

Virtual Reality Platform with AI Assistance for Simulation and Training in Nuclear Research Reactors

Federico Sastre Heer¹  Alén Eneas Geor² 

¹ INVAP S.A.U., San Carlos de Bariloche, Argentina. FSastreHeer@invap.com.ar

² INVAP S.A.U., San Carlos de Bariloche, Argentina. AEGeor@invap.com.ar

Abstract. This paper presents the development of an immersive Virtual Reality (VR) platform designed for nuclear research reactor personnel training. The system provides a high-fidelity environment that bridges the gap between academic theory and practical operations in critical facilities. The architecture is based on a decoupled integration where the virtual environment manages interaction while an external high-precision simulator processes physical and thermo-hydraulic parameters via API. A key contribution is the simulation-based engineering assistance, which supports decision-making through real-time data. The platform enables field and control room procedure assistance, allowing operators to practice complex maneuvers in a synchronized multiuser environment. This significantly reduces the need for expensive physical mockups. Additionally, an AI-powered virtual assistant, provides real-time multimodal support to guide users through critical protocols. This synergy between robust simulation, multiuser collaboration, and intelligent assistance aims to optimize learning curves and mitigate risks in real nuclear environments.

Keywords: virtual reality, nuclear reactor simulation, multiuser, generative AI, immersive training, immersive learning environment.

Plataforma de Realidad Virtual con Asistencia de IA para la Simulación y Entrenamiento en Reactores Nucleares de Investigación

Resumen. Este trabajo presenta el desarrollo de una plataforma inmersiva de Realidad Virtual (RV) diseñada para la capacitación de personal de reactores nucleares de investigación. El sistema proporciona un entorno de alta fidelidad que acorta la brecha entre la teoría académica y las operaciones prácticas en instalaciones críticas. La arquitectura se basa en una integración desacoplada donde el entorno virtual gestiona la interacción, mientras que un simulador externo de alta precisión procesa los parámetros físicos y termohidráulicos a través de una API. Una contribución clave es la asistencia de ingeniería basada en simulación, que apoya la toma de decisiones mediante datos en tiempo real. La plataforma permite la asistencia en procedimientos de campo y de sala de control, lo que permite a los operadores practicar maniobras complejas en un entorno multiusuario sincronizado. Esto reduce significativamente la necesidad de costosas maquetas físicas. Además, un asistente virtual impulsado por IA, proporciona soporte multimodal en tiempo real para guiar a los usuarios a través de protocolos críticos. Esta sinergia entre simulación robusta, colaboración multiusuario y asistencia inteligente tiene como objetivo optimizar las curvas de aprendizaje y mitigar riesgos en entornos nucleares reales.

Palabras Clave: realidad virtual, simulación de reactor nuclear, multiusuario, IA generativa, entrenamiento inmersivo, entorno de aprendizaje inmersivo.

1 Introducción

El entrenamiento del personal para reactores nucleares de investigación involucra escenarios complejos donde la seguridad y la precisión son primordiales. Como señala el Organismo Internacional de Energía Atómica (IAEA, 1998), los métodos de instrucción tradicionales basados en el estudio teórico y la operación normal de las instalaciones limitan severamente la exposición de los operadores a situaciones anómalas. Dado que en la operación diaria no se presentan entornos de accidentes o maniobras poco frecuentes, el uso de simuladores se vuelve indispensable para desarrollar la competencia crítica necesaria sin comprometer la seguridad física de la instalación. Este trabajo presenta una plataforma de entrenamiento inmersivo desarrollada por INVAP S.A.U. que aprovecha la Realidad Virtual (RV) y la Inteligencia Artificial (IA) como tecnologías aplicadas a la optimización de procesos de aprendizaje en instalaciones críticas. La principal contribución de este proyecto es la integración en tiempo real entre un simulador físico de alta complejidad basado en el estándar SMP2¹, y una plataforma de RV de grado comercial (FES). Bajo una filosofía de SimaaS², el sistema garantiza que la réplica digital se comporte según las leyes de la física nuclear, permitiendo una capacitación accesible y escalable que responde a las demandas de formación en contextos profesionales modernos.

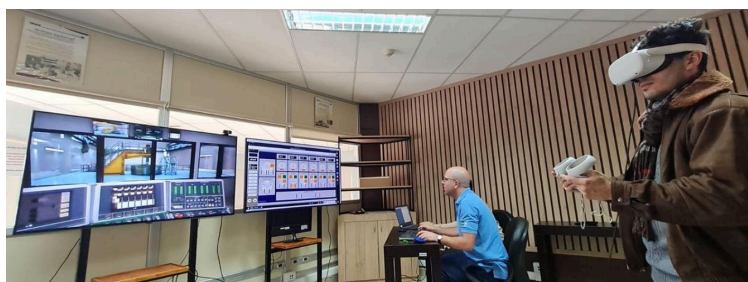


Fig. 1. Sesión de entrenamiento nuclear inmersivo: Visualización de variables del reactor en consolas externas y manipulación de controles mediante dispositivos de RV.

¹SMP2: *Simulation Model Portability 2*. Estándar de Portabilidad de Modelos de Simulación desarrollado por la Agencia Espacial Europea. Arquitectura de software basada en componentes que busca desacoplar los modelos de simulación de su infraestructura de ejecución subyacente. (ESA, 2005)

²SimaaS: *Simulator-as-a-Service*. Se define como una arquitectura orientada a servicios (SOA) en entornos de nube que busca resolver las dificultades de interoperabilidad y costos en sistemas de modelado. Su objetivo principal es proveer entornos computacionales donde las aplicaciones de simulación puedan ser consumidas directamente por los usuarios a través de la red, asegurando flexibilidad y escalabilidad sin requerir inversiones locales en plataformas físicas o licencias de software. (NATO STO, 2019)

2 Conceptos Preliminares

Simulador de entrenamiento de Reactor, *Reactor Training Simulator (RTS)*:

Simulador SMP2 basado en Python con interfaz de usuario (*frontend*) basado en React. Si bien fue desarrollado en INVAP S.A.U., no fue desarrollado directamente por los autores de este trabajo. De todas formas, se trabajó de forma conjunta para su integración con la plataforma de realidad virtual.

Simulador de Entorno de Campo, *Field Environment Simulator (FES)*:

Plataforma de realidad virtual que responde al Simulador SMP2 previamente definido. Entorno colaborativo desarrollado en Unreal Engine 5.

Asistente de IA, *AI Assistant*: Bot de asistencia contextual embebido dentro del FES. Implementado en N8N y basado en la herramienta de modelos de lenguaje Ollama. Brinda al usuario la posibilidad de consultar y recibir información específica en tiempo real.

3 Antecedentes y Trabajos Previos

Recientemente, la adopción de tecnologías inmersivas ha emergido como una alternativa para mitigar las limitaciones y riesgos en la capacitación de operarios de instalaciones críticas. En el ámbito nuclear, Szabó (2022) demostró la viabilidad de reemplazar las réplicas físicas mediante la implementación de simuladores inmersivos, utilizando entornos de Realidad Virtual (RV). Su implementación para la sala de control de la Planta Nuclear de Paks (Hungría) comprobó que este tipo de simulación reduce drásticamente los costos de infraestructura, y proporciona un nivel de realismo espacial superior al de los tradicionales monitores planos.

En una línea similar orientada a los factores humanos, Alenezi et al. (2024) validaron la eficacia de la simulación inmersiva en laboratorios radiológicos de alta actividad (*hot laboratories*). Demostró que el uso de entornos virtuales permite a los operadores dominar protocolos de alta complejidad, sin exponerlos al riesgo físico de la radiación durante su curva de aprendizaje. Esto se traduce en una mejor retención cognitiva y confianza operativa en comparación con la instrucción teórica tradicional.

Si bien estos trabajos demuestran los beneficios operativos de los entornos inmersivos en el dominio nuclear, estas soluciones operan de forma aislada (*standalone*) acopladas rígidamente a motores gráficos. Esto limita la reutilización de los modelos físicos y dificulta su despliegue a gran escala, evidenciando la necesidad de integrar estas interfaces RV con estándares de portabilidad de modelos como SMP2.

4 Arquitectura e Integración del Sistema

La plataforma está diseñada mediante una arquitectura desacoplada que separa la capa de visualización (el modelo de realidad virtual, basado en Unreal Engine 5) del núcleo de simulación (simulador SMP2 desarrollado en lenguaje Python). Este enfoque asegura que el entorno inmersivo mantenga su capacidad de respuesta incluso durante tareas computacionalmente costosas, al separar físicamente el procesamiento gráfico (renderizado y manejo de periféricos RV) del entorno de simulación. La figura 2 ilustra de forma gráfica esta arquitectura y el perfil de usuarios asociados a cada módulo del sistema (instructor, aprendiz).

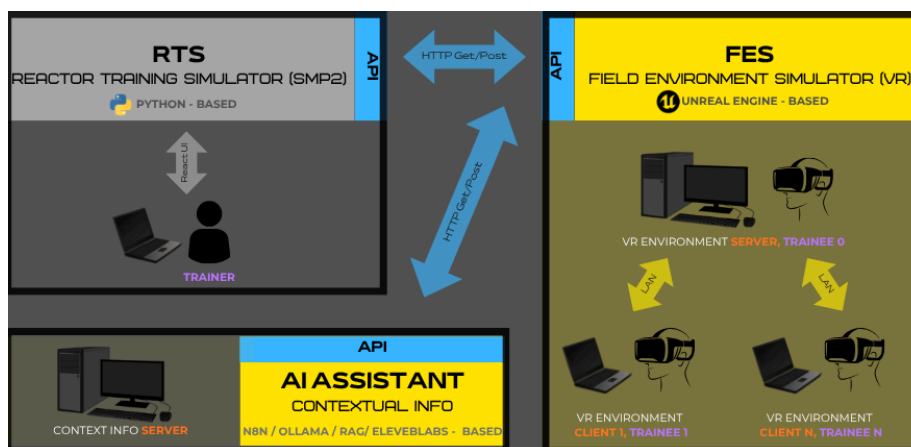


Fig. 2. Arquitectura del sistema: Integración del simulador SMP2 con el frontend de RV y el motor de IA local vía API. Nótese las leyendas en violeta ilustran perfiles de usuario, y las naranjas rol dentro de la arquitectura. Se utilizan los endpoints: La escritura se hace con POST / usando `command = set_variable_value` `curl -X POST "<http://10.64.127.238:8003/>" \ -H "Content-Type: application/json" \ -d '{ "command": "set_variable_value", "variable_name": "PushButton_Raise_PRESSED", "value": 1 }'`

4.1 Simulación Física y Conectividad API

En el núcleo del proyecto se encuentra un simulador de alta precisión desarrollado bajo el estándar SMP2, lo que garantiza un diseño modular y la portabilidad de los modelos físicos. Este simulador, implementado en Python, permite un mantenimiento ágil y una rápida implementación en servidores.

Intercambio de Datos. La comunicación entre el entorno virtual (RV) y el RTS se realiza mediante requests HTTP en red LAN (ver Fig. 2). Los datos parámetros operativos, tales como potencia, temperatura y presión del reactor se envían en tiempo real al frontend de RV del FES. **Retroalimentación.** Cuando el operador interactúa con la consola virtual, la instrucción es enviada y procesada por el backend del simulador RTS y validada por su lógica, garantizando un lazo de retroalimentación de

latencia en el orden de los 100 ms, que cumple con criterios de verificación y validación (V&V).

4.2 Colaboración Multiusuario y Eficiencia de Costos

La plataforma permite sesiones multiusuarios sincronizadas, lo que reduce significativamente la necesidad de construir réplicas físicas a escala (*mockups*) para el entrenamiento grupal. Mientras que los estados globales del reactor se sincronizan por red para todos los usuarios, las físicas de interacción inmediata (*colisiones y manipulación de objetos*) se calculan localmente en el frontend RV para evitar latencia y asegurar la inmersión.

Como se observa en la parte derecha de la Figura 2, sombreada en amarillo, puede apreciarse la arquitectura interna del ambiente RV: El servidor del entorno de realidad virtual (FES) funciona como nodo central de comunicación entre las distintas instancias de RV y el simulador (RTS). Aunque cada instancia computa localmente su procesamiento gráfico, el manejo, distribución y sincronización de señales se concentran en el servidor de RV, responsable de replicar la información del simulador. La centralización de sincronización de señales en el servidor de RV alivia la carga de procesamiento de las instancias locales.

En la Figura 3 puede apreciarse a la izquierda, el frontend del RTS (basado en React) con el que interactúa el instructor. A la izquierda, una captura 2D del *headset* de RV conectado a una instancia del FES. Puntualmente, en la consola de control del reactor.

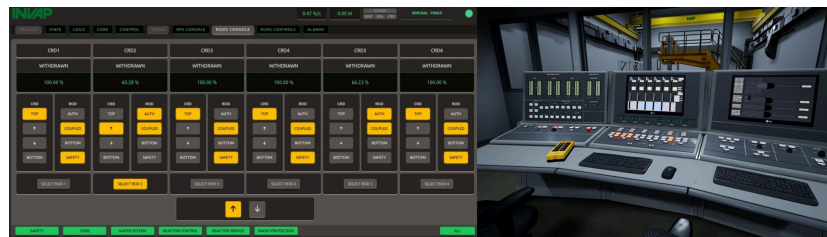


Fig. 3. Pestaña dentro de la interfaz gráfica del entrenador RTS (izquierda). Consola virtual en Realidad Virtual (derecha) sincronizada en tiempo real con los parámetros físicos del simulador del reactor

4.3 Asistente Impulsado por IA

Se integra un asistente virtual en RV que utiliza Procesamiento de Lenguaje Natural (NLP) para brindar soporte multimodal (*texto y voz*). La arquitectura de la IA se basa en una implementación de RAG ³(*Retrieval-Augmented Generation*) local, orquestada mediante n8n. Esta herramienta gestiona el flujo de datos entre la documentación técnica del reactor y el motor de inferencia, permitiendo que la IA responda consultas contextuales precisas sobre componentes y protocolos de emergencia.

Por razones de seguridad informática, confidencialidad y soberanía tecnológica, el sistema no depende de servicios en la nube. En su lugar, utiliza modelos de lenguaje (LLM) ejecutados localmente a través de Ollama. Este enfoque garantiza que la información sensible del reactor permanezca dentro de la infraestructura de INVAP S.A.U.

³ RAG: *Retrieval-Augmented Generation*. Técnica de IA que permite a los LLM recurrir a información externa y actualizada para mejorar la respuesta al usuario.

4.4 Hardware, Sistema Operativo y Motor Gráfico

La aplicación fue desarrollada bajo Windows 11 de 64 bits, en PCs equipadas con procesadores Intel Core i9 y placas de video NVIDIA RTX3060ti y/o superior. El entorno de realidad virtual se basó en el motor gráfico Unreal Engine 5.6, el cual opera como framework del *headset* de realidad virtual, el modelo Quest 3 de Meta.

El sistema de iluminación implementado es el precalculado, para lograr una calidad visual más realista a menor costo computacional.

5 Conclusiones

La integración de una simulación nuclear de alta fidelidad basada en el estándar SMP2 con tecnologías de XR y asistentes de IA local representa un avance significativo en la formación técnica y la soberanía tecnológica de INVAP S.A.U. La capacidad *multiusuario* no solo fomenta el aprendizaje colaborativo en procedimientos de campo y sala de control, sino que optimiza recursos críticos al sustituir infraestructuras físicas costosas por entornos digitales escalables y distribuidos.

Por último, se proyecta integrar la plataforma con aulas virtuales tradicionales (entornos tipo *Classroom*). Esto permitirá conectar el producto de RV y su simulador directamente con el sistema de gestión educativa. De esta manera, los instructores podrán centralizar en un solo lugar toda la información de los alumnos, haciendo un seguimiento automatizado de sus avances, notas obtenidas en las prácticas y métricas clave de desempeño ante las fallas del reactor.

6 Referencias

- Alenezi, A., et al. (2024).** Nuclear Medicine Radiological Hot Laboratory Simulation: A Mixed-Method Intervention Study on Immersive Virtual Reality for Sustainable Education. *Applied Sciences*.
- INVAP S.A.U (2024).** *Research Reactor Simulator as a Service based in SMP2*. Technical Report. San Carlos de Bariloche, Argentina.
- Ollama. (2024).** *Get up and running with large language models*. <https://ollama.com/>
- n8n.io. (2024).** *Workflow automation tool*. <https://n8n.io/>
- Szabó, B. K. (2022).** Using a virtual reality headset in the simulation of the control room of a nuclear power plant. *2022 IEEE 2nd Conference on Information Technology and Data Science (CITDS)*, 249-252. <https://doi.org/10.1109/CITDS54976.2022.9914190>
- NATO Science and Technology Organization (STO). (2019).** *Modelling and Simulation as a Service, Volume 1: MSaaS Technical Reference Architecture* (STO-TR-MSG-136). NATO STO.
- European Space Agency. (2005).** *SMP 2.0 Handbook* (Technical Report EGOS-SIM-GEN-TN-0099). European Space Agency (ESA).
- International Atomic Energy Agency. (1998).** *Selection, specification, design and use of various nuclear power plant training simulators* (IAEA-TECDOC-995). https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te_995_prn.pdf