

## **Realidad Virtual y Realidad Aumentada: Aplicación al Entrenamiento en Escenarios de Alto Riesgo**

**Resumen.** La Neurología Conductual y la Neuropsicología han provisto un nuevo marco de comprensión para los procesos de aprendizaje y entrenamiento y los simuladores brindan experiencias significativas a estos fines desde sus formas más primitivas. La Realidad Virtual y la Realidad Aumentada, finalmente, ofrecen un nuevo espectro de posibilidades para el diseño de estas experiencias, en tanto que los modernos Motores de Juegos proveen un nuevo enfoque basado en paradigmas y patrones clásicos. Ambas tecnologías, Realidad Virtual con controladores de mano libre y Realidad Aumentada combinada con un enfoque de Internet de las Cosas, permiten diseñar experiencias de entrenamiento y enseñanza más cercanas a la realidad, asunto que ha sido del mayor interés en los distintos campos de aplicación de simuladores. Con este escenario, el propósito de este trabajo es analizar y describir un caso de control de evacuación de instalaciones durante una emergencia con corte de energía, implementado sobre Realidad Virtual, y un modelo de contaminación implementado en una escena de Realidad Aumentada con objetos interactivos, a partir de un enfoque de Internet de las Cosas, para casos de entrenamiento de Alta Fidelidad en Gestión de Crisis con Agentes CBRN (del inglés, Químicos, Biológicos, Radiológicos y Nucleares).

**Palabras Clave.** Realidad Virtual, Realidad Aumentada, Simulación, Juegos Serios, Ludificación

### **1 Introducción**

El entrenamiento de Agentes Críticos de Seguridad (Security Critical Agents, SCA) para situaciones riesgosas se ha vuelto más crítico y complejo en el tiempo, en múltiples sentidos. Los costos operativos del entrenamiento se han incrementado, la indisponibilidad de recursos estratégicos imprescindibles, consideraciones ambientales respecto del impacto de las operaciones, la sensibilidad social extrema respecto de asuntos de seguridad y sanidad pública y la baja tolerancia a fallas son algunos de los factores que han complejizado el entrenamiento especializado en situaciones críticas de seguridad y gestión de riesgos [1], [2], [3], [4].

Las tecnologías de Realidad Virtual (RV) y Realidad Aumentada (RA) brindan nuevas posibilidades para la implementación de simuladores de entrenamiento [5], [6], [7], entre otros. A su vez, la disponibilidad de nuevas herramientas de desarrollo presenta un escenario inédito en la industria de los simuladores [8].

Este trabajo brinda un análisis de consideraciones de diseño de experiencia de usuario para simuladores de entrenamiento basado en neurociencias modernas. Luego, presenta un estudio acerca del estado actual de herramientas disponibles para el desarrollo de simuladores de entrenamiento, en un sentido amplio. Finalmente, este estudio presenta un estudio más detallado de las tecnologías de RV y RA para su aplicación a simuladores de entrenamiento, junto con dos desarrollos originales: un simulador basado en RV, para control de evacuación de un galpón industrial tras un incidente de seguridad con corte de energía, y un simulador basado en RA, para intervención de agentes especializados en

incidentes radiológicos. Para cada uno de estos simuladores se desarrollaron métodos de prueba formales con voluntarios y ensayos de campo, con el objeto de validar su diseño, desarrollo y utilidad.

## **2 Aspectos de Diseño para Simuladores de Entrenamiento**

### **2.1 Ciencias Cognitivas**

El diseño de experiencias para la capacitación y el entrenamiento debería apoyarse en las bases de la neurología conductual y neuropsicología modernas [9], [10]. El aprendizaje, por ejemplo, se encuentra vinculado a la creatividad, y el estrés se considera un factor decisivo para el desempeño bajo presión [11], [12], entre otros. De las técnicas de “práctica mental”, ampliamente utilizadas en el deporte de alto rendimiento, se pueden extraer recomendaciones prácticas [13], [14], [15], entre otros, y el “condicionamiento clásico” provee un marco sólido para entender y construir asociaciones mentales [16], [17], [18].

