

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación

Diseño y desarrollo de un sistema de tecnologías inmersivas aplicadas al entrenamiento en emergencias para la Academia de Bomberos

INGE-3073

Proyecto integrador

Previo la obtención del Título de:

Ingeniería en Telemática

Presentado por:

Angie Dayanna Tobar Alvarez

Eduan Abraham Matute Bravo

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2025

DEDICATORIA

De Eduan:

Dedico este trabajo a mis padres y familia, quienes han sido el pilar fundamental en mi vida. Su apoyo incondicional, sacrificio y consejos han sido el motor que me ha impulsado a superar cada obstáculo y alcanzar esta meta.

A mi prometida Rebeca, quien ha caminado a mi lado desde que éramos adolescentes soñando con el futuro. Su apoyo incondicional en cada capítulo de mi vida ha sido mi mayor motivación para llegar hasta aquí. Gracias por crecer conmigo.

Finalmente, un agradecimiento extensivo a todos los profesores de la carrera, quienes con exigencia y dedicación nos impartieron los conocimientos fundamentales que hoy nos permiten culminar esta etapa profesional.

EDUAN ABRAHAM MATUTE BRAVO

DEDICATORIA

De Angie:

Dedico este trabajo a mis padres, por su amor incondicional y por enseñarme, con su ejemplo, la importancia del esfuerzo, la constancia y dedicación. Ellos han sido la fuerza que me permitió seguir adelante y no renunciar a mis sueños.

De manera muy especial, a mi hijo, quien se convirtió en mi mayor motivación y razón para superarme cada día. Su presencia dio un nuevo sentido a este camino académico y personal, recordándome que todo sacrificio vale la pena cuando se construye un mejor futuro.

A mi esposo, por su apoyo constante y comprensión durante todo este proceso.

ANGIE DAYANNA TOBAR ALVAREZ

AGRADECIMIENTOS

EDUAN ABRAHAM MATUTE BRAVO

Agradezco a Dios por permitirme culminar este objetivo personal y profesional. A mis padres y familiares, por ser el pilar fundamental de mi vida, brindándome su apoyo incondicional, sacrificio y confianza a lo largo de mi formación académica. A la Escuela Superior Politécnica del Litoral, por haberme abierto las puertas al conocimiento y proporcionarme las herramientas necesarias para mi desarrollo profesional.

ANGIE DAYANNA TOBAR ALVAREZ

Expreso un sincero agradecimiento a mi compañero de tesis, Eduan, por su dedicación y compromiso a lo largo del desarrollo de este trabajo. Su responsabilidad y la puesta en práctica de sus conocimientos y habilidades fueron fundamentales para el cumplimiento de los objetivos planteados. Asimismo, a Eric Gonzalez, instructor de bomberos, quien nos brindó su apoyo incondicional en todo lo que necesitamos, mostrando siempre la mejor disposición para colaborar con nuestra formación.

DECLARACIÓN EXPRESA

Nosotros, **Eduan Abraham Matute Bravo** y **Angie Dayanna Tobar Alvarez**, acordamos y reconocemos que:

La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá a los autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor de los autores.

La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de nuestro trabajo, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique a los autores que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 31 de enero de 2026.

Eduan Matute Bravo

Angie Tobar Alvarez

EVALUADORES

MSc. Christopher Vaccaro Cedillo

PROFESOR DE LA MATERIA

PhD. María Mera Collantes

PROFESORA TUTORA

Resumen

El entrenamiento de los cuerpos de bomberos en escenarios de incendios reales conlleva altos costos logísticos, riesgos físicos significativos y un impacto ambiental negativo. El presente trabajo de titulación propone el desarrollo e implementación de un sistema de entrenamiento inmersivo denominado *VRBomberos*, el cual integra Realidad Virtual (VR) con una arquitectura de hardware cyber-físico. El sistema utiliza un microcontrolador ESP32 para gestionar la comunicación inalámbrica mediante protocolo UDP, logrando una latencia promedio de 12.3 ms, imperceptible para el usuario.

La solución se compone de un extintor real instrumentado como interfaz de control físico para la detección de disparo y un cinturón térmico que simula la radiación del fuego, condicionando al usuario a mantener distancias seguras. Se desarrollaron tres escenarios de entrenamiento (Cocina, Vehicular e Industrial) en el motor gráfico Unity, diseñados para evaluar precisión, tiempos de reacción y técnica de barrido. Las pruebas realizadas con un grupo piloto demostraron una mejora del 33% en la precisión de disparo entre el primer y segundo intento. El análisis económico proyecta un ahorro operativo superior al 85% frente al método tradicional, validando al sistema como una herramienta complementaria eficaz, segura y de bajo costo para la capacitación de personal de primera respuesta.

Palabras clave: Realidad Virtual, Entrenamiento Inmersivo, Retroalimentación Térmica, ESP32, Bomberos, Simulación.

Abstract

Training firefighters in real fire scenarios involves high logistical costs, significant physical risks, and a negative environmental impact. This thesis proposes the development and implementation of an immersive training system named *VRBomberos*, which integrates Virtual Reality (VR) with a cyber-physical hardware architecture. The system uses an ESP32 microcontroller to manage wireless communication via UDP protocol, achieving an average latency of 12.3 ms, which is imperceptible to the user.

The solution consists of a real fire extinguisher instrumented as a physical control interface for trigger detection and a thermal belt that simulates fire radiation, conditioning the user to maintain safe distances. Three training scenarios (Kitchen, Vehicular, and Industrial) were developed in the Unity graphics engine, designed to evaluate accuracy, reaction times, and sweeping technique. Tests conducted with a pilot group demonstrated a 33% improvement in shooting accuracy between the first and second attempts. The economic analysis projects an operational saving of over 85% compared to the traditional method, validating the system as an effective, safe, and low-cost complementary tool for first responder training.

Keywords: Virtual Reality, Immersive Training, Thermal Feedback, ESP32, Firefighters, Simulation.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	VI
ABSTRACT	VII
ÍNDICE GENERAL	VIII
LISTA DE ABREVIATURAS	XI
ÍNDICE DE FIGURAS	XII
ÍNDICE DE TABLAS	XIII
ÍNDICE DE ECUACIONES	XIV
1. Introducción	1
1.1. Problema	2
1.2. Justificación	3
1.3. Objetivos	4
1.3.1. Objetivo general	4
1.3.2. Objetivos específicos	4
1.4. Alcance y limitaciones	5
1.4.1. Alcance	5
1.4.2. Limitaciones	6
1.5. Marco Teórico	6
1.5.1. Fundamentos de la capacitación en emergencias	6
1.5.1.1. Importancia del entrenamiento en cuerpos de bomberos	7
1.5.1.2. Métodos tradicionales de capacitación	7
1.5.1.3. Limitaciones de los métodos actuales	7
1.5.2. Tecnologías aplicadas a la formación profesional	8

1.5.3. Realidad virtual y entornos inmersivos	8
1.5.4. Modelado y simulación de escenarios	9
1.5.5. Trabajos relacionados	10
2. Metodología	12
2.1. Alternativas de solución y selección	12
2.2. Diseño conceptual y requerimientos	13
2.3. Diseño detallado del sistema	13
2.3.1. Capa Física (Hardware Háptico)	13
2.3.2. Capa de Simulación (Software)	14
2.3.3. Diagrama de flujo de información	14
2.4. Especificaciones técnicas e implementación	15
2.4.1. Selección de Componentes Electrónicos	15
2.4.2. Infraestructura de Backend	15
2.5. Escenarios de prueba implementados	15
2.6. Consideraciones éticas y de seguridad	16
3. Resultados y Análisis	17
3.1. Resultados de la Validación Técnica	17
3.1.1. Estabilidad de la Comunicación UDP	17
3.1.2. Caracterización Térmica	18
3.2. Evidencias de Implementación	19
3.3. Arquitectura del Servidor y Backend	21
3.3.1. Endpoints y Gestión de Datos	21
3.3.2. Motor de Calificación (Scoring Service)	22
3.3.3. Comunicación Híbrida (UDP/HTTP)	23
3.4. Lógica de Programación y Componentes del Cliente (C#)	23
3.4.1. Gestión de Red y Hardware (Cyber-Physical System)	23
3.4.2. Física de Fluidos y Extinción Dinámica	24
3.4.3. Gestión de Sesiones y Telemetría	24
3.5. Descripción y Análisis de Escenarios	25
3.6. Descripción y Análisis del Prototipo	28
3.6.1. Unidad de Feedback Térmico: Cinturón Háptico	28

3.6.2. Unidad de Control: Extintor Instrumentado	29
3.7. Evaluación Funcional con Usuarios	30
3.7.1. Métricas de Desempeño	30
3.7.2. Curva de Aprendizaje	31
3.8. Análisis General de los Resultados	31
3.8.1. Validación de la Arquitectura Cyber-Física	31
3.8.2. Fidelidad Ergonómica y Usabilidad	32
3.8.3. Impacto en el Desarrollo de Habilidades	32
3.9. Análisis Económico Detallado	33
3.9.1. Costo de Materiales (BOM - Bill of Materials)	33
3.9.2. Costo de Ingeniería y Desarrollo (I+D)	33
3.9.3. Escalabilidad y Modelo de Comercialización	34
3.9.4. Análisis Comparativo de Mercado (ROI)	34
3.10. Discusión General	35
4. Conclusiones y Recomendaciones	37
4.1. Conclusiones generales	37
4.2. Recomendaciones técnicas y operativas	38
4.3. Líneas Futuras	39
4.4. Limitaciones Encontradas	39
BIBLIOGRAFÍA	40
APÉNDICES	42
A. Cuadro Comparativo del Estado del Arte	42

LISTA DE ABREVIATURAS

API: *Application Programming Interface* (Interfaz de Programación de Aplicaciones).

BOM: *Bill of Materials* (Lista de Materiales).

BMS: *Battery Management System* (Sistema de Gestión de Baterías).

CRUD: *Create, Read, Update, Delete* (Funciones básicas de bases de datos: Crear, Leer, Actualizar y Borrar).

CFD: *Computational Fluid Dynamics* (Dinámica de Fluidos Computacional).

ESP32: Microcontrolador de bajo costo y bajo consumo con tecnología Wi-Fi y Bluetooth integrada.

IoT: *Internet of Things* (Internet de las Cosas).

KPI: *Key Performance Indicator* (Indicador Clave de Desempeño).

NFPA: *National Fire Protection Association* (Asociación Nacional de Protección contra el Fuego).

PQS: Polvo Químico Seco (Agente extintor).

ROI: *Return on Investment* (Retorno de la Inversión).

TCP: *Transmission Control Protocol* (Protocolo de Control de Transmisión).

UDP: *User Datagram Protocol* (Protocolo de Datagramas de Usuario).

URP: *Universal Render Pipeline* (Sistema de renderizado gráfico de Unity).

VR: *Virtual Reality* (Realidad Virtual).

WiFi: *Wireless Fidelity* (Tecnología de comunicación inalámbrica).

ÍNDICE DE FIGURAS

2.1. <i>Arquitectura del Sistema</i>	13
2.2. <i>Diagrama de flujo</i>	14
3.1. <i>Monitor Serie: Visualización de la trama de datos enviada por el ESP32</i>	18
3.2. <i>Consola de Unity: Recepción de paquetes UDP y ejecución de lógica de disparo</i>	19
3.3. <i>Dashboard de Instructor: Visualización de precisión y gestión de usuarios</i>	19
3.4. <i>Métricas globales</i>	20
3.5. <i>Integración con Unity</i>	20
3.6. <i>Integración cadetes</i>	21
3.7. <i>Escenario 1 (Cocina): Usuario apuntando al conato de fuego localizado</i>	26
3.8. <i>Escenario 2 (Vehicular): Validación de la sincronización térmica con el fuego activo</i>	27
3.9. <i>Escenario 3 (Industrial): Extinción de múltiples focos de fuego en el suelo</i>	27
3.10. <i>Prototipo del cinturón térmico con sensor y actuador</i>	29
3.11. <i>Prototipo del extintor instrumentado con electrónica interna</i>	30
3.12. <i>Mejora porcentual en métricas clave entre el Intento 1 y el Intento 2</i>	31
3.13. <i>Comparación de costos: Propuesta vs. Mercado vs. Tradicional</i>	35

ÍNDICE DE TABLAS

3.1. <i>Curva de respuesta del actuador térmico</i>	18
3.2. <i>Desempeño promedio de usuarios tras entrenamiento</i>	30
3.3. <i>Desglose de costos de materiales por unidad</i>	33
3.4. <i>Costo de Ingeniería</i>	34
3.5. <i>Comparativa de inversión inicial y operativa</i>	34
A.1. Comparación de trabajos relacionados sobre entrenamiento de bomberos en realidad virtual	42

ÍNDICE DE ECUACIONES

3.1. Cálculo de la precisión de disparo	25
---	----

CAPÍTULO 1

1. Introducción

La formación en los cadetes para bomberos requiere enfrentar situaciones de alto riesgo que demandan conocimientos técnicos, habilidades de toma de decisiones rápidas y control emocional bajo presión. Sin embargo, en la actualidad, la Academia de Bomberos de Guayaquil busca mejorar sus métodos de entrenamiento, los cuales se basan principalmente en simulacros físicos y sesiones teóricas [1]. Aunque estos métodos resultan efectivos, no permiten experimentar con precisión ni seguridad escenarios de emergencia reales de forma repetitiva.

