos y estándares como ASGI son fundamentales para optimizar el rendimiento en entornos de alta concurrencia [47].
- Ecosistema (Peso: 10 %): Conjunto de herramientas, bibliotecas y soporte de comunidad disponibles. Un ecosistema maduro reduce el tiempo de implementación al ofrecer soluciones preexistentes y probadas [48].
- Curva de Aprendizaje (Peso: 10 %): Grado de dificultad y tiempo requerido para que un desarrollador sea productivo. Factores como la complejidad del lenguaje y la verbosidad del framework determinan este indicador [49].
- Seguridad (Peso: 15 %): Capacidad del framework para mitigar vulnerabilidades mediante mecanismos nativos de autenticación, autorización y validación de esquemas [46].
- Escalabilidad (Peso: 15 %): Atributo que permite al sistema manejar un crecimiento en la carga de trabajo, ya sea mediante la distribución de procesos o el despliegue eficiente en infraestructuras de nube [47].
- Integración DB (Peso: 10 %): Facilidad de comunicación con sistemas de gestión de bases de datos a través de ORMs (Object-Relational Mapping), garantizando la integridad y persistencia de la información [48].
- Documentación (Peso: 10 %): Calidad, extensión y claridad de los recursos instructivos oficiales. Una documentación robusta es vital para la resolución de problemas y la correcta implementación de patrones [49].

b) Matriz de selección

Tabla 35: Matriz de selección del backend

Criterio de Selección	Peso	NestJS	Spring Boot	FastAPI	NestJS (Pond.)	Spring Boot (Pond.)	FastAPI (Pond.)
Arquitectura	0.15	5	5	3	0.75	0.75	0.45
Rendimiento	0.15	5	4	5	0.75	0.60	0.75
Ecosistema	0.10	5	5	4	0.50	0.50	0.40
Curva de Aprendizaje	0.10	4	2	5	0.40	0.20	0.50
Seguridad	0.15	5	5	4	0.75	0.75	0.60
Escalabilidad	0.15	5	5	4	0.75	0.75	0.60
Integración DB	0.10	5	5	4	0.50	0.50	0.40
Documentación	0.10	4	4	5	0.40	0.40	0.50
Total	**1.00**				**4.80**	**4.45**	**4.20**

c) Justificación

NestJS fue seleccionado como framework backend debido a que presentó el mejor equilibrio entre arquitectura, rendimiento, seguridad y escalabilidad dentro de la evaluación realizada. Su enfoque modular y el uso de inyección de dependencias facilitan el mantenimiento y crecimiento del sistema, mientras que su integración con ORMs, herramientas modernas y documentación consolidada favorecen un desarrollo más estructurado y eficiente. Además, el ecosistema basado en TypeScript contribuye a mejorar la organización del código y la interoperabilidad con las demás tecnologías definidas en el proyecto, convirtiéndolo en una alternativa adecuada para soportar los requerimientos funcionales y técnicos planteados.

3.4.5 Base de datos

La selección de la base de datos se realizó considerando diferentes herramientas tecnológicas (PostgreSQL, MySQL y MariaDB) que fueron comparadas a partir de los criterios siguientes:

a) Criterios

- Manejo de datos complejos (VR) (Peso: 25 %): Se refiere a la capacidad del sistema de gestión de bases de datos (SGBD) para almacenar y procesar tipos de datos no estructurados o espaciales. En entornos de Realidad Virtual (VR), esto es crítico para la gestión de coordenadas y objetos JSONB que representan estados del entorno inmersivo [50].

- Consistencia y Seguridad (ACID) (Peso: 20 %): Es el conjunto de propiedades (Atomicidad, Consistencia, Aislamiento y Durabilidad) que garantizan que las transacciones en una base de datos se procesen de manera confiable, asegurando la integridad de la información ante fallos del sistema [51].
- Rendimiento Concurrente (Peso: 20 %): Define la eficiencia del motor de base de datos para gestionar múltiples peticiones de lectura y escritura de forma simultánea. Es fundamental en sistemas multiusuario para evitar bloqueos y latencias que degraden la experiencia del usuario [48].
- Integración con el Stack (ORMs) (Peso: 15 %): Evalúa la compatibilidad del SGBD con herramientas de mapeo objeto-relacional (ORM). Una integración robusta facilita el desarrollo de software al permitir que los desarrolladores interactúen con la base de datos utilizando el mismo lenguaje de programación del backend [52].
- Costo y Licenciamiento (Peso: 20 %): Determina la viabilidad económica del proyecto a largo plazo. Se analiza el tipo de licencia (Open Source vs. Propietaria/Dual) para asegurar que no existan restricciones legales o costos imprevistos por escalabilidad comercial [53].

b) Matriz de selección

Tabla 36: Matriz de selección de base de datos

Criterio de Selección	**Peso**	**PostgreSQL**	**MySQL**	**MariaDB**	**PostgreSQL (Pond.)**	**MySQL (Pond.)**	**MariaDB (Pond.)**
Manejo de datos complejos (VR)	25 %	5	3	4	1.25	0.75	1.00
Consistencia y Seguridad (ACID)	20 %	5	3	4	1.00	0.60	0.80
Rendimiento Concurrente	20 %	5	4	5	1.00	0.80	1.00
Integración con el Stack (ORMs)	15 %	5	4	4	0.75	0.60	0.60
Costo y Licenciamiento	20 %	5	2	5	1.00	0.40	1.00
Puntaje Total Ponderado	**100 %**				**5.00**	**3.15**	**4.40**

c) Justificación

PostgreSQL fue seleccionado como sistema gestor de base de datos al demostrar un desempeño superior en el manejo de datos complejos, consistencia transaccional y rendimiento concurrente, aspectos fundamentales para garantizar estabilidad y confiabilidad en el proyecto. Su compatibilidad con ORMs y herramientas modernas de desarrollo facilita la integración con el backend y mejora la administración de la información dentro del sistema. Asimismo, su modelo de código abierto y capacidades avanzadas para trabajar con estructuras de datos complejas permiten contar con una solución escalable, flexible y adecuada para los requerimientos tecnológicos definidos en la investigación.

3.4.6 Hardware de Visualización

El hardware utilizado fue determinado por la disponibilidad de recursos del grupo de investigación al que se adscribe esta tesis. Se empleó el visor Meta Quest 2 con sus controladores originales tanto el derecho como el izquierdo.

3.4.7 Software de Conexión y Runtime

Para la integración del visor con el entorno de desarrollo y la gestión de periféricos, se utilizaron las siguientes plataformas:

- **Meta Horizon Link:** Software oficial que habilita el modo PC VR, permitiendo que el visor funcione como periférico de visualización y seguimiento para las aplicaciones ejecutadas en el sistema anfitrión a través de una interfaz USB o inalámbrica.
- **SteamVR:** Actúa como capa de abstracción basada en el estándar OpenXR. Su uso fue indispensable para integrar dispositivos de seguimiento de cuerpo completo (Full Body Tracking) de terceros, permitiendo la sincronización de datos de tracking externos con el ecosistema del visor en una única sesión coordinada.

3.5 Resumen Selección de Metodologia y Herramientas de Desarrollo VR

A fin de consolidar los hallazgos de las evaluaciones precedentes, la Tabla 37 unifica los resultados de las Matrices de Simon. Se introduce el cálculo del Margen de Ventaja Técnica (M_V) III.2 para evaluar la distancia relativa entre la opción seleccionada y su competidor más cercano.

$$M_V = \left(\frac{P_G - P_S}{P_G} \right) \times 100 \tag{III.1}$$

Donde:

- M_V: Margen de Ventaja Técnica expresado en porcentaje (%).

- P_G: Puntaje de la opción seleccionada o Ganadora (mayor ponderación).
- P_S: Puntaje de la opción en segundo lugar o Competidor inmediato (Segunda mayor ponderación).

Tabla 37: Consolidado cuantitativo de selección de componentes

Categoría de Evaluación	**Opción Seleccionada**	**Puntaje (P_G)**	**Segunda Alternativa**	**Puntaje (P_S)**	**Margen (M_V)**
Metodología de Desarrollo	Desarrollo IID	4.75	Prototipado Evolutivo	3.45	27.37 %
Motor Gráfico	Unreal Engine	4.65	Unity	4.15	10.75 %
Tecnología de Tracking (FBT)	HTC Vive 3.0	4.70	Tundra Tracker	4.55	3.19 %
Herramienta de Modelado 3D	Blender	4.50	Maya	3.95	12.22 %
Framework Backend	NestJS	4.80	Spring Boot	4.45	7.29 %
Sistema de Base de Datos	PostgreSQL	5.00	MariaDB	4.40	12.00 %
Promedio General	**Idoneidad del Stack**	**4.73**	**Alternativas Secundarias**	**4.16**	**12.08 %**

El promedio general de idoneidad obtenido tanto por la metodología de desarrollo como por el stack tecnológico seleccionado alcanza una puntuación de 4.73/5.00, lo que demuestra una adecuada adaptación frente a los requerimientos técnicos del proyecto, especialmente en aspectos relacionados con el renderizado en tiempo real y la sincronización de movimientos dentro del entorno de realidad virtual.

3.6 Desarrollo de la Aplicación de Realidad Virtual

3.6.1 Diseño Arquictectura del Sistema

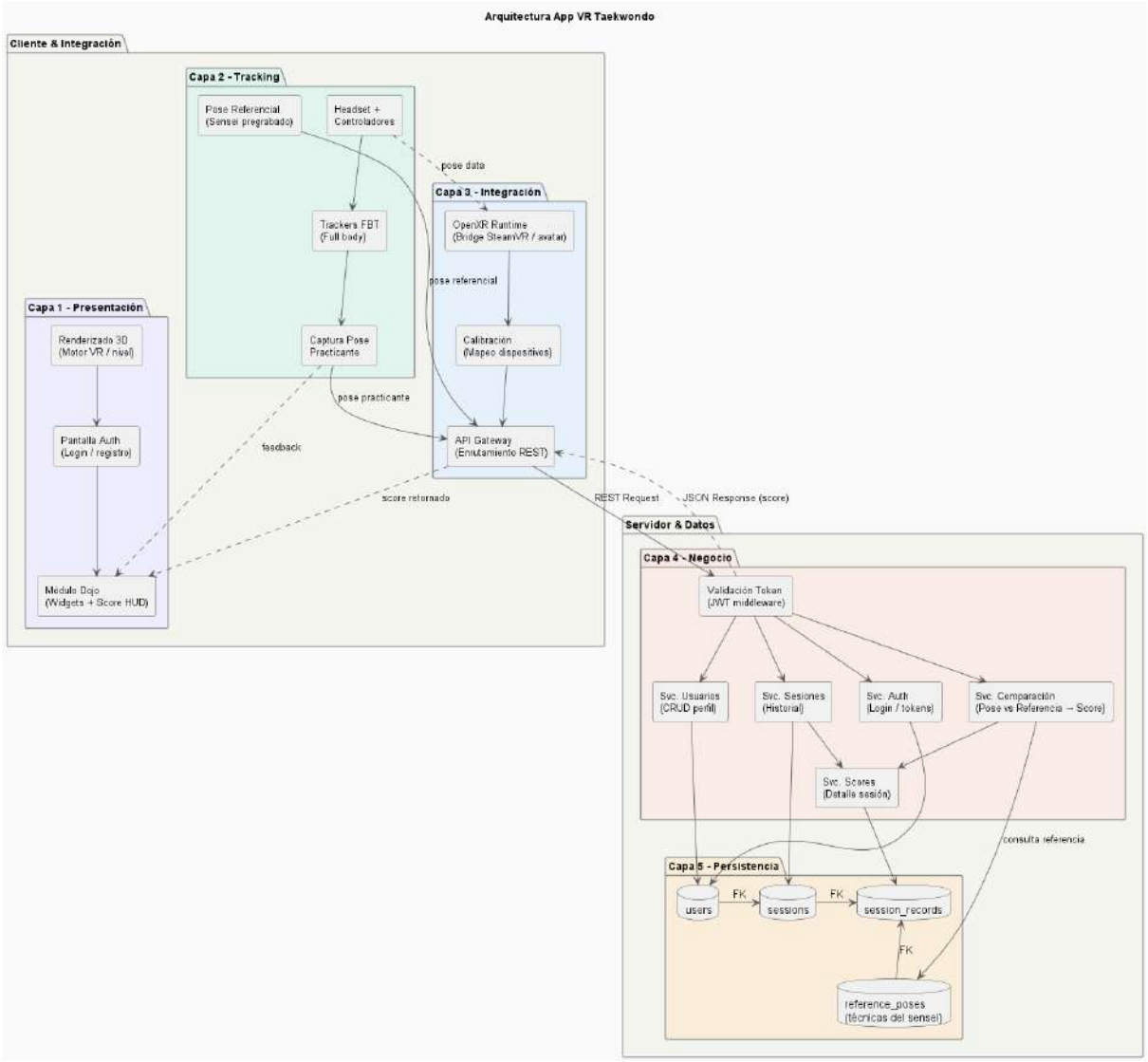


Figura 31: Diagrama arquitectonico del sistema

3.6.2 Diseño Base de Datos

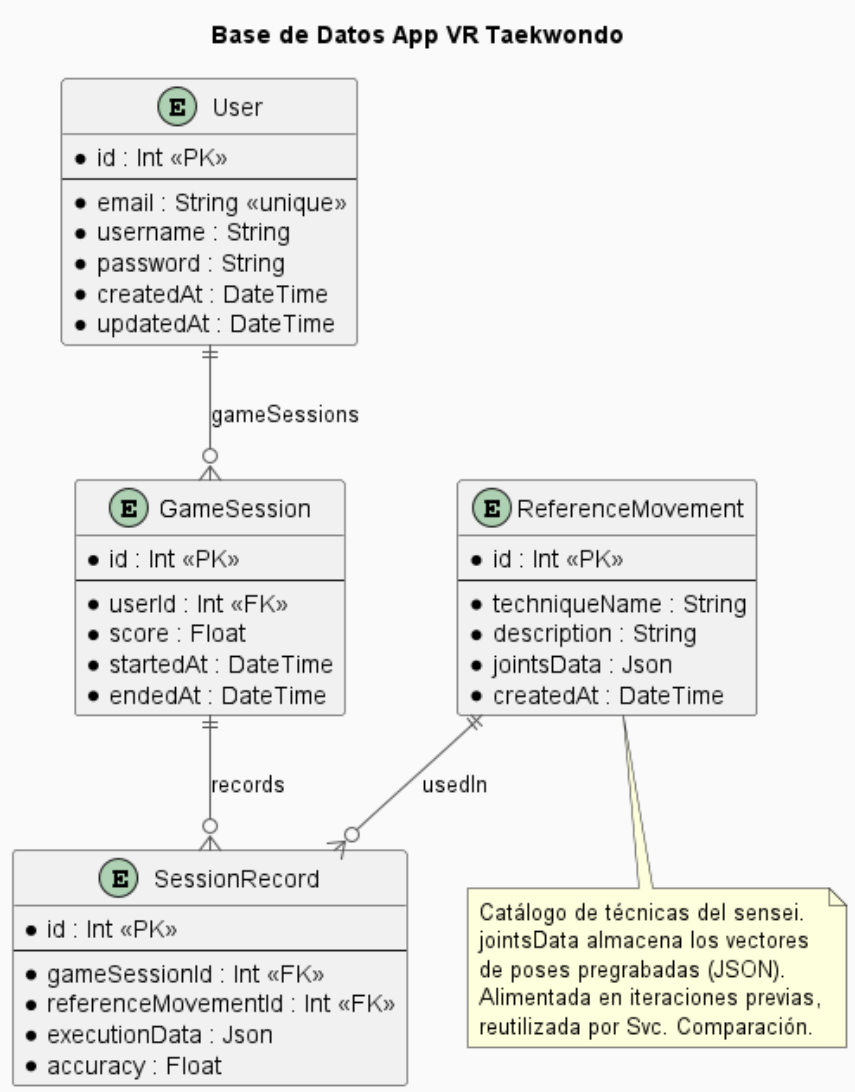


Figura 32: Diagrama de Base de Datos

3.6.3 Planificación de iteraciones

Dado que la metodología seleccionada para el proyecto es el Desarrollo Incremental e Iterativo (IID), el desarrollo se planifica en diferentes iteraciones, permitiendo incorporar progresivamente nuevas funcionalidades en cada etapa. En la Tabla 38 se presenta la planificación general de las iteraciones y las Historias de Usuario asociadas a cada una.

Tabla 38: Planificación de iteraciones y distribución de Historias de Usuario

Iteración	**Objetivo principal**	**Historias de Usuario**	**Prioridad**
Iteración 1: Hardware y entornos	Configuración de repositorios, verificación del hardware de trackeo HTC Vive y puesta a punto de los entornos de ejecución.	— (sin HU asignada)	Alta
Iteración 2: Login, menú y Pawn VR	Diseño e implementación de widgets de acceso, lógica del Pawn VR, backend de autenticación y construcción de niveles (login y Dojo).	US-01, US-02, US-03, US-10	Alta
Iteración 3: Captura corporal full-body	Desarrollo del subsistema de captura con seis trackers HTC Vive, calibración en T-Pose, suavizado de movimiento y grabación por fotograma del experto.	US-05	Alta
Iteración 4: Avatar guía y categorías	Implementación del avatar 3D de referencia que se activa al iniciar el ejercicio y ejecuta la técnica seleccionada, y organización de los movimientos por categoría.	US-04, US-08	Media–Alta
Iteración 5: Comparación, retroalimentación, métricas e historial	Desarrollo del sistema de comparación de posturas, retroalimentación con errores detectados y porcentaje de precisión, cálculo de puntaje e historial de sesiones.	US-06, US-07, US-09	Alta

a) **Iteracion 1: Verificación y configuración del hardware y entornos de ejecución**

- **Etapa de Diseño**

  En esta etapa se define la distribución espacial del área de seguimiento para asegurar la cobertura óptima de los sensores.

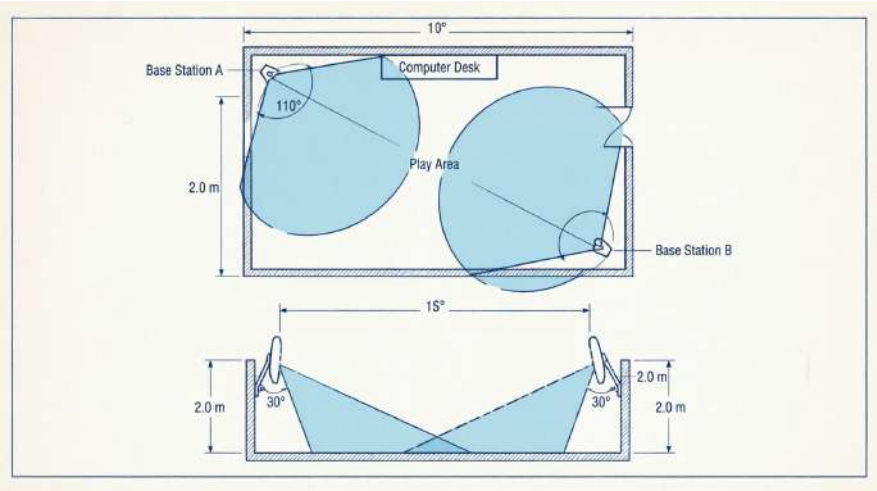


Figura 33: Diagrama Ubicación Base Station

En la figura 33 se contempla el diseño de la instalación para las dos estaciones base que se usaran para el trackeo, estas estaran ubicadas en esquinas opuestas, situadas a una altura de 2.0 metros y con una inclinación hacia abajo de 30°. Esto permite que los campos de visión de ambos dispositivos, que cubren un ángulo de 110° cada uno, se superpongan en el centro del espacio de juego. Al cruzar estas áreas de rastreo, se minimizan las zonas ciegas y se garantiza que los movimientos del usuario sean captados de manera constante desde distintos ángulos.

- **Etapa de Desarrollo**

  En la Figura 34 se ilustra la inicializacion del repositorio destinado a la lógica del backend. Por otro lado, la Figura 35 presenta el repositorio encargado de la interfaz de usuario, la lógica de la aplicación de Realidad Virtual (VR), el motor gráfico y el entorno visual de los niveles.

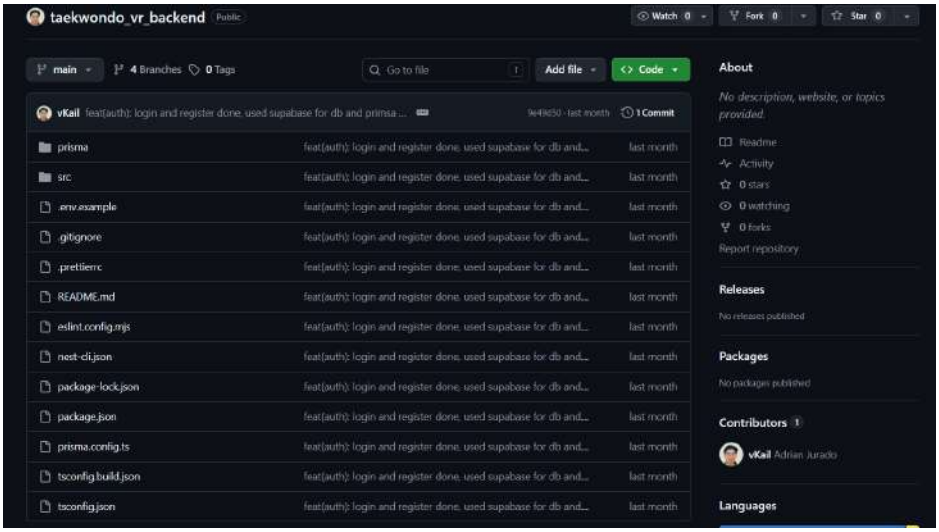


Figura 34: Repositorio Backend

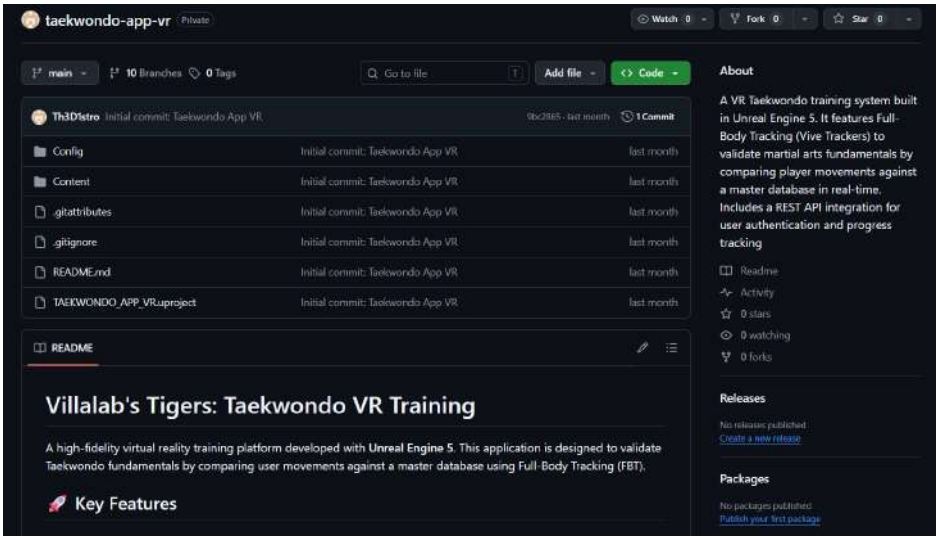


Figura 35: Repositorio App VR

Tras definir el diseño previo para la ubicación de las estaciones base (base stations), se procedió con la instalación de cada unidad, tal como se ilustra en las Figuras 36 y 37.



Figura 36: Base Station 1



Figura 37: Base Station 2

Una vez posicionados y activados los dispositivos, se estableció la sincronización entre el hardware de Oculus y su ecosistema de software. El resultado de esta integración se presenta en la Figura 38, mientras que la configuración final de los sensores de seguimiento (trackers) con el sistema de Realidad Virtual se detalla en la Figura 39.

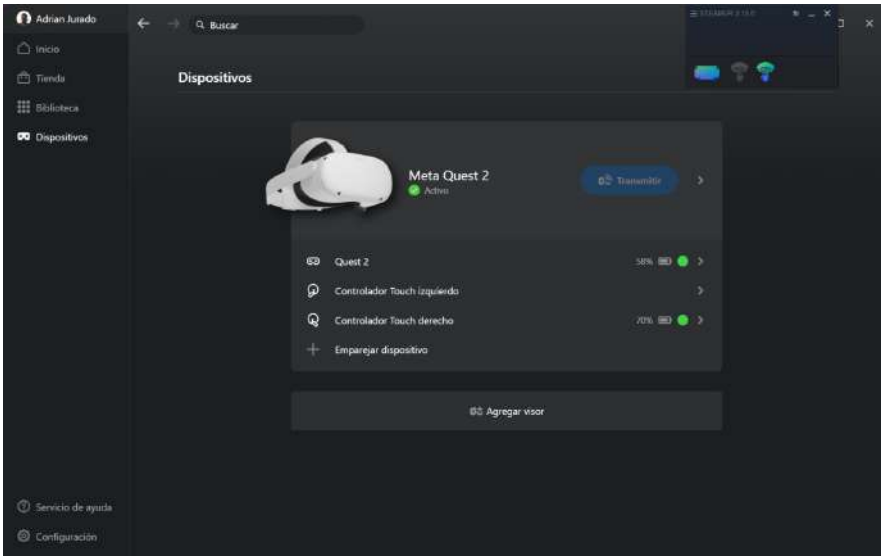


Figura 38: Meta Horizon Link Integración

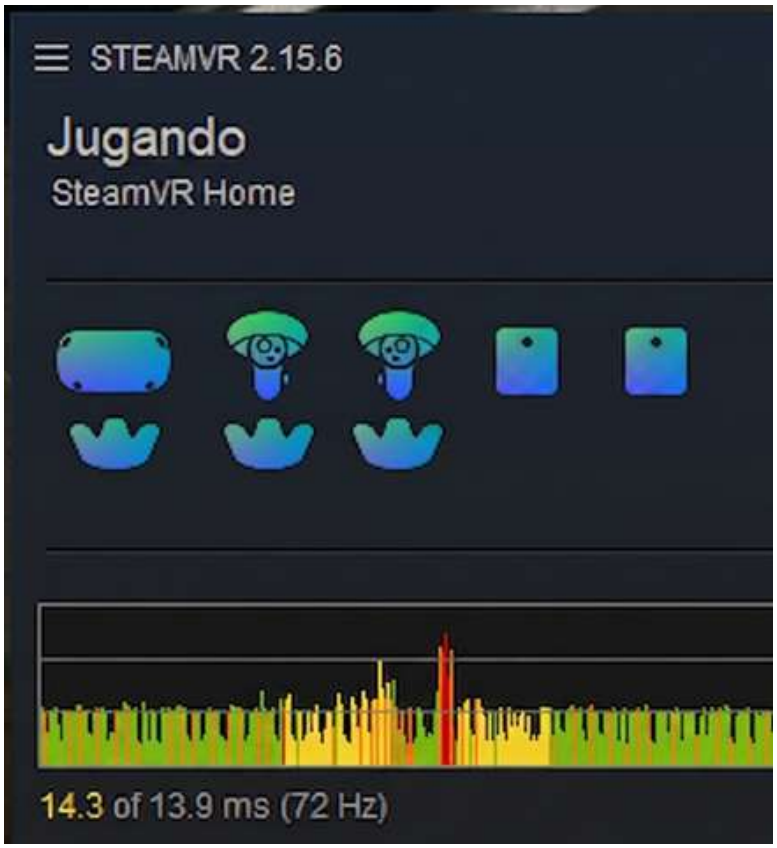


Figura 39: Configuración Trackers en SteamVR

Después se procedió a configurar el espacio dentro del sistema Guardian de la Meta Quest 2, debido a que este utiliza un espacio previamente definido para la ubicación espacial tanto de los controladores como del headset. La

Figura 40 muestra una referencia a dicha configuración, mientras que las Figuras 41 y 42 presentan el proceso realizado para su establecimiento.



Figura 40: Referencia configuración sistema Guard [54]

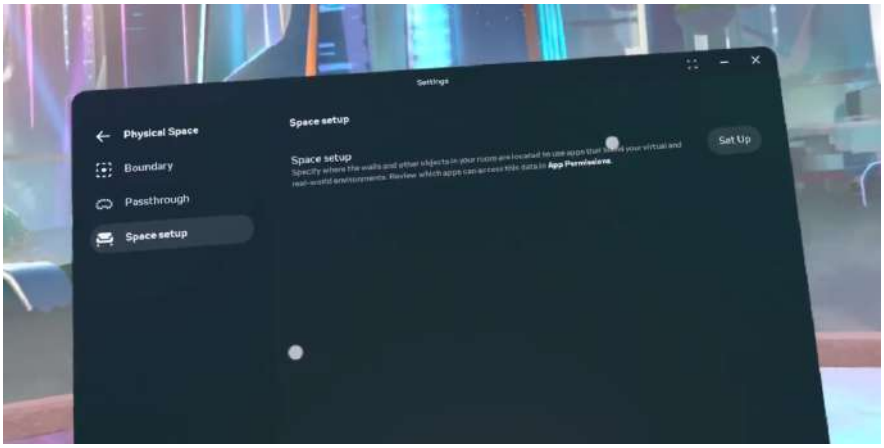


Figura 41: Configuración sistema Guard



Figura 42: Configuración del espacio para el sistema Guard

Posteriormente, también fue necesario configurar el SteamVR Room Setup, correspondiente a la configuración del espacio dentro de SteamVR. Para ello, se seleccionó la opción Scale, mostrada en la Figura 43, y se procedió a seguir cada uno de los pasos definidos, de manera similar a la configuración realizada en el sistema Guardian de Meta Quest.

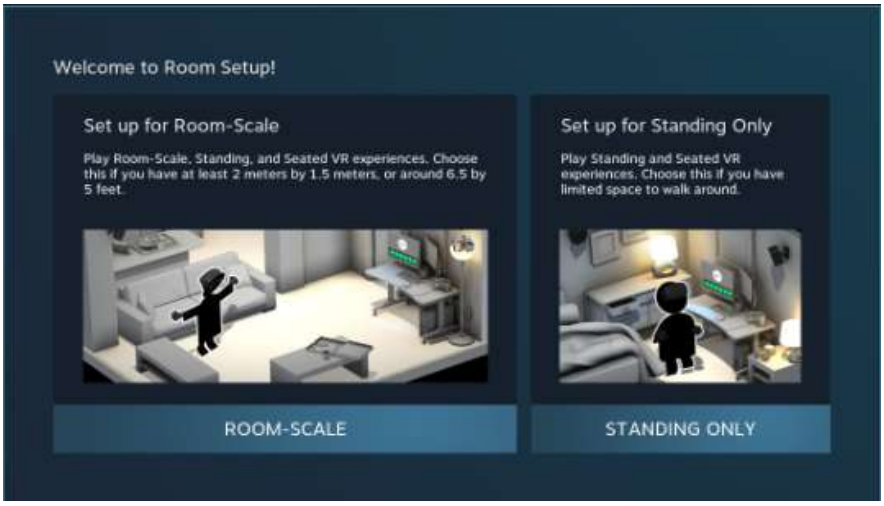


Figura 43: Configuración SteamVR Room Setup

- **Etapa de Pruebas**

Tabla 39: Checklist de verificación de la configuración inicial

ID	Elemento verificado	Estado
CH-01	Creación y configuración del repositorio backend.	✓
CH-02	Creación y configuración del repositorio frontend VR.	✓
CH-03	Definición de la ubicación física de las estaciones base.	✓
CH-04	Configuración inicial de los trackers HTC Vive 3.0.	✓
CH-05	Configuración de Meta Horizon Link para la conexión del visor Meta Quest 2 con el equipo de desarrollo.	✓
CH-06	Configuración del sistema Guardian en Meta Quest 2 para la definición del espacio de seguimiento.	✓
CH-07	Configuración de SteamVR para la gestión del entorno VR y los dispositivos de seguimiento externo.	✓
CH-08	Configuración de SteamVR Room Setup para la calibración del espacio virtual de seguimiento.	✓

b) **Iteracion 2: Creación de niveles + Pawn VR + widgets del nivel de login/menú**

- **Etapa de Diseño**

El diseño de los entornos se basó en el levantamiento fotográfico de las instalaciones reales de la academia Villalba Tiger's (ver Anexo A), utilizando estas capturas como referencia visual para el modelado de los niveles.

Para los widgets de interfaz, se optó por un diseño funcional y minimalista, priorizando la claridad y la facilidad de interacción dentro del entorno virtual, como se muestran en la Figura 44 .

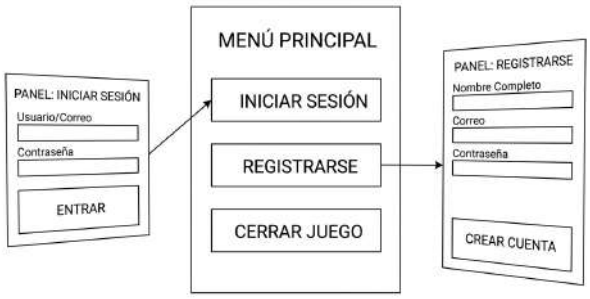


Figura 44: Menú principal

El flujo de navegación diseñado para esta iteración se detalla en la Figura 45.

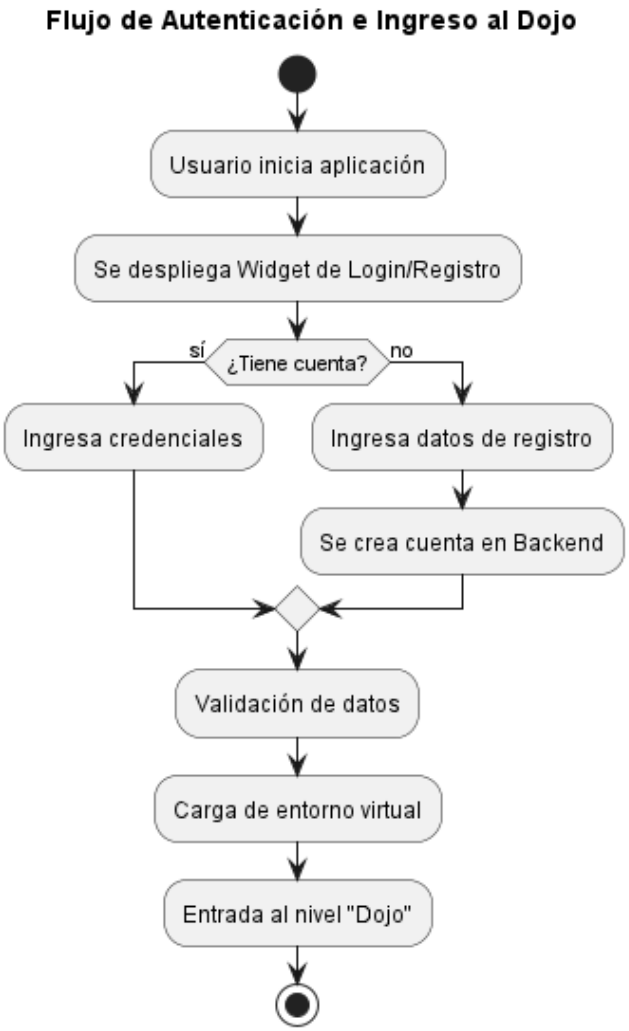


Figura 45: Flujo de Navegación

- **Etapa de Desarrollo Implementación de Entornos (Niveles)**

  En las Figuras 46 y 47 se observa la transición del registro fotográfico exterior hacia el diseño digital siendo este usado como entorno del primer nivel de la aplicacion.



Figura 46: Exterior de la Academia Villalba Tiger's



Figura 47: Nivel Inicial

Por su parte, las Figuras 48 y 49 muestran la comparativa de la infraestructura interior de la academia y su implementación final como entorno del segundo nivel (Nivel del Dojo).

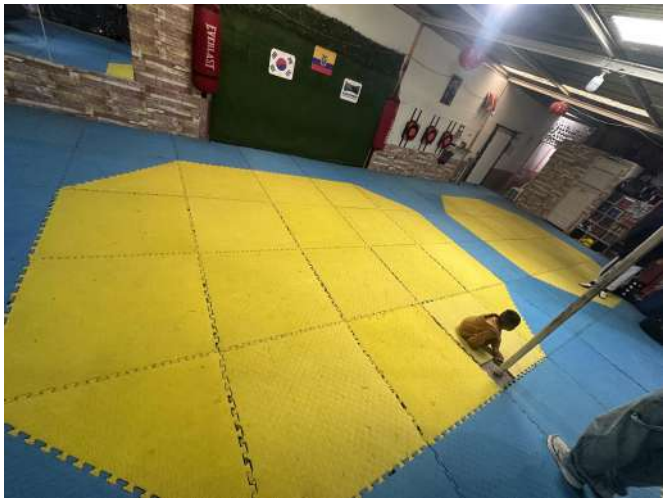


Figura 48: Interior de la Academia Villalba Tiger's

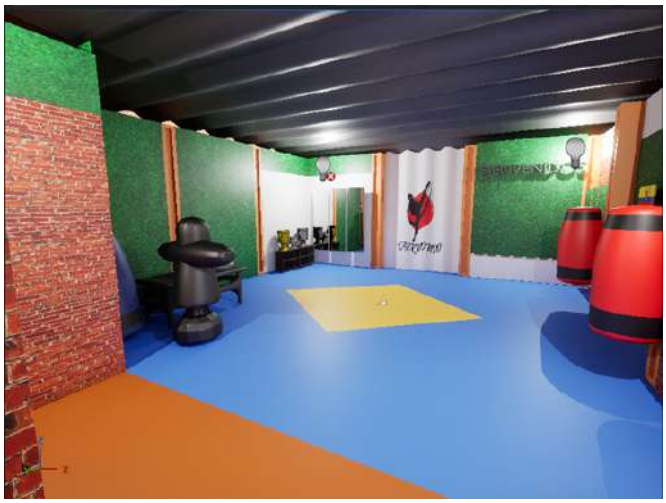


Figura 49: Nivel del Dojo

Lógica del Pawn VR e Interacciones

Tal como se observa en la Figura 50, la configuración del Pawn se realiza mediante el uso de Blueprints, permitiendo establecer tanto la movilidad que tendran los controladores como las funcionalidades necesarias para la interacción con distintos widgets dentro del entorno virtual

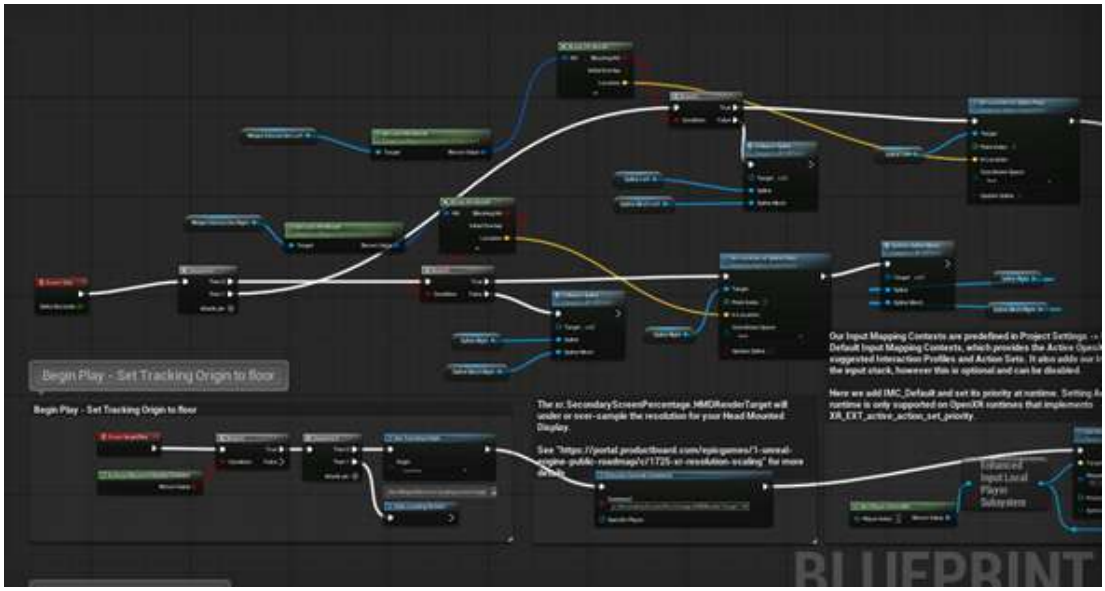


Figura 50: Implementación de seguimiento en el Blueprint Pawn

De igual manera, se implementan funciones destinadas a la manipulación de dichos widgets, permitiendo su creación, visualización y eliminación según las necesidades de interacción. Un ejemplo de este proceso se presenta en la Figura 51.

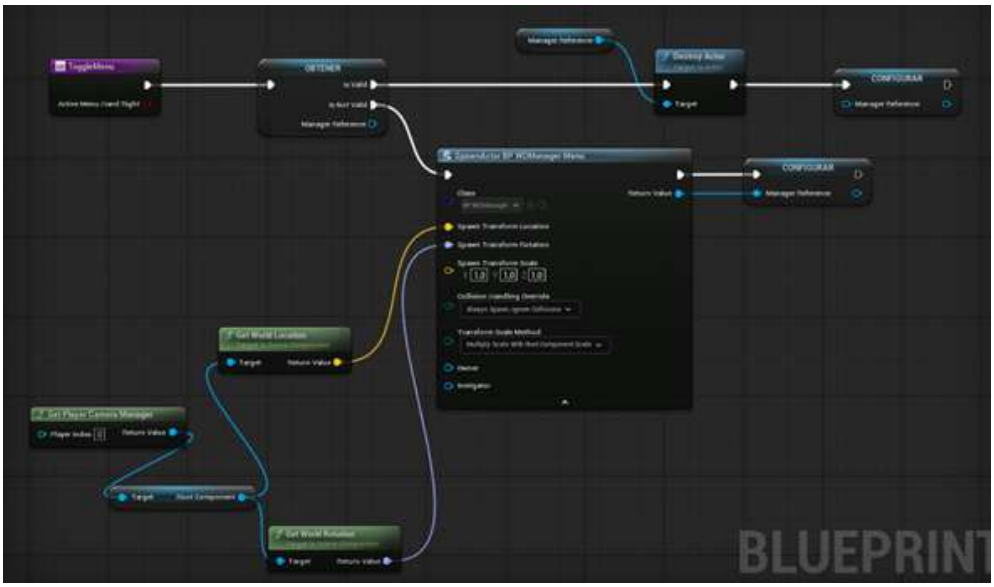


Figura 51: Implementación de la creacion de widgets

Como se puede ver en las Figuras 52 y 53, se presenta el resultado obtenido tras la implementación y configuración del Pawn, evidenciando la estructura de componentes y la integración de las distintas funcionalidades desarrolladas para su funcionamiento.

Estructura de Clase - BP_XRPawn

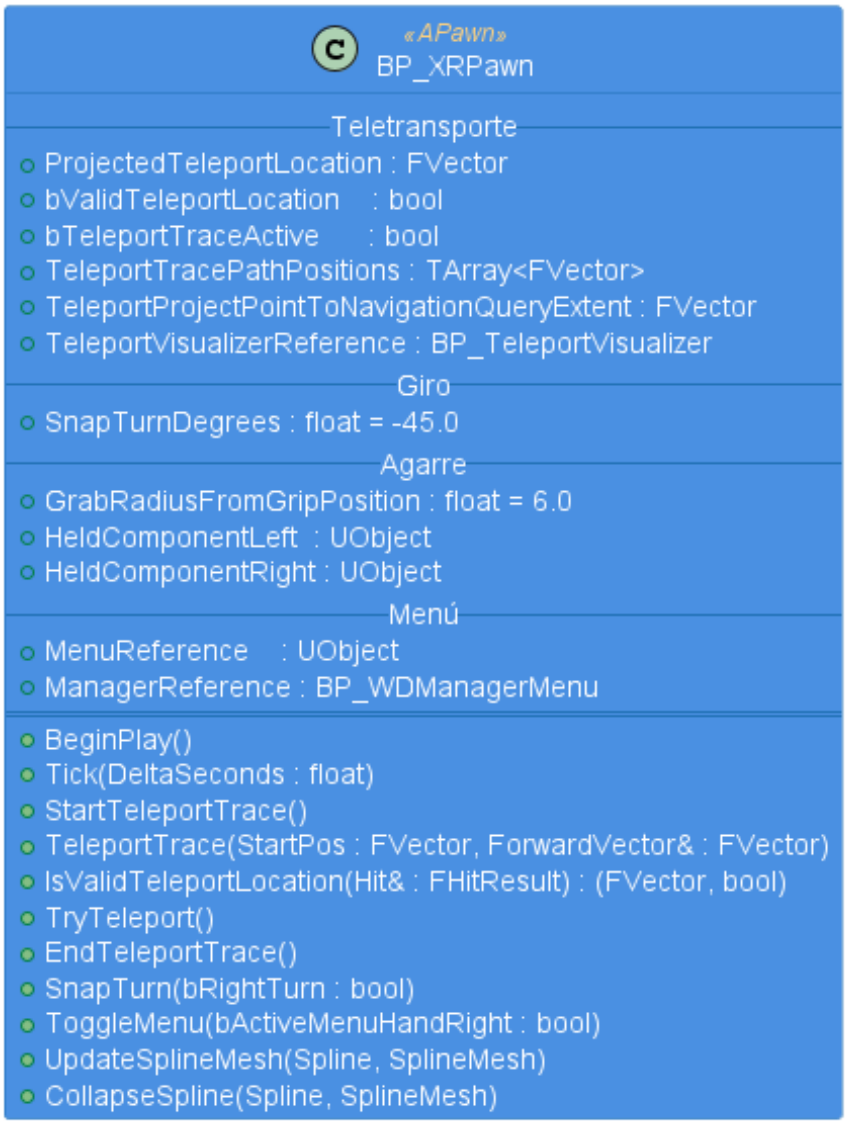


Figura 52: Estructura de Clase del Pawn

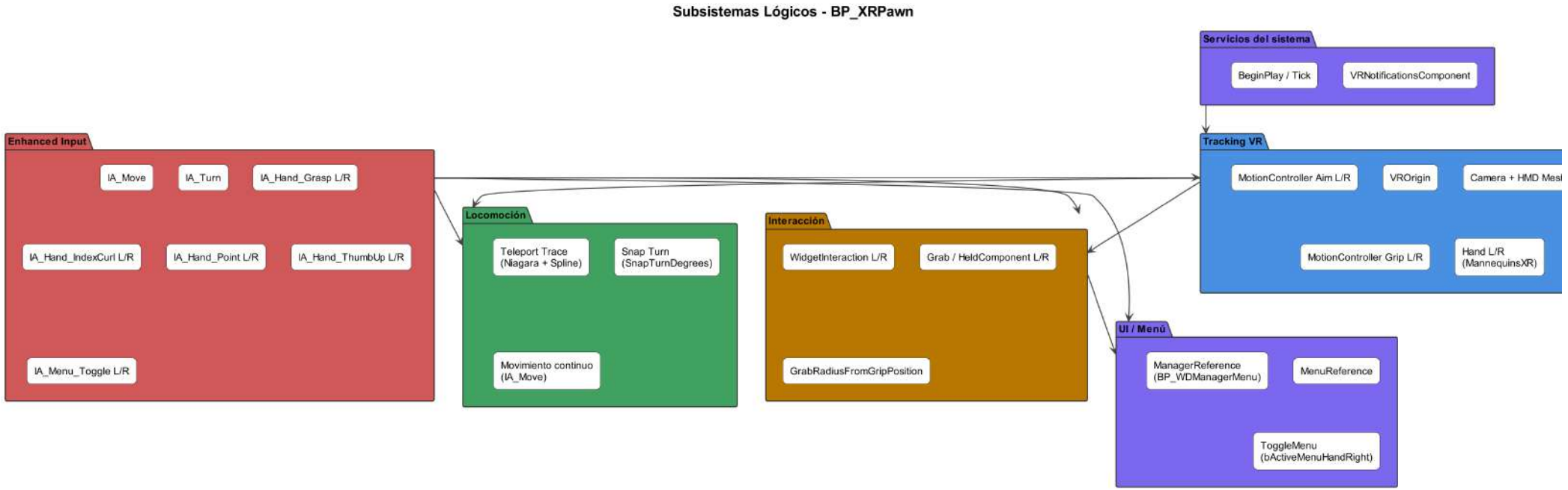
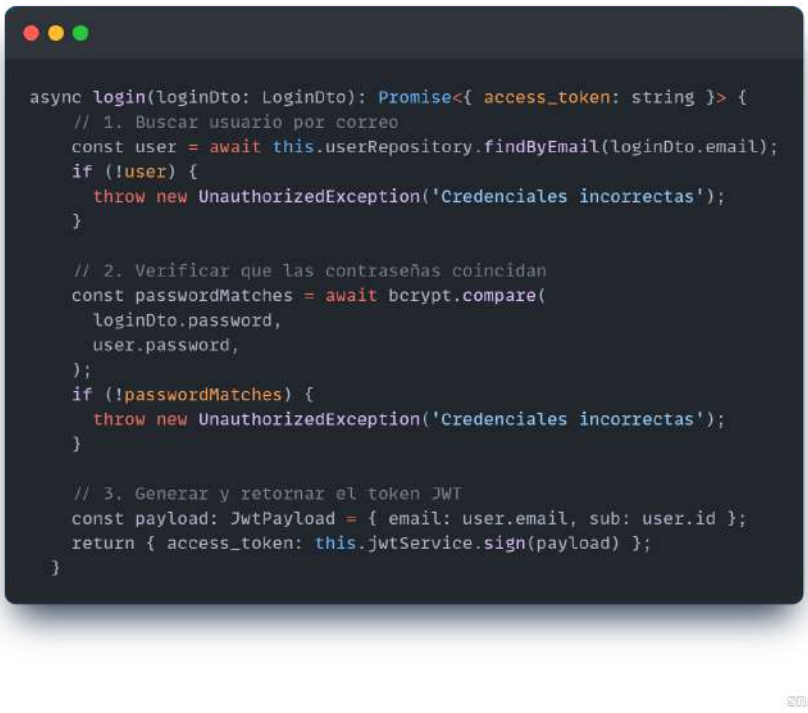


Figura 53: Subsistemas del Pawn

Servicio Autenticación y Registro (Backend)

Como parte del desarrollo, también se implementó el servicio de autenticación en el backend utilizando JWT (JSON Web Token), con el propósito de incorporar un mecanismo de seguridad para la generación de tokens y la validación de credenciales de los usuarios registrados. El resultado de esta implementación, se muestra en la Figura 54



```
async login(loginDto: LoginDto): Promise<{ access_token: string }> {
    // 1. Buscar usuario por correo
    const user = await this.userRepository.findByEmail(loginDto.email);
    if (!user) {
      throw new UnauthorizedException('Credenciales incorrectas');
    }

    // 2. Verificar que las contraseñas coincidan
    const passwordMatches = await bcrypt.compare(
      loginDto.password,
      user.password,
    );
    if (!passwordMatches) {
      throw new UnauthorizedException('Credenciales incorrectas');
    }

    // 3. Generar y retornar el token JWT
    const payload: JwtPayload = { email: user.email, sub: user.id };
    return { access_token: this.jwtService.sign(payload) };
  }
```

snappify.com

Figura 54: Iniciar Sesión (Código)

Por otra parte, tambien se desarrolló el servicio de registro de usuarios como parte del modulo de autenticacion, permitiendo la creación de nuevas cuentas. Para ello, se incorporaron procesos de validación de datos y seguridad en contraseñas, garantizando asi seguridad en la informacion almacenada. Se muestra en la Figura 55 el resultado de esta implementación



```
async register(registerDto: RegisterDto): Promise<{access_token: string;
    user: { id: number; email: string; username: string }; }> {

    // 1. Validar que el correo no exista en la base de datos
    const existingUser = await this.userRepository.findByEmail(
      registerDto.email,
    );
    if (existingUser) {
      throw new ConflictException('Correo ya registrado');
    }

    // 2. Encriptar contraseña y guardar en base de datos
    const hashedPassword = await bcrypt.hash(
      registerDto.password,
      this.BCRYPT_ROUNDS,
    );
    const created = await this.userRepository.createUser({
      email: registerDto.email,
      username: registerDto.username,
      password: hashedPassword
    });

    // 3. Retornar token JWT e información del usuario
    const payload: JwtPayload = { email: created.email, sub: created.id };
    return {
      access_token: this.jwtService.sign(payload),
      user: {
        id: created.id,
        email: created.email,
        username: created.username,
      },
    };
  }
```

snappify.com

Figura 55: Registrarse (Código)

Integración de Interfaz (Widgets)



Figura 56: Widget para iniciar sesión



Figura 57: Widget para registro

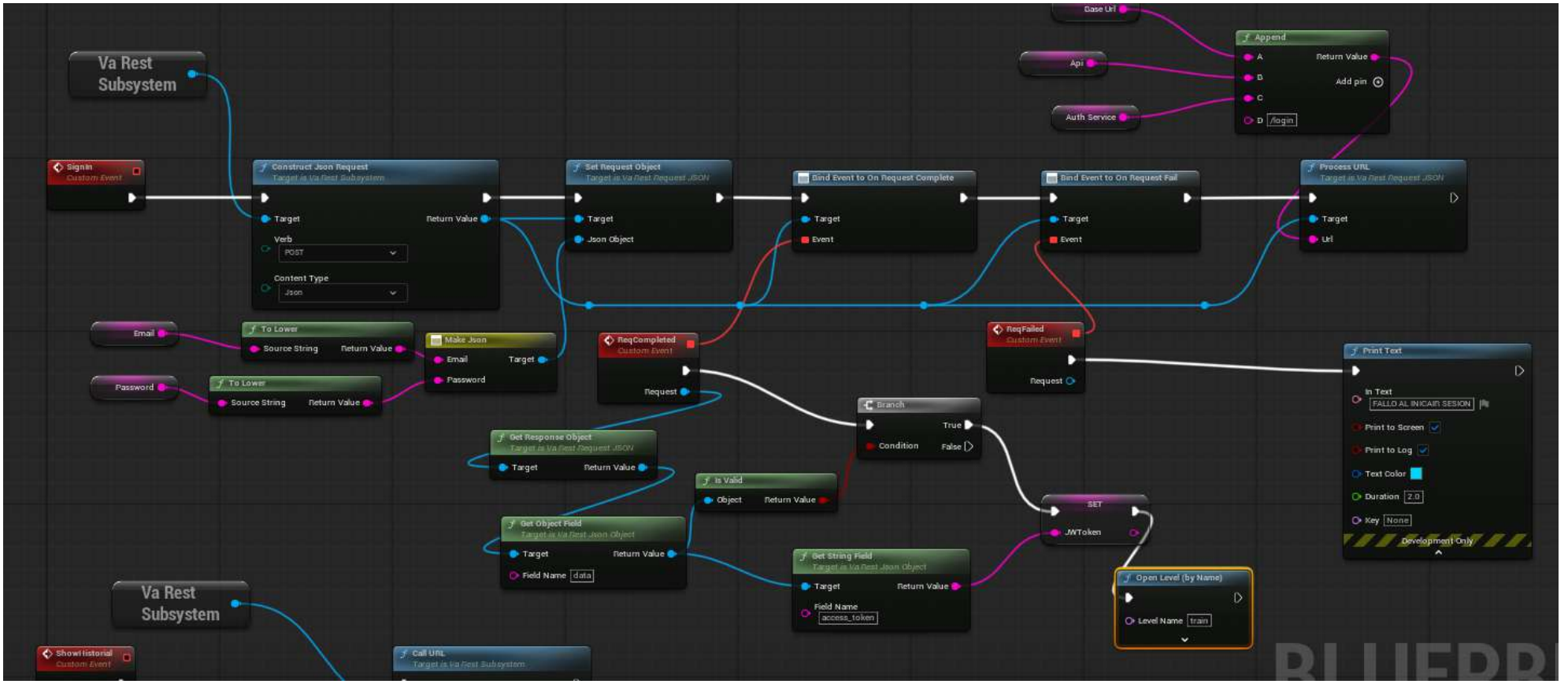


Figura 58: Iniciar Sesión servicio del backend

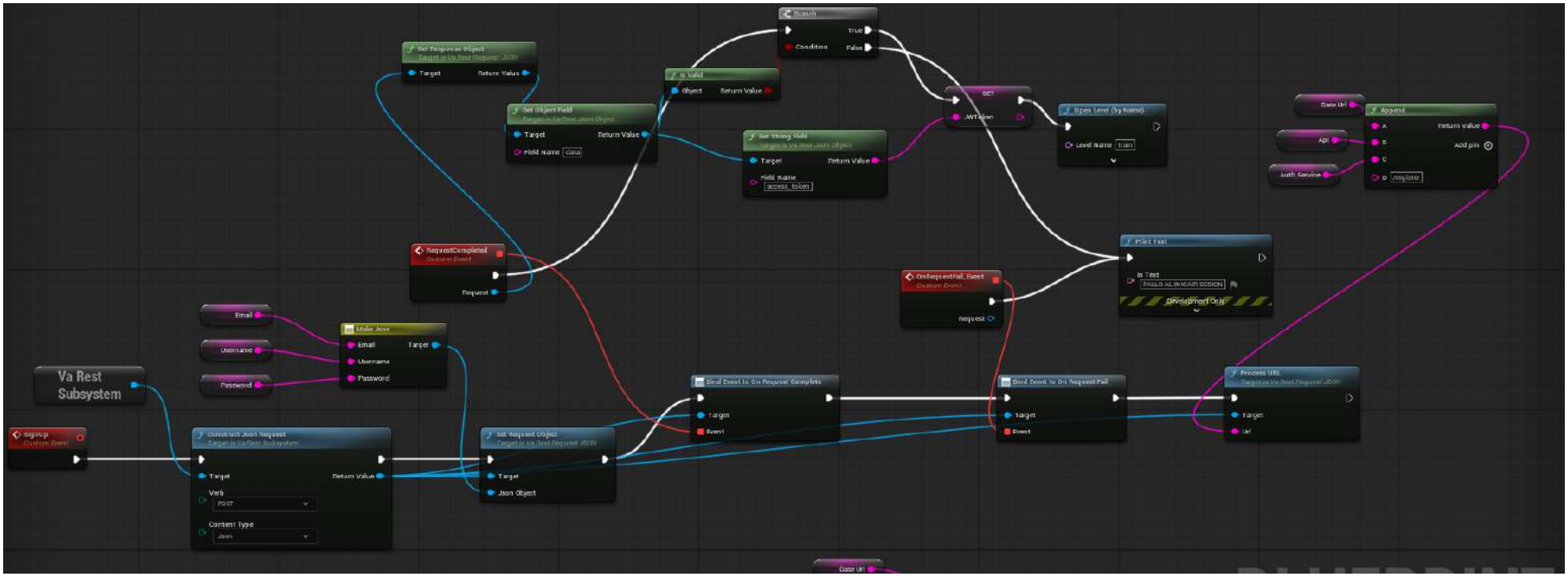


Figura 59: Registrase servicio del backend

- **Etapa de Pruebas** En la etapa de pruebas de esta iteración, después de diseñar e implementar los widgets en el Pawn, se verificó el funcionamiento del menú principal mostrado en la Figura 60.



Figura 60: Widget de Main Menu en Ejecución

Para comprobar que las interacciones funcionen correctamente, se realizó una prueba con la opción de inicio de sesión, mostrando durante la ejecución la aparición del widget correspondiente, tal como se observa en la Figura 61.



Figura 61: Widget de Iniciar Sesión en Ejecución

c) **Iteracion 3: Sistema de captura corporal full-body con trackers HTC Vive**

- **Etapa de Diseño**

Para la etapa de diseño de esta iteración, se desarrolló la arquitectura correspondiente al personaje y a los trackers asociados al mismo. Esta estructura permitirá descomponer y vincular los distintos puntos de seguimiento corporal necesarios para la captura y grabación de movimientos dentro del entorno virtual. La Figura 62 muestra la estructura definida para dicha arquitectura.

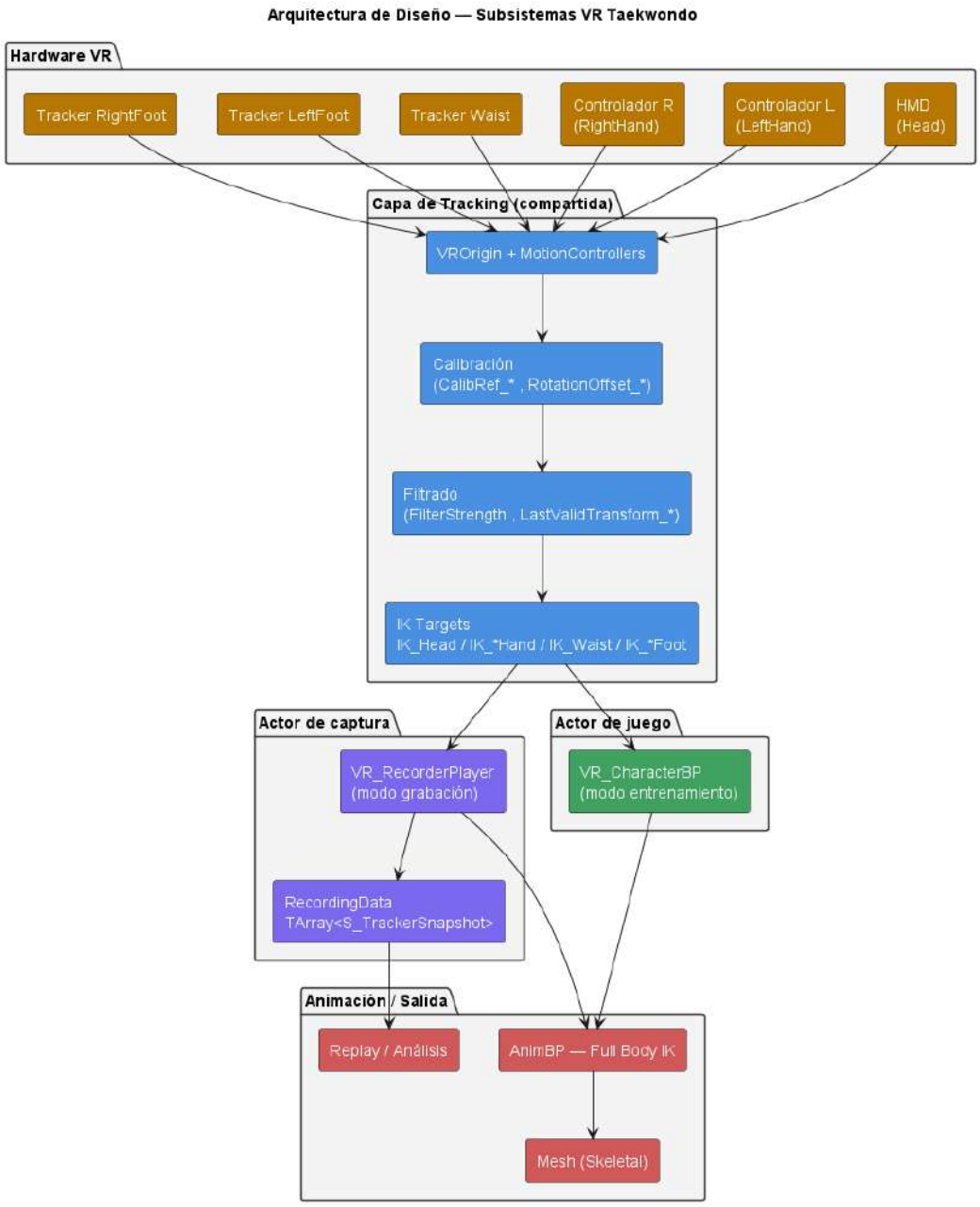


Figura 62: Arquitectura del Character

- **Etapa de Desarrollo**

Comenzando con la base del character, se realizó la selección de su avatar y la configuración de la estructura del Skeletal Mesh. En la Figura 63 se muestra el avatar utilizado, así como la cápsula que lo recubre, cuya finalidad es gestionar los movimientos y definir la hitbox del personaje durante las interacciones dentro del entorno.

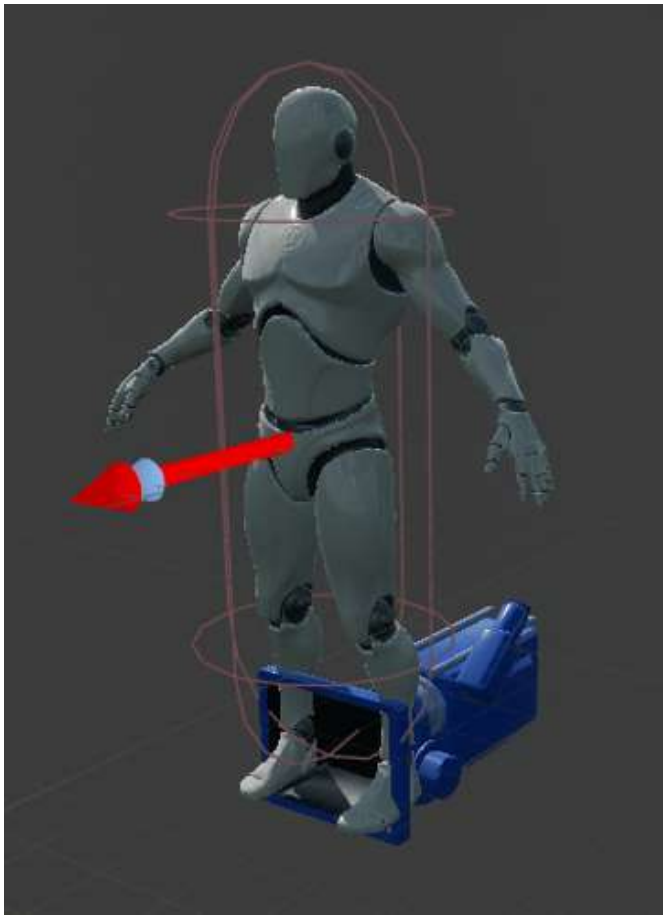


Figura 63: Skeletal Mesh Character

En la Figura 64 se puede observar el diagrama de implementación desarrollado para el sistema de tracking del character. De igual manera, en la Figura65 se presenta su implementación realizada mediante nodos Blueprint dentro del propio character.

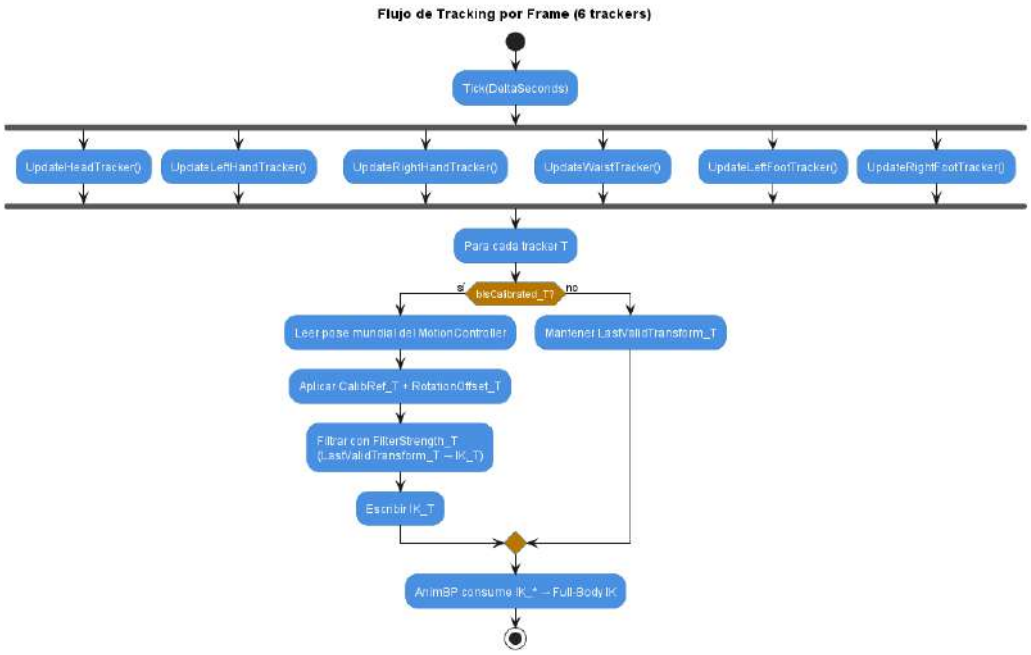


Figura 64: Diagrama del flujo del tracking en el Character

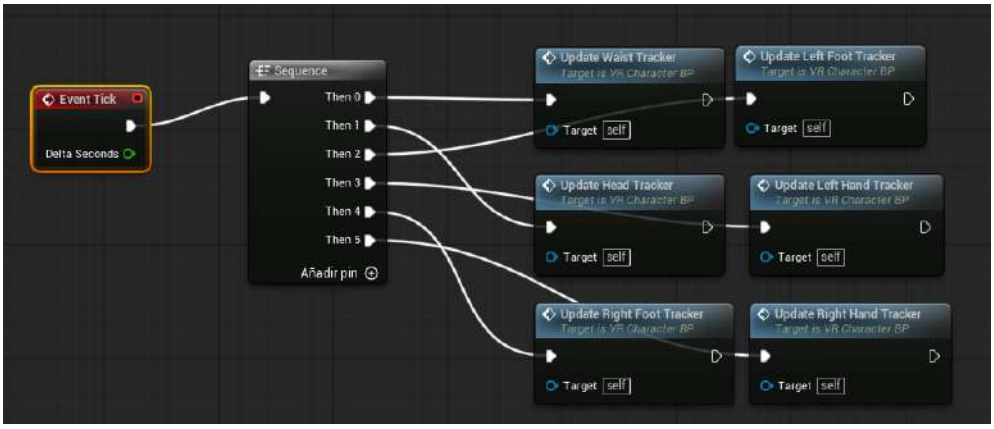


Figura 65: Blueprint configuracion del tracking

En la Figura 66 se puede observar el diagrama de implementación desarrollado para el conjunto de calibración del character. De igual manera, en la Figura 67 se presenta su implementación realizada mediante nodos Blueprint dentro del propio character.

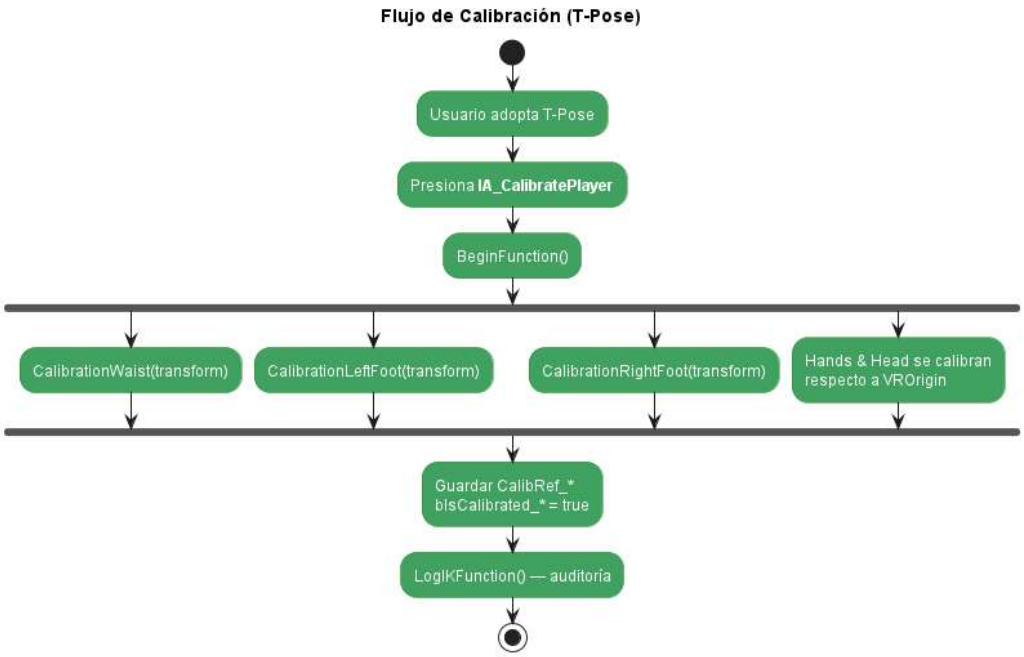


Figura 66: Diagrama del flujo para la calibración de los trackers

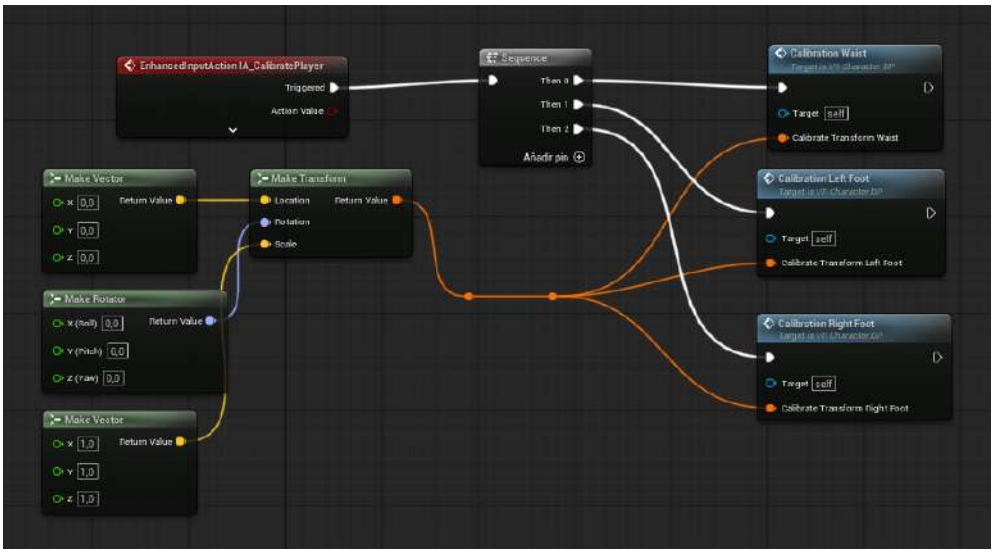


Figura 67: Nodos blueprints para la calibración de los trackers

Para el character del recorder, encargado de la grabación, se añadió un flujo específico de grabación además de la base previamente implementada en el character. En la Figura 68 se muestra dicho flujo, mientras que en la Figura 69 y la Figura 70 se presentan ejemplos de los Blueprints utilizados, correspondientes a las acciones para iniciar y detener una grabación, así como a la captura de movimiento empleada durante el proceso de grabación.

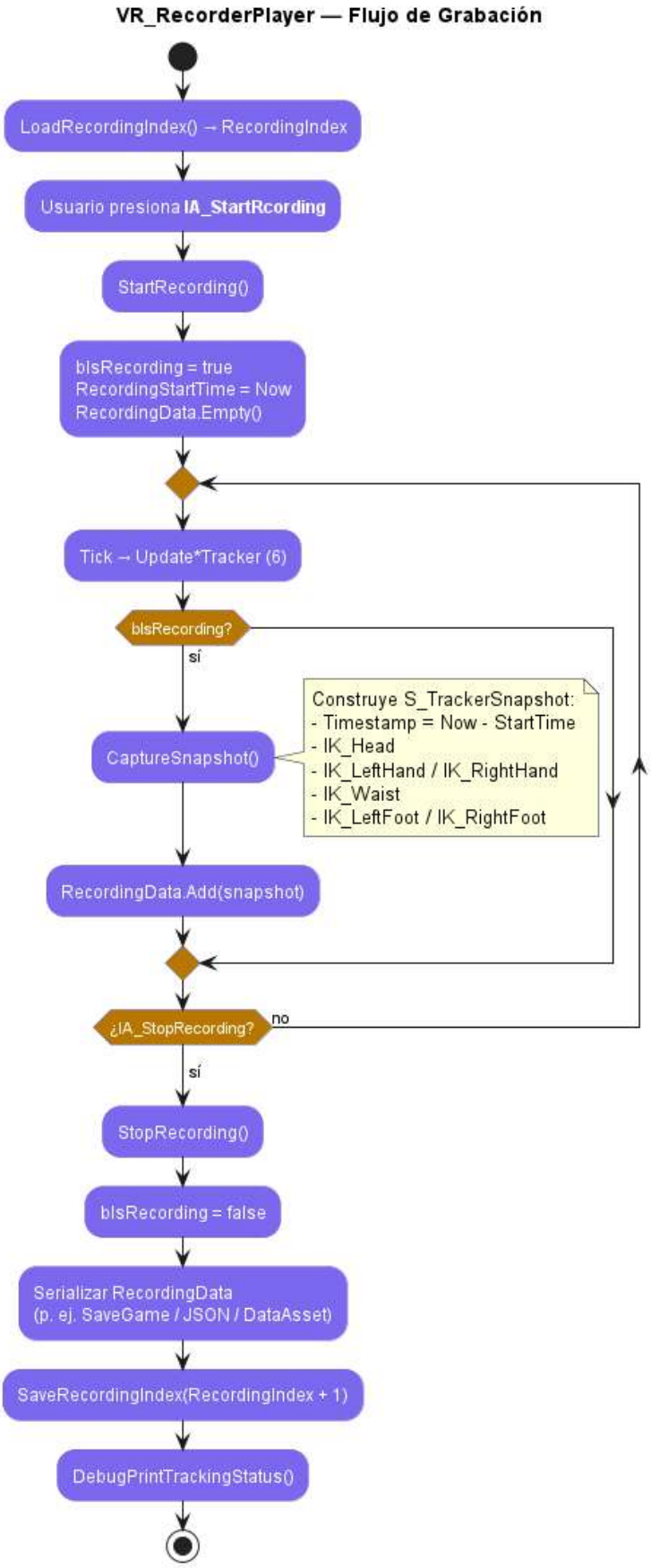


Figura 68: Comparativo Funcional de los Characters

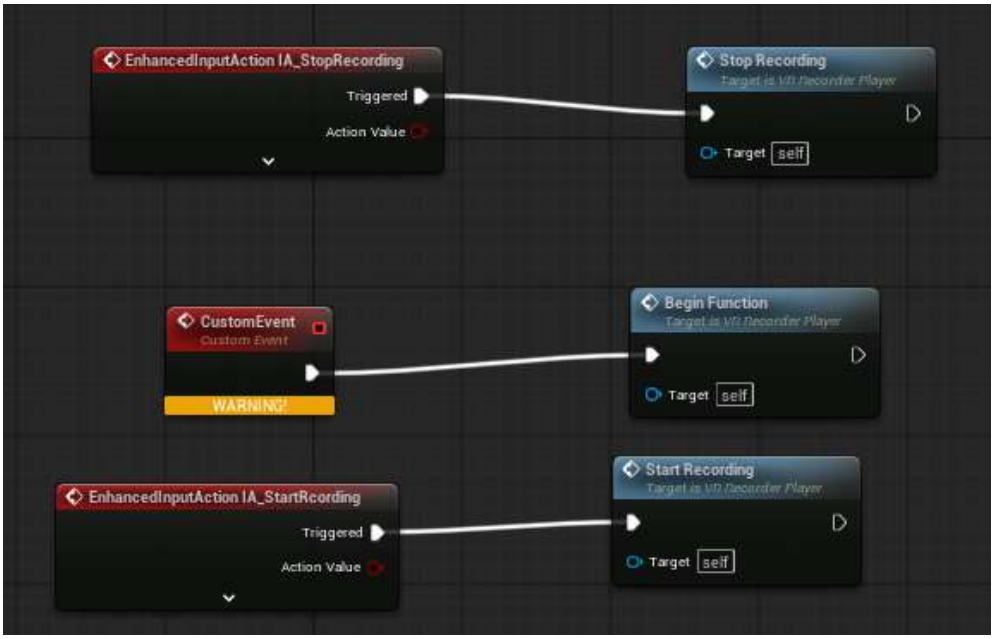


Figura 69: Acciones del Character Recorder

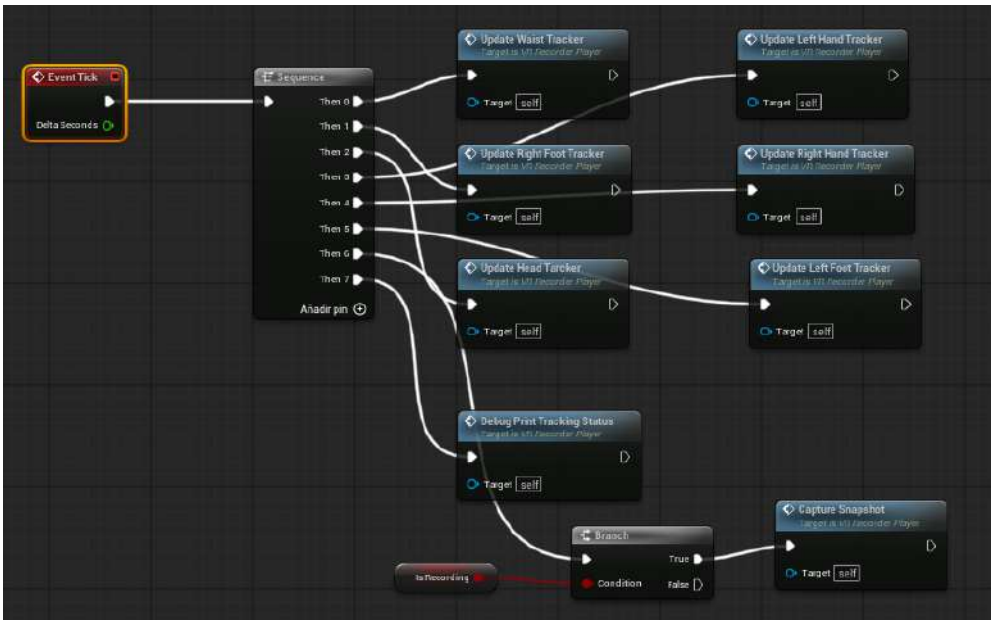


Figura 70: Comparativo Funcional de los Characters

- **Etapa de Pruebas**

  Como resultado de la arquitectura desarrollada durante la etapa de diseño, se obtiene una comparativa funcional entre ambos personajes implementados. Tal como se observa en la Figura 71

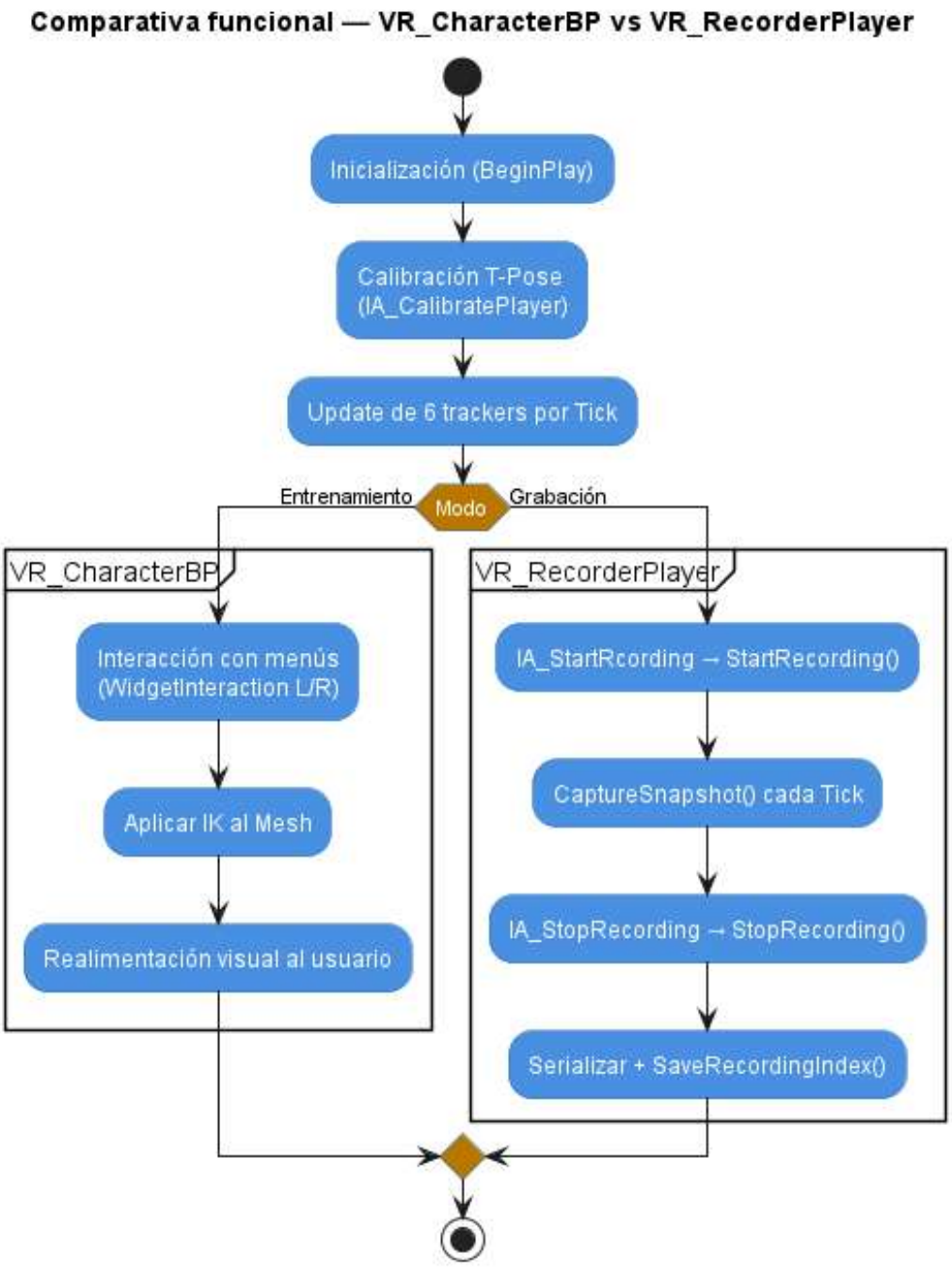


Figura 71: Comparativo Funcional de los Characters

Como parte de las pruebas realizadas, se llevó a cabo la ejecución de la aplicación junto a un instructor de taekwondo, tal como se muestra en la Figura 72 y la Figura 73, donde se realizó la colocación de los trackers correspondientes y posteriormente se procedió con la ejecución del entorno virtual para la captura de movimientos.



Figura 72: Demostración de la ejecución por parte de un Instructor



Figura 73: Demostración de la ejecución por parte de un Instructor

En la Figura 74 se presenta el resultado obtenido durante la ejecución y la sesión realizada con el instructor, donde pueden observarse los movimien-

tos registrados y almacenados en archivos con formato .sav, utilizados para conservar la información generada durante la captura de movimientos.

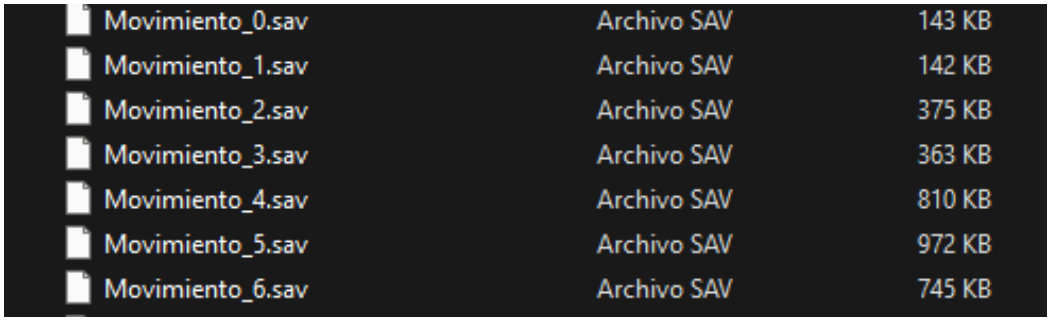


Figura 74: Almacenamiento de los movimientos en formato sav

d) **Iteración 4: Avatar guia y categorias**

- **Etapa de Diseño**

  Para la etapa de diseño, se optó por definir el flujo necesario para llegar hasta la interacción del avatar guía. En este diseño se contempló el uso de los datos obtenidos de la interacción anterior, con el fin de que estos mismos sean utilizados para darle movimiento al avatar guía. El flujo definido puede observarse en la Figura 75 mostrada a continuación

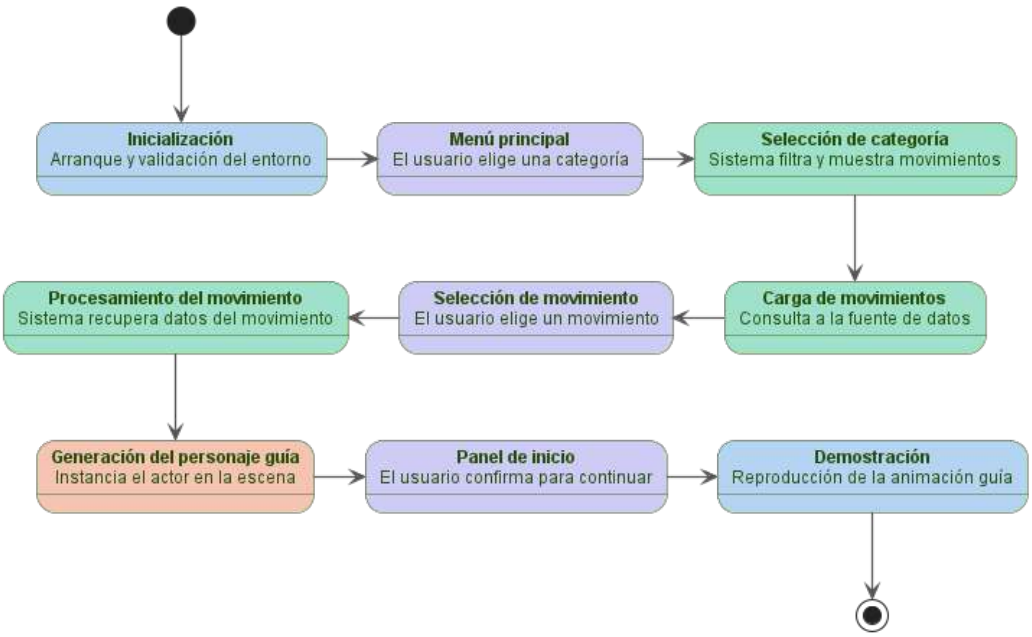


Figura 75: Flujo de la generación movimiento del avatar guía

A su vez, se diseñaron los widgets cuya finalidad era la selección de movimientos según la categoría, ya sea de puño o de patada. Esto puede observarse en las siguientes figuras, siendo la Figura 76 el menú de selección; la

Figura 77, la lista de movimientos acordes a la categoría seleccionada, ya sea patada o puño; la Figura 78, el widget con el cual se daría comienzo a la ejecución del avatar guía; y la Figura 79, el último widget previo a la visualización de resultados.



Figura 76: Widget selección de categoría



Figura 77: Widget de la lista de movimientos correspondiente a puño y patada



Figura 78: Widget “Comenzar”



Figura 79: Widget para visualización de resultados

- **Etapa de Desarrollo**

  En la etapa de desarrollo se diseñó la estructura general de la información para almacenar los datos de cada movimiento, definiendo el tipo de dato y el nombre de cada columna que permitiría identificar y acceder a estos, vease la Figura 80.

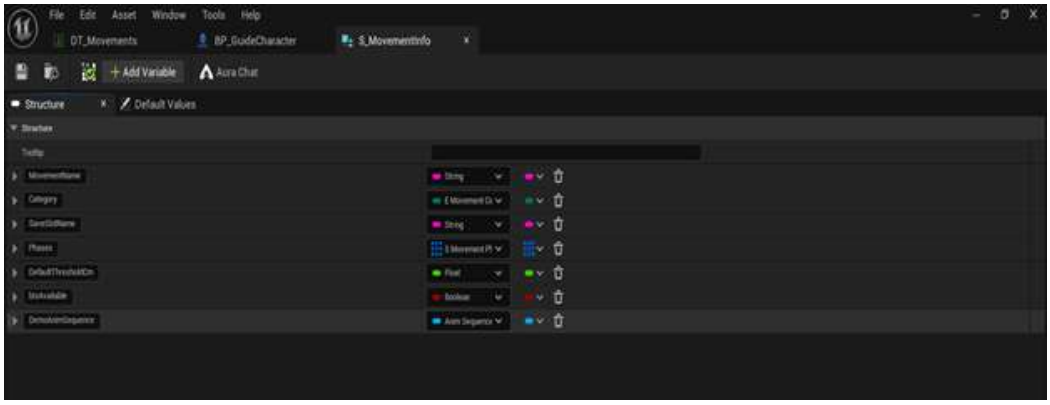


Figura 80: Estructura de la información

Después de haber definido los tipos de datos, se creó la tabla donde se guardarían los movimientos, los cuales se convierten de archivos SAV a datos asociados a secuencias de movimiento dentro del motor gráfico. Estas secuencias son referenciadas dentro de la tabla (Figura 81) para cada movimiento.

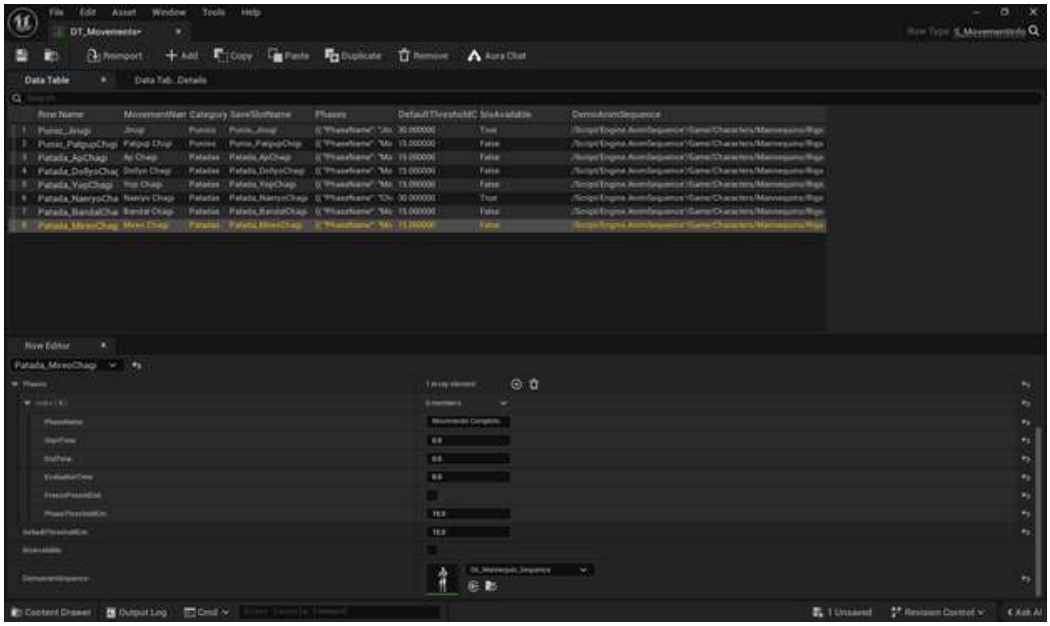


Figura 81: Tabla con la secuencia de los movimientos

El avatar guía igualmente fue diseñado utilizando el mismo modelo del avatar recorder, siendo este el “Mannequin Manny”, tal como se muestra en la Figura 82.

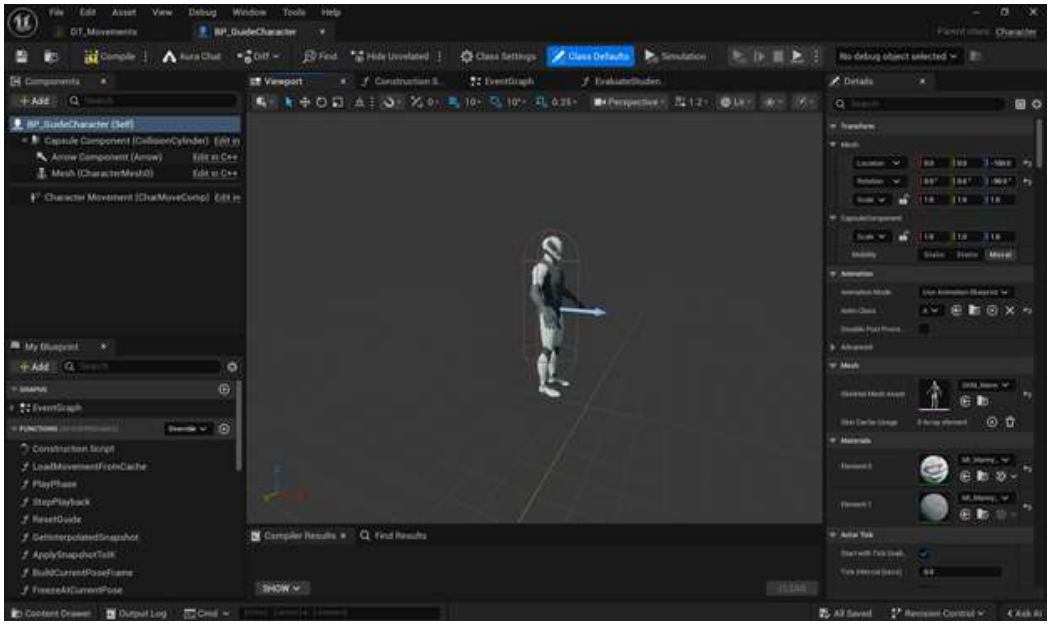


Figura 82: Creación y Configuración del Avatar Guía

Con la misma base se diseñó el AnimBP, el cual se encarga de la animación del character guía con base en las secuencias referenciadas en la tabla para cada movimiento, como se ve en la Figura 83.

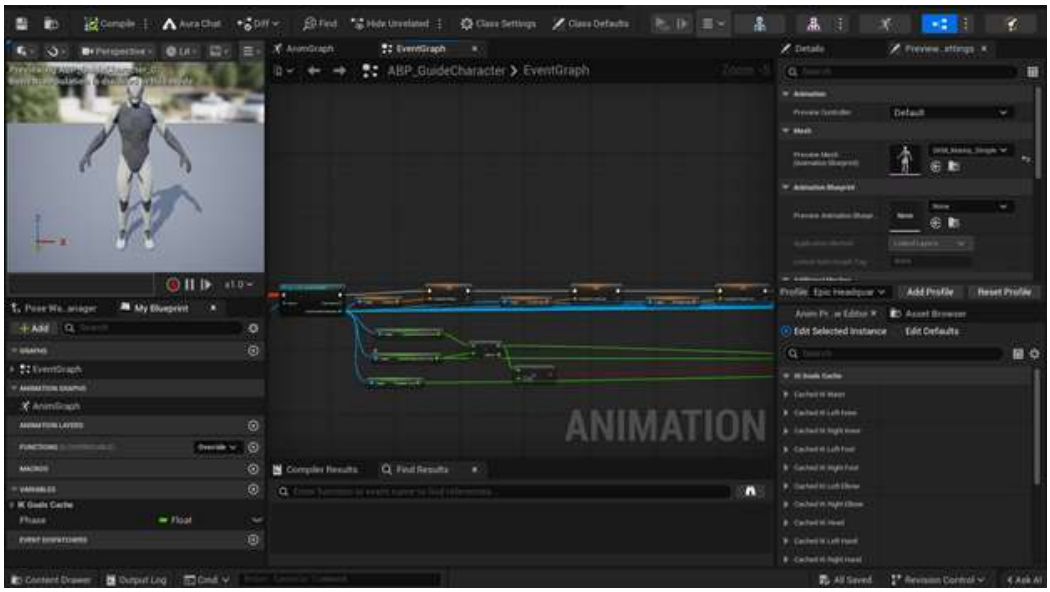


Figura 83: Animation Blueprint del Avatar Guía

Para la selección de los movimientos se crearon los widgets previamente establecidos en la etapa de diseño, tal como se muestra en las Figuras 84, 85, 86 y 87.

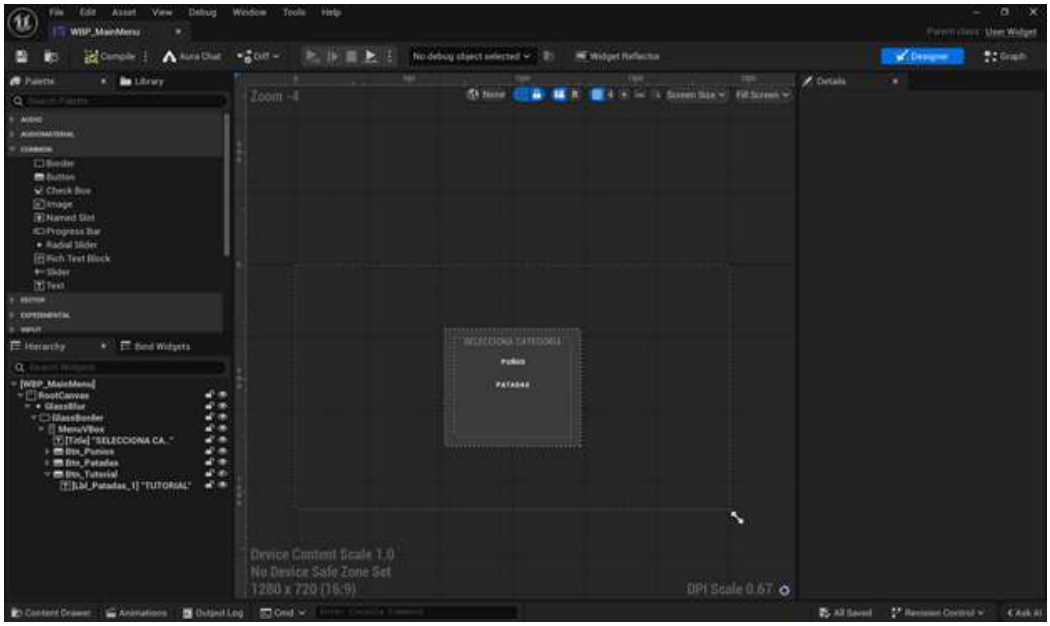


Figura 84: Creación widget de selección

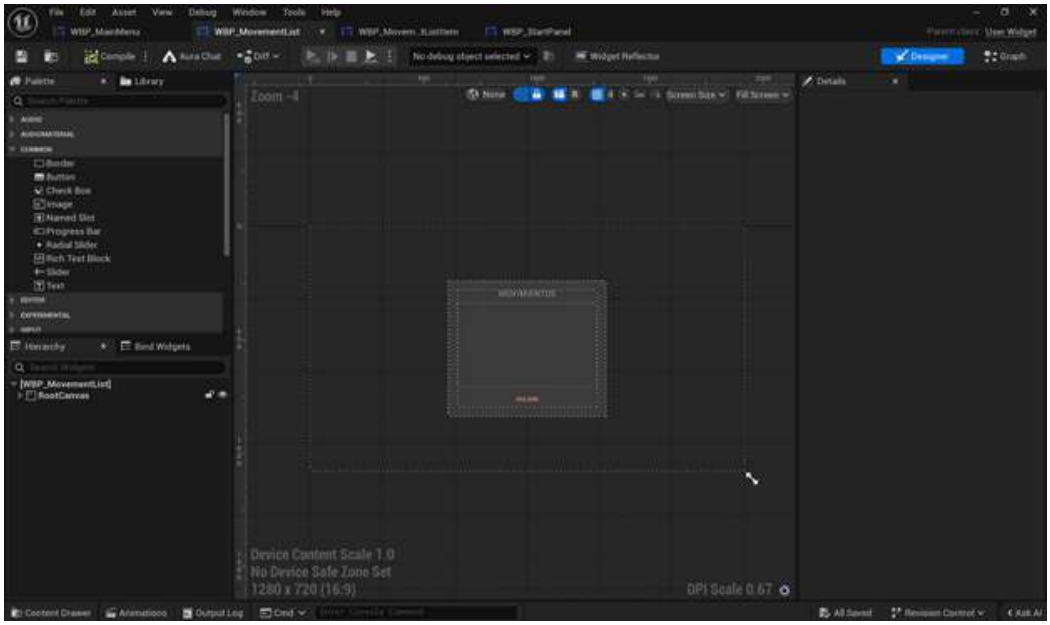


Figura 85: Creación widget movimiento (Lista)

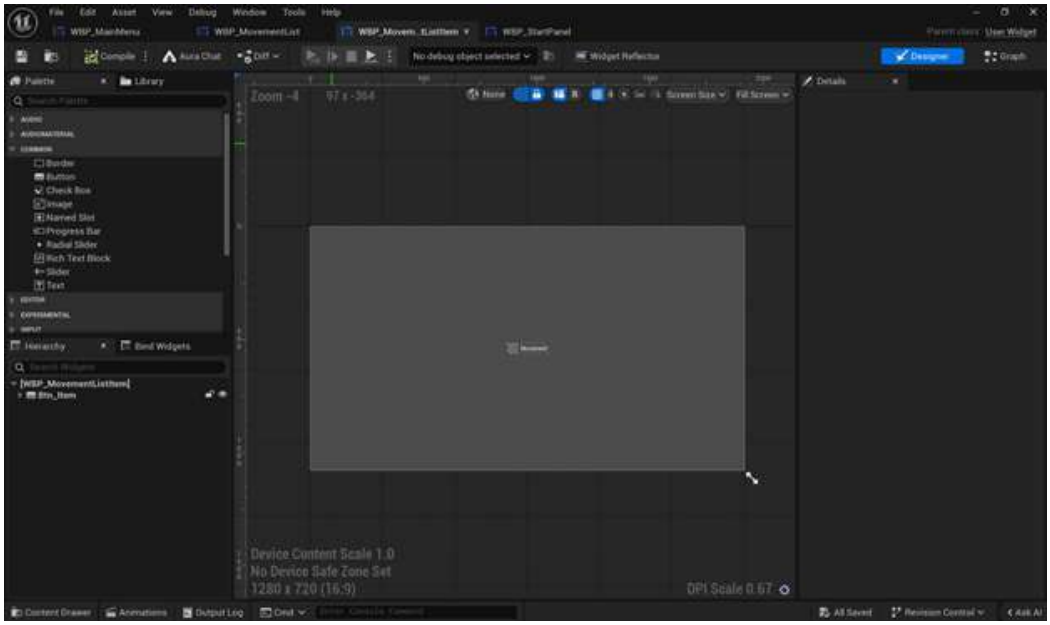


Figura 86: Creación widget movimiento (Item)

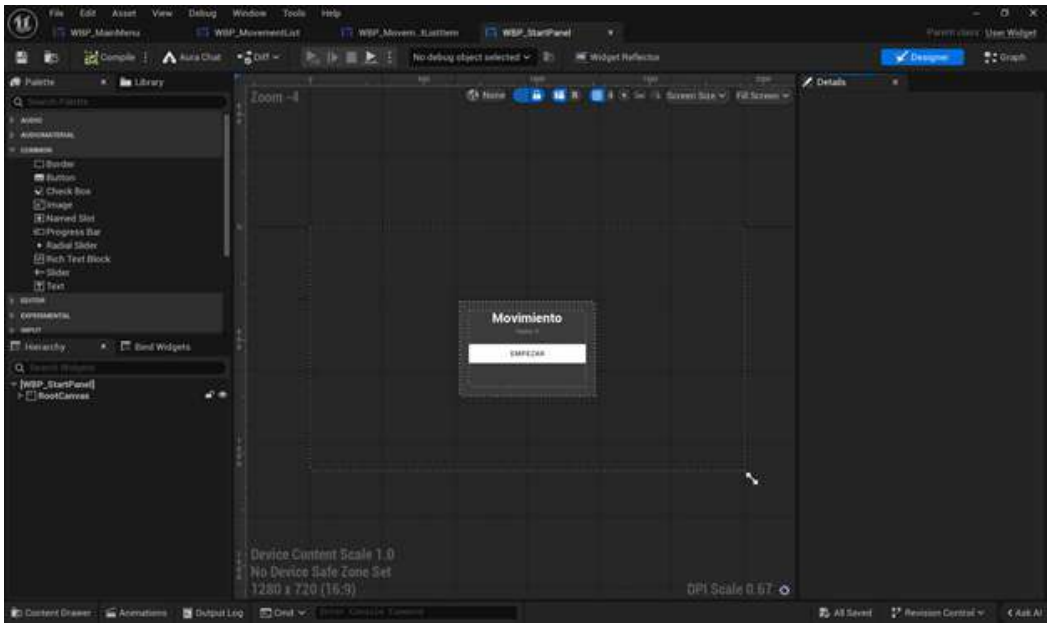


Figura 87: Creación de Widget “Comenzar”

Usando una clase manager se definieron las funciones que permitirían el cambio entre los diferentes widgets de forma ordenada y organizada, como se muestra en la Figura 88.

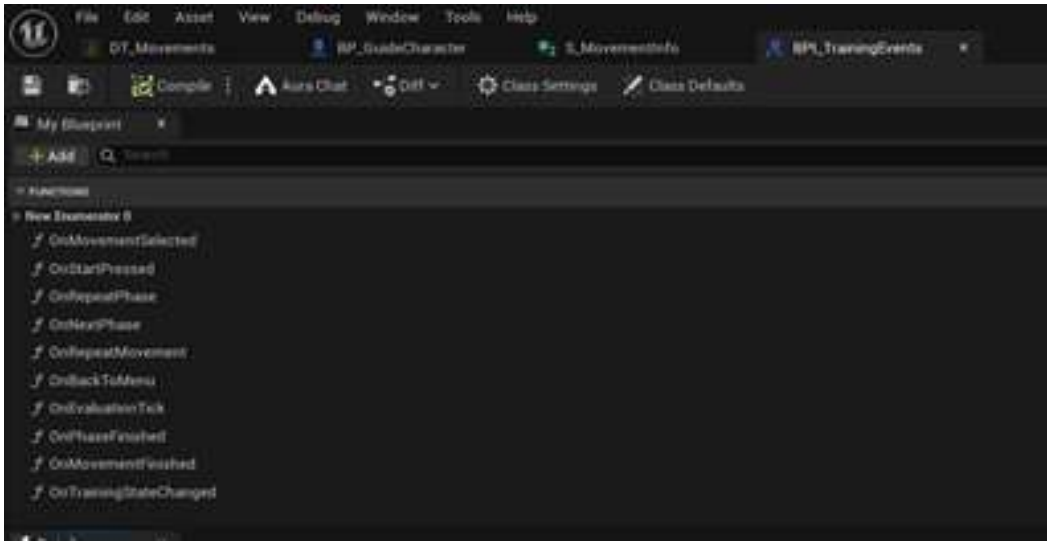


Figura 88: Clase Blueprint Manager

- **Etapa de Pruebas**

  Para la etapa de pruebas se ejecutó el flujo definido, observándose en la Figura 89 el widget implementado dentro del nivel y la capacidad de interacción que se tiene con este. Asimismo, en la Figura 90 se muestra al avatar guía ejecutando el movimiento.

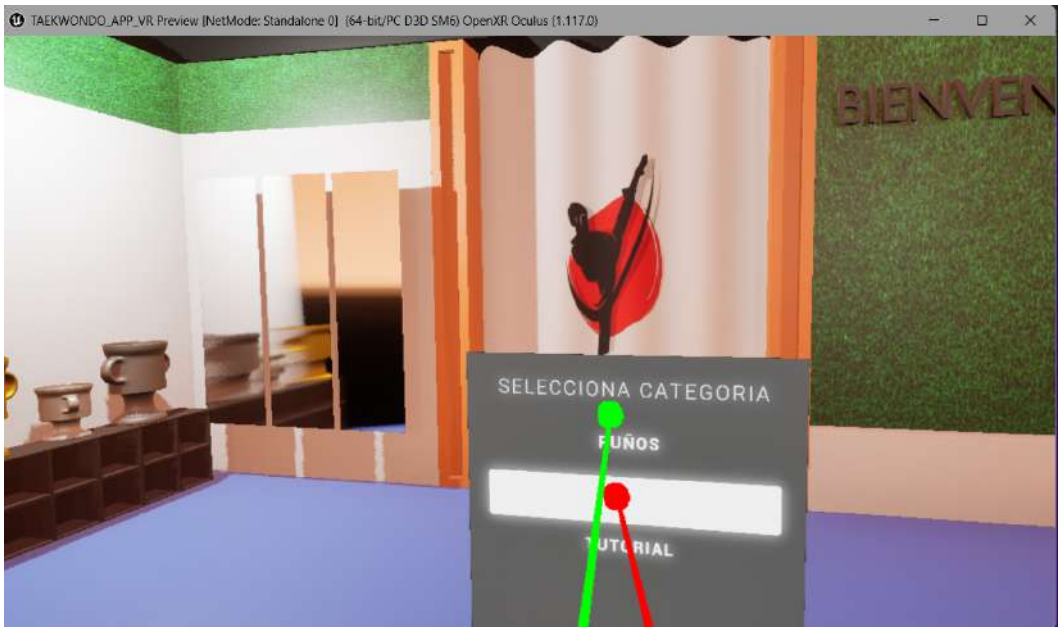


Figura 89: Menú selección de categoría (ejecución)

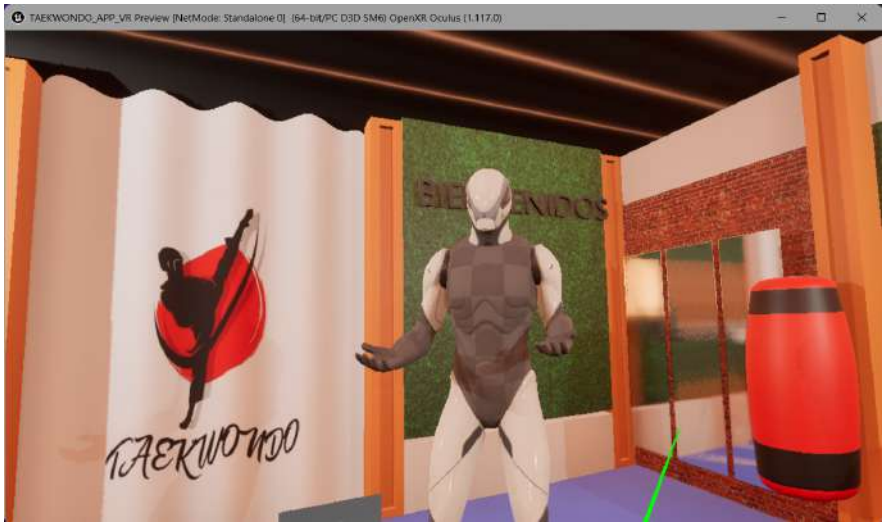


Figura 90: Avatar guia ejecutándose

e) **Iteración 5: Sistema de comparación + retroalimentación + historial**

- **Etapa de Diseño**

  Para la etapa de diseño, en esta iteración se planteó el flujo de comparación, definiendo cómo se grabarían los datos, cómo serían utilizados y de qué manera se realizaría la comparación, así como el lugar donde esta se ejecutaría. El flujo establecido es el visualizado en la Figura 91, donde primero se definió la demostración del movimiento y, por ende, la estructura con la cual se va a comparar.

  Posteriormente, se definió la obtención del movimiento y, seguido de esto, el envío al backend, donde se compara la ejecución realizada con la ejecución base. Como resultado de esta comparación, se obtiene la retroalimentación necesaria. Además, se definió un frontend para la visualización del historial por sesión de cada usuario, tambien mostrada en la Figura 91.

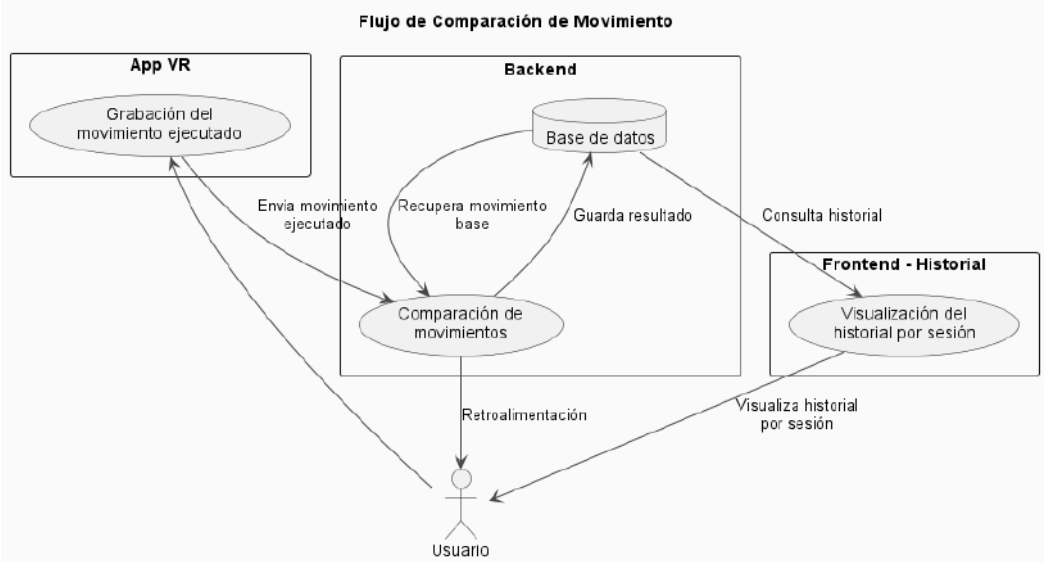


Figura 91: Flujo comparación del movimiento

- **Etapa de Desarrollo**

  La obtención de la información de los trackers fue implementada en una iteración anterior. En esta etapa, como se muestra en la Figura 92, los datos obtenidos son procesados mediante nodos Blueprint, los cuales se encargan de estructurar la información dentro de un string que posteriormente es convertido a formato JSON. Asimismo, la Figura 93 muestra los nodos utilizados para el inicio y detención de la grabación, así como el proceso de guardado del archivo JSON.

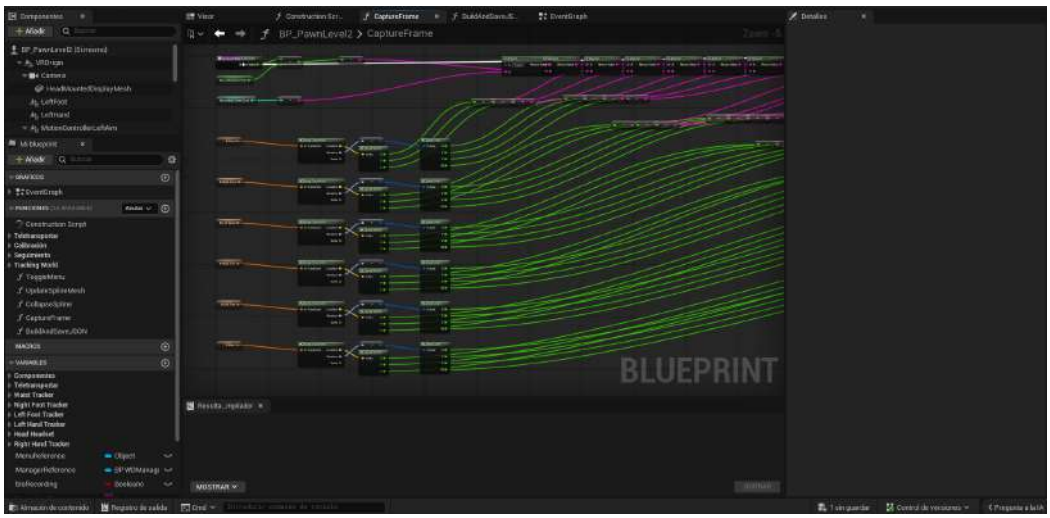


Figura 92: Obtención de la información para json a comparar

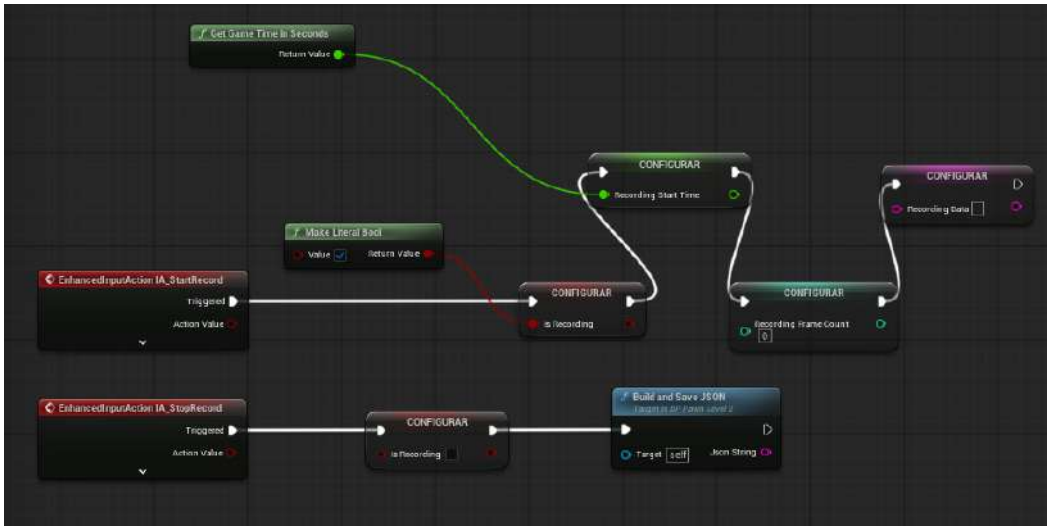


Figura 93: Implementación grabación para json a comparar

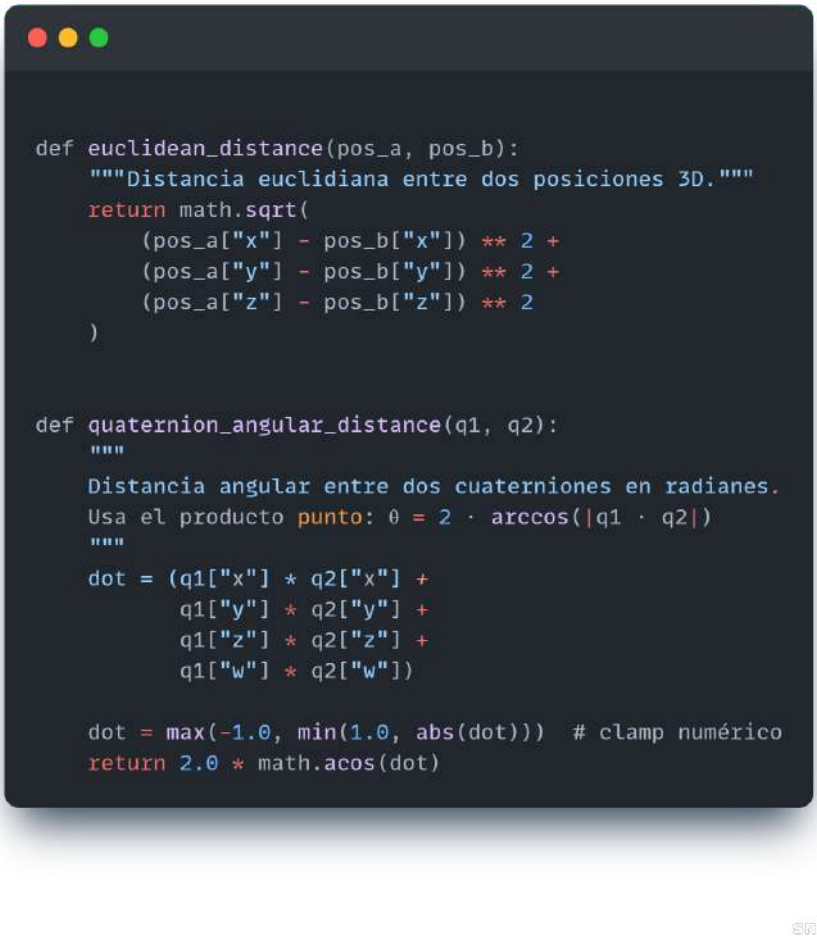
El formato del JSON resultante puede observarse en la Figura 94.


```
{
  "session_id": "string-uuid",
  "user_id": "string",
  "fps": 30,
  "total_frames": 180,
  "duration_sec": 6.0,
  "space": "world",
  "rotation_format": "quat_xyzw",
  "unit_position": "cm",
  "frames": [
    {
      "frame": 0,
      "time_sec": 0.0,
      "trackers": {
        "head":   { "position": {"x":0,"y":0,"z":0}, "rotation_quat": {"x":0,"y":0,"z":0,"w":1} },
        "pelvis": { "position": {...},               "rotation_quat": {...} },
        "hand_r": { "position": {...},               "rotation_quat": {...} },
        "hand_l": { "position": {...},               "rotation_quat": {...} },
        "foot_r": { "position": {...},               "rotation_quat": {...} },
        "foot_l": { "position": {...},               "rotation_quat": {...} }
      }
    }
  ]
}
```


Figura 94: Formato Json Resultante

Posteriormente, se implementó un microservicio en Python destinado a realizar la comparación entre el JSON resultante y el JSON base correspondiente al movimiento que se está ejecutando. La Figura 95 el cálculo aplicado para la distancia euclidiana y el procesamiento de los quaternions.

Para mayor detalle sobre el fundamento matemático de la calibración de quaternions y su mapeo entre el espacio real y virtual, véase el Anexo B. Asimismo, la Figura 96 presenta la aplicación de dicho código para cada frame analizado.



```python
def euclidean_distance(pos_a, pos_b):
    """Distancia euclidiana entre dos posiciones 3D."""
    return math.sqrt(
        (pos_a["x"] - pos_b["x"]) ** 2 +
        (pos_a["y"] - pos_b["y"]) ** 2 +
        (pos_a["z"] - pos_b["z"]) ** 2
    )


def quaternion_angular_distance(q1, q2):
    """
    Distancia angular entre dos cuaterniones en radianes.
    Usa el producto punto: θ = 2 · arccos(|q1 · q2|)
    """
    dot = (q1["x"] * q2["x"] +
           q1["y"] * q2["y"] +
           q1["z"] * q2["z"] +
           q1["w"] * q2["w"])

    dot = max(-1.0, min(1.0, abs(dot)))  # clamp numérico
    return 2.0 * math.acos(dot)
```

snappify.com

Figura 95: Código de comparación (distancias euclidiana y quaternion)



```
def compare_sessions(session_ref, session_test):

    frames_ref  = session_ref["frames"]
    frames_test = session_test["frames"]

    n_frames = min(len(frames_ref), len(frames_test))
    results  = []

    for i in range(n_frames):
        frame_ref  = frames_ref[i]
        frame_test = frames_test[i]

        frame_result = {
            "frame"    : frame_ref["frame"],
            "time_sec" : frame_ref["time_sec"],
            "trackers" : {}
        }

        trackers_ref  = frame_ref["trackers"]
        trackers_test = frame_test["trackers"]

        # Solo compara trackers presentes en ambos frames
        common_trackers = set(trackers_ref.keys()) & set(trackers_test.keys())

        for tracker_name in common_trackers:
            t_ref  = trackers_ref[tracker_name]
            t_test = trackers_test[tracker_name]

            pos_dist = euclidean_distance(
                t_ref["position"],
                t_test["position"]
            )
            rot_dist = quaternion_angular_distance(
                t_ref["rotation_quat"],
                t_test["rotation_quat"]
            )

            frame_result["trackers"][tracker_name] = {
                "pos_dist" : round(pos_dist, 4),
                "rot_dist" : round(rot_dist, 4)
            }

        results.append(frame_result)

    return resultscode here
```

snappify.com

Figura 96: Código de comparación de Jsons

En cuanto a la visualización del historial, se desarrolló una implementación simple utilizando Next.js para la página de historial, la cual consume el servicio de scores, como se muestra en la Figura 97. Dicho frontend puede observarse en las figuras 98, 99 y 100.



```
  async addDetails(
    sessionId: number,
    userId: number,
    dto: AddDetailsDto,
  ): Promise<SessionDetailEntity[]> {
    const session = await this.sessionRepository.findById(sessionId);
    if (!session) throw new NotFoundException('Session not found');
    if (session.userId !== userId)
      throw new ForbiddenException('Not authorized');

    const details = await this.sessionRepository.addDetails(
      sessionId,
      dto.details.map((d) => ({
        movementId: d.movementId,
        movementName: d.movementName,
        executionData: d.executionData ?? null,
        feedback: d.feedback ?? null,
        accuracy: d.accuracy ?? null,
        order: d.order,
      })),
    );
    return SessionDetailMapper.toEntities(details);
  }

  async getHistory(
    userId: number,
    page: number,
    limit: number,
  ): Promise<{ sessions: SessionEntity[]; total: number }> {
    const result = await this.sessionRepository.findByUserIdPaginated(
      userId,
      page,
      limit,
    );
    return {
      sessions: result.sessions.map(SessionMapper.toEntity),
      total: result.total,
    };
  }
}
```

snappify.com

Figura 97: Servicio para historial

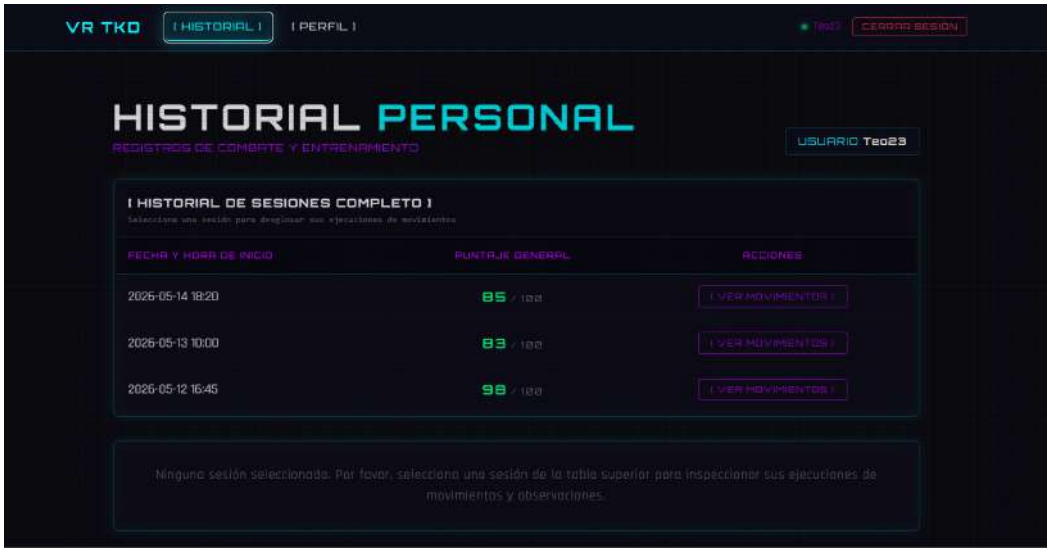


Figura 98: Frontend (Tabla)



Figura 99: Frontend (Movimientos)



Figura 100: Frontend (Detalle)

- **Etapa de Pruebas**

Para la etapa de pruebas se implementó el sistema junto con las funcionalidades definidas durante esta iteración. Asimismo, con el apoyo de la experta en taekwondo, se ejecutó la aplicación con el fin de validar el funcionamiento del proceso de comparación de movimientos y la interacción general del sistema. En las Figuras 101, 102 y 103 se observa a la usuaria realizando la ejecución de los movimientos dentro de la aplicación durante las distintas etapas del flujo implementado.



Figura 101: Ejecución del movimiento pose inicial



Figura 102: Ejecución del movimiento primera parte



Figura 103: Ejecución del movimiento segunda parte

Por otra parte, en la Figura 104 se puede observar la ejecución final del avatar guía realizando el movimiento correspondiente dentro del entorno virtual. Finalmente, en la Figura 105 se presenta la culminación de la ejecución del proceso implementado.

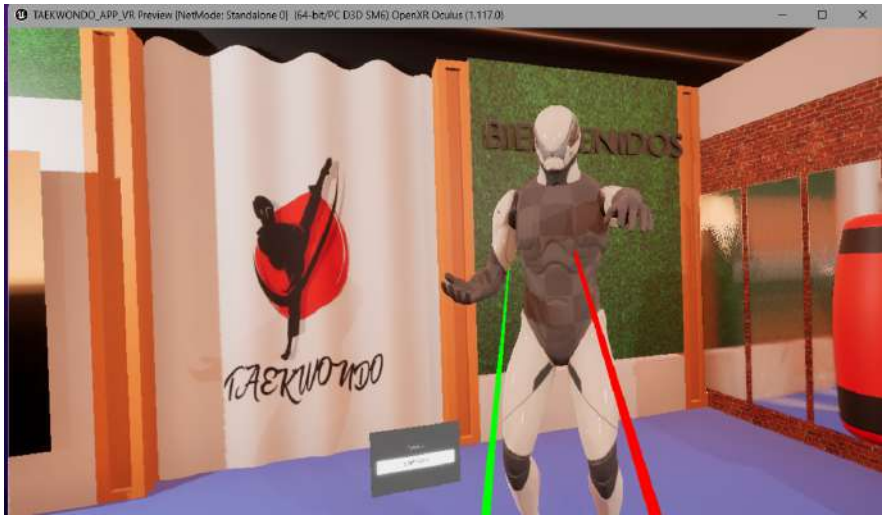


Figura 104: Avatar guía ejecutando el movimiento de puño (Jirugi)

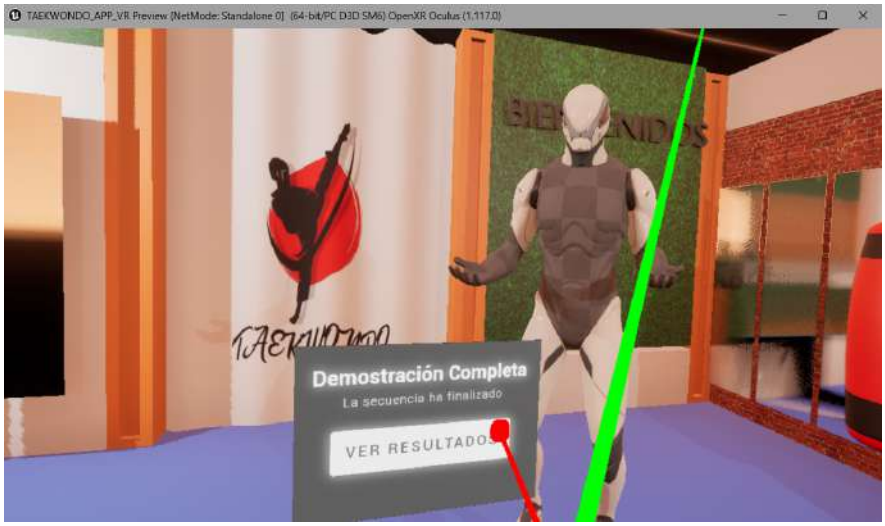


Figura 105: Ejecución completa

Adicionalmente, con el fin de evaluar la estabilidad y el comportamiento técnico de la arquitectura, se llevaron a cabo pruebas de carga orientadas al backend desplegado. Asimismo, como un esquema secundario para aumentar la transparencia del algoritmo, se documentaron los archivos de log y trazas generados por el microservicio de comparación. Los resultados detallados del rendimiento y el comportamiento de estas trazas de ejecución se presentan en el Anexo C y el Anexo D, respectivamente.

3.7 Resultados

En la presente sección se exponen los resultados obtenidos durante el desarrollo del proyecto, organizados conforme a cada uno de los objetivos planteados en la investigación.

3.7.1 Acorde al Objetivo Especifico 1

Como parte del cumplimiento de este objetivo, se realizó una revisión bibliográfica sobre fundamentos técnicos de Taekwondo, biomecánica deportiva, realidad virtual y sistemas de captura de movimiento.

A partir de la información recopilada, se identificaron elementos técnicos y biomecánicos relacionados con la ejecución de movimientos, equilibrio corporal, coordinación motriz y análisis de ángulos articulares, los cuales fueron considerados para la evaluación de técnicas dentro del entorno de realidad virtual mediante Full Body Tracking (FBT).

La revisión bibliográfica estuvo conformada por artículos científicos, libros y documentación especializada, permitiendo recopilar información actualizada para el desarrollo del sistema.

Tabla 40: Resumen de revisión bibliográfica

Tipo de Fuente	**Cantidad**	**Antigüedad <5 años**	**Antigüedad ≥ 5 años**
Artículos Científicos	13	11	2
Libros	7	3	4
Páginas Especializadas	2	2	0
Total	**22**	**16**	**6**

Como resultado del análisis realizado, se recopilaron y clasificaron las principales técnicas fundamentales utilizadas dentro de la disciplina, las cuales fueron consideradas como referencia para el diseño técnico del sistema de evaluación implementado en el entorno de realidad virtual.

Tabla 41: Clasificación de técnicas fundamentales recopiladas

Categoría	**Cantidad**	**Técnicas identificadas**
Golpes de puño	2	Jirugi y Palgup Chigi
Patadas	6	Ap Chagi, Dollyo Chagi, Yop Chagi, Naeryo Chagi, Bandal Chagi y Mireo Chagi
Total	**8**	Técnicas fundamentales analizadas

3.7.2 Acorde al Objetivo Especifico 2

Como resultado del análisis comparativo realizado previamente, se determinaron las metodologías y herramientas tecnológicas más adecuadas para el desarrollo de la aplicación de realidad virtual, considerando criterios relacionados con rendimiento, compatibilidad, escalabilidad y adaptabilidad al entorno VR.

Con base en las matrices de evaluación aplicadas, se obtuvo un consolidado cuantitativo de las alternativas seleccionadas. Adicionalmente, se empleó el cálculo del Margen de Ventaja Técnica (M_V) para determinar la diferencia porcentual entre la opción seleccionada y su competidor inmediato.

$$M_V = \left(\frac{P_G - P_S}{P_G} \right) \times 100 \tag{III.2}$$

Donde:

- M_V: Margen de ventaja técnica expresado en porcentaje.
- P_G: Puntaje de la opción seleccionada.
- P_S: Puntaje de la segunda alternativa mejor valorada.

Tabla 42: Consolidado cuantitativo de selección de componentes

Categoría de evaluación	**Opción seleccionada**	P_G	**Segunda alternativa**	P_S	M_V
Metodología de desarrollo	Desarrollo IID	4.75	Prototipado Evolutivo	3.45	27.37 %
Motor gráfico	Unreal Engine	4.65	Unity	4.15	10.75 %
Tecnología de Tracking (FBT)	HTC Vive 3.0	4.70	Tundra Tracker	4.55	3.19 %
Herramienta de modelado 3D	Blender	4.50	Maya	3.95	12.22 %
Framework Backend	NestJS	4.80	Spring Boot	4.45	7.29 %
Sistema de base de datos	PostgreSQL	5.00	MariaDB	4.40	12.00 %
Promedio General	**Idoneidad del Stack**	**4.73**	**Alternativas Secundarias**	**4.16**	**12.08 %**

Los resultados obtenidos evidencian que la metodología de desarrollo y el stack tecnológico seleccionados alcanzaron un promedio general de idoneidad de **4.73/5.00**, reflejando una adecuada adaptación a los requerimientos técnicos del entorno de realidad virtual.

3.7.3 Acorde al Objetivo Especifico 3

Como resultado de la última iteración y del desarrollo del sistema, se obtuvo una ponderación total correspondiente a la evaluación de los criterios definidos en las diferentes dimensiones analizadas. Dicha evaluación se realizó mediante juicio de expertos, aplicado a especialistas en Taekwondo con experiencia tanto en la enseñanza como en la práctica de esta disciplina.

Para la evaluación se utilizó una escala Likert de 1 a 5, donde 1 representa “Deficiente” y 5 “Excelente”.

Tabla 43: Evaluación por juicio de expertos

Dim.	Dimensión	Criterio de evaluación	E1	E2	E3	Prom.
D1	Usabilidad del sistema	Facilidad de uso del entorno virtual.	4	4	3	3.67
		Claridad de navegación e interacción.	4	3	4	3.67
		Comprensión de funciones del sistema.	5	4	3	4.00
D2	Funcionalidad del trackeo	Eficiencia en el registro de movimientos.	4	3	4	3.67
		Estabilidad del trackeo corporal.	3	2	4	3.00
		Correspondencia entre movimiento real y virtual.	4	3	3	3.33
D3	Retroalimentación técnica	Claridad de la retroalimentación generada.	5	4	4	4.33
		Comprensión de errores detectados.	4	4	3	3.67
		Utilidad para corregir técnicas.	5	4	4	4.33
D4	Avatar guía	Claridad visual del avatar.	5	4	4	4.33
		Coherencia de movimientos del avatar.	4	4	3	3.67
		Utilidad del avatar como apoyo visual.	5	5	4	4.67
D5	Funcionamiento general	Fluidez general del entorno VR.	4	3	3	3.33
		Integración entre evaluación y retroalimentación.	4	4	4	4.00
		Estabilidad del sistema durante la interacción.	3	2	4	3.00
Puntuación total promedio						**3.78**
Nivel de valoración						**Bueno**

Puntuación promedio obtenida: **3.78**.

Nivel de valoración: **Bueno**.

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

Se concluye que el proyecto desarrollado se articula con el objetivo del proyecto de investigación "Sistema Innovador de Entrenamiento basado en Realidad Virtual e Inteligencia Artificial Generativa como factor para el Rendimiento Técnico, Psicológico e Intercultural en Estudiantes Universitarios de la Zona 3", aprobado mediante Resolución Nro. UTA-CONIN-2025-0405-R, debido a que aporta un componente tecnológico orientado al rendimiento técnico mediante realidad virtual. Aunque esta tesis se centró en la evaluación de fundamentos técnicos de Taekwondo, sus resultados contribuyen a la validación progresiva de un sistema de entrenamiento holístico, al integrar captura corporal, comparación de movimientos, avatar guía y retroalimentación como recursos aplicables al entrenamiento deportivo asistido por tecnología.

En relación con el objetivo general, se concluye que la aplicación de realidad virtual desarrollada constituye una herramienta de apoyo pertinente para la evaluación de fundamentos técnicos de Taekwondo, ya que complementa la observación tradicional del instructor mediante un entorno interactivo de práctica y revisión. La integración de seguimiento corporal, avatar guía, comparación de movimientos y retroalimentación permitió estructurar una solución orientada a fortalecer el proceso de enseñanza y corrección técnica dentro de la Academia Villalba's Tigers, sin reemplazar el criterio del entrenador.

En relación con el primer objetivo específico, se concluye que la investigación de los fundamentos técnicos permitió establecer una base teórica y técnica adecuada para orientar el diseño del sistema. La clasificación de **8 técnicas fundamentales**, conformadas por **2 técnicas de puño** y **6 técnicas de patada**, permitió organizar los contenidos de entrenamiento y seleccionar movimientos de referencia para ser representados dentro del entorno virtual como apoyo al aprendizaje y a la revisión de la ejecución.

En relación con el segundo objetivo específico, se concluye que la comparación de metodologías y herramientas permitió seleccionar una estructura tecnológica coherente con las necesidades del proyecto. El stack conformado por Desarrollo IID, Unreal Engine, HTC Vive 3.0, Blender, NestJS y PostgreSQL obtuvo una idoneidad general de **4.73/5.00** y un margen de ventaja técnica promedio de **12.08 %**, lo que respalda su adecuación para el desarrollo de una aplicación VR con captura corporal, gestión de datos, escalabilidad y retroalimentación técnica.

En relación con el tercer objetivo específico, se concluye que la implementación de la aplicación permitió materializar una solución funcional para la evaluación de fundamentos técnicos de Taekwondo. El sistema integró autenticación, selección de técnicas, avatar guía, captura corporal mediante Full Body Tracking, comparación de movimientos, retroalimentación, cálculo de precisión e historial de desempeño. La valoración por juicio de expertos alcanzó **3.78/5.00**, equivalente a un nivel **Bueno**, destacándose la utilidad del avatar con **4.67**, la claridad de la retroalimentación con **4.33** y la utilidad para corregir técnicas con **4.33**.

Finalmente, se concluye que las encuestas y entrevistas respaldaron la pertinencia de la propuesta al evidenciar la necesidad de una herramienta que complemente la enseñanza presencial y apoye la evaluación de técnicas básicas específicas mediante la comparación del movimiento ejecutado y la retroalimentación posterior. Sin embargo, la estabilidad del trackeo corporal con **3.00**, la estabilidad del sistema con **3.00** y la fluidez del entorno VR con **3.33** permiten identificar oportunidades de mejora relacionadas con precisión, estabilidad y continuidad de la experiencia de evaluación.

4.2 Recomendaciones

Se recomienda continuar fortaleciendo la aplicación de realidad virtual mediante nuevas iteraciones de desarrollo, priorizando los aspectos que obtuvieron menor valoración en el juicio de expertos. En particular, se debe mejorar la estabilidad del trackeo corporal, valorada con **3.00**, la estabilidad del sistema durante la interacción, también valorada con **3.00**, y la fluidez general del entorno VR, valorada con **3.33**. Estos resultados muestran que, aunque la aplicación alcanzó una valoración general de **3.78/5.00**, todavía existen aspectos técnicos que pueden optimizarse para mejorar la precisión y continuidad de la evaluación.

Para futuras versiones de aplicaciones VR orientadas a la evaluación de movimientos corporales completos, se recomienda considerar que el uso exclusivo del sistema Oculus no resulta suficiente para capturar de forma completa técnicas de Taekwondo que involucran piernas, brazos, cadera y desplazamientos. Las gafas y controladores permiten registrar principalmente cabeza y manos, pero para evaluar fundamentos técnicos como patadas y golpes se requiere hardware adicional, especialmente trackers externos ubicados en segmentos corporales clave. Por esta razón, se recomienda contemplar desde el diseño inicial el uso de Full Body Tracking mediante dispositivos adicionales.

Se recomienda disponer de un área física amplia y despejada para el uso de la aplicación, considerando como referencia mínima un espacio de **3 m x 3 m**. Este espacio permite reducir interferencias durante la ejecución de movimientos, disminuir riesgos de colisión con objetos del entorno y evitar errores de detección ocasionados por restricciones de movilidad. En técnicas de patada como Ap Chagi, Dollyo Chagi, Yop Chagi, Naeryo Chagi, Bandal Chagi y Mireo Chagi, un área reducida puede limitar la extensión de la pierna, afectar el equilibrio del usuario y alterar la captura correcta del movimiento.

Para reducir problemas de compatibilidad y simplificar la configuración, se recomienda utilizar, cuando sea posible, dispositivos pertenecientes a un mismo ecosistema o marca. Es decir, emplear headset, controladores izquierdo y derecho, estaciones base y trackers compatibles entre sí. Esta decisión puede disminuir conflictos de sincronización, reducir el tiempo de calibración y mejorar la estabilidad del seguimiento corporal, especialmente en aplicaciones que requieren capturar movimientos de cuerpo completo en tiempo real.

Se recomienda mantener la aplicación como una herramienta complementaria al entrenamiento presencial y no como un reemplazo del instructor. Las entrevistas realizadas a **3 instructores** evidenciaron que la corrección técnica requiere explicación, observación y acompañamiento pedagógico, por lo que la realidad virtual debe emplearse como apoyo para reforzar la práctica autónoma, registrar el progreso y proporcionar retroalimentación sobre errores detectados. De esta manera, el instructor conserva su rol principal dentro del proceso formativo.

BIBLIOGRAFÍA

[1] S. Pastel et al., "Training in virtual reality enables learning of a complex sports movement," *Virtual Reality*, vol. 26, n.º 2, págs. 523-540, 2022. DOI: 10.1007/s10055-022-00679-7

[2] Y. Pu e Y. Yang, "Application of virtual reality technology in martial arts situational teaching," *Mobile Information Systems*, vol. 2022, págs. 1-13, 2022. DOI: 10.1155/2022/6497310

[3] B. Liu y D. Tian, "Application of VR technology in sports training in colleges and universities," *Applied Mathematics and Nonlinear Sciences*, vol. 9, n.º 1, págs. 1-18, 2024. DOI: 10.2478/amns-2024-0330

[4] F. Yang y Z. Wang, "An intelligent taekwondo coaching system based on augmented reality technology with real-time feedback mechanisms," *Scientific Reports*, vol. 15, 2025. DOI: 10.1038/s41598-025-24608-1

[5] H. Chen, Y. Wang y W. Liang, "VCoach: Enabling personalized boxing training in virtual reality," en *Proc. IEEE Conf. Virtual Reality and 3D User Interfaces Abstracts and Workshops (VRW)*, Christchurch, New Zealand, 2022, págs. 546-547. DOI: 10.1109/VRW55335.2022.00124

[6] M. A. Ghazi, D. E. M. Ibrahim Abdeen y M. H. Kzar Altaie, "Enhancing karate skill performance through virtual visuals and artificial intelligence techniques," *Scientific Journal of Sport and Performance*, vol. 4, n.º 1, págs. 31-39, 2025. DOI: 0000-0001-8341-6842

[7] J. Lee y H. Jung, "TUHAD: Taekwondo unit technique human action dataset with key frame-based CNN action recognition," *Sensors*, vol. 20, n.º 17, pág. 4871, 2020. DOI: 10.3390/s20174871

[8] J. Zhong y J. Xu, "Taekwondo Action Design Combining CAD and Virtual Reality Technology," *Computer-Aided Design Applications*, vol. 19, n.º S5, págs. 132-142, 2022. DOI: 10.14733/cadaps.2022.S5.132-142

[9] Y. Li et al., "Combat sports in virtual reality for rehabilitation and disability adaptation: a mini-review," *Frontiers in Public Health*, vol. 13, 2025. DOI: 10.3389/fpubh.2025.1557338

[10] Y. Song, J. Liu, F. Cao y H. Hu, "A feasibility study on the popularization of Tai Chi with virtual reality technology," en *Proc. 2021 Int. Conf. Information Technology and Contemporary Sports (TCS)*, Guangzhou, China, 2021, págs. 1-4. DOI: 10.1109/TCS52929.2021.00116

[11] Z. Xie, "Research on the Application of VR Technology in Taekwondo Teaching," en *Proc. Int. Conf. E-Learning, E-Education, and Online Training (ICEKIM)*, Springer, 2023, págs. 1855-1860. DOI: 10.2991/978-94-6463-172-2_205

[12] D. Ma, "Application of virtual reality technology assisted training in college taekwondo training," *Frontiers in Sport Research*, vol. 5, n.º 7, págs. 12-18, 2023. DOI: 10.25236/FSR.2023.050703

[13] M.-C. Shin, D.-H. Lee, A. Chung e Y.-W. Kang, "When Taekwondo Meets Artificial Intelligence: The Development of Taekwondo," *Applied Sciences*, vol. 14, n.º 7, pág. 3093, 2024. DOI: 10.3390/app14073093

[14] E. Malla-Salazar y D. G. García-Herrera, "Análisis de los Fundamentos Técnicos del Taekwondo Modalidad Poomsae en la Etapa de Iniciación," *Polo del Conocimiento*, vol. 7, n.º 8, 2022. DOI: 10.23857/pc.v7i9.4607

[15] S. Shaw, *Taekwondo Basics*. Boston, MA, USA: Tuttle Publishing, 2003, ISBN: 0804834849.

[16] D. Parajuli, *Fundamentals of Taekwondo: The Physics Behind Taekwondo*. Kathmandu, Nepal: Tribhuvan University, 2022.

[17] Y. H. Park, *Tae Kwon Do: The Ultimate Reference Guide to the World's Most Popular Martial Art*, 3rd. New York, NY, USA: Skyhorse Publishing, 2014, ISBN: 978-1626364257.

[18] Y. Yao, "Application of Sports Biomechanics in the Technical Analysis of Taekwondo Kicking," *Revista Brasileira de Medicina do Esporte*, vol. 27, págs. 100-104, 2021. DOI: 1517-8692202329012022_0379

[19] Hanra Taekwondo. "WT Poomsae: Meaning and Movements." Accedido: 17 de mayo de 2026. dirección: https://tkdhanra.com/?page_id=987

[20] Blue Dragon Taekwondo. "Chigi (Striking) and Kicking Techniques." Accedido: 17 de mayo de 2026. dirección: https://www.bluedragontkd.net/learn-taekwondo/chigi-kicking/

[21] Blue Dragon Taekwondo. "Chagi (Kicking) Techniques in Taekwondo." Accedido: 17 de mayo de 2026. dirección: https://www.bluedragontkd.net/learn-taekwondo/chagi-kicking/

[22] A. Manrique. “Tu blog en un clic.” Accedido: 17 de mayo de 2026. dirección: https://manriquearie l601.wixsite.com/misitio/post/tu-blog-en-un-clic

[23] R. S. Pressman y B. R. Maxim, *Software Engineering: A Practitioner’s Approach*, 9th. New York, NY: McGraw-Hill Education, 2020, ISBN: 9781260235159.

[24] J. J. LaViola Jr., E. Kruijff, R. P. McMahan, D. Bowman e I. P. Poupyrev, *3D User Interfaces: Theory and Practice*, 2nd. Boston, MA, USA: Addison-Wesley Professional, 2017, ISBN: 9780134034324.

[25] B. Boehm, “A spiral model of software development and enhancement,” *Computer*, vol. 21, n.º 5, págs. 61-72, mayo de 1988. DOI: 10.1109/2.59

[26] I. Sommerville, *Software Engineering*, 10th. Boston, MA: Pearson, 2016, ISBN: 9780133943030.

[27] D. Schmalstieg y T. Höllerer, *Augmented Reality: Principles and Practice*. Boston, MA, USA: Addison-Wesley Professional, 2016, ISBN: 9780321887382.

[28] C. Anthes, R. J. García-Hernández, M. Wiedemann y D. Kranzlmüller, “State of the Art of Virtual Reality Technologies,” en *2016 IEEE Aerospace Conference*, Big Sky, MT, USA, 2016, págs. 1-19. DOI: 10.1109/AERO.2016.7500674

[29] T. Akenine-Möller, E. Haines y N. Hoffman, *Real-Time Rendering*, 4th. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2018, ISBN: 9781138627000.

[30] J. Gregory, *Game Engine Architecture*, 3rd. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2018, ISBN: 9781138035454.

[31] S. M. LaValle, *Virtual Reality*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2017, ISBN: 9781107193932.

[32] E. S. Raymond, *The Cathedral and the Bazaar: Musings on Linux and Open Source*. Sebastopol, CA, USA: O’Reilly Media, 2001, ISBN: 9780596001087.

[33] J. P. Rolland, Y. Baillot y A. A. Goon, “A Survey of Tracking Technology for Virtual Environments,” en *Fundamentals of Wearables and Augmented Reality*, 2nd, vol. 1, CRC Press, 2015, págs. 67-112. DOI: 10.1201/b18703-7

[34] S. S. Bukhari et al., “Evaluation of Virtual Reality Software Development Kits for Cross-Platform VR Applications,” *IEEE Access*, vol. 9, págs. 147 285-147 302, 2021. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3123864

[35] J. J. Cummings y J. N. Bailenson, “How Immersive Is Enough? A Meta-Analysis of the Effect of Immersive Technology on User Presence,” *Media Psychology*, vol. 19, n.º 2, págs. 272-309, 2016. DOI: 10.1080/15213269.2015.1015740

[36] M. Niehorster et al., "The Accuracy and Precision of the HTC Vive Holographic and Light-House Tracking Systems," *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, vol. 23, n.º 11, págs. 2372-2381, 2017. DOI: 10.1109/TVCG.2017.2737037

[37] A. van der Vlist, "Durability and Lifecycle Assessment of Wearable VR Motion Trackers," *Journal of Engineering Design*, vol. 32, n.º 4, págs. 415-430, 2021. DOI: 10.1080/09544828.2021.1884242

[38] R. T. Azuma, "A Survey of Augmented Reality," *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, vol. 6, n.º 4, págs. 355-385, 1997. DOI: 10.1162/pres.1997.6.4.355

[39] G. S. Kumar y V. Singh, "Interoperability challenges in 3D asset pipelines for VR/AR," *Computer-Aided Design and Applications*, vol. 18, n.º 4, págs. 780-795, 2021. DOI: 10.14733/cadaps.2021.780-795

[40] L. J. Shuman, "The pedagogy of 3D modeling software," *Journal of Engineering Education*, vol. 112, n.º 3, págs. 210-224, 2023. DOI: 10.1002/jee.20524

[41] R. Parent, *Computer Animation: Algorithms and Techniques*. Amsterdam, Netherlands: Morgan Kaufmann, 2012, ISBN: 9780124158429.

[42] S. M. LaValle, *Virtual Reality*. Cambridge University Press, 2023.

[43] M. Coleman, "Open Source vs. Proprietary Software in Academic Research," *Science & Technology Studies*, vol. 35, n.º 2, págs. 88-105, 2022. DOI: 10.23987/sts.110255

[44] B. Karis, "Real Shading in Unreal Engine 4," en *ACM SIGGRAPH 2013 Courses*, ACM, 2013. DOI: 10.1145/2504435.2504457

[45] D. Wolf, *Advanced 3D Production Workflows*. New York, NY, USA: Routledge, 2021, ISBN: 9780367503741.

[46] M. Fowler, *Patterns of Enterprise Application Architecture*. Addison-Wesley, 2002, ISBN: 9780321127426.

[47] B. Vennam, "Microservices scalability: A systematic review," *IEEE Software*, vol. 36, n.º 5, págs. 22-29, sep. de 2019. DOI: 10.1109/MS.2019.2904074

[48] R. Elmasri y S. B. Navathe, *Fundamentals of Database Systems*, 7th. Harlow, England: Pearson Education, 2017, ISBN: 9780133970777.

[49] J. Nielsen, "Usability of software documentation," *IEEE Transactions on Professional Communication*, vol. 45, n.º 4, págs. 253-261, dic. de 2002. DOI: 10.1109/TPC.2002.805167

[50] P. C. Righetti, *PostgreSQL: Advanced Database Administration and Performance Tuning*, 2nd. Birmingham, UK: Packt Publishing, 2023, ISBN: 9781803239279.

[51] A. Silberschatz, H. F. Korth y S. Sudarshan, *Database System Concepts*, 7th. New York, NY, USA: McGraw-Hill Education, 2020, ISBN: 9780078022159.

[52] C. J. Date, *An Introduction to Database Systems*, 8th. Boston, MA, USA: Pearson, 2004, ISBN: 9780321197849.

[53] B. Fitzgerald, "The Transformation of Open Source Software," *MIS Quarterly*, vol. 30, n.º 3, págs. 587-598, 2006. DOI: 10.2307/25148740

[54] A. Truly, *Multi-room setup and more uncovered in Quest v50 update*, https://mixed-news.com/en/multi-room-setup-and-more-uncovered-in-quest-v50-update/, feb. de 2023.

ANEXOS

ANEXO A: REGISTRO FOTOGRÁFICO DE LAS INSTALACIONES DE LA ACADEMIA

El presente anexo contiene el registro fotográfico del entorno exterior e interior de las instalaciones de la academia. Las imágenes recopiladas permiten documentar de manera visual la infraestructura, distribución de espacios y elementos representativos del entorno, con el propósito de servir como referencia para su recreación en el entorno digital del proyecto.



Figura 106: Exterior de la Academia Villalba Tiger's



Figura 107: Interior (Foto 1) de la Academia Villalba Tiger's



Figura 108: Interior (Foto 2) de la Academia Villalba Tiger's



Figura 109: Interior (Foto 3) de la Academia Villalba Tiger's



Figura 110: Interior (Foto 4) de la Academia Villalba Tiger's

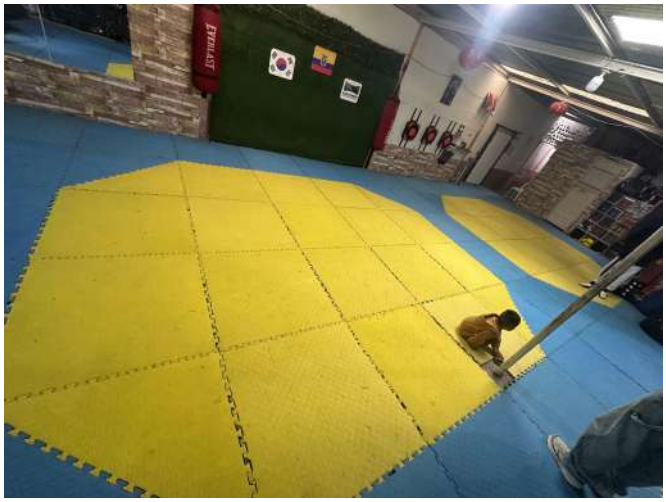


Figura 111: Interior (Foto 5) de la Academia Villalba Tiger's



Figura 112: Interior (Foto 6) de la Academia Villalba Tiger's

ANEXO B: CALIBRACIÓN DE QUATERNIONS EN EL SISTEMA DE TRACKING PARA REALIDAD VIRTUAL

El presente anexo documenta el fundamento técnico de la calibración de quaternions utilizada en el sistema de tracking del proyecto, con el objetivo de justificar la precisión angular obtenida en el mapeo entre el espacio físico real y el entorno virtual de Unreal Engine 5.

B.1 Representación de orientación mediante quaternions

En sistemas de captura de movimiento, la orientación de un cuerpo rígido puede representarse mediante ángulos de Euler, que descompone la rotación en tres giros secuenciales alrededor de ejes fijos. Sin embargo, esta representación presenta una singularidad conocida como gimbal lock, que ocurre cuando dos de los tres ejes de rotación se alinean, resultando en la pérdida de un grado de libertad.

Los quaternions unitarios resuelven este problema al representar cualquier orientación como una rotación única alrededor de un eje arbitrario $\hat{u} \in \mathbb{R}^3$ y un ángulo θ, mediante la expresión:

$$q = \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) + \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \hat{u} \tag{B.1}$$

donde $q = [w, x, y, z]$ con $\|q\| = 1$. Esta formulación garantiza una representación globalmente regular, sin singularidades, y es la razón por la cual Unreal Engine 5 los utiliza internamente para el cálculo de transformaciones espaciales, incluso cuando la interfaz de Blueprint presenta los valores en formato Rotator (pitch, yaw, roll).

B.2 Obtención del quaternion desde el tracker en Unreal Engine 5

En el sistema desarrollado, la orientación de cada tracker HTC Vive 3.0 se obtiene a través del componente Motion Controller, el cual expone la pose del dispositivo físico dentro del espacio de tracking definido por SteamVR. Para acceder a los datos de transformación completa del tracker, se utiliza el nodo Get World Transform, cuya salida es una estructura Transform que internamente codifica la orientación original como quaternion.

Mediante el nodo Break Transform, se descompone dicha estructura para extraer el componente de rotación en forma de Rotator. Dado que el flujo requiere preservar la representación matemática óptima para evitar problemas como el Gimbal Lock, este Rotator es transformado explícitamente mediante el nodo Get Quaternion (o "Quat from Rotator"). Este paso intermedio permite recuperar el quaternion correspondiente a la orientación del dispositivo, el cual hereda directamente la calibración del espacio físico realizada previamente mediante el Room Setup de SteamVR.

El flujo de datos puede resumirse de la siguiente manera:

1. Las Base Stations emiten barridos de láser infrarrojo que definen el sistema de referencia del espacio físico calibrado.
2. El tracker HTC Vive 3.0 detecta dichos barridos y SteamVR computa la pose en 6 DoF (posición y orientación) expresada originalmente como quaternion en el espacio del Room Setup.
3. El nodo Get World Transform expone esa pose al entorno de Unreal Engine 5.
4. El nodo Break Transform extrae el componente rotacional en forma de Rotator.
5. Se aplica el nodo de conversión "Quat from Rotator" para obtener el quaternion correspondiente, asegurando la integridad de los datos de rotación.
6. Dicho quaternion se serializa a formato JSON junto con los datos de posición, generando el registro por frame que posteriormente es procesado por el micro-servicio de comparación.

ANEXO C: REGISTRO DE MÉTRICAS DE RENDIMIENTO DEL SERVIDOR BAJO CARGA

El presente anexo contiene el registro de las pruebas de rendimiento realizadas sobre el servidor NestJS desplegado en Render, utilizando la herramienta k6 para la simulación de múltiples solicitudes de comparación JSON simultáneas. Las métricas recopiladas permiten documentar el comportamiento del servidor bajo distintos niveles de carga, con el propósito de evidenciar la capacidad de respuesta del sistema ante escenarios de uso concurrente.



Figura 113: Métricas de rendimiento del servidor bajo carga (HTTP Overview)



Figura 114: Métricas de rendimiento del servidor bajo carga

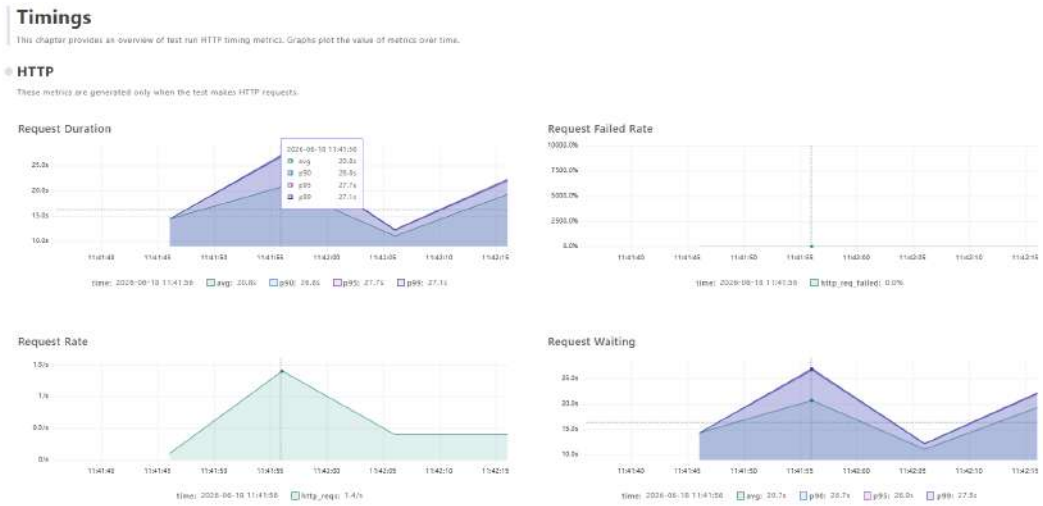


Figura 115: Métricas de rendimiento del servidor bajo carga (Tiempos parte 1)

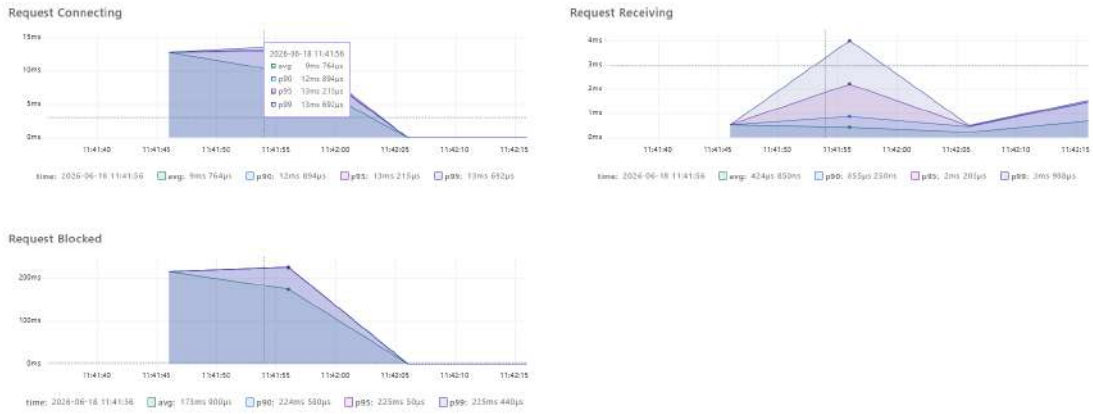


Figura 116: Métricas de rendimiento del servidor bajo carga (Tiempos parte 2)

Tabla 44: Resumen de métricas de rendimiento obtenidas durante la prueba de carga

Métrica	**Avg**	**Max**	**Med**	**Min**	**P90**	**P95**	**P99**
http_req_blocked	77 ms	225 ms	0 ms	0 ms	221 ms	224 ms	225 ms
http_req_connecting	4 ms	13 ms	0 ms	0 ms	12 ms	12 ms	13 ms
http_req_duration	17 s	27 s	20 s	3 s	26 s	26 s	27 s
http_req_receiving	419 μs	4 ms	0 ms	0 ms	1 ms	1 ms	3 ms
http_req_sending	67 ms	151 ms	43 ms	37 ms	129 ms	144 ms	150 ms
http_req_tls_handshaking	17 ms	50 ms	0 ms	0 ms	49 ms	50 ms	50 ms
http_req_waiting	17 s	27 s	20 s	3 s	26 s	26 s	27 s
iteration_duration	18 s	28 s	21 s	4 s	27 s	27 s	28 s

ANEXO D: REGISTRO DE LOGS Y TRAZABILIDAD DEL MICROSERVICIO

El presente anexo contiene la evidencia de los logs generados por el microservicio de comparación de movimientos en formato JSON. Las pruebas fueron realizadas en el entorno desplegado en Render.

Los logs fueron generados durante la ejecución del endpoint `/evaluate`. Cada solicitud fue identificada mediante el campo `requestId`, lo que permitió relacionar el inicio y fin de cada comparación, así como distinguir solicitudes válidas, entradas incompletas y solicitudes ejecutadas bajo carga concurrente.

En la Figura 117 se muestra un ejemplo de comparación ejecutada correctamente. En este caso, se registran los eventos `comparison_started` y `comparison_finished`, ambos asociados al mismo identificador de solicitud.

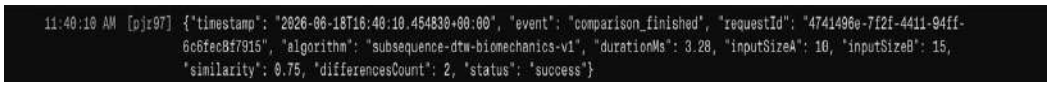


Figura 117: Registro de una comparación exitosa en los logs de Render

El siguiente fragmento muestra la estructura del log generado durante una comparación válida. En este registro se evidencia el algoritmo utilizado, el tiempo interno de ejecución, el tamaño de las entradas, el valor de similitud calculado y la cantidad de diferencias detectadas.

Listing D.1: Fragmento de log de una comparación exitosa

```
{
  "timestamp": "2026-06-18T16:40:08.901889+00:00",
  "event": "comparison_started",
  "requestId": "3e0c4ef6-caee-4cab-8ea1-e693b653f4d5",
  "inputSizeA": 136,
  "inputSizeB": 310
}
{
  "timestamp": "2026-06-18T16:40:09.811786+00:00",
  "event": "comparison_finished",
```

```
  "requestId": "3e0c4ef6-caee-4cab-8ea1-e693b653f4d5",
  "algorithm": "subsequence-dtw-biomechanics-v1",
  "durationMs": 909.93,
  "inputSizeA": 136,
  "inputSizeB": 310,
  "similarity": 0.76,
  "differencesCount": 2,
  "status": "success"
}
```


También se verificó el comportamiento del microservicio ante una entrada incompleta. En este caso, el sistema registró el evento `invalid_payload`, indicando que los datos recibidos no contenían la estructura esperada de `frames`. Esta evidencia se presenta en la Figura 118.

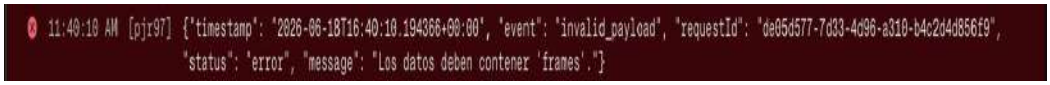


Figura 118: Registro de validación de entrada incompleta en Render

El siguiente fragmento muestra el registro generado cuando la solicitud no contiene todos los datos requeridos. Se observa que el campo `inputSizeB` se registra con valor cero y posteriormente se genera el evento de error de validación.

Listing D.2: Fragmento de log generado ante una entrada incompleta


```
{
  "timestamp": "2026-06-18T16:40:10.194222+00:00",
  "event": "comparison_started",
  "requestId": "de05d577-7d33-4d96-a310-b4c2d4d856f9",
  "inputSizeA": 136,
  "inputSizeB": 0
}
{
  "timestamp": "2026-06-18T16:40:10.194366+00:00",
  "event": "invalid_payload",
  "requestId": "de05d577-7d33-4d96-a310-b4c2d4d856f9",
  "status": "error",
  "message": "Los datos deben contener 'frames'."
}
```


La Tabla 45 resume los principales eventos registrados por el microservicio durante las pruebas. Estos eventos permiten identificar el inicio de una comparación, la finalización exitosa del algoritmo y los errores de validación o ejecución.

Tabla 45: Eventos registrados por el microservicio

Evento	Descripción	Campos principales
`comparison_started`	Inicio de una solicitud de comparación.	`requestId`, `timestamp`, `inputSizeA`, `inputSizeB`
`comparison_finished`	Finalización exitosa del algoritmo de comparación.	`requestId`, `durationMs`, `similarity`, `differencesCount`, `status`
`comparison_error`	Error ocurrido durante la ejecución de la comparación.	`requestId`, `errorMessage`, `status`
`invalid_payload`	Error de validación de entrada antes de ejecutar el algoritmo.	`requestId`, `message`, `status`

Se realizaron pruebas con entradas de diferente tamaño para observar la variación del tiempo interno de ejecución del algoritmo. En la Tabla 46 se evidencia que el tiempo registrado aumenta conforme crece la cantidad de frames procesados.

Tabla 46: Variación del tiempo interno de ejecución según el tamaño de entrada

Caso	Request ID	Tamaño A	Tamaño B	Duración interna	Diferencias
JSON pequeño	`4741496e-7f2f-4411-94ff-6c6fec8f7915`	10	15	3.28 ms	2
JSON mediano	`e3df9de1-c184-4b96-93f6-d6a05b509265`	60	80	21.79 ms	2
JSON grande	`ca251c01-54de-473d-8505-59606c007a5c`	136	310	1196.59 ms	2

Finalmente, se revisaron logs generados durante solicitudes concurrentes hacia el endpoint `/evaluate`. En este escenario, varias solicitudes fueron recibidas en un intervalo reducido de tiempo, por lo que el campo `requestId` permitió rastrear cada comparación de forma independiente.

La Tabla 47 muestra algunos registros obtenidos durante esta prueba. Los tiempos internos superaron los 10 segundos en varios casos, lo que permite observar una degradación del tiempo de ejecución cuando el microservicio procesa varias comparaciones en paralelo o en un intervalo muy corto.

Tabla 47: Trazabilidad de solicitudes concurrentes

Request ID	**Hora de inicio UTC**	**Hora de fin UTC**	**Duración interna**
`13ccd820-c4dc-482f-9360-e7eb3c7c015d`	16:41:31.65	16:41:37.70	6047.56 ms
`58c1707a-1d31-47d6-8c22-6212ccb8fa18`	16:41:32.80	16:41:45.31	12509.89 ms
`a8637792-2b66-450a-9fc3-7547aca18f92`	16:41:33.01	16:41:45.70	12689.82 ms
`f0312ff2-d7b2-4727-a516-407fba383e11`	16:41:33.30	16:41:47.40	14098.03 ms
`2031d1ac-0d0e-498b-95c5-1df11ea42316`	16:41:35.60	16:41:49.51	14294.87 ms

Los registros presentados en este anexo muestran que los logs estructurados permiten complementar las métricas generales del sistema, ya que aportan evidencia interna sobre la ejecución del algoritmo. Mediante estos registros fue posible identificar solicitudes válidas, errores de validación, variaciones del tiempo de ejecución y el comportamiento individual de cada petición bajo carga concurrente.