Comúnmente se distingue entre aprendizaje motor, relacionado a habilidades y capacidades motoras (como la marcha erguida) y aprendizaje cognitivo, relacionado a percepciones, ideas, expresiones lingüísticas y todas sus representaciones [9]. Además de las tareas, objeto del aprendizaje, ciertos autores han clasificado a los actores del proceso de aprendizaje o entrenamiento según determinados perfiles de alumnos y docentes, basándose en la teoría de la predominancia cerebral hemisférica, que determina personalidades y tendencias [9]. Estas observaciones implican que el tipo de comunicación empleada, afinidades de tipo personal, cultural o de otro tipo, entre otros aspectos humanos no necesariamente relacionados con las capacidades intrínsecas individuales, pueden estar relacionados también con las diferencias en los resultados obtenidos al realizar una tarea determinada, en un contexto dado. Este punto se tuvo presente a la hora de diseñar las experiencias con los usuarios, a fin de mantener una comunicación lo más neutral y estandarizada posible a la hora de comunicar las tareas a desarrollar durante las pruebas.

Lograr un alto rendimiento en la ejecución de tareas requiere el desarrollo de conocimiento con componentes tanto cognitivos como ejecutivos, en diverso grado [9], [13]. Gracias a las técnicas de imagen modernas, el mapeo de la actividad cerebral actualmente es muy preciso en relación con tipos específicos de tareas o funciones corporales determinadas [9]. Se descubrió que a medida que se aprende más una habilidad, las áreas del cerebro involucradas en su ejecución cambian de áreas de asociación generales a áreas de propósito más específicas, liberando recursos atencionales para otras demandas eventuales [9], [10]. Este fenómeno puede apreciarse en tareas que requieren gran atención y esfuerzo para ser aprendidas, pero que, una vez automatizadas, la mente puede llevar a cabo de manera subconsciente, permitiendo enfocar la atención en otros asuntos, como por ejemplo podría ocurrir al manejar un auto. A los fines de este trabajo, además de la posible automatización de las tareas a aprender, se consideró importante que resulte sencilla la automatización de las interacciones artificiales con el sistema, de forma que los recursos atencionales se puedan enfocar en las tareas objetivo del entrenamiento.

La unidad de percepción, descrita por Ramón y Cajal, es articulada por diversos autores con la teoría de los hemisferios cerebrales, que atribuye un procesamiento lineal, secuencial y lógico al hemisferio izquierdo, y holístico y multifacético al hemisferio derecho [9]. Relacionado a métricas de desempeño humano, el coeficiente intelectual, que tuvo una concepción más estática en sus orígenes, actualmente es considerado un factor más flexible, relacionado en particular a estrategias cognitivas aprendibles y perfeccionables, y supeditado al concepto de “intrepidez intelectual”, que resulta determinante para obtener rendimientos extraordinarios [9]. La intuición se relaciona al hecho de que la mente procesa un gran cúmulo de datos de forma semiconsciente y a una reverberación del hemisferio derecho, holístico, en el hemisferio izquierdo, secuencial y lógico. El funcionamiento libre de pensamientos defensivos de la mente facilita el fluir de ideas y sus conexiones multidireccionales, en tanto que el excesivo racionalismo de las personas impulsa a veces al hombre a negarse a sí mismo y a repudiar partes presentadas a sí mismo como una aparente incoherencia o una amenaza, generando un conflicto entre razón e intuición. Los estados afectivos, finalmente, pueden inhibir, distorsionar, excitar o regular procesos cognitivos. Un estado de relajación consciente, medible en emisión de determinadas ondas cerebrales, permite la activación de vastas áreas heteromodales asociativas, en tanto que la automatización de tareas denota un decremento de carga de actividad en estas áreas, y elementos de presión, como estímulos de recompensas o amenazas, la incrementan. La creatividad se vuelve determinante para resolver problemas y la confianza resulta el elemento crítico para cualquier desempeño exitoso [9]. A los fines de este trabajo, se pretendió dar libertad a los voluntarios durante las pruebas y animarlos a elaborar y aplicar distintas estrategias de resolución.