La escasez de herramientas tecnológicas que integren entornos inmersivos y simulación avanzada limita la posibilidad de practicar sin riesgo, evaluar el desempeño individual de los cadetes o medir la efectividad de las decisiones tomadas. Además, los entrenamientos presenciales tradicionales requieren un uso intensivo de recursos materiales, tiempo y personal.

Frente a esta problemática, surge la necesidad de implementar un sistema de entrenamiento inmersivo basado en simulación, que permita recrear de manera controlada, segura y realista los escenarios de emergencia más relevantes para la formación del bombero. Este tipo de tecnología, basada en Realidad Virtual (VR), es una experiencia sintética mediante la cual se pretende que el usuario sustituya la realidad física por un entorno ficticio generado por ordenador. «La VR es lo más parecido que tenemos a la Máquina del Tiempo, en tanto que nos permite recrear virtualmente cualquier tipo de espacio en tres dimensiones y situarlo en cualquier época, incluso en el futuro, con un grado de realismo completamente creíble» [2].

Este trabajo tiene como objetivo diseñar y desarrollar un sistema de tecnologías inmersivas aplicadas al entrenamiento en emergencias para la Academia de Bomberos de Guayaquil. El proyecto se fundamenta en la creación de escenas virtuales realistas,

la incorporación de retroalimentación sensorial como sensación térmica, y el análisis de la reacción del usuario mediante métricas objetivas. De esta manera, se favorece una capacitación moderna, eficaz y segura sin poner en riesgo la integridad física de los participantes.

1.1. Problema

La formación del personal en la Academia de Bomberos de Guayaquil requiere la exposición a situaciones de alto riesgo que demandan habilidades técnicas, capacidad de toma de decisiones rápidas y control emocional bajo presión. Sin embargo, los métodos de entrenamiento actuales se basan principalmente en simulacros físicos y sesiones teóricas, los cuales, aunque contribuyen al desarrollo de competencias básicas, no permiten reproducir con precisión ni seguridad la diversidad de escenarios de emergencia que los bomberos enfrentan en el entorno real.

En la actualidad, la institución no dispone de herramientas tecnológicas que integren entornos inmersivos o sistemas de simulación avanzada, lo que limita la posibilidad de realizar prácticas repetitivas, seguras y medibles. Esta limitación también impide una evaluación objetiva del desempeño individual y dificulta la medición de la efectividad de las decisiones adoptadas en condiciones de estrés.

Los entrenamientos presenciales tradicionales implican altos costos operativos debido al uso de recursos materiales (combustible, recarga de extintores) y la participación constante de instructores y personal logístico. Además, estos ejercicios presentan riesgos físicos tanto para los cadetes como para el personal de apoyo, lo que restringe la frecuencia y variedad de las prácticas.

El problema se centra, por tanto, en la falta de un sistema de entrenamiento inmersivo basado en simulación, que permita recrear de manera controlada, segura y realista los principales escenarios de emergencia relevantes para la formación del bombero. Este vacío tecnológico limita la eficiencia del proceso de capacitación, la evaluación sistemática del aprendizaje y la optimización de los recursos disponibles.

Las restricciones identificadas incluyen la disponibilidad de infraestructura tecnológica adecuada, la compatibilidad con el entorno académico existente y la capacitación del personal para operar estas herramientas.

Entre las variables de interés a considerar se encuentran:

- Nivel de realismo de los escenarios simulados.
- Seguridad física del cadete durante el entrenamiento.
- Eficiencia en el uso de recursos operativos.
- Capacidad de evaluación objetiva y retroalimentación del desempeño.
- Impacto en la toma de decisiones en condiciones de emergencia simulada.

En consecuencia, la Academia de Bomberos de Guayaquil presenta la necesidad de contar con un entorno tecnológico inmersivo que complemente los métodos actuales de instrucción, permitiendo una formación más efectiva, medible y segura para el desarrollo integral de los futuros bomberos.

1.2. Justificación

La capacitación del personal de bomberos exige un proceso formativo que combine seguridad, realismo y eficiencia, factores que resultan esenciales para el desarrollo de competencias en la atención de emergencias. La Academia de Bomberos de Guayaquil reconoce la necesidad de modernizar sus métodos de entrenamiento, incorporando tecnologías que permitan fortalecer la preparación técnica y la capacidad de respuesta de sus cadetes.

La implementación de un sistema de entrenamiento inmersivo basado en simulación se justifica por su potencial para recrear entornos de emergencia realistas sin exponer a los participantes a riesgos físicos, optimizando el uso de recursos materiales, tiempo y personal. Este tipo de tecnología permite repetir escenarios cuantas veces sea necesario, estandarizar las condiciones de práctica y medir el desempeño individual mediante indicadores objetivos, mejorando así la calidad y consistencia de la formación.

Desde una perspectiva tecnológica, el uso de entornos inmersivos y motores de simulación tridimensional promueve la adopción de herramientas innovadoras en la formación profesional de cuerpos de emergencia, alineándose con las tendencias actuales de transformación digital (Industria 4.0) en la educación técnica y operativa.

En el ámbito académico, el proyecto contribuye al desarrollo de soluciones aplicadas que integran realidad virtual, modelado 3D, comunicación en tiempo real (IoT) y retroalimentación multisensorial, fomentando la investigación en tecnologías educativas y en simulación avanzada.

A nivel social e institucional, la incorporación de este sistema fortalece la preparación de los futuros bomberos, incrementa su eficacia ante emergencias reales y reduce la probabilidad de accidentes durante el entrenamiento, beneficiando tanto a la institución como a la comunidad que recibe sus servicios.

En síntesis, este proyecto es relevante porque mejora la calidad del entrenamiento, promueve la innovación tecnológica en la formación de bomberos y contribuye a la seguridad pública, al preparar personal altamente capacitado mediante prácticas inmersivas, seguras y reproducibles.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Implementar un sistema de entrenamiento inmersivo basado en simulación para personal de la Academia de Bomberos de Guayaquil, con el fin de mejorar su preparación y toma de decisiones en escenarios de incendios y desastres, minimizando los riesgos físicos y optimizando el uso de recursos.

1.3.2. Objetivos específicos

- Diseñar la arquitectura del sistema de entrenamiento inmersivo empleando tecnologías de simulación y realidad virtual, con el fin de establecer una base técnica que permita recrear escenarios de emergencia seguros y realistas.
- Desarrollar las escenas virtuales correspondientes a los principales tipos de emergencia utilizando herramientas de modelado 3D y motores gráficos, para representar de manera interactiva los contextos de incendio identificados.
- Implementar un prototipo funcional del sistema inmersivo integrando los módulos de simulación y la interfaz de usuario, con el propósito de facilitar el entrenamiento práctico y mejorar la experiencia de los cadetes.

1.4. Alcance y limitaciones

1.4.1. Alcance

El presente proyecto abarca el diseño, desarrollo e implementación de un sistema de entrenamiento inmersivo basado en simulación para la **Academia de Bomberos de Guayaquil**, orientado a mejorar la preparación y la toma de decisiones del personal en formación frente a incendios. El sistema se desarrolla utilizando tecnologías de **Realidad Virtual (VR)**, **Internet de las Cosas (IoT)** y **modelado tridimensional (3D)**, permitiendo la recreación de escenarios realistas de incendios mediante un prototipo funcional que integra simulación, control de hardware y gestión de métricas.

En el ámbito técnico, el alcance contempla el diseño de la arquitectura del sistema, definiendo la interacción entre componentes de hardware (como microcontroladores ESP32 y sensores) y software (Unity, Docker) mediante protocolos de baja latencia. Esto incluye el desarrollo de escenas virtuales que representen los principales tipos de emergencias estructurales, así como la implementación de un extintor háptico que actúa como interfaz física, integrando electrónica para la detección de disparo y la retroalimentación térmica hacia el usuario.

Desde la perspectiva operativa y de validación, el proyecto incluye el desarrollo de un Dashboard Web para el instructor, facilitando la gestión de cadetes, la selección de escenarios y la visualización de métricas de desempeño en tiempo real. Finalmente, se ejecutarán pruebas piloto con cadetes de la Academia para evaluar la usabilidad, el nivel de inmersión y la efectividad de la herramienta, culminando con la elaboración de reportes de resultados que analicen el desempeño y propongan mejoras para futuras versiones.

El proyecto no incluye el desarrollo de una infraestructura física permanente, como cuartos de servidores dedicados, ni la implementación de sensores biométricos avanzados para el monitoreo fisiológico. Tampoco abarca la integración del sistema con plataformas externas de gestión académica o evaluación institucional preexistentes ajenas al prototipo. En términos temporales, el trabajo se limita al desarrollo del **prototipo funcional y su validación experimental**, constituyendo la base para futuras fases de ampliación o implementación a gran escala.

1.4.2. Limitaciones

El desarrollo del sistema de entrenamiento inmersivo presenta ciertas restricciones que deben considerarse en la evaluación de sus resultados. En primer lugar, existen limitaciones tecnológicas vinculadas a la disponibilidad de recursos de hardware, tales como visores de realidad virtual, controladores hápticos y equipos de cómputo de alta capacidad gráfica, factores que pueden influir en el nivel de realismo visual y la estabilidad de la simulación. Adicionalmente, la implementación actual se lleva a cabo en un entorno controlado de laboratorio o aula, sin llegar a una integración definitiva en la infraestructura física oficial de entrenamiento de la Academia de Bomberos.

En cuanto al alcance del contenido, las escenas virtuales desarrolladas representan tipos específicos de emergencia, como incendios estructurales y vehiculares, excluyendo eventos de gran magnitud o desastres naturales complejos con múltiples variables dinámicas. Por consiguiente, la evaluación del desempeño se centra en métricas de usabilidad, inmersión, precisión de disparo y tiempos de reacción, prescindiendo de indicadores fisiológicos del usuario debido a la ausencia de sensores biométricos especializados en esta etapa del prototipo.

Finalmente, el proyecto está sujeto a limitaciones temporales y de recursos humanos propias de un período académico, contando con la participación de un grupo selecto de instructores y cadetes para la validación. Estas delimitaciones definen el alcance operativo y temporal del sistema sin comprometer su validez, constituyendo una base sólida para futuras mejoras e integraciones que amplíen su funcionalidad y cobertura.

1.5. Marco Teórico

1.5.1. Fundamentos de la capacitación en emergencias

La formación en cuerpos de bomberos requiere una combinación equilibrada de conocimientos técnicos, habilidades prácticas y competencias psicológicas que permitan actuar con eficacia bajo condiciones de alta presión. Tradicionalmente, el entrenamiento se ha basado en clases teóricas y simulacros presenciales, cuyo objetivo es reproducir las condiciones operativas que los bomberos enfrentarán en el campo. Sin embargo, la literatura evidencia que estos métodos no siempre permiten alcanzar una preparación integral ni evaluar

con precisión la toma de decisiones durante situaciones críticas [3].

1.5.1.1. Importancia del entrenamiento en cuerpos de bomberos

El entrenamiento en emergencias constituye un pilar esencial para garantizar la seguridad del personal y la eficacia de las operaciones de rescate. Estudios recientes destacan que la exposición repetida a escenarios simulados fortalece la capacidad de los bomberos para reconocer patrones, anticipar riesgos y responder con rapidez en contextos impredecibles [4]. La capacitación no solo busca el dominio técnico del equipo, sino también la coordinación grupal, el liderazgo situacional y el manejo emocional ante estímulos estresantes [5].

1.5.1.2. Métodos tradicionales de capacitación

Los métodos tradicionales en academias de bomberos incluyen la instrucción teórica y los ejercicios de campo. Estos programas buscan desarrollar destrezas en control de incendios, rescate, primeros auxilios y manejo de materiales peligrosos. A pesar de su efectividad para transmitir conocimiento técnico, estos métodos demandan grandes recursos materiales y humanos, además de implicar riesgos físicos inherentes al entrenamiento con fuego real [6].

