

	POSIBILIDADES DE LA REALIDAD VIRTUAL EN LA REDUCCION DE ACCIDENTES LABORALES EN LA INDUSTRIA 4.0	
	ARTICULO / COLABORACION	David Checa, Kim Martínez, Roque Alfredo Osornio-Rios, Andres Bustillo

POSIBILIDADES DE LA REALIDAD VIRTUAL EN LA REDUCCION DE ACCIDENTES LABORALES EN LA INDUSTRIA 4.0
VIRTUAL REALITY OPPORTUNITIES IN THE REDUCTION OF OCCUPATIONAL HAZARDS IN INDUSTRY 4.0

¹David Checa, ²Kim Martínez, ³Roque Alfredo Osornio-Rios, ¹Andres Bustillo
¹ Departamento de Ingeniería Informática, Universidad de Burgos, Burgos, España
dcheca@ubu.es, abustillo@ubu.es
² Departamento de Historia, Geografía y Comunicación Universidad de Burgos, Burgos, España
kmartinez@ubu.es
³ HSPdigital CA-Mecatrónica, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro, San Juan del Rio, México
raosornio@hspdigital.org

<p>ABSTRACT:</p> <p>This work discuss the possibilities of Immersive Virtual Reality (iVR) environments in occupational risk prevention in the manufacturing industry. Firstly, a framework for iVR experiences design is presented. Secondly, two examples to demonstrate the usefulness of this scheme for the detection of occupational hazards are discussed. In the first one, the worker controls an overhead crane in a realistic iVR environment. Realism is searched to intensify user's presence in the iVR and, therefore, learning effectiveness. Visual quality is maximized and natural movements and load's inertias are programmed with this objective. The user performs different critical operations in this application. The tasks becomes more complex while the user gets used to the iVR serious game: noise level, bad lighting, presence of other workers in the working area and, especially, load unbalance. Under these conditions, the user must carry out different common tasks while avoiding accidents. In the second one, the worker moves through a factory and identifies different risk situations, taking the corresponding corrective measures. While in the first application, the user interacts with the virtual environment using a real overhead crane keypad to increase his immersion, in the second one a standard iVR interface is used, because it simulates in a natural way the interaction with virtual objects. In both cases, a data acquisition system, including positioning and eyetracking, allows the trainer to directly provide feedback to the user on his performance.</p> <p><i>Keywords: Virtual Reality; Occupational Risk Prevention; Industry 4.0; Overhead crane; Educational Games</i></p>	<p>RESUMEN:</p> <p>Este trabajo analiza las posibilidades de la Realidad Virtual Inmersiva (RVI) en la formación en prevención de riesgos laborales en la industria manufacturera actual. En primer lugar, se presenta un marco general con aspectos clave que hay que considerar en el diseño de experiencias RVI. En segundo lugar, se presentan dos ejemplos concretos ya validados experimentalmente, para demostrar la utilidad de este esquema para la detección de riesgos laborales. En el primero de ellos, el trabajador puede controlar en primera persona un puente grúa en un entorno virtual realista, tanto por la calidad visual como por la forma de movimiento de los objetos y cargas; además de realizar distintas operaciones críticas tanto por el nivel sonoro del entorno, iluminación, interacción con otros trabajadores y, en especial, por el equilibrado y geometría de las cargas a transportar. En estas condiciones debe realizar distintas tareas habituales (carga, movimiento, descarga de piezas...) y atender a la prevención de accidentes. En el segundo, el trabajador debe desplazarse por una fábrica e identificar situaciones de riesgo, así como tomar las medidas correctivas apropiadas. Mientras que en la primera aplicación el usuario interactúa con el entorno virtual utilizando una botonera real de puente grúa para aumentar su inmersión, en el segundo se utilizan mandos estándar de RVI por su facilidad para simular la interacción con objetos virtuales. En ambos casos un sistema de adquisición de datos, tanto de posicionamiento como de control de la mirada, permiten al formador proporcionar rápidamente al usuario retroalimentación sobre su rendimiento y los puntos de mejora observados.</p> <p>Palabras clave: Realidad Virtual; Prevención de Riesgos Laborales; Industria 4.0; Puente grúa; Juegos Educativos</p>
---	---

FINANCIACION

Este trabajo ha sido financiado por la Comisión Europea (proyecto RiskReal, 2020-1-ES01-KA204-081847), la Consejería de Empleo e Industria de la Junta de Castilla y León (proyectos GrúaRV, INVESTUN/18/BU/0002 y ACIS, INVESTUN/21/BU/0002) y el Banco Santander (Beca Santander Iberoamérica Investigación 2019/20).

1.- INTRODUCCION

En 1965, Sutherland describió por primera vez lo que hoy es la Realidad Virtual como "una habitación en la que un ordenador controla la existencia de la materia" [1]. Esta definición invitaba a soñar con un inmenso mundo de posibilidades, aunque los retos tecnológicos

	POSIBILIDADES DE LA REALIDAD VIRTUAL EN LA REDUCCION DE ACCIDENTES LABORALES EN LA INDUSTRIA 4.0	
	ARTICULO / COLABORACION	David Checa, Kim Martínez, Roque Alfredo Osornio-Rios, Andres Bustillo

a los que se enfrentaba impidieron que se convirtiera en realidad durante más de medio siglo. Su lenta maduración se aceleró definitivamente en la segunda década de este siglo debido a un sector económico dispuesto a convertir esta tecnología en su eje central: el ocio. De esta forma, desde hace cinco años existen en el mercado cascos de realidad virtual (conocidos habitualmente como HMDs por sus siglas en inglés, Head Mounted Displays) a un precio asequible. A estos dispositivos se unen otras tecnologías que han eclosionado a la par: procesadores gráficos de gran potencia, motores de videojuegos hiperrealistas o sensores biométricos que evalúan al usuario [2]. Esta fusión de tecnologías es lo que se conoce actualmente como Realidad Virtual Inmersiva (RVI).

La RVI se diferencia de cualquier otro sistema de visualización de imágenes creadas por ordenador en la sensación de inmersión y presencia que produce en el usuario. Estos dos conceptos se refieren a la distancia que un usuario percibe entre sí mismo y lo que recibe a través de sus sentidos. En el caso de la RVI, tras unos minutos de inmersión en el entorno virtual, este se hace prácticamente real, lo que la convierte en una tecnología especialmente adecuada para el entrenamiento y la capacitación en la industria, por un lado, y en un laboratorio flexible y de coste reducido para el sector educativo [3]. Además, permite que el usuario trabaje de forma autónoma y reciba una retroalimentación inmediata sobre su rendimiento [4].

En la relación formador-usuario, en RVI se abre un horizonte completamente distinto a cualquier tipo de formación clásica. Mientras que tradicionalmente el aprendiz siente de forma continua la presencia del formador, en RVI esta presencia puede hacerse completamente invisible si así se desea. Así, el formador puede optar por tres estrategias de presencia. En la primera controla un avatar en el entorno RVI que interactúa con el usuario, acercándose al modelo tradicional de formación. En la segunda simplemente visualiza en tiempo real el comportamiento del usuario, aportándole un feedback sonoro, reduciéndose su intrusión en el proceso de aprendizaje. En la tercera se evita cualquier interacción en tiempo real, analizándose a posteriori los datos recogidos por los sensores sobre la experiencia del usuario. Este caso es especialmente interesante porque, al no sentir el usuario la presencia del formador, se desenvuelve de una manera más natural y cercana a su comportamiento en el entorno real. Sin embargo, los sensores de posicionamiento o de seguimiento de mirada recogen todas sus reacciones: la RVI permite observar cómo se comporta un usuario con un nivel altísimo de detalle de forma no invasiva.

En el caso de la Prevención de Riesgos Laborales (PRL), la utilización de RVI añade otras ventajas específicas. En primer lugar, permite colocar al usuario en situaciones imposibles en la formación tradicional, como todas aquellas que impliquen un riesgo para el usuario, compañeros o medios materiales [5]. En segundo lugar, el carácter inmersivo de esta experiencia hace al usuario mucho más consciente de los riesgos a los que se enfrenta y las consecuencias de sus acciones, facilitando su maduración en la toma de decisiones [6]. Finalmente, al requerir la formación en PRL de actualizaciones periódicas, el uso de simuladores de RVI resulta una solución fácil, flexible y dinámica comparada con la formación tradicional [7]. De estas ventajas se aprovechan sistemas de RVI que entrenan a mineros [8], operarios de industrias químicas [9] o conductores de maquinaria pesada [10].

El objetivo de este trabajo es analizar las posibilidades de la RVI en la prevención de riesgos laborales en la industria manufacturera actual. En especial, presentar un marco general novedoso de aquellos aspectos clave a la hora de diseñar experiencias RVI, así como demostrar con dos ejemplos concretos ya validados experimentalmente, la utilidad de este esquema para la prevención de riesgos laborales en el control de puentes grúa y en la identificación de situaciones de riesgo en una fábrica actual.

2.- OPTIMIZACIÓN DE APLICACIONES DE RVI PARA LA PREVENCIÓN DE RIESGOS LABORALES

La estrategia aquí presentada adapta a la prevención de riesgos laborales mediante RVI, las metodologías básicas de "formación virtual" (sin elementos reales) [11] y aquellas específicas para RVI [3]. Se divide en 4 niveles: 1) instrucción, 2) interfaz, 3) simulación y 4) evaluación. Cada nivel se divide a su vez en varios subniveles, como recoge la Figura 1.

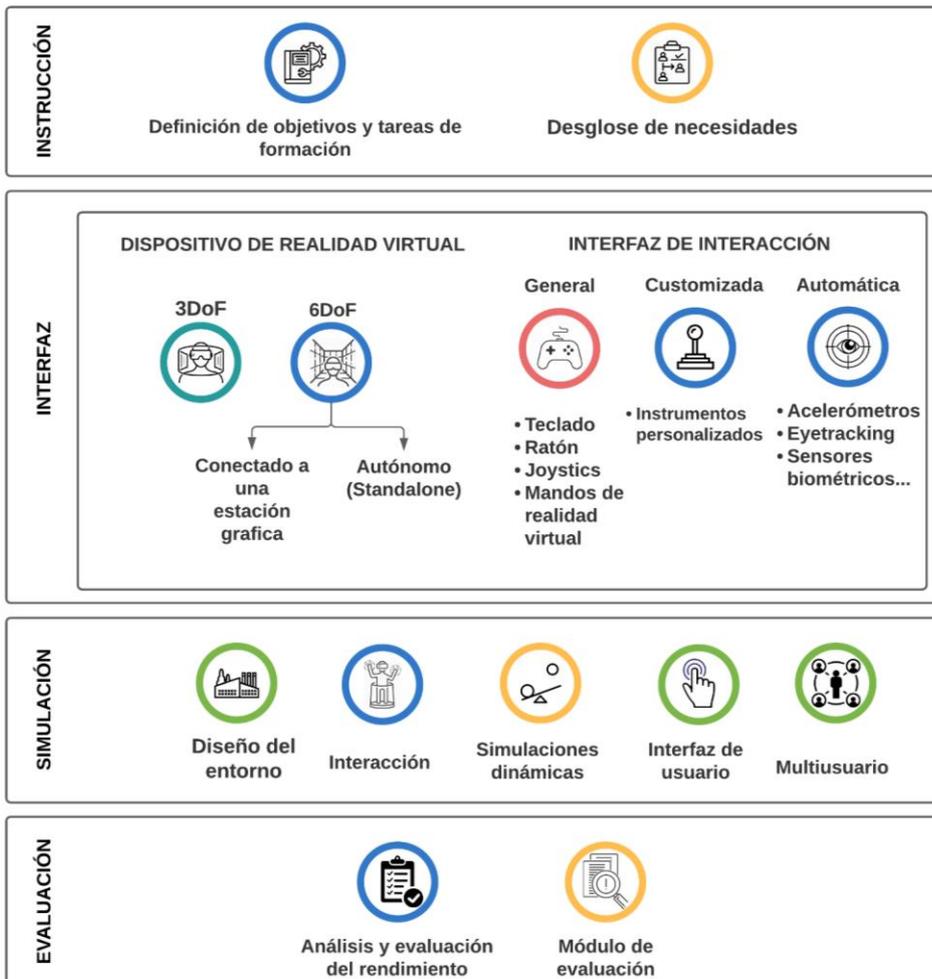


Fig. 1. Estrategia propuesta para el diseño de aplicaciones de Realidad Virtual Inmersiva en la prevención de riesgos laborales.

El primer nivel, de instrucción, incluye el desglose de necesidades, definiendo operaciones, elementos y riesgos presentes en la aplicación. Se definen las tareas a realizar por el trabajador en el entorno RVI, en función de los objetivos de formación propuestos. Estas tareas deben incluir ejercicios representativos sobre los que se han identificado los riesgos más habituales. Entre estos riesgos se encuentran los derivados del uso de maquinaria (utilización contraindicada o forzada), del operario (distracciones) o del ambiente (iluminación, etc). La elección de tareas y riesgos debe potenciar las ventajas inherentes a la RVI recogidas en la Tabla 1.

Tabla 1. Elección de tareas y riesgos más apropiados para entornos RVI en PRL.

TAREA	Riesgo asociado				Ventajas RVI	Limitaciones RVI	Tiempo para su implementación
	Proceso de trabajo	Maquinaria	Operario	Condiciones ambientales			
Identificar y evaluar riesgos	Definir EPI necesarios. Sefatización.	Suciedad, desgaste o deterioro del equipo.	Mala elección del equipo. Mala utilización del equipo.	Ruido. Iluminación insuficiente.	Favorece la comprensión de conceptos complejos y abstractos aprendiendo a través de la experiencia. Control y estadísticas sobre el progreso de los trabajadores.	Pocos contenidos ya creados. Creación de aplicaciones personalizada y costosa.	Inmediato
Operaciones con riesgo en altura	Caidas a distinto nivel. Caída de materiales u objetos. Derrumbe de estructuras.	Contactos eléctricos.	Distracciones. Atropamiento.	Condiciones climáticas adversas.	Adquirir hábitos de comportamiento concretos que aplicará en situaciones reales en su día a día.	Falta de interfaces para reproducir caídas.	Medio Plazo
Operaciones con riesgo de origen eléctrico	Contacto eléctrico directo, con conductores activos. Contacto eléctrico indirecto.	Falta de mantenimiento.	No prestar atención en el trabajo.	Iluminación insuficiente.	Permite medir el grado de atención en el desarrollo de las tareas. Comprobación de la aptitud del usuario en el manejo seguro de cualquier equipo de trabajo.	Falta de interfaces de tacto corporales para reproducir descargas eléctricas.	Medio Plazo
Operaciones con riesgo de incendio	Factores de inicio. Factores de propagación. Evacuación. Medios de lucha contra incendios.	Falta de mantenimiento.	Falta de formación.	Concentración de humo.	Permite analizar la forma de actuar de los trabajadores ante situaciones anómalas. Facilita llevar a los trabajadores a una situación de extremo riesgo, sin interferir en el funcionamiento de los equipos, sin interrumpir la actividad de la empresa.	Falta de interfaces para reproducir elevadas temperaturas.	Inmediato
Operaciones con riesgos mecánicos	Aplastamiento. Atropamiento o arrastre.	Utilización de la maquinaria por encima de sus posibilidades o en operaciones contraindicadas por el fabricante.	Manejo inadecuado de la máquina al no tener en cuenta las instrucciones del fabricante.	Condiciones iluminación adversas.	Realismo, inmersión, naturalidad. Situaciones peligrosas en un entorno seguro. Reducción de costes.	Falta de interfaces de tacto corporales para reproducir atropamiento o aplastamiento.	Inmediato
Operaciones con riesgos de naturaleza psicosocial	Estrés.	Cargas de trabajo excesivas.	Comunicación ineficaz. Acoso psicológico.	Ruido.	Permite simular demandas de trabajo excesivas. Permite mostrar los conceptos de manera más visual en lugar de explicarlos solo de forma teórica.	Necesaria una alta inmersión en el entorno de RVI, por lo que se necesitara más tiempo de entrenamiento.	Inmediato
Operaciones con riesgos ergonómicos	Posturas de trabajo forzadas. Movimientos repetitivos.	Manejo de herramientas en los que la aplicación de fuerzas sea constante.	Posturas en el trabajo deficientes.	Ruido. Iluminación insuficiente. Dimensiones reducidas.	Estudio postural del puesto de trabajo. Concebir las máquinas, equipos e instalaciones seguras y funcionales. Simular virtualmente el trabajo en el puesto con las instrucciones y procedimiento que debe seguir el usuario, validando el cumplimiento de los procedimientos.	Estándares de RV aun en desarrollo y sus contenidos de una plataforma pueden no funcionar en otras.	Inmediato

En el segundo nivel, o de interfaz, se seleccionan los dispositivos RVI e interfaces más apropiados. Existen una gran variedad de dispositivos con diferencias sustanciales en funcionalidad, portabilidad y precio. Es conveniente distinguir entre dispositivos 3DoF (grados de libertad, según su denominación inglesa, Degrees Of Freedom) y 6DoF. Los cascos de realidad virtual (HMDs) 3DoF únicamente son capaces de evaluar la orientación de la cabeza, mientras que los de 6DoF también calculan su localización en el espacio. Estos últimos se subdividen a su vez en dos tipos. Los primeros y más habituales se conectan a una estación de trabajo que se encarga de realizar los cálculos gráficos. En este caso, el HMD únicamente es responsable de posicionar al usuario y mostrar las imágenes en la pantalla. Los segundos se denominan HMDs autónomos (*standalone*) ya que no necesitan ningún otro hardware externo para funcionar; son una solución interesante por su portabilidad, pero limitada en potencia gráfica. Para la formación industrial, los equipos más utilizados actualmente son Htc Vive y Oculus Rift [4], dos HMDs 6DoF incluidos en el primer grupo. Respecto a las interfaces de interacción, se subdividen en: generales, personalizados y automáticos. A los generales pertenecen los teclados, ratones y los mandos RVI que vienen asociados a cada HMD. En el segundo grupo se incluyen todas las interfaces personalizadas por el desarrollador de la aplicación (volantes, botones, etc). Estas interfaces resultan más naturales para los usuarios, al utilizarlos en el mundo real. En el tercer grupo se encuentran todos los sensores que recogen automáticamente datos; pueden aparecer ya integrados en los HMDs, como acelerómetros o sensores de seguimiento ocular, o se adaptan al usuario, como guantes hápticos o dispositivos biométricos. Estos sensores son una herramienta fundamental para medir la carga cognitiva, lo que permite conocer mejor el rendimiento y la capacidad para tomar decisiones del usuario.

En el tercer nivel, o de simulación, se genera la aplicación RVI. Habitualmente se utiliza una interfaz de programación de aplicaciones (API en inglés) gráfica avanzada para motores de videojuegos. Unity 3D y Unreal Engine son los dos motores de videojuegos más utilizados en RVI. Estos dos motores incluyen simuladores de fuerzas físicas (dinámica de cuerpos rígidos, fluidos, etc.), motores gráficos (encargados de generar gráficos en 3D mediante métodos como rasterización, trazado de rayos, etc.) y módulos de interacción para integrar dispositivos como mandos de RVI, interfaces personalizadas o sensores. Tras la elección del motor gráfico, se procede a generar el entorno virtual. Para ello, en primer lugar, se integran los modelos 3D en el motor gráfico y se diseña la iluminación de los espacios virtuales. En el caso de formación en PRL, es importante que los objetos, dispositivos y maquinaria se representen con el mayor realismo posible, ya que el fotorealismo es imprescindible en este tipo de formación. Si, por ejemplo, se simula una carretilla elevadora, su apariencia realista y su comportamiento dinámico debe ser idéntico al real. Este punto puede ser especialmente complejo cuando se recrean situaciones físicas complejas (como el movimiento de cargas voluminosas y desequilibradas). Así mismo, la interacción con el simulador debe resultar lo más real posible, siendo las interfaces personalizadas idénticas a los controles reales la mejor solución. Si bien esta opción no siempre es posible y a veces se requiere una alternativa menos realista como el uso de mandos de RVI. Es conveniente evitar la utilización de aplicaciones con interfaces tales como ratón o teclado, porque reducen drásticamente la sensación de inmersión. Finalmente, dentro de esta tarea, se prepara el entorno formativo RVI para uno o más usuarios, aunque el uso práctico de aplicaciones colaborativas es hoy en día aún muy limitado.

Finalmente, en el cuarto nivel, o de evaluación, se desarrollan las herramientas que monitorizan el rendimiento del usuario. Estas herramientas recogerán los datos definidos en el nivel de instrucción, que aporten información en tiempo real al usuario sobre su

	POSIBILIDADES DE LA REALIDAD VIRTUAL EN LA REDUCCION DE ACCIDENTES LABORALES EN LA INDUSTRIA 4.0	Disciplina UNESCO
	ARTICULO / COLABORACION	David Checa, Kim Martínez, Roque Alfredo Osornio-Rios, Andres Bustillo

rendimiento, en forma de avisos o recomendaciones. En sistemas RVI avanzados, es posible ajustar dinámicamente las tareas a ejecutar y su nivel de dificultad, adaptándose así automáticamente al desempeño del usuario. En paralelo, en este nivel se diseña el sistema de evaluación y retroalimentación al usuario, donde se analiza el rendimiento en las diferentes tareas encomendadas.

3.- VALIDACIÓN DE LAS APLICACIONES

A continuación, se presentan dos ejemplos de aplicaciones de RVI a PRL en entornos industriales de fabricación. Ambos ejemplos están basados en la metodología presentada en la sección anterior y se pueden descargar en la referencia/link siguiente [12], junto con videos explicativos sobre su funcionamiento.

3.1 RVI APLICADO A LA PREVENCIÓN DE RIESGOS LABORALES EN EL MANEJO DE PUENTES GRÚA

Esta aplicación de RVI pretende formar en la prevención de riesgos laborales en la interacción con puentes grúa. Los puentes grúa son el método más extendido de transporte de cargas en entornos industriales. Como sus operadores no sufren inercias en el uso de esta maquinaria, pues su control se realiza por mandos remotos, su manejo en RVI resulta especialmente similar al real. Además, en este caso, la RVI permite enfrentarse a situaciones peligrosas tales como cargas desequilibradas, paso de operarios bajo la carga o tránsito por zonas mal iluminadas. Para que el proceso de entrenamiento en RVI sea lo más parecido al entrenamiento con un puente grúa real, en la aplicación se emplea un entorno RVI en primera persona; así se induce en el usuario una mayor sensación de inmersión, y se aumenta la eficacia del aprendizaje [13]. Para maximizar la naturalidad del entorno RVI, se utiliza un mando personalizado de puente grúa como interfaz.

La Figura 2 recoge la implementación de la estrategia propuesta en la sección anterior a esta aplicación industrial. En la primera fase, se definieron los objetivos formativos. El principal objetivo es lograr el correcto manejo de un puente grúa en un aprendizaje por niveles de dificultad en la prevención de riesgos laborales. Para la consecución de este objetivo se definieron operaciones y riesgos presentes en el manejo de puentes grúa. Se identificaron las siguientes operaciones como especialmente útiles para su simulación y entrenamiento:

- Transportar cargas de masa superior a la permitida por la grúa o el utillaje
- Transportar cargas desequilibradas
- Equilibrar cargas en movimiento

Y los principales factores de riesgo identificados fueron [14]:

- Oscilaciones de la carga durante su transporte con la consiguiente pérdida de estabilidad en la carga, máquina o accesorios
- Interacción de la carga o del puente grúa con el personal o con otras máquinas u objetos, en especial la caída de la carga
- Rotura de elementos de la máquina
- Ausencia o inadecuación de Equipos de Protección Individual (EPIs)
- Inadecuada iluminación
- Alta presión sonora en el entorno de trabajo
- Desplazamiento de la carga por zonas en las que transitan otros trabajadores

A continuación, se desglosaron las necesidades propias del entorno virtual a modelar. Era preciso el modelado 3D de puentes grúa, mandos, accesorios de eslingado, de elevación y elementos de unión entre accesorios o de agarres de cargas, así como el interior de una fábrica tipo, distintos operarios y EPIs necesarios. Finalmente, se definieron los diferentes niveles de la aplicación. Es recomendable en las aplicaciones de RVI dotar de un tiempo al usuario para acostumbrarse al medio y familiarizarse con las interfaces. Para ello se definió un primer nivel donde el usuario, mediante un tutorial guiado, se familiarizase con el entorno en RVI y las mecánicas que se utilizarían en la simulación (teletransportarse, coger objetos, pulsar botones...). En el segundo nivel el usuario debía familiarizarse con el uso del puente grúa, superando un pequeño circuito de obstáculos. Ya superada la fase de novedad del sistema, debían comenzar los niveles propios del aprendizaje. Primero, el usuario debía elegir los EPIs necesarios para la tarea a realizar y posteriormente el usuario se enfrentaría a distintas tareas/niveles según el accesorio de eslingado elegido, la tipología de la carga y las condiciones del movimiento, entre otros, aumentando secuencialmente la dificultad.

En la segunda fase, se eligieron las interfaces hombre-máquina a utilizar. Para este simulador se eligió el HMD Htc Vive Pro Eye. Un HMD de gama alta que incluye una pantalla de alta calidad, controladores y rastreadores (trackers) 6DOF, seguimiento ocular y sensores para el cálculo del posicionamiento del usuario en el entorno virtual. En la actualidad este HMD es el único en el mercado con estas características que además incluye un sistema integrado de seguimiento ocular, elemento fundamental para detectar, por ejemplo, si el usuario pierde de vista la carga. Respecto a la interfaz de interacción, se optó por dos soluciones: 1) dispositivos generales en forma de mandos de realidad virtual para usuarios noveles y 2) una interfaz personalizada de botonera real de puente

grúa para usuarios experimentados. Para hacerlo se incorporó una placa de control a la botonera física que sustituía los controles de los botones originales del mando por otros que envían las señales al controlador que los transmite mediante USB al ordenador.

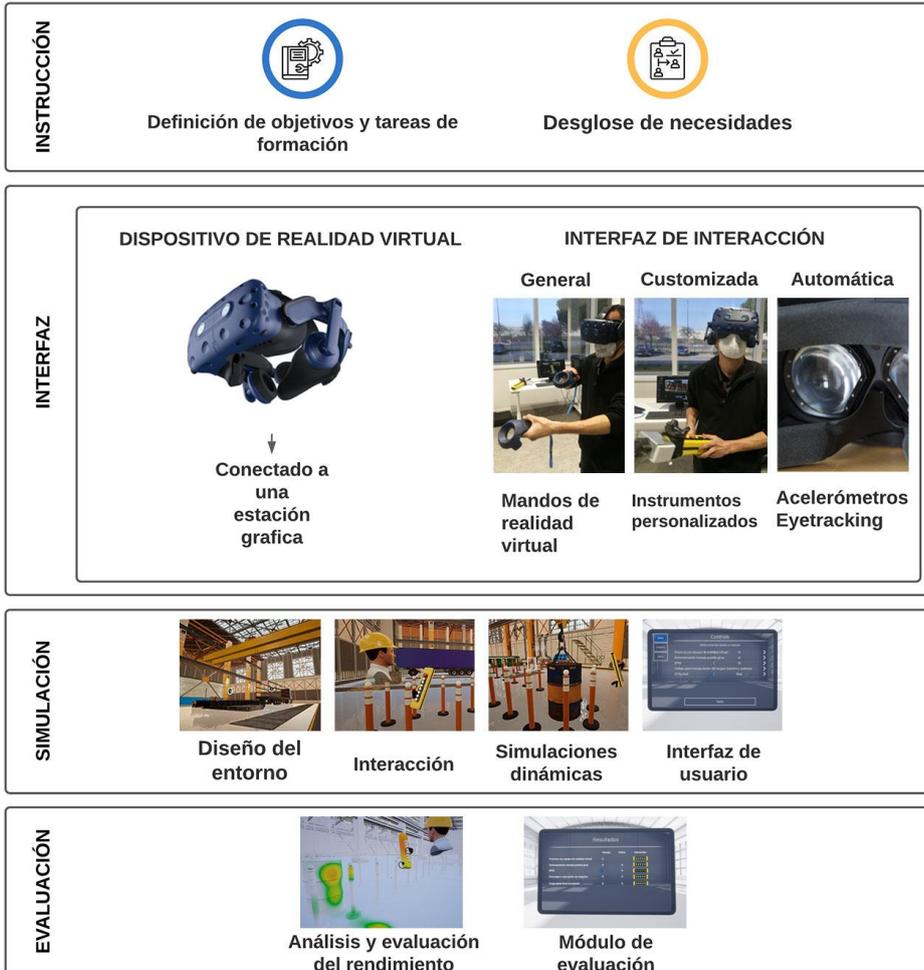


Fig. 2. Diseño del Módulo de RVI para PRL en la interacción con puentes grúa.

Para la creación del simulador de RVI se utilizó el motor de videojuegos Unreal Engine, dado que era compatible con el HMD seleccionado, facilitaba la integración de los dispositivos de interacción anteriormente descritos y proporcionaba un entorno de programación visual con herramientas para crear entornos fotorrealistas. Este motor de videojuegos incluye un motor de físicas que facilitó la programación de la simulación del movimiento de las cargas. Se generaron entonces los escenarios de entrenamiento maximizando su fotorrealismo, pero teniendo siempre en cuenta el correcto equilibrio entre calidad visual y rendimiento de cómputo. En la Figura 3 se presenta un ejemplo de la calidad visual obtenida, así como a un usuario interactuando con el puente grúa y la programación visual que sustenta esta prueba en el motor de videojuegos.



Fig. 3. Usuario interactuando con el puente grúa y ejemplo de la programación visual que lo soporta.

Para acelerar el desarrollo de la aplicación de RVI y permitir su posterior personalización a distintas necesidades de clientes industriales, se utilizó un marco de trabajo o *framework* creado anteriormente [15] que, mediante herramientas prediseñadas, simplifica el desarrollo de la aplicación. En especial, el *framework* incluye herramientas para la creación de: el movimiento del jugador (teletransporte o desplazamiento libre), las interacciones con el escenario y los objetos y la creación de tareas, sus objetivos y sus indicadores de rendimiento.

En el nivel de evaluación se recogen los siguientes datos del desempeño del usuario: identificador de usuario, tiempo empleado, fallos cometidos (choques con elementos del escenario, colocación errónea de la carga, movimientos peligrosos, etc). También se recogen datos para analizar el rendimiento del usuario tales como: la posición y rotación de la grúa, la carga, el usuario y el mando, la posición de enfoque de la mirada del usuario, la distancia entre el usuario y el punto de enfoque, la apertura del ojo y la posición y tamaño de la pupila. El *framework* utilizado incluye un plugin extractor de datos, programado en C++, cuya arquitectura puede verse en la Figura 4 y que automatiza la adquisición de estos datos. El plugin envía los datos mediante UDP Multicast para reducir la latencia. Finalmente, se diseñó un protocolo de rúbricas que utiliza un gradiente de 1 (ejecución inaceptable) a 5 (ejecución excelente), para valorar la ejecución de cada una de las tareas programadas.

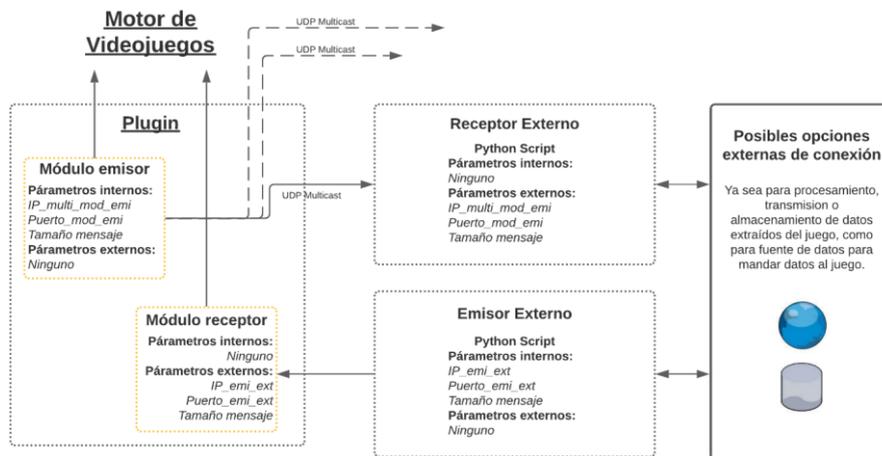


Fig. 4. Arquitectura del plugin e interacción con su entorno.

Antes del uso masivo de la aplicación, es necesario validar su usabilidad. Esta validación se realizó con un total de 23 personas divididas en dos grupos. Por un lado, estudiantes del grado superior en programación de la producción en fabricación mecánica del Centro Salesianos Padre Aramburu y por otro, guistas con amplia experiencia en el manejo de puentes grúa en procesos industriales.

Comentado [RAOR1]: No es preciso decir de donde?

	POSIBILIDADES DE LA REALIDAD VIRTUAL EN LA REDUCCION DE ACCIDENTES LABORALES EN LA INDUSTRIA 4.0	Disciplina UNESCO
	ARTICULO / COLABORACION	David Checa, Kim Martínez, Roque Alfredo Osornio-Rios, Andres Bustillo

Inmediatamente después de la experiencia, los usuarios rellenaron un cuestionario para evaluar su satisfacción, la usabilidad y la cinetosis (mareos característicos de entornos RVIs). El 86% nunca había utilizado un dispositivo de RVI anteriormente, y tan solo el 9% reportó mareos leves, siendo inexistentes para el resto de los usuarios. La satisfacción con la aplicación fue alta, un 68% la calificó como "muy buena" y el 32% restante como "buena". Respecto a la utilidad percibida por el usuario, el 82% opina que el simulador le ayudaría en el aprendizaje del manejo de un puente grúa y un 91% cree que el simulador le ha ayudado a comprender los riesgos que supone el manejo de estos equipamientos. Respecto al realismo, los usuarios otorgaron una media de 8.2 sobre 10 a la recreación de la fábrica y un 8.1 al nivel de presencia experimentada (esto es, la sensación subjetiva de estar en un lugar o entorno cuando uno se encuentra físicamente en otro). Finalmente, respecto al uso de las dos interfaces propuestas para el manejo de la aplicación (dispositivos generales en forma de mandos de RVI para los estudiantes y botonera real personalizada para los guistas profesionales) la usabilidad reportada fue mucho más alta con el dispositivo personalizado (9,1) que con los dispositivos generales (7,9), aunque en ambos casos razonablemente alta. Así mismo a guistas profesionales, tras rellenar la encuesta, se les hizo una entrevista personal mientras utilizaban de nuevo el simulador para recibir una retroalimentación más directa sobre las posibles mejoras del simulador. Se corrigieron así pequeños fallos, como la correcta velocidad de la grúa cuando se utilizan botoneras de dos posiciones de velocidad o el aumento de la distancia de frenado para grandes cargas. Estos resultados avalan el uso masivo de esta aplicación y coinciden con experiencias similares para otros sectores tales como el aprendizaje de diagramas de fase ternarios donde la interactividad y la componente espacial del aprendizaje resultan fundamentales [16]

3.2 RVI APLICADO A LA DETECCIÓN DE RIESGOS LABORALES EN ENTORNOS INDUSTRIALES

Esta segunda aplicación de RVI pretende formar en la prevención de riesgos laborales de forma general en un entorno de fabricación 4.0. Para ello se simula un recorrido por un entorno industrial donde el usuario debe evaluar y corregir errores de seguridad ante riesgos propios y ajenos. La RVI permite al usuario trabajar su capacidad de observación, así como mejorar sus conocimientos sobre los riesgos y normas de seguridad en entornos industriales.

La aplicación de la metodología propuesta en la Sección 2 para este caso concreto se recoge en la Figura 5. En la fase de instrucción, se define el objetivo principal de la formación: que el usuario aprenda a identificar las situaciones peligrosas y los comportamientos de alto riesgo en su entorno de trabajo. Para ello debe identificar, evaluar y, cuando sea posible, corregir las situaciones de riesgo mientras realiza una observación de un entorno industrial. Se identificaron las siguientes situaciones para ser simuladas en el RVI:

- Elección de EPIs adecuados a cada situación.
- Seguridad vial y respeto de las normas de circulación (seguimiento de vías peatonales, zonas restringidas...)
- Identificación de trabajadores sin uso o con uso incorrecto de EPIs
- Trabajos realizándose de forma insegura
- Señalización de situaciones de riesgo
- Señalización de zonas peligrosas

Para finalizar la fase de instrucción se definieron los diferentes niveles de la aplicación. Al igual que en la sección anterior se utiliza un primer nivel para dotar de un tiempo al usuario para acostumbrarse al medio y familiarizarse con los dispositivos. Los siguientes niveles confrontan al usuario con situaciones donde debe reconocer y detectar riesgos laborales cumpliendo estrictamente los procedimientos de seguridad.

En la fase de interfaz se eligieron los interfaces hombre-máquina a utilizar. Para esta aplicación no es necesario una interfaz personalizada y se utilizaron por tanto dispositivos generales (mandos estándar de RVI). Se optó por que la aplicación fuera compatible con el máximo número de HMDs comerciales, validándose finalmente para Htc Vive (necesita conexión con una estación gráfica) y Oculus Quest 2 (dispositivo autónomo). De esta forma se amplía el campo de utilización industrial comparado con la aplicación anterior (más exigente en el uso de interfaces personalizados), si bien presenta nuevos retos ya que la aplicación ha de funcionar en un dispositivo con un hardware muy limitado en cuando a capacidad de representación gráfica. Por ello, la fase de simulación se realizó utilizando el motor de videojuegos Unreal Engine y el framework ya descrito, por su capacidad de optimización de recursos y la facilidad de crear aplicaciones que funcionen en ambos tipos de dispositivos. Si bien, para ello hay que realizar una importante labor de optimización, reduciendo el número de polígonos de los objetos presentes en la escena y la calidad de las texturas. Para la locomoción por la escena se eligió el teletransporte, dado que evita la cinetosis, en comparación con el modo de desplazamiento libre mediante el uso de los joysticks de los mandos.

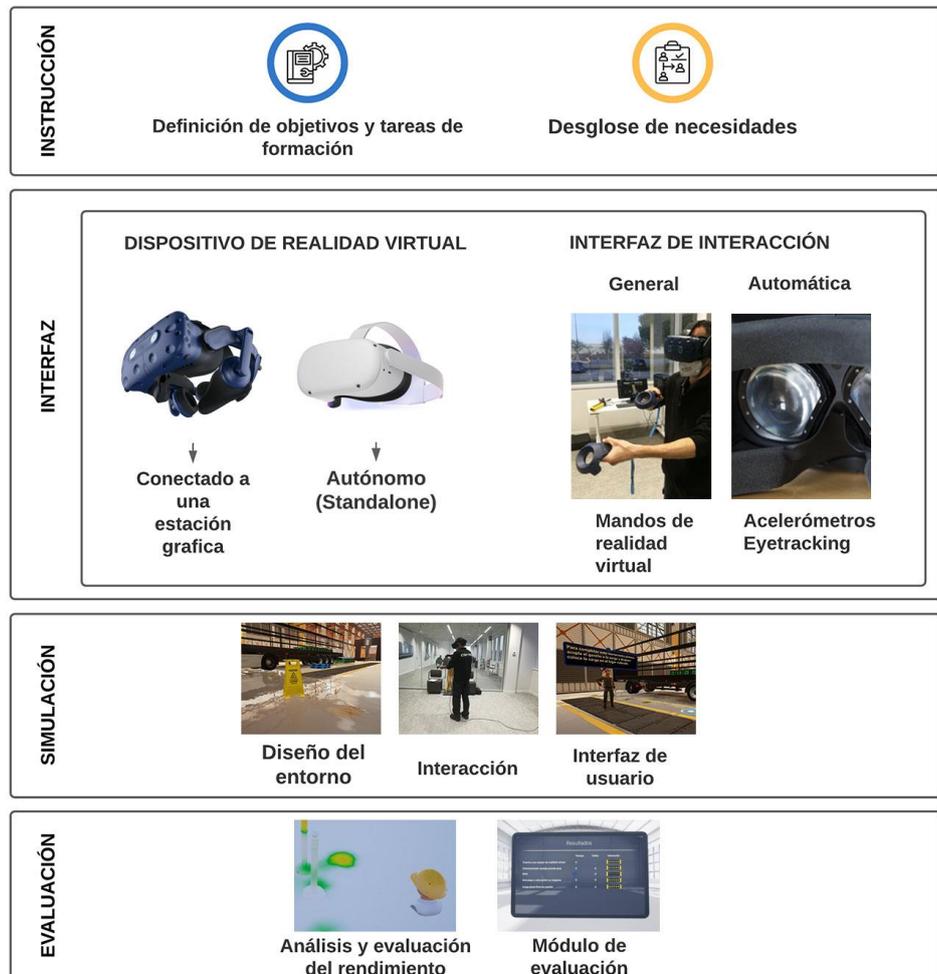


Fig. 5. Diagrama del Módulo de formación con RVI para la detección de riesgos en entornos industriales.

Finalmente, en el nivel de evaluación se recogen los siguientes datos del desempeño del usuario: identificador de usuario, tiempo empleado, grado de cumplimiento de protocolos y fallos/riesgos no detectados. Los datos para evaluar el rendimiento del usuario fueron: posición del usuario y variables del eyetracking ya señaladas en la aplicación anterior (si el HMD lo permite). Finalmente, en esta fase se utilizó también el protocolo de rúbricas diseñado para la aplicación anterior, pero personalizado para resaltar el grado de cumplimiento de protocolos de seguridad y los riesgos ajenos y propios detectados según un gradiente de 1 (inaceptable) a 5 (excelente). Además, tras la experiencia se muestra al usuario la lista de situaciones no identificadas, lo que puede orientarle hacia su mejora personal.

La usabilidad de la aplicación se evaluó con 10 alumnos de Máster Universitario, divididos en dos grupos, uno para cada tipo de HMD propuesto. Tras la experiencia, rellenaron un cuestionario de satisfacción, usabilidad y presencia de cinetosis. El grupo que utilizó el HMD conectado a una estación mostró alta satisfacción (70% respondieron Muy Buena), pero resaltaron recurrentemente la limitación

	POSIBILIDADES DE LA REALIDAD VIRTUAL EN LA REDUCCION DE ACCIDENTES LABORALES EN LA INDUSTRIA 4.0	Disciplina UNESCO
	ARTICULO / COLABORACION	David Checa, Kim Martínez, Roque Alfredo Osornio-Rios, Andres Bustillo

de movimientos que supone el cable ordenador-HMD. El grupo que utilizó un HMD autónomo mostró una satisfacción un poco más alta (85% respondieron Muy Buena) resaltando la libertad de movimientos que permite el dispositivo. Estos resultados coinciden con experiencias similares para otros sectores tales como el entrenamiento de técnicos en pruebas no destructivas con ultrasonidos donde también se priorizan la modularidad de las aplicaciones y el bajo coste computacional de las mismas [17]

4.- CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO

La Realidad Virtual Inmersiva está llamada a jugar un papel fundamental en la reducción de accidentes laborales en la Industria 4.0. Para ello hará falta crear nuevas aplicaciones RVI y es necesario la definición de metodologías de diseño optimizadas. En primer lugar, este trabajo presenta un novedoso marco general sobre la aplicación de RVI en la formación en PRL en esta industria. Ese marco identifica los siguientes aspectos clave para diseñar estas experiencias:

- Desglose de operaciones y riesgos a simular potenciando las ventajas de la RVI
- Elección del dispositivo (HMD e interacción) más adecuados
- Diseño de entorno virtual fotorrealista
- Diseño de interacciones y simulaciones naturales y fidedignas
- Análisis y evaluación del rendimiento del usuario
- Validación de la usabilidad/satisfacción/utilidad

Además, el trabajo presenta dos aplicaciones de RVI: la primera, controlando un puente grúa, muy guiada con alta interacción del usuario con su entorno y la segunda, paseando por un entorno industrial para detectar fallos de seguridad, más libre, pero con una interacción más limitada. Tanto el fotorrealismo, la sensorización y la naturalidad de las interacciones en estas aplicaciones resultan especialmente novedosas. Distintos niveles en la primera, a base de variar factores tales como el nivel sonoro del entorno, la iluminación, la interacción con otros trabajadores o el equilibrado de las cargas a transportar, facilitan el aprendizaje progresivo. En la segunda, tras la experiencia se le indican al usuario las situaciones de riesgo no detectadas. En ambos casos un sistema de adquisición de datos, tanto de posicionamiento como de control de la mirada, permiten al formador un análisis más detallado del rendimiento del trabajador para proporcionarle posibles indicaciones de mejora.

Esta estrategia tiene una serie de limitaciones: el reducido nivel de detalle en su diseño, la falta de validación final con expertos en PRL y su no-adaptabilidad a dispositivos de realidad mixta, llamados a ser una realidad comercial en el medio plazo. Además de resolver estas limitaciones, de cara al futuro resulta fundamental la optimización de la metodología propuesta para minimizar los costes de personalización así como el desarrollo de sistemas de medida fiables de la carga cognitiva durante el aprendizaje."

REFERENCIAS

- [1] I. E. Sutherland, "The ultimate display," *Proc. Congr. Int. Fed. Inf. Process.*, 1965, doi: 10.1109/MC.2005.274.
- [2] S. Das, J. Maiti, and O. B. Krishna, "Assessing mental workload in virtual reality based EOT crane operations: A multi-measure approach," *Int. J. Ind. Ergon.*, vol. 80, 2020, doi: 10.1016/j.ergon.2020.103017.
- [3] D. Vergara, J. Extremera, M. P. Rubio, and L. P. Dávila, "The proliferation of virtual laboratories in educational fields," *ADCAJ Adv. Distrib. Comput. Artif. Intell. J.*, vol. 9, no. 1, 2020, doi: 10.14201/adcaj2020918597.
- [4] D. Checa and A. Bustillo, "A review of immersive virtual reality serious games to enhance learning and training," *Multimed. Tools Appl.*, vol. 79, no. 9–10, pp. 5501–5527, 2020, doi: 10.1007/s11042-019-08348-9.
- [5] S. Nazir, R. Totaro, S. Brambilla, S. Colombo, and D. Manca, "Virtual Reality and Augmented-Virtual Reality as Tools to Train Industrial Operators," in *Computer Aided Chemical Engineering*, vol. 30, 2012.
- [6] J. Leder, T. Horlitz, P. Puschmann, V. Wittstock, and A. Schütz, "Comparing immersive virtual reality and powerpoint as methods for delivering safety training: Impacts on risk perception, learning, and decision making," *Saf. Sci.*, vol. 111, pp. 271–286, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.ssci.2018.07.021.
- [7] P. Wang, P. Wu, J. Wang, H.-L. Chi, and X. Wang, "A Critical Review of the Use of Virtual Reality in Construction Engineering Education and Training," *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 15, no. 6, pp. 1660–1601, 2018, doi: 10.3390/ijerph15061204.
- [8] A. Grabowski and J. Jankowski, "Virtual Reality-based pilot training for underground coal miners," *Saf. Sci.*, vol. 72, pp. 310–314, 2015, doi: 10.1016/j.ssci.2014.09.017.
- [9] D. Manca, S. Brambilla, and S. Colombo, "Bridging between Virtual Reality and accident simulation for training of process-industry operators," *Adv. Eng. Softw.*, vol. 55, 2013, doi: 10.1016/j.advengsoft.2012.09.002.
- [10] D. Ojados Gonzalez, B. Martín-Gorritz, I. Ibarra Berrocal, A. Macian Morales, G. Adolfo Salcedo, and B. Miguel Hernandez, "Development and assessment of a tractor driving simulator with immersive virtual reality for training to avoid occupational hazards," *Comput. Electron. Agric.*, vol. 143, pp. 111–118, 2017, doi: 10.1016/j.compag.2017.10.008.
- [11] F. Lin, L. Ye, V. G. Duffy, and C. J. Su, "Developing virtual environments for industrial training," *Inf. Sci. (Ny)*, vol. 140, no. 1–2, pp. 153–170, 2002, doi: 10.1016/S0020-0255(01)00185-2.
- [12] David Checa, "https://3dubu.es/guaravi/," May 2021. .

Comentado [RAOR2]: Valdría la pena darle una revisada a la información de las Referencias pues parece que no todas contienen la misma información por ejemplo en algunas no se pone el número de páginas, otras no el volumen o número, etc. Tratar de uniformar la información lo mas posible

	POSIBILIDADES DE LA REALIDAD VIRTUAL EN LA REDUCCION DE ACCIDENTES LABORALES EN LA INDUSTRIA 4.0	Disciplina UNESCO Subdisciplina
ARTICULO / COLABORACION	David Checa, Kim Martínez, Roque Alfredo Osornio-Rios, Andres Bustillo	

- [13] A. Bustillo, M. Alaguero, I. Miguel, J. M. Saiz, and L. S. Iglesias, "A flexible platform for the creation of 3D semi-immersive environments to teach Cultural Heritage," *Digit. Appl. Archaeol. Cult. Herit.*, vol. 2, no. 4, pp. 248–259, 2015, doi: 10.1016/j.daach.2015.11.002.
- [14] S. Sadeghi, N. Soltanmohammadlou, and P. Rahnamayiezekavat, "A systematic review of scholarly works addressing crane safety requirements," *Saf. Sci.*, vol. 133, 2021, doi: 10.1016/j.ssci.2020.105002.
- [15] D. Checa, C. Gatto, D. Cisternino, L. T. De Paolis, and A. Bustillo, "A Framework for Educational and Training Immersive Virtual Reality Experiences," in *Augmented Reality, Virtual Reality, and Computer Graphics*, 2020, pp. 220–228.
- [16] D. Vergara, M. P. Rubio, M. Lorenzo, and S. Rodríguez, "On the importance of the design of virtual reality learning environments," in *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2020, vol. 1007, doi: 10.1007/978-3-030-23990-9_18.
- [17] D. Vergara Rodríguez, M. Rodríguez Martín, M. P. Rubio Caveró, J. Ferrer Marin, F. J. Nuñez garcia, and L. Moralejo Cobo, "Technical staff training in ultrasonic non-destructive testing using virtual reality," *DYNA*, vol. 93, no. 1, 2018, doi: 10.6036/8444.

AGRADECIMIENTOS

Se desea agradecer la colaboración del personal especialista en PRL de las empresas Nicolás Correa S.A., Grupo Aciturri y Grupo Antolín-Irausa.