El estrés se relaciona comúnmente a los “marcadores somáticos”, que se asocian a diversas manifestaciones físicas, y al mecanismo de “lucha o huida” enunciado por Cannon en 1932, según el cual el sistema nervioso activa alarmas en todos los niveles del organismo para aumentar la conciencia y la disponibilidad de recursos para proporcionar respuestas rápidas y potentes [9], [10]. La activación innecesaria o permanente de estos mecanismos son causas comunes de enfermedades como enfermedades coronarias, trastornos mentales, etc. El estrés y su relación con el desempeño ha sido abordado científicamente en gran medida desde el deporte competitivo de alto rendimiento. Para algunos autores, el estrés es un fenómeno subjetivo que no se produce por el entorno o las situaciones, sino por las creencias, pensamientos e interpretaciones de hechos de los individuos, y es por eso que tantas respuestas diversas al estrés surgen naturalmente de diferentes individuos. En relación con el estrés, “no importa lo que esté sucediendo, sino lo que uno cree que está sucediendo” [19]. Para mejorar las respuestas al estrés, Ruiz menciona la necesidad de un cambio de perspectiva sobre el significado de los eventos o en la fe en las capacidades propias para lidiar positivamente con situaciones estresantes y cambiar la realidad emocional en un momento dado. En este asunto nada “realmente cambia”, excepto la manera en que uno se percibe a sí mismo debido a la interpretación de los hechos [19]. Las estrategias para manejar el estrés se denominan de “enfrentamiento”, y pueden atenuar sus efectos, encauzar estímulos positivamente, o agravarlos, si se utilizan estrategias inadecuadas al contexto y al tipo de estímulos estresantes [20]. El estrés en general es un obstáculo para el aprendizaje y el buen desempeño bajo presión, pero un elemento deseable para incorporar al entrenamiento de habilidades que se aplicarán en

entornos reales con diversos niveles de control y en variedad de circunstancias. Driskell, citando a Salas, propone un modelo de estrés, basado en “elementos estresores”, siendo los más comunes ruido, restricciones de tiempo, carga de las tareas, amenazas, fatiga, etc. Los elementos estresores se presentan como la “entrada” de este modelo, el “proceso de evaluación” determina el asimilamiento de los estresores, y la “salida” se compone de respuestas fisiológicas, emocionales, cognitivas, sociales y conductuales [9], [11], [12]. La dificultad de modelar “entrenamiento bajo estrés” es que no se sabe qué estresores van a presentarse al desempeñarse una tarea en un escenario real [4]. El mismo Driskell propone en un estudio posterior que el entrenamiento bajo determinados estresores facilita la transferencia de estrategias de gestión del estrés a escenarios novedosos, respecto de un entrenamiento totalmente libre de elementos estresores [12]. De forma general, el estrés se caracteriza por la naturaleza de los estímulos, que pueden aumentar la excitación, como el ruido, o aplacarla, como el cansancio. Los tipos de tarea comúnmente determinan los elementos de estrés, estando los cognitivos más relacionados con procesos atencionales y los motores con procesos físicos y mecánico biológicos [12]. En general, a los fines del entrenamiento con simuladores, algunos factores de estrés pueden recrearse a través de detalles aparentemente insignificantes a los fines de la tarea a desarrollar, pero que terminan afectando en gran medida al ejecutor [4].