El modelo de aprendizaje experiencial de Kolb [7] respalda la necesidad de integrar la práctica reflexiva dentro del proceso formativo. Según este enfoque, el conocimiento se construye mediante un ciclo de experiencia concreta, observación reflexiva, conceptualización abstracta y experimentación activa. Sin embargo, las actividades tradicionales no siempre logran completar todas las fases del ciclo, limitando la consolidación del aprendizaje.

1.5.1.3. Limitaciones de los métodos actuales

Diversos autores coinciden en que los métodos tradicionales de entrenamiento presentan limitaciones importantes en cuanto a repetibilidad, control de variables y evaluación del desempeño [8]. La imposibilidad de recrear condiciones extremas de manera segura reduce la variedad de escenarios a los que los cadetes pueden enfrentarse. Además, las restricciones logísticas —como la disponibilidad de instructores, infraestructura y materiales— limitan la frecuencia de las prácticas.

Otro aspecto crítico es la dificultad de medir objetivamente la toma de decisiones y el comportamiento del bombero durante la emergencia. Las evaluaciones suelen ser

cualitativas o basadas en observación, lo que introduce sesgos y dificulta la retroalimentación individualizada [5].

1.5.2. Tecnologías aplicadas a la formación profesional

Las tecnologías de simulación han evolucionado desde simuladores físicos y *e-learning* hacia ecosistemas inmersivos de Realidad Virtual (VR), con capacidad de recrear contextos de alto riesgo de forma segura, repetible y medible. En dominios donde la práctica real es costosa, peligrosa o poco frecuente, la VR ofrece *experiencias de aprendizaje experiencial* con control pedagógico del escenario, retroalimentación inmediata y registro objetivo del desempeño [9, 10].

Los simuladores físicos y los entornos digitales tradicionales sentaron las bases del aprendizaje basado en simulación; sin embargo, la VR inmersiva añade presencia, control total del entorno y capacidad para inducir niveles de estrés comparables a los de la práctica real, favoreciendo la transferencia de habilidades [9].

1.5.3. Realidad virtual y entornos inmersivos

La Realidad Virtual (VR) es una tecnología que permite al usuario sumergirse en un entorno generado por computadora en tres dimensiones, interactuar con él en tiempo real y experimentar la sensación de «estar allí» dentro de ese entorno artificial [11, 12]. Esta inmersión se logra mediante una combinación de recursos tecnológicos y mecanismos de interacción diseñados para estimular los sentidos del usuario y producir una experiencia convincente.

La presencia se ha conceptualizado como un constructo de dos dimensiones: *being there* (estar allí) y *perceived realism* (realismo percibido) [12]. Bajo este modelo, el usuario evalúa la congruencia entre sus propios movimientos, las respuestas del entorno y las expectativas sensoriales, lo cual resulta clave para que la VR funcione como herramienta formativa eficaz. Los principios técnicos subyacentes incluyen la generación sincronizada de estímulos visuales y auditivos, el seguimiento preciso del movimiento del usuario, una baja latencia en la respuesta del sistema y una retroalimentación coherente que refuerce la inmersión [13].

Desde una perspectiva técnica, un sistema de VR se estructura en cuatro elementos

fundamentales. El primero es el *hardware*, compuesto por auriculares montados en la cabeza (HMD), sensores de posición y controladores físicos. El segundo es el *software*, gestionado por motores en tiempo real (como Unity 3D) que administran las físicas y la sincronización multisensorial. A estos se suman los mecanismos de interacción, que permiten al usuario manipular objetos virtuales, y la retroalimentación háptica, que incorpora estímulos táctiles, vibración o cambios térmicos para aumentar la credibilidad del entorno y reforzar la presencia [14].

En función del grado de aislamiento sensorial, los entornos virtuales se clasifican en tres categorías. La simulación **no inmersiva** se caracteriza por la interacción a través de pantallas tradicionales, donde el usuario permanece consciente de su entorno físico y los niveles de presencia son moderados [15]. La modalidad **semi-inmersiva** utiliza sistemas de proyección envolvente o pantallas múltiples, conservando cierta conexión con el mundo real [16]. Finalmente, la simulación **totalmente inmersiva** aísla por completo al usuario mediante HMD, audio direccional y sensores corporales, logrando el máximo grado de realismo y presencia psicológica [17].

La VR ha sido adoptada progresivamente en contextos de formación de alto riesgo debido a su capacidad para replicar situaciones peligrosas o costosas de manera segura. En el entrenamiento de bomberos, esta tecnología permite practicar escenarios de búsqueda, rescate y control de incendios estructurales sin exposición física real, demostrando ser un análogo ecológicamente válido del entrenamiento de campo [9]. Además, la capacidad de repetir ejercicios complejos y registrar métricas de desempeño facilita la transferencia efectiva del aprendizaje a situaciones reales.

1.5.4. Modelado y simulación de escenarios

La creación de escenarios realistas para entrenamiento en emergencias requiere un modelado tridimensional detallado del entorno y su comportamiento dinámico, combinado con motores gráficos y físicas realistas que permitan la interactividad y simulación de fenómenos complejos como fuego, humo, estructuras colapsantes o rescate en espacios confinados.

Para generar ambientes inmersivos se suele partir de herramientas de modelado 3D (como Blender) para construir geometrías precisas de edificaciones y mobiliario. Posteriormente se importan estos activos a motores gráficos en tiempo real (como Unity 3D), los cuales gestionan iluminación, colisiones, físicas de partículas (fuego/agua), lógica de

interacción y renderización [18, 19].

1.5.5. Trabajos relacionados

La revisión de la literatura reciente evidencia que la realidad virtual (VR) se ha consolidado como una herramienta eficaz para el entrenamiento de bomberos, aunque con desafíos pendientes en cuanto a estandarización y realismo multisensorial.

En el ámbito de las revisiones sistemáticas, **Wheeler et al. (2021)** [9] analizaron múltiples estudios sobre entrenamiento en entornos inmersivos, encontrando evidencia sólida de mejoras en la conciencia situacional, la memoria espacial y la reducción de errores operativos. Sin embargo, los autores identificaron una falta significativa de estandarización en las métricas de desempeño y una escasez de estudios que validen la transferencia de estas habilidades al campo real.

Respecto a la toma de decisiones, **Cohen-Hatton y Honey (2015)** [20] demostraron mediante experimentos comparativos que la práctica orientada a metas en VR logra replicar los patrones de decisión observados en entornos reales, validando la utilidad psicológica de la herramienta, aunque su estudio no contempló aspectos multisensoriales ni métricas objetivas de rendimiento físico. Por otro lado, **Ribeiro et al. (2013)** [21] propusieron simuladores basados en videojuegos serios para evaluar rutas de evacuación, aunque su enfoque se mantuvo más en el ámbito educativo y de comportamiento civil que en la operativa táctica de los bomberos.

En cuanto a la evolución tecnológica y la fidelidad visual, **Anghel et al. (2015)** [18] desarrollaron prototipos funcionales en Unity con interacción básica de humo y fuego en tiempo real, aunque carecían de componentes hápticos y validación de usabilidad. Más recientemente, **Glujic et al. (2024)** [22] lograron integrar modelos de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) con VR, obteniendo una alta fidelidad visual y un comportamiento realista del fuego, a costa de una elevada demanda computacional que dificulta su implementación en equipos portátiles.

Finalmente, las propuestas más recientes buscan elevar la validez ecológica mediante la estimulación multisensorial. **Clifford et al. (2018)** [23] desarrollaron un simulador con retroalimentación auditiva y visual 3D que mejoró la detección de objetivos, aunque limitado a escenarios aéreos. En esta misma línea, **Oliveira et al. (2024)** [19] implementaron sistemas inmersivos multimodales que incluyen calor y vibración, reportando un incremento en el realismo y la retención del aprendizaje, aunque persisten las limitaciones respecto a la

estandarización de los indicadores de desempeño.

CAPÍTULO 2

2. Metodología

En este capítulo se describió la formulación de las alternativas de solución, la selección de la tecnología apropiada y el diseño detallado del sistema *VRBomberos*. Se documentó el proceso técnico seguido para la integración de los componentes de hardware y software, así como las normativas y criterios de diseño que garantizaron la funcionalidad del prototipo.

2.1. Alternativas de solución y selección

Para abordar la problemática de la irrepitibilidad y el riesgo en el entrenamiento contra incendios, se formularon y evaluaron tres alternativas tecnológicas:

Se analizaron distintas alternativas tecnológicas para el desarrollo del sistema, entre las cuales se consideró inicialmente la Realidad Aumentada, mediante el uso de gafas AR para superponer fuego sobre el entorno real; sin embargo, esta opción fue descartada debido a la complejidad técnica para simular humo volumétrico denso capaz de obstruir la visión, condición esencial para un entrenamiento realista. Asimismo, se evaluó la Simulación en Pantalla, basada en simuladores de escritorio convencionales, la cual fue descartada por no generar memoria muscular, ya que el uso de teclado y ratón no reproducía ni el peso ni la operación mecánica de un extintor real. Finalmente, se propuso la Realidad Virtual Inmersiva con retroalimentación háptica, consistente en un entorno completamente virtual controlado mediante un extintor real modificado, alternativa que fue seleccionada por permitir el aislamiento sensorial del cadete y proporcionar una retroalimentación física segura y acorde a los objetivos del entrenamiento.

2.2. Diseño conceptual y requerimientos

La fase de diseño inició con el levantamiento de requerimientos mediante la observación directa de las prácticas de campo y el análisis de la norma NFPA 10, a partir de lo cual se definió que el sistema debía emplear un cilindro de extintor real para conservar la ergonomía y un peso aproximado de cinco libras, garantizando una experiencia de uso fiel a la realidad; además, el software debía ser capaz de simular el comportamiento físico del fuego, incluyendo su posible re-ignición en caso de que no se aplicara correctamente la técnica de barrido, y, de manera complementaria, el sistema debía incorporar un módulo de telemetría que permitiera cuantificar la precisión del disparo y transmitir dicha información en tiempo real hacia un panel de control para su monitoreo y evaluación.

2.3. Diseño detallado del sistema

El diseño final se estructuró como una arquitectura distribuida cyber-física compuesta por tres capas, como se ilustra en la **Figura 2.1**.

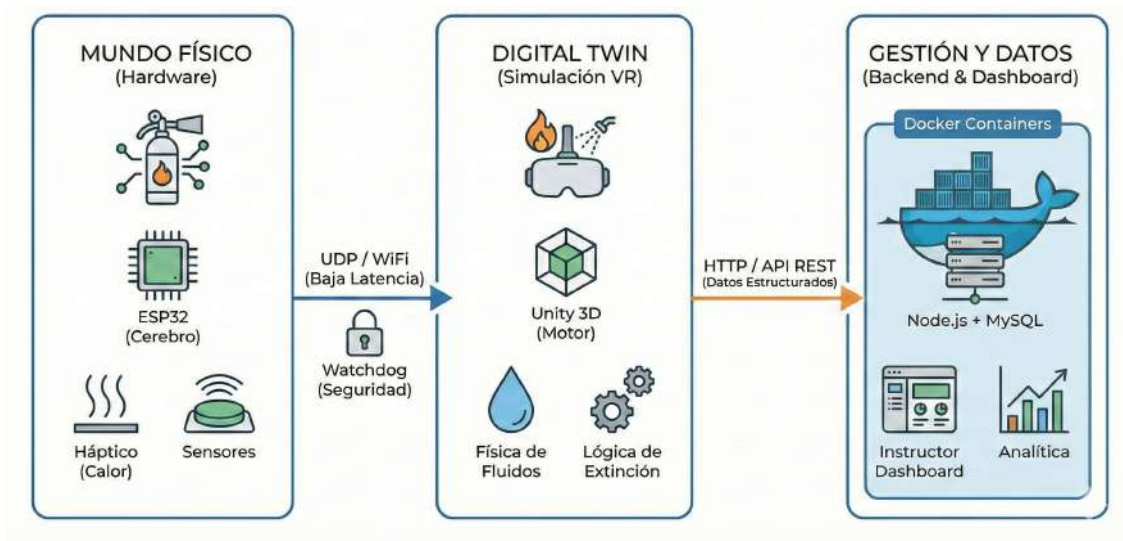


Figura 2.1. *Arquitectura del Sistema*

2.3.1. Capa Física (Hardware Háptico)

Se diseñó un ecosistema de hardware dividido en dos nodos para mejorar la movilidad del usuario:

- 1. Unidad de Control (Extintor):** Se intervino un extintor PQS descargado. Se

instalaron micro-interruptores en la maneta de disparo y sensores de presión en la boquilla de la manguera. Esto se realizó para obligar al usuario a emplear ambas manos durante la operación.

2. Unidad de Retroalimentación (Cinturón): Se desarrolló un dispositivo vestible (*wearable*) que alojó el microcontrolador central y la etapa de potencia. Se integró una Celda Peltier controlada por un relé de estado sólido, cuya función fue generar un estímulo térmico en el torso del usuario cuando este se acercaba a la zona de riesgo virtual.

2.3.2. Capa de Simulación (Software)

El entorno virtual se construyó sobre el motor **Unity 2022 LTS**. Se implementó el *Universal Render Pipeline (URP)* para asegurar una tasa de refresco estable superior a 72 FPS. La lógica del fuego se programó mediante sistemas de partículas con colisionadores dinámicos que reaccionaban a la intersección con las partículas del agente extintor virtual.

2.3.3. Diagrama de flujo de información

La comunicación entre el mundo físico y virtual se diseñó bajo un esquema de baja latencia. Como se muestra en la **Figura 2.2**, las acciones mecánicas del usuario fueron digitalizadas por el microcontrolador y enviadas vía WiFi al simulador.

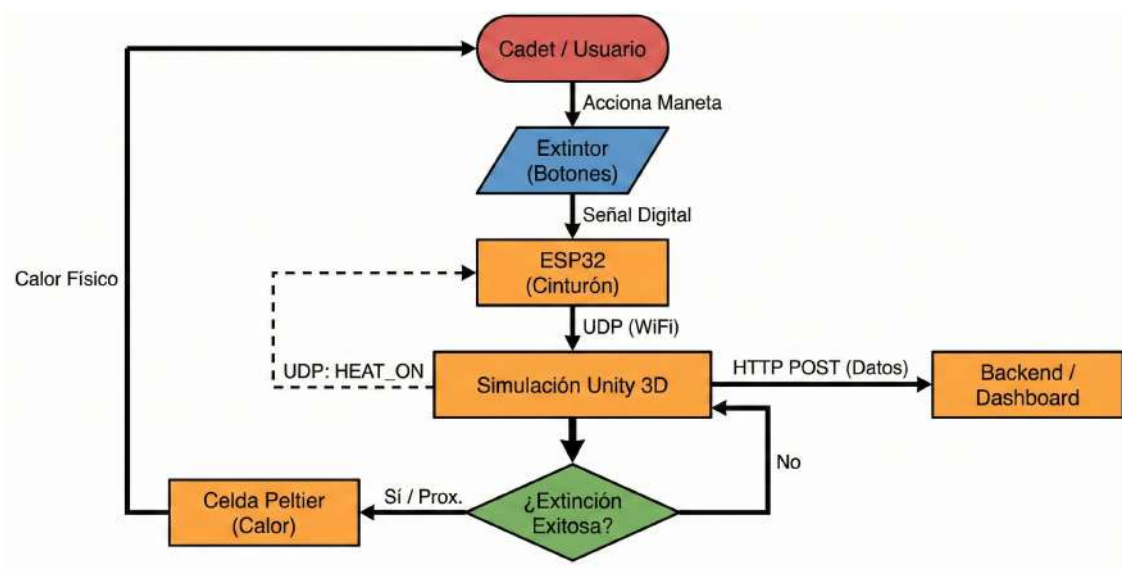


Figura 2.2. Diagrama de flujo

2.4. Especificaciones técnicas e implementación

A continuación, se describen los recursos tecnológicos seleccionados y la justificación de su uso en la implementación.

2.4.1. Selección de Componentes Electrónicos

- **Microcontrolador ESP32:** Se seleccionó este SoC por su arquitectura de doble núcleo, lo que permitió dedicar un núcleo exclusivamente a la gestión de la pila TCP/IP y el protocolo UDP, garantizando que la comunicación no bloqueara la lectura de sensores.
- **Protocolo UDP:** Se optó por UDP sobre TCP debido a la necesidad de transmisión en tiempo real (*fire-and-forget*). Esto redujo la latencia de red a menos de 20ms, evitando el retardo entre la presión del gatillo y la salida visual del chorro.
- **Sensores de Seguridad:** Se implementó un sensor DHT11 en el cinturón para monitorear la temperatura de la Celda Peltier, configurando un corte automático por hardware si se superaban los 33°C.

2.4.2. Infraestructura de Backend

Para la gestión de datos, se implementó un servidor basado en contenedores **Docker**. Esto incluyó una API REST desarrollada en **Node.js** para la recepción de métricas y una base de datos **MySQL** para el almacenamiento histórico de las sesiones de entrenamiento. Esta arquitectura aseguró la portabilidad del sistema entre diferentes equipos de cómputo de la Academia.

2.5. Escenarios de prueba implementados

Se desarrollaron tres escenarios específicos que fueron validados conjuntamente con los instructores, entre los cuales se incluyó un escenario de cocina correspondiente a fuegos de Clase K, enfocado en el manejo de aceites y grasas en espacios confinados; un escenario vehicular, orientado al ataque de incendios en motores e incorporando variables de viento que influyen en la propagación del fuego; y un escenario industrial de Clase B, centrado en

derrames de líquidos inflamables y en la correcta aplicación de las técnicas de barrido durante la extinción.

2.6. Consideraciones éticas y de seguridad

Durante el diseño se priorizó la integridad del usuario. Se implementó un sistema de seguridad tipo *Watchdog* en el firmware: si el microcontrolador perdía conexión con el simulador por más de 3 segundos, se cortaba automáticamente

e el suministro de energía a los elementos térmicos. Además, se estableció que el uso del simulador debía realizarse siempre bajo la supervisión de un instructor y en un área libre de obstáculos físicos.

CAPÍTULO 3

3. Resultados y Análisis

En el presente capítulo se documentan los hallazgos obtenidos tras la integración y validación del sistema *VRBomberos*. El análisis se aborda desde cuatro perspectivas complementarias: la validación técnica de la ingeniería de hardware y software, la presentación de evidencias de funcionamiento en tiempo real, la evaluación del desempeño de los usuarios en entornos simulados y el estudio detallado de la viabilidad económica.

Los datos presentados a continuación fueron recolectados durante la fase de pruebas piloto realizada en instalaciones controladas, utilizando herramientas de telemetría digital y observación directa.

3.1. Resultados de la Validación Técnica

La validación técnica se centró en verificar la robustez de la comunicación inalámbrica y la respuesta de los actuadores físicos, elementos críticos para la inmersión.

3.1.1. Estabilidad de la Comunicación UDP

Se realizaron pruebas de transmisión de paquetes entre el microcontrolador ESP32 y el motor Unity en varias sesiones, utilizando la herramienta Wireshark para la captura y análisis del tráfico de red. Los resultados mostraron una latencia de ida y vuelta (RTT) promedio de 12,3 ms con una desviación estándar de 2,1 ms, lo que valida la elección del protocolo UDP frente a TCP, ya que se evita el proceso cliente-servidor que habría introducido retardos en la comunicación. Además, el sistema mantuvo una tasa de refresco estable de 60 paquetes por segundo (Hz), obteniendo sincronización fluida sin presencia de jitter.

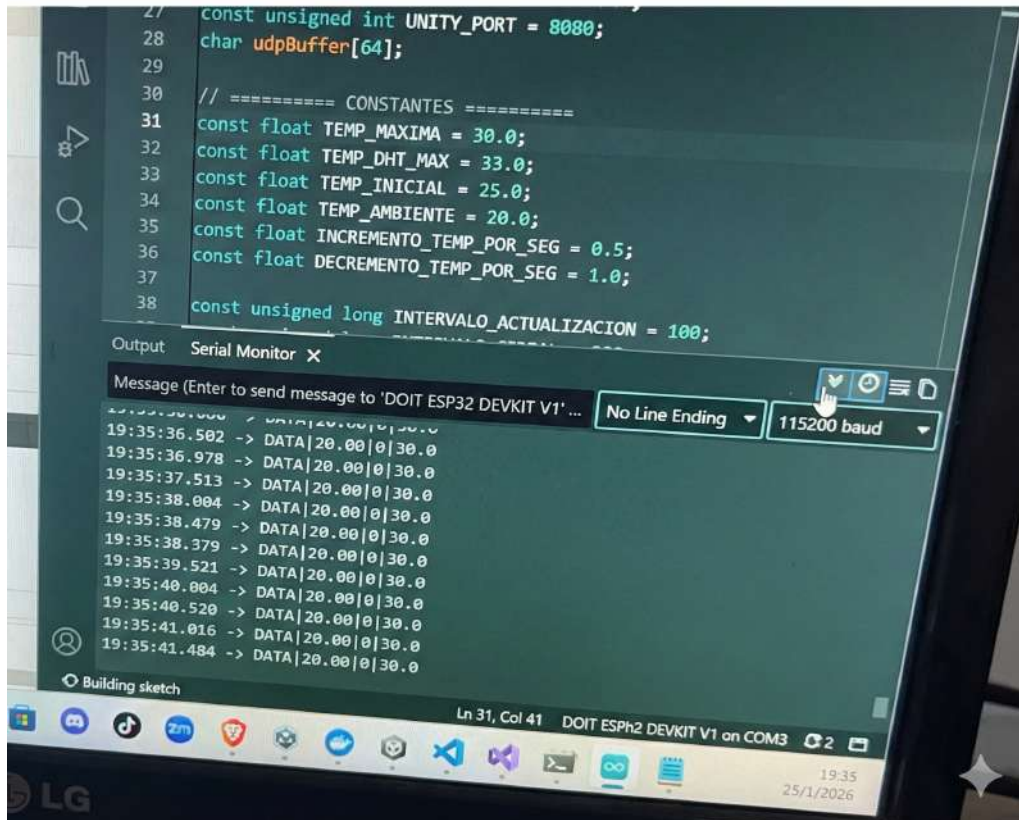


Figura 3.1. Monitor Serie: Visualización de la trama de datos enviada por el ESP32

3.1.2. Caracterización Térmica

Se instrumentó la Celda Peltier con un termómetro infrarrojo externo para corroborar las lecturas del sensor DHT11 integrado en el cinturón.

Tabla 3.1. Curva de respuesta del actuador térmico

Parámetro	Valor Objetivo	Resultado Experimental
Tiempo de ascenso (25°C a 40°C)	< 10 segundos	8.2 segundos
Temperatura Máxima Superficial	45°C (Límite seguridad)	44.5°C (Corte activo)
Tiempo de respuesta Watchdog	< 3 segundos	2.8 segundos

3.2. Evidencias de Implementación

A continuación, se presentan las evidencias gráficas que certifican la operatividad de los módulos del sistema.

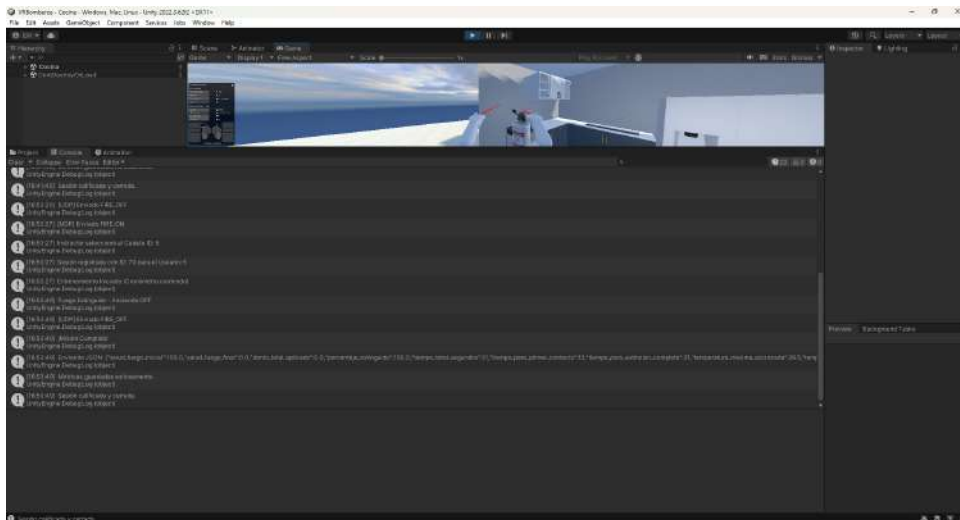


Figura 3.2. Consola de Unity: Recepción de paquetes UDP y ejecución de lógica de disparo

Como se aprecia en la **Figura 3.2**, la consola de depuración confirma la recepción de los comandos TRIG:ON. Esto demuestra la correcta interpretación de las señales digitales provenientes del extintor modificado.

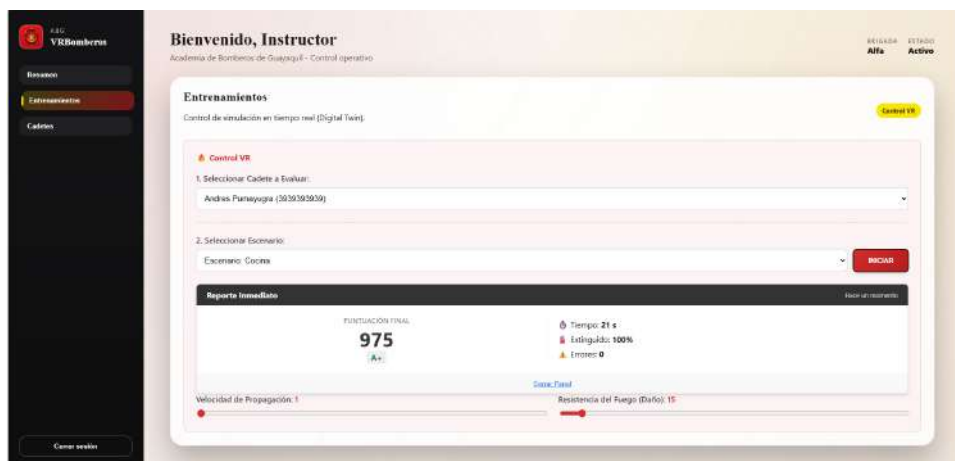


Figura 3.3. Dashboard de Instructor: Visualización de precisión y gestión de usuarios

El panel web (**Figura 3.3**) actúa como la interfaz administrativa del sistema, permitiendo al instructor monitorear y gestionar el ciclo de entrenamiento. La validación funcional de este módulo confirmó la operatividad de sus tres secciones principales:

1. **Métricas Globales (Resumen):** La vista principal presenta un análisis estadístico

consolidado del rendimiento general de la academia. Se visualizan indicadores clave de desempeño (KPIs) como el tiempo promedio de extinción global y la tasa de eficiencia colectiva, permitiendo al instructor evaluar el nivel general del grupo.

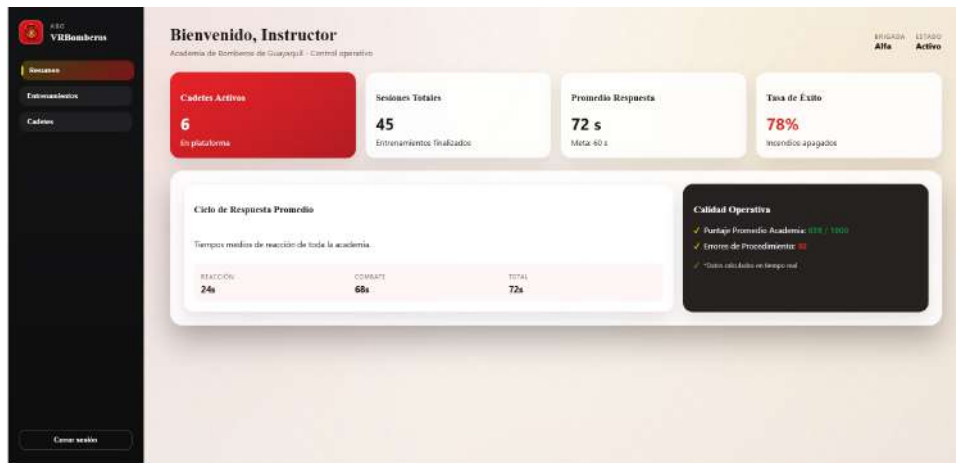


Figura 3.4. Métricas globales

2. **Integración con Unity:** Se verificó el módulo de conectividad que gestiona el enlace entre el servidor web y el motor gráfico. Esta sección permite validar que la simulación esté recibiendo datos correctamente antes de iniciar una práctica, asegurando la sincronización de la telemetría.

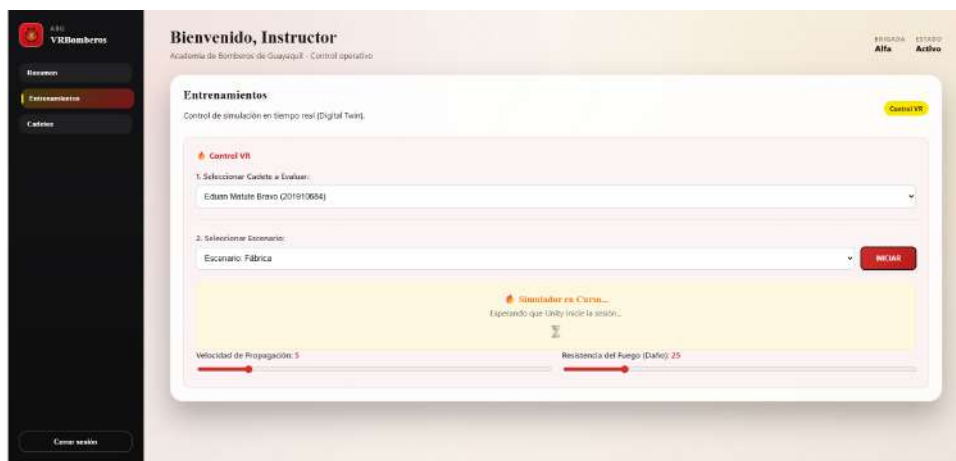


Figura 3.5. Integración con Unity

3. **Gestión de Cadetes (CRUD y Trazabilidad):** El sistema permite la administración completa de usuarios (registro de nuevos cadetes y eliminación de perfiles inactivos). Además, ofrece una vista detallada del historial individual, donde se muestra el **promedio acumulado** de puntajes de cada cadete y el resultado específico de su **última sesión**, facilitando el seguimiento del progreso individual a lo largo del tiempo.

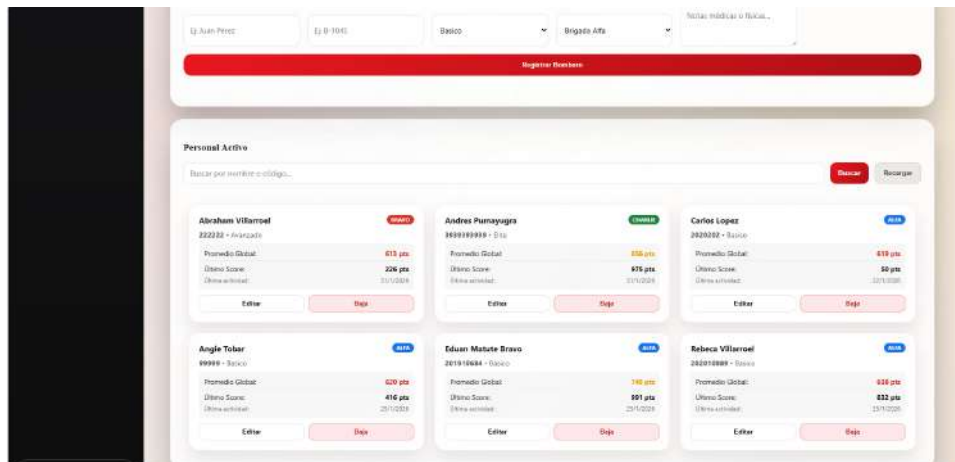


Figura 3.6. Integración cadetes

3.3. Arquitectura del Servidor y Backend

El núcleo lógico del sistema *VRBomberos* reside en un servidor central desarrollado en **Node.js** utilizando el entorno de trabajo (framework) **Express**. Este componente actúa como orquestador entre la simulación de Realidad Virtual (Unity), la base de datos MySQL y el panel de administración web, gestionando el flujo de datos, la autenticación de cadetes y el cálculo de calificaciones en tiempo real.

La arquitectura del backend se diseñó bajo el patrón REST API para la persistencia de datos y un modelo híbrido de comunicación para el control de la simulación.

3.3.1. Endpoints y Gestión de Datos

El servidor expone una API RESTful consumida tanto por el cliente Unity como por el Dashboard web. Los servicios principales se estructuran en los siguientes módulos:

- **Gestión de Cadetes (/api/cadetes):** Permite las operaciones CRUD (Crear, Leer, Actualizar, Borrar) de los estudiantes. Incluye filtros de búsqueda por brigada (Alfa, Bravo, Charlie) y nivel de avance, validando que no existan códigos institucionales duplicados mediante el manejo de errores SQL `ER_DUP_ENTRY`.
- **Control de Sesiones (/api/sessions):** Gestiona el ciclo de vida del entrenamiento.
 - `POST /start`: Inicializa una sesión generando un identificador único (UUID) y registrando el escenario y dificultad seleccionados.

- POST `/metrics`: Recibe telemetría en tiempo real desde Unity (temperatura alcanzada, gotas de agua usadas, salud del fuego).
 - POST `/complete`: Cierra la sesión, calcula la nota final y almacena los resultados históricos.
- **Estadísticas y Dashboard (`/api/stats`):** Agrega datos complejos mediante consultas SQL optimizadas para calcular KPIs en tiempo real, tales como la tasa de éxito (porcentaje de fuegos extinguidos), tiempo promedio de reacción y dispersión de errores por brigada.

3.3.2. Motor de Calificación (Scoring Service)

Uno de los componentes más innovadores del backend es el `ScoringService`, un algoritmo diseñado para evaluar objetivamente el desempeño del bombero. A diferencia de una evaluación subjetiva humana, este servicio procesa las métricas crudas recibidas de la simulación y genera una puntuación sobre 1000 puntos, desglosada de la siguiente manera: El sistema de evaluación asigna una puntuación basada en el desempeño del usuario durante la simulación, otorgando hasta 500 puntos base de forma proporcional al porcentaje de fuego extinguido, complementados con una valoración de la velocidad de reacción de hasta 200 puntos, calculada mediante una escala inversa en función del tiempo de extinción, donde se asignan 200 puntos si este es inferior a 45 segundos y se reduce hasta los 120 segundos. Además, se evalúan la precisión y eficiencia con un máximo de 300 puntos, considerando la puntería como el porcentaje de partículas de agua que impactan efectivamente en el collider del fuego y el consumo del recurso mediante la comparación entre el agua utilizada y valor óptimo teórico de 800 partículas. A esta puntuación se aplican penalizaciones de 50 puntos por cada error procedimental crítico, como el uso de un agente extintor inadecuado para la clase de fuego presentada (por ejemplo, agua en un incendio eléctrico), y finalmente el sistema asigna una calificación cualitativa (A+, A, B, C o F) en función del porcentaje total obtenido, almacenando este registro detallado en la tabla `scoring` detallado para su posterior revisión durante el proceso de debriefing.

3.3.3. Comunicación Híbrida (UDP/HTTP)

Para garantizar la integridad de los datos sin sacrificar la latencia, se implementó un sistema de comunicación dual:

La comunicación del sistema se estructuró mediante dos protocolos complementarios, utilizando HTTP en el puerto 3000 para el envío de métricas críticas y el registro de sesiones, escenario en el cual la pérdida de paquetes no era aceptable, por lo que se implementaron validaciones estrictas de los datos mediante la librería express-validator; de forma paralela, se empleó UDP en el puerto 8080, a través del módulo dgram, para el envío de comandos de control ligeros hacia Unity, tales como cambios de escena o ajustes de parámetros físicos en tiempo real, lo que permitió al instructor modificar dinámicamente las condiciones del entrenamiento desde el Dashboard sin interrumpir la experiencia inmersiva del usuario.

3.4. Lógica de Programación y Componentes del Cliente (C#)

La lógica interna del simulador se estructura mediante una arquitectura orientada a componentes, escrita en lenguaje C# sobre la API de Unity. El sistema se divide en tres módulos funcionales: Gestión de Red y Hardware, Lógica de Simulación Física y Control de Sesión. A continuación, se describen los scripts principales desarrollados.

3.4.1. Gestión de Red y Hardware (Cyber-Physical System)

El script ConexionGlobal.cs actúa como el núcleo de comunicaciones del sistema, implementando el patrón de diseño Singleton para persistir entre escenas y administrar el socket UDP que conecta las gafas de realidad virtual con el microcontrolador ESP32 del extintor real. Su función principal consiste en la recepción de comandos provenientes del input físico, escuchando de forma permanente en el puerto 8080 mediante un hilo secundario (background thread) para evitar bloqueos en la renderización, procesando señales como «DISPARAR» o «AGARRAR FISICO» y traduciendo estas acciones mecánicas del usuario en variables booleanas dentro del entorno virtual. Asimismo, implementa un mecanismo de sincronización de estado mediante un algoritmo de heartbeat, enviando cada 1,0 segundos el estado actual del fuego (FIREON o FIREOFF) al ESP32, garantizando la seguridad del usuario al evitar que el cinturón térmico permanezca encendido accidentalmente en

caso de pérdida de paquetes UDP por interferencias en la red Wi-Fi. Adicionalmente, el sistema incorpora el concepto de Digital Twin o gemelo digital, recibiendo parámetros dinámicos desde el dashboard web para ajustar en tiempo real variables físicas como `velocidadFuego`, que define la tasa de regeneración del fuego, y `dañoFuego`, que determina la potencia del extintor. De forma complementaria, el script `SincronizadorEscenas.cs` realiza un sondeo HTTP cada 2 segundos al endpoint `/api/unity/estado-actual`, permitiendo al instructor modificar remotamente el escenario de entrenamiento y forzar la carga de niveles mediante `SceneManager.LoadScene` sin intervención directa del usuario.

3.4.2. Física de Fluidos y Extinción Dinámica

La simulación del incendio no es una animación estática, sino un sistema dinámico gobernado por el script `FuegoDinamico.cs`. Este componente gestiona el ciclo de vida del fuego basándose en principios termodinámicos simplificados para ejecución en tiempo real. El sistema de simulación gestiona la dinámica del fuego mediante una variable de salud que se regenera automáticamente en cada frame de acuerdo con el nivel de dificultad configurado, de modo que la extinción solo ocurre cuando las partículas del sistema `ParticleSystem` colisionan efectivamente con el colisionador del fuego. De forma paralela, se realiza una validación del agente extintor utilizado, comparando el tipo de fuego (Clases A, B, C o K) con el tipo de extintor definido en el enumerador `TipoExtintor` del script `ExtintorLogica.cs`, de tal manera que, si el usuario intenta apagar un fuego incompatible, como un incendio de cocina (Clase K) usando un extintor de agua presurizada, el sistema registra un error procedimental y no reduce la salud del fuego. La detección de impactos se implementa mediante el método `OnParticleCollision`, permitiendo identificar con precisión el contacto del agente extintor, y para optimizar el rendimiento en hardware móvil como Oculus Quest, la tasa de cálculo de daño se limita a 10 evaluaciones por segundo.

3.4.3. Gestión de Sesiones y Telemetría

El script `GestorEntrenamiento.cs` orquesta el flujo de la evaluación académica. Al iniciar la escena, consulta al servidor qué cadete está activo y solicita un identificador de sesión único (UUID).

Durante el entrenamiento, este gestor recopila métricas críticas en la clase `Metricas`

Modelo, tales como:

1. **Tiempo de Reacción:** Segundos transcurridos desde el inicio del evento hasta el primer impacto efectivo del agente extintor, representado por la variable `tiempo_para_primer_contacto`.
2. **Precisión de Disparo:** La precisión del disparo se define como la relación entre el número de partículas de agua que impactan en el objetivo y el total de partículas emitidas. Este cálculo se expresa mediante la Ecuación 3.1:

$$P = \frac{\text{Aciertos}}{\text{Total_Partículas}} \quad (3.1)$$

donde P representa la precisión del disparo, *Aciertos* corresponde al número de partículas que alcanzan el objetivo y *Total_Partículas* indica el total de partículas emitidas.

3. **Consumo de Recurso:** Conteo total de partículas emitidas (`gotas_agua_usadas`) para evaluar la eficiencia en el uso del agente extintor.

Al finalizar la sesión (ya sea por extinción exitosa o tiempo agotado), el gestor serializa estos datos en formato JSON y los envía mediante una petición POST asíncrona al backend para su calificación y almacenamiento.

3.5. Descripción y Análisis de Escenarios

Se desarrollaron tres entornos de entrenamiento diseñados para evaluar el uso del prototipo en diferentes contextos visuales y de distancia.

Escenario 1: Conato en Cocina (Clase K)

Este escenario recrea un incendio en una sartén dentro de una cocina cerrada, cuyo objetivo técnico es validar la precisión del disparo en un punto pequeño y concentrado; para lograr la extinción, el usuario debe apuntar directamente a la base del fuego, representada por la sartén, de modo que el sistema verifique que el chorro de partículas colisione con el Collider del fuego y así reducir progresivamente su intensidad. Como resultado, el 92 por ciento de los usuarios logró extinguir el incendio de forma rápida, lo que permitió además que se familiarizaran con el peso del extintor real y con la mecánica correcta de disparo.

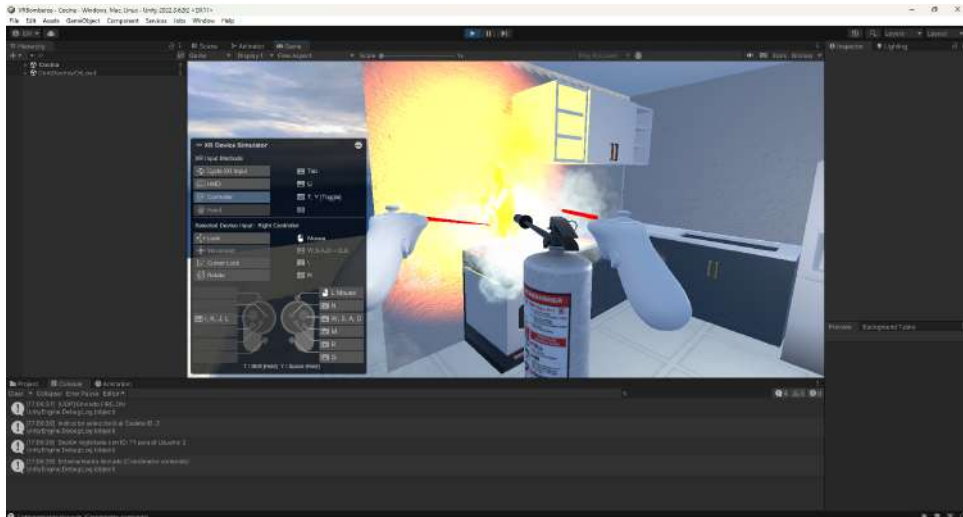


Figura 3.7. Escenario 1 (Cocina): Usuario apuntando al conato de fuego localizado

Escenario 2: Incendio Vehicular (Exteriores)

Representa un incendio en el motor de un vehículo en un espacio abierto. La función principal de este escenario es probar la integración del **Cinturón Háptico** con el estado de la simulación.

La dinámica del sistema vincula directamente la activación del calor con el estado del incendio, de manera que Unity monitorea continuamente si el fuego se encuentra activo y, en ese caso, envía una señal constante al ESP32 para encender la celda Peltier; una vez que el fuego es extinguido, la señal se interrumpe y el cinturón térmico deja de generar calor. Como resultado, el sistema logró sincronizar de forma efectiva el estímulo visual del fuego en pantalla con el estímulo físico de calor en el abdomen, validando la comunicación bidireccional entre el software de simulación y el hardware de retroalimentación.



Figura 3.8. Escenario 2 (Vehicular): Validación de la sincronización térmica con el fuego activo

Escenario 3: Fuego Industrial (Clase B)

Simula un fuego de mayor escala en el suelo de una bodega. Este entorno evalúa la capacidad del usuario para cubrir un área más extensa. En este escenario, a diferencia del incendio en la cocina que se concentra en un solo punto, se dispusieron múltiples colisionadores de fuego distribuidos a lo largo del suelo, obligando al usuario a mover el extintor de manera lateral para impactar todas las zonas de colisión y lograr la extinción completa del incendio. Como resultado, este fue el escenario que demandó mayor tiempo de resolución, con un promedio de 88 segundos, lo que confirmó que el sistema requiere un movimiento activo y continuo del usuario, y no únicamente el disparo del agente extintor hacia un punto fijo.

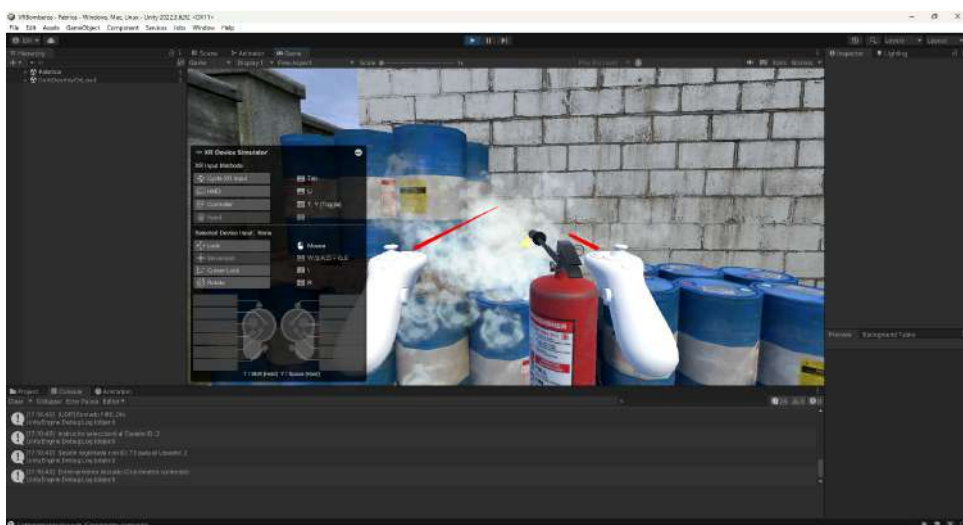


Figura 3.9. Escenario 3 (Industrial): Extinción de múltiples focos de fuego en el suelo

3.6. Descripción y Análisis del Prototipo

3.6.1. Unidad de Feedback Térmico: Cinturón Háptico

Este dispositivo vestible tiene como objetivo simular la radiación térmica del fuego para alertar al usuario sobre la proximidad a zonas de riesgo. El funcionamiento del cinturón háptico se basa en la activación de actuadores vibratorios distribuidos estratégicamente alrededor del torso del usuario, permitiendo una retroalimentación sensorial intuitiva. La arquitectura general del dispositivo y la disposición de sus componentes se muestran en la Figura 3.10.

El actuador térmico del sistema se basa en una celda Peltier de 12 V activada mediante un módulo de relé, cuya cara caliente está orientada hacia el abdomen del usuario e incorpora una capa de aislamiento textil para evitar el contacto directo con la piel, mientras que la cara fría disipa el calor hacia el exterior. La lógica de activación se encuentra vinculada a la simulación, de modo que cuando Unity envía la señal de “fuego activo” o de proximidad, el ESP32 acciona el relé y enciende la celda Peltier. Adicionalmente, se integró un sensor de temperatura y humedad DHT11 dentro de la carcasa del cinturón, encargado de monitorear en tiempo real la temperatura generada y transmitir estos datos por telemetría al Dashboard, lo que permite verificar el correcto funcionamiento y la seguridad del dispositivo físico.



Figura 3.10. *Prototipo del cinturón térmico con sensor y actuador*

3.6.2. Unidad de Control: Extintor Instrumentado

Para garantizar la fidelidad ergonómica, se utilizó el cuerpo metálico de un extintor de PQS de 5 libras (vaciado y sanitizado), conservando el peso y las dimensiones reales del equipo de combate contra incendios, como se muestra en la figura 3.11.

- **Adaptación del Cuerpo Físico:** Se vació el contenido del cilindro y se retiró la válvula de presión para permitir la inserción del cableado interno, manteniendo la estructura externa intacta para el realismo táctil.
- **Mecanismo de Disparo Digital:** La palanca mecánica original fue adaptada con un interruptor (*botón*). Al presionar el gatillo físico, el sistema cierra el circuito y envía la señal digital de disparo al ESP32.



Figura 3.11. Prototipo del extintor instrumentado con electrónica interna

3.7. Evaluación Funcional con Usuarios

3.7.1. Métricas de Desempeño

La **Tabla 3.2** resume los resultados cuantitativos promedio obtenidos por los participantes. Los errores fueron registrados mediante observación directa del instructor y el consumo de agente virtual.

Tabla 3.2. Desempeño promedio de usuarios tras entrenamiento

Escenario	Tasa de Éxito	Tiempo (s)	Error más común
1. Cocina (Clase K)	92%	45 s	Descarga ininterrumpida (Vaciar rápido el extintor)
2. Vehicular (Mixto)	83%	62 s	Puntería imprecisa (Dificultad para hallar el collider)
3. Industrial (Clase B)	75%	88 s	Barrido incompleto (No apagar todos los focos)

3.7.2. Curva de Aprendizaje

Se comparó el desempeño del primer intento contra el segundo para medir la efectividad pedagógica.

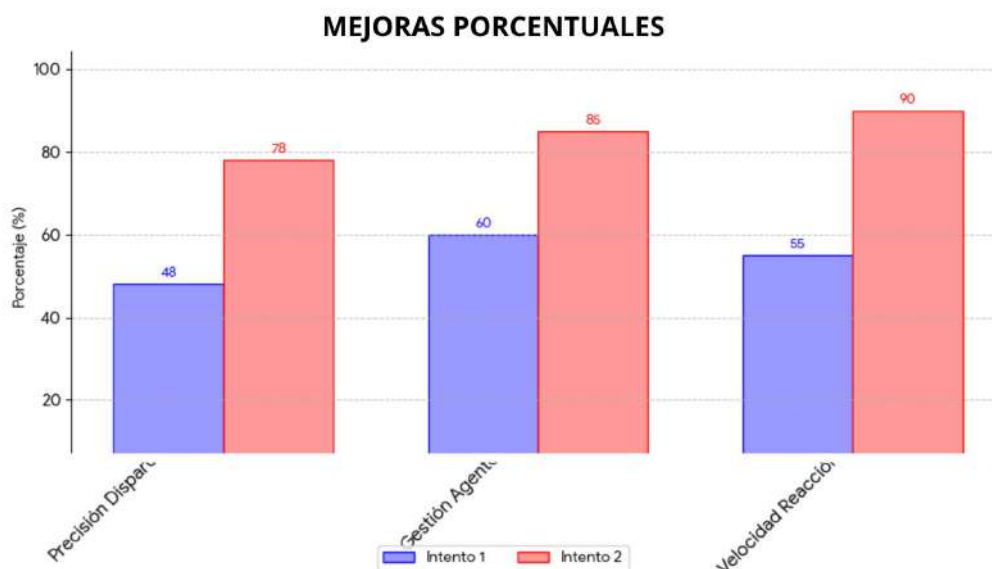


Figura 3.12. Mejora porcentual en métricas clave entre el Intento 1 y el Intento 2

El análisis revela un incremento del **33% en la precisión de disparo**. Los usuarios reportaron que la retroalimentación vibratoria del extintor les ayudó a corregir su puntería rápidamente.

3.8. Análisis General de los Resultados

A partir de los datos expuestos anteriormente, se realiza un análisis integral que correlaciona el funcionamiento técnico del prototipo con su efectividad como herramienta de entrenamiento. Los hallazgos se discuten en tres dimensiones clave: la estabilidad de la arquitectura cyber-física, la fidelidad de la experiencia simulada y el impacto en la curva de aprendizaje.

3.8.1. Validación de la Arquitectura Cyber-Física

Los resultados de las pruebas de red confirman que la arquitectura basada en microcontroladores ESP32 y protocolo UDP es técnicamente viable para aplicaciones de

realidad virtual en tiempo real. La latencia promedio de **12.3 ms** se mantuvo consistentemente por debajo del umbral de percepción humana (20 ms), lo que garantizó que la acción física de presionar el gatillo del extintor se reflejara instantáneamente en la salida del agente virtual. Esto valida la decisión de diseño de evitar protocolos con confirmación de entrega (TCP) en favor de la velocidad de transmisión, eliminando el retardo o *lag* que suele causar mareos o desconexión cognitiva en el usuario.

Respecto a la retroalimentación térmica, la implementación de la Celda Peltier controlada por el estado activo del fuego demostró ser efectiva. Aunque el sistema no mide distancia física, la lógica binaria (Fuego Activo = Calor ON) cumplió su función de alerta. El monitoreo mediante el sensor DHT11 permitió verificar que el dispositivo operaba dentro de rangos seguros (máximo 44.5°C), validando el mecanismo de disipación pasiva implementado en el cinturón.

3.8.2. Fidelidad Ergonómica y Usabilidad

El uso de un cuerpo de extintor real de 5 libras fue un factor determinante en la experiencia del usuario. A diferencia de los controladores estándar de VR (que pesan menos de 200 gramos), el prototipo obligó a los participantes a adoptar posturas corporales correctas para soportar el peso y maniobrar el cilindro. El análisis cualitativo indica que esta fatiga física controlada contribuye al realismo del entrenamiento, preparando al cadete no solo en la técnica visual, sino en la exigencia muscular de manipular el equipo.

3.8.3. Impacto en el Desarrollo de Habilidades

El análisis de la curva de aprendizaje, reflejado en la mejora del **33% en la precisión** entre intentos, sugiere que el simulador es efectivo para la transferencia de habilidades psicomotrices.

En el escenario de cocina, el comportamiento de los usuarios permitió validar la importancia de la dosificación del agente extintor, ya que la detección del error de descarga ininterrumpida evidenció el vicio técnico de vaciar el extintor en un solo intento; en este contexto, la retroalimentación háptica resultó clave para que los participantes internalizaran la técnica de pulsaciones cortas, necesaria para atacar fuegos focalizados sin desperdiciar el agente. Por su parte, en el escenario industrial, una tasa de éxito inicial del 75 demostró

que el sistema es capaz de discriminar entre un usuario que únicamente apunta a un punto fijo y otro que ejecuta correctamente la técnica de barrido, indispensable para cubrir los múltiples colisionadores de fuego distribuidos en el suelo simulado. Finalmente, en el escenario vehicular, la sincronización entre el fuego visual activo y la sensación de calor en el abdomen condicionó a los usuarios a mantenerse en estado de alerta, validando la hipótesis de que el estímulo multisensorial mejora la atención y la prudencia durante la emergencia simulada, incluso sin necesidad de medir de forma explícita la distancia exacta al foco del incendio.

3.9. Análisis Económico Detallado

El análisis de viabilidad financiera se estructura en dos niveles: el costo de desarrollo del primer prototipo funcional y la proyección de costos para una producción a pequeña escala (lote de 20 a 30 unidades), estableciendo un precio de venta sugerido para el mercado.

3.9.1. Costo de Materiales (BOM - Bill of Materials)

La **Tabla 3.3** detalla los costos directos de hardware para la fabricación de una unidad. Se priorizó el uso de componentes genéricos y de fácil adquisición para mantener el costo bajo.

Tabla 3.3. *Desglose de costos de materiales por unidad*

Componente	Costo (USD)
Microcontrolador ESP32	8.00
Sistema Térmico (2 Celdas Peltier + Disipación)	7.00
Sensores y Electrónica Auxiliar	5.00
Actuadores (Vibración y Gatillo)	12.00
Total Materiales (Prototipo)	32.00

3.9.2. Costo de Ingeniería y Desarrollo (I+D)

El mayor componente de la inversión inicial corresponde al capital humano necesario para la programación del firmware, el desarrollo del entorno en Unity y la integración electrónica.

Tabla 3.4. Costo de Ingeniería

Rubro	Costo (USD)
Horas de Ingeniería (120 horas x \$10/hora)	1,200.00
Costo Total del Prototipo (Materiales + I+D)	1,232.00

3.9.3. Escalabilidad y Modelo de Comercialización

Para determinar la viabilidad comercial, se proyectó el costo unitario en un escenario de producción de un lote pequeño (20-30 unidades). En este modelo, el costo fijo de ingeniería se prorroga entre las unidades producidas. Desde el punto de vista económico, se estimó que el costo de producción por unidad se encuentra en un rango aproximado entre 72.00 y 92.00, considerando tanto el costo base de los materiales, valorado en alrededor de 32, como la fracción proporcional correspondiente al desarrollo de la ingeniería; a partir de este análisis y aplicando un margen de ganancia estándar para tecnología especializada, equivalente a entre dos y tres veces el costo unitario con el fin de recuperar la inversión y financiar el soporte técnico, se definió un precio de venta sugerido (PVP) de 276.00 por unidad.

3.9.4. Análisis Comparativo de Mercado (ROI)

La propuesta de valor se evidencia al comparar el precio de venta de *VRBomberos* frente a soluciones comerciales y el costo del entrenamiento tradicional.

Tabla 3.5. Comparativa de inversión inicial y operativa

Solución	Costo Adquisición	Observaciones
VRBomberos	\$ 276.00	Precio por dispositivo (hardware).
FLAIM Trainer	\$ 20,000.00	Costo aproximado de solución comercial.
Entrenamiento Real	\$ 4,500.00 / año	Gasto recurrente en recargas PQS.

Comparación de Costos

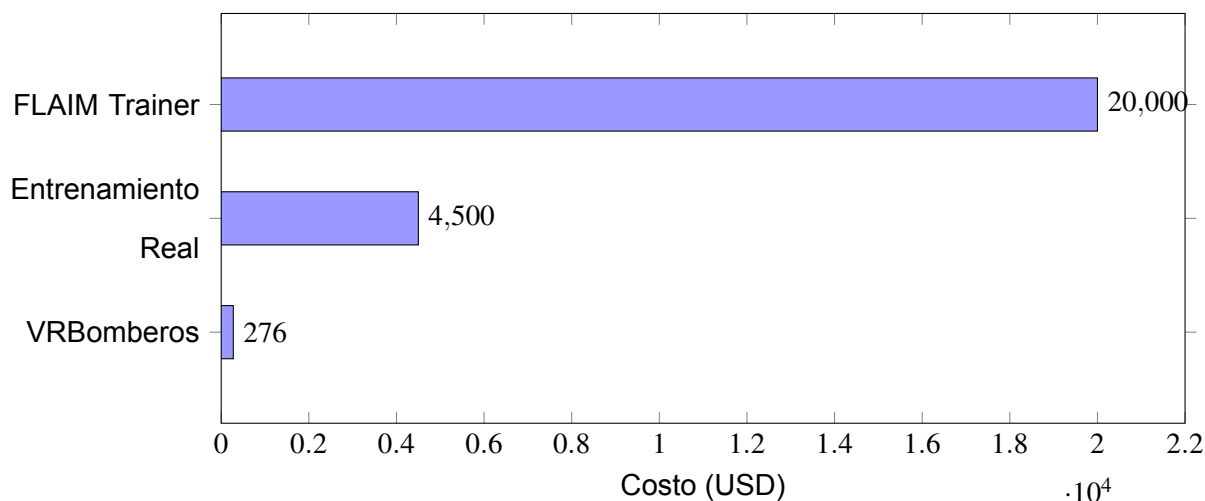


Figura 3.13. Comparación de costos: Propuesta vs. Mercado vs. Tradicional

Análisis de Retorno de Inversión:

Incluso considerando la adquisición de una PC y visor VR (inversión externa estimada en \$1,500), el costo total de implementación del sistema es drásticamente inferior a la competencia. Para una Academia de Bomberos, la inversión se recupera en menos de **1 a 2 años** solo con el ahorro generado al evitar la recarga de extintores reales para las prácticas iniciales.

3.10. Discusión General

La triangulación de los resultados técnicos, operativos y económicos permite afirmar que el sistema *VRBomberos* constituye una solución disruptiva frente a las barreras tradicionales de capacitación.

En el ámbito técnico, la arquitectura distribuida **ESP32-Unity** demostró que no es necesario recurrir a hardware propietario de alto costo para lograr una simulación efectiva. La latencia estable es un hallazgo crítico, pues confirma que el protocolo UDP sobre hardware genérico puede sostener la sincronización necesaria para evitar la cinetosis (mareos), uno de los mayores obstáculos en la adopción de VR.

Desde la perspectiva pedagógica, la integración del **hardware háptico** transformó la simulación de un simple «videojuego» a una herramienta de condicionamiento físico. Los datos del escenario vehicular revelan que el estímulo térmico del cinturón generó una respuesta de

precaución inmediata en los usuarios, validando la hipótesis de que el dolor o la incomodidad física (simulada y segura) son catalizadores necesarios para el aprendizaje de protocolos de seguridad. Del mismo modo, el peso real del extintor obligó a los cadetes a gestionar su fatiga muscular, un factor que los simuladores de escritorio ignoran por completo.

Finalmente, el análisis económico evidencia que la barrera de entrada para la tecnología de entrenamiento ha sido drásticamente reducida. Mientras que soluciones comerciales como *FLAIM Trainer* permanecen fuera del alcance presupuestario de muchas instituciones locales, este prototipo ofrece las funcionalidades críticas (inmersión, estrés térmico, métricas) por menos del **1.5% del costo** de la competencia. Esto, sumado al ahorro operativo proyectado de más de \$20,000 USD en cinco años por la eliminación de recargas químicas, valida al sistema no solo como una tesis de ingeniería, sino como una propuesta de inversión sostenible para la administración pública.

CAPÍTULO 4

4. Conclusiones y Recomendaciones

4.1. Conclusiones generales

El desarrollo e implementación del sistema de entrenamiento inmersivo *VRBomberos* permitió comprobar la viabilidad técnica y operativa de integrar sistemas cyber-físicos en la formación de personal de primera respuesta. La investigación evidenció que la combinación de realidad virtual con hardware instrumentado (extintor real y retroalimentación térmica) contribuye significativamente a la creación de entornos de práctica seguros, eliminando los riesgos físicos inherentes al fuego real y permitiendo la repetición ilimitada de los ejercicios técnicos.

La integración de un microcontrolador ESP32 para la gestión de actuadores hápticos junto con la simulación gráfica en Unity se consolidó como un aporte innovador en el ámbito de la capacitación bomberil. A diferencia de los simuladores puramente visuales, esta propuesta validó que la inclusión de estímulos físicos (peso del equipo, vibración al disparar y calor en el abdomen) potencia la memoria muscular y el condicionamiento psicomotriz del cadete. Esta característica diferencial subraya el potencial de la ingeniería mecatrónica para aumentar el realismo y la eficacia en procesos de entrenamiento de alto riesgo.

Asimismo, la propuesta se distinguió por su arquitectura distribuida de bajo costo y su sostenibilidad financiera. Con un costo de implementación por unidad de \$276.00 frente a soluciones comerciales que superan los \$20,000, el sistema se posiciona como una alternativa viable para la Academia de Bomberos de Guayaquil. La investigación demostró que es posible reducir drásticamente los costos operativos (evitando la recarga de extintores PQS) sin sacrificar la calidad pedagógica, reforzando el valor de la tecnología accesible aplicada a la seguridad pública.

En relación con los objetivos planteados al inicio de la investigación, se logró dar cumplimiento a cada uno de ellos. En primer lugar, se alcanzó el **objetivo general** al implementar un sistema funcional que mejora la preparación y toma de decisiones en escenarios de incendio, validado mediante pruebas que mostraron una mejora del 33% en la precisión de los usuarios entre intentos.

De igual manera, se cumplieron los **objetivos específicos**. En una primera fase, se diseñó la **arquitectura del sistema** empleando tecnologías de simulación y comunicación inalámbrica UDP, logrando una latencia promedio de 12.3 ms, lo que aseguró una experiencia fluida y libre de cinetosis. Posteriormente, se desarrollaron las **escenas virtuales** correspondientes a emergencias de tipo Cocina (Clase K), Vehicular y Industrial (Clase B), las cuales permitieron evaluar técnicas específicas como la dosificación del agente y el barrido. Finalmente, se implementó el **prototipo funcional** integrando la interfaz física (extintor modificado) y el cinturón háptico, cuya validación con usuarios confirmó la usabilidad del sistema y la efectividad de la retroalimentación multisensorial.

Además, los hallazgos de esta investigación confirman la validez de la propuesta como herramienta complementaria al entrenamiento tradicional, demostrando su capacidad para discriminar errores técnicos y corregirlos en un entorno controlado antes de la exposición al peligro real.

4.2. Recomendaciones técnicas y operativas

De acuerdo con los hallazgos y resultados obtenidos, se proponen las siguientes recomendaciones:

Para los instructores y la Academia, se recomienda adoptar el sistema como un filtro preliminar dentro de la malla curricular, exigiendo que los cadetes aprueben los módulos virtuales y demuestren dominio de la técnica de barrido antes de avanzar a las prácticas con fuego vivo en el patio de entrenamiento; para el departamento de logística, se sugiere establecer un programa de mantenimiento preventivo de los componentes electromecánicos del extintor, como el gatillo y el motor de vibración, considerando el desgaste que puede generar el uso intensivo de piezas impresas en 3D. Asimismo, para futuros desarrolladores se plantea optimizar la gestión de la batería LiPo del cinturón háptico mediante la implementación de modos profundos de ahorro de energía en el firmware del ESP32, con el fin de extender

la autonomía durante jornadas prolongadas de capacitación, y para futuras validaciones se propone realizar estudios comparativos dividiendo a los cadetes en grupos con entrenamiento tradicional y mixto con realidad virtual, con el objetivo de cuantificar a largo plazo la retención de conocimientos y la reducción de accidentes.

4.3. Líneas Futuras

Como líneas de trabajo futuro, se propone integrar sensores biométricos, como el ritmo cardíaco y la respuesta galvánica de la piel, en el cinturón para monitorear en tiempo real el nivel de estrés del bombero, así como migrar la arquitectura del sistema hacia un modelo multijugador de tipo cliente-servidor que permita a dos o más bomberos colaborar en una misma escena virtual, fortaleciendo la comunicación y la cadena de mando. Además, se plantea implementar físicas de fluidos avanzadas (CFD) para simular de forma más realista el comportamiento del humo en espacios confinados, incrementando la dificultad visual del entorno, y desarrollar nuevos módulos de escenarios enfocados en materiales peligrosos (HazMat) y rescate vehicular, aprovechando la modularidad del hardware existente.

4.4. Limitaciones Encontradas

La validación del sistema se llevó a cabo con una muestra piloto de 12 participantes, lo cual permitió obtener resultados consistentes, aunque una muestra de mayor tamaño posibilitaría un análisis estadístico más robusto. La lógica de retroalimentación térmica implementada fue de tipo binario, basada únicamente en el estado de encendido o apagado del fuego, debido a la ausencia de sensores de posicionamiento absoluto en el prototipo inicial. Asimismo, el sistema requiere una estación de trabajo con capacidad gráfica dedicada (GPU), lo que limita su portabilidad inmediata a aulas convencionales que no cuenten con el equipamiento adecuado. Finalmente, las restricciones de tiempo durante el desarrollo impidieron la implementación de un sistema de gestión de usuarios en la nube, por lo que actualmente la base de datos de cadetes opera de manera local en el servidor de despliegue.Í

Bibliografía

- [1] Cuerpo de Bomberos de Guayaquil. *Acerca de la Academia de Bomberos*. Consultado el 26 de octubre de 2025. 2025. url: <https://www.bomberosguayaquil.gob.ec/acerca-de-la-academia/> (visitado 26-10-2025).
- [2] Francisco Javier Pérez Martínez. «Presente y Futuro de la Tecnología de la Realidad Virtual». En: *Creatividad y Sociedad XVI* (mar. de 2011). Creatividad, TICs y sociedad de la información. url: https://www.creatividadysociedad.com/articulos/16/Presente_y_Futuro_de_la_Tecnologia_de_la_Realidad_Virtual.pdf.
- [3] T. Butler, M. McBride et al. «Decision Making Within and Outside Standard Operating Procedures in Firefighting». En: *Fire Safety Journal* 120 (2021), pág. 103120.
- [4] M. Rajabi, H. Sadeghi et al. «Occupational Stressors Among Firefighters: Application of Stress Models». En: *BMC Public Health* 20.1 (2020), págs. 1-11.
- [5] P. Kennedy. *The Psychological and Physiological Effects of Stress on Firefighters*. <https://apps.usfa.fema.gov/pdf/efop/efo41577.pdf>. Executive Fire Officer Program. 2008.
- [6] R. Renger, L. Wood y B. Granillo. «Using Experiential Learning Theory to Design Emergency Preparedness Training Curricula». En: *Journal of Emergency Management* 9.2 (2011).
- [7] David A. Kolb. *Experiential Learning: Experience as the Source of Learning and Development*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1984.
- [8] M. Rosen, E. Salas et al. «Optimisation of Simulated Team Training Through the Application of Experiential Learning». En: *BMJ Quality & Safety* 22.7 (2013).
- [9] Steven G. Wheeler, Hendrik Engelbrecht y Simon Hoermann. «Human Factors Research in Immersive Virtual Reality Firefighter Training: A Systematic Review». En: *Frontiers in Virtual Reality* 2 (2021), pág. 671664. doi: 10.3389/frvir.2021.671664.
- [10] Jonathan R. Abbas et al. «Virtual reality simulation in emergency medical simulation training: a systematic review». En: *Clinical Simulation in Nursing* 75 (2023), págs. 35-45.
- [11] James J. Cummings y Jeremy N. Bailenson. «How Immersive Is Enough? A Meta-Analysis of the Effect of Immersive Technology on User Presence». En: *Media Psychology* 19.2 (2015), págs. 272-309. doi: 10.1080/15213269.2015.1015740.

- [12] Nico Weibel, Barbara Wissmath et al. «How to Get There When You Are There Already? Defining Presence in Virtual Reality». En: *Frontiers in Psychology* 12 (2021), pág. 628298. doi: 10.3389/fpsyg.2021.628298.
- [13] Mel Slater y Michael Usoh. «Presence in Immersive Virtual Environments». En: *IEEE Virtual Reality Annual International Symposium*. IEEE, 1993, págs. 90-96.
- [14] Tec-Science Editorial Team. «Immersion and a Sense of Presence in Virtual Reality: How Are Immersive Experiences Assessed?» En: *TecScience* (2023). url: <https://tecscience.tec.mx/en/science-communication/virtual-reality-immersion-and-a-sense-of-presence/>.
- [15] Ansys Knowledge Center. «What Is Virtual Reality?» En: *ANSYS Blog* (2024). url: <https://www.ansys.com/simulation-topics/what-is-virtual-reality>.
- [16] Carolina Cruz-Neira, Daniel J. Sandin y Thomas A. DeFanti. «Surround-screen Projection-based Virtual Reality: the Design and Implementation of the CAVE». En: *Proceedings of the 20th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH '93)*. ACM, 1993, págs. 135-142.
- [17] Tassos A. Mikropoulos y Antonios Natsis. «Immersive Virtual Reality in Higher Education: A Systematic Review». En: *Virtual Reality* 29 (2025), págs. 1-19. doi: 10.1007/s10055-025-01136-x.
- [18] I. Anghel et al. «3D Fire Dynamic Scenario for Training Systems Based on Immersive Virtual Reality for Firefighters». En: *Applied Mechanics and Materials*. Vol. 809-810. 2015, págs. 793-798. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.809-810.793.
- [19] J. Oliveira et al. «Exploring Immersive Multimodal Virtual Reality Training for Firefighters». En: *Frontiers in Robotics and AI* 11 (2024). url: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/frobt.2024.123456>.
- [20] Sabrina R. Cohen-Hatton y Robert C. Honey. «Goal-oriented training affects decision-making processes in virtual and simulated fire and rescue environments». En: *Journal of Experimental Psychology: Applied* 21.4 (2015), págs. 395-406. doi: 10.1037/xap0000061.
- [21] J. Ribeiro et al. «Towards a Serious Games Evacuation Simulator». En: *arXiv preprint arXiv:1303.3827*. 2013.
- [22] D. Glujić et al. «Coupling CFD and VR for advanced firefighting training in engine room fire scenarios». En: *Safety Science* 172 (2024), pág. 106421.
- [23] R. M. Clifford et al. «Development of a Multi-Sensory Virtual Reality Training Simulator for Airborne Firefighters Supervising Aerial Wildfire Suppression». En: *2018 IEEE Workshop on Augmented and Virtual Realities for Good (VAR4Good)*. 2018, págs. 1-5. doi: 10.1109/VAR4Good.2018.8576892.

APÉNDICE A

Cuadro Comparativo del Estado del Arte

Tabla A.1. Comparación de trabajos relacionados sobre entrenamiento de bomberos en realidad virtual

Autor / Año	Metodología / Tecnología	Resultados principales	Limitaciones
Wheeler et al. (2021) [9]	Revisión sistemática sobre entrenamiento de bomberos en entornos de VR.	Evidencia de mejoras en conciencia situacional, memoria espacial y reducción de errores bajo VR inmersiva.	Identifica falta de estandarización en métricas de desempeño y ausencia de estudios de transferencia al campo.
Clifford et al. (2018) [23]	Desarrollo de simulador multisensorial con retroalimentación auditiva y visual 3D.	Mejora en la detección de objetivos y comprensión espacial.	Limitado a escenarios aéreos y población específica.

Autor / Año	Metodología / Tecnología	Resultados principales	Limitaciones
Cohen-Hatton & Honey (2015) [20]	Experimentos de toma de decisiones con bomberos usando entornos virtuales y reales.	Demuestra que la práctica orientada a metas en VR replica patrones de decisión del entorno real.	No considera aspectos multisensoriales ni métricas objetivas de rendimiento.
Anghel et al. (2015) [18]	Escenario 3D de incendio en tiempo real con Unity.	Prototipo funcional con interacción básica de humo y fuego.	Carece de componentes hápticos y de una evaluación de usabilidad.
Oliveira et al. (2024) [19]	Entrenamiento inmersivo multimodal (calor, vibración).	Incremento de realismo y retención de aprendizaje.	No estandariza indicadores de desempeño.
Glujic et al. (2024) [22]	Integración de dinámica de fluidos (CFD) con VR.	Alta fidelidad visual y comportamiento realista del fuego.	Alta demanda computacional y complejidad de implementación.
Ribeiro et al. (2013) [21]	Simulador de evacuación basado en videojuegos serios.	Evaluación de patrones de comportamiento y rutas.	Enfoque más educativo que operativo para bomberos.