Las imágenes mentales se refieren al “proceso activo por el cual los humanos reviven sensaciones con o sin estímulos externos”, en tanto que “los humanos tienen la capacidad de generar correlatos mentales de eventos perceptuales y motores sin ningún estímulo externo desencadenante, conocidos como imágenes” [15]. La “práctica mental”, también conocida como “ensayo mental o simbólico”, es un “método de entrenamiento mediante el cual la reproducción interna de un acto motor dado se repite ampliamente con la intención de mejorar el rendimiento”. Se diferencian las “imágenes mentales” de la “práctica mental” en tanto la segunda consiste en el uso sistemático y repetitivo de las primeras con el objeto de mejorar o aprender una habilidad [15]. Driskell define “práctica mental” como “ensayo simbólico, encubierto, mental de una tarea en ausencia de ensayo real, manifiesto y físico”, y se diferencia de la “preparación mental”, que consiste en un término más general que abarcaría técnicas diversas utilizadas para mejorar el rendimiento, como “imágenes positivas, estrategias de psiquiatra, enfoque, relajación, declaraciones de autoeficacia y otras formas de preparación cognitiva o emocional antes del desempeño”. La práctica mental se ha probado efectiva, siendo objeto de investigación aplicada formal desde el deporte competitivo de alto rendimiento, que es un área específica que concentra amplios recursos en pos de lograr los mejores desempeños humanos posibles en acciones determinadas, repetitivas y estandarizadas [15], [14], así como en otras áreas, como por ejemplo rehabilitación neurológica [15]. Estudios de meta análisis han integrado y sistematizado exitosamente estos hallazgos, obtenidos a lo largo de diferentes estudios [13]. En línea con el citado trabajo de Feltz, Driskell halló factores que atenúan la efectividad de la práctica mental, y por tanto una serie de recomendaciones tendientes a optimizar su efectividad, directamente aplicables a cualquier programa de entrenamiento, en general como un complemento al entrenamiento en prácticas “reales” [13], [14]. Estos factores son tipo de tarea (componentes cognitivos y físicos), intervalo de retención (tiempo desde la última práctica), nivel de experiencia (según el tipo de tarea, la práctica mental es más efectiva en expertos que en novatos), duración de la práctica (tiempo óptimo de 20

minutos), y tipo de control (si los individuos pertenecían a grupos de control o no, si en determinadas experiencias recibían mayor atención de los investigadores). Estas recomendaciones de Driskell para la “práctica mental” se trasladaron en este trabajo a la experiencia de voluntarios para el caso de RV, durante el control de evacuación de un galpón industrial. Se determinó un tiempo objetivo de ejercicio de 20 minutos, se elaboró un ensayo previo a su ejecución sobre el mismo escenario y se determinó que la ejecución se realizara inmediatamente luego de la práctica.

El condicionamiento clásico, establecido por el famoso fisiólogo Iván Pavlov al estudiar los “reflejos condicionados” [16], identificó un fuerte vínculo entre estímulos ambientales y respuestas conductuales. La aplicación de las teorías de Pavlov al aprendizaje fue desarrollada por Thorndike y, según Bitterman, este marco teórico tiene en la actualidad una relevancia que probablemente no habría podido predecir el mismo Pavlov [17]. Si bien los reflejos condicionados proponen un marco aplicable a incontables escenarios, en este caso se puede mencionar por ejemplo la ludificación (“gamification”), que propone un marco extraído de los sistemas de recompensas de videojuegos a escenarios diversos. Prácticamente cualquier sistema de recompensas y castigos es pasible de análisis bajo un marco pavloviano [17].

## **2.2 Simuladores de Entrenamiento y Tecnologías de Juegos**

Para este trabajo se toman dos definiciones para simuladores de entrenamiento propuestas por Vaughan [6]: la “validez de constructo”, que se define como la “capacidad de un simulador para evaluar la habilidad técnica de los usuarios”, y la “validez de transferencia” que es la “capacidad de un simulador de generar habilidades trasladables a aplicaciones reales”.

La simulación, como estrategia pedagógica y de entrenamiento, se remonta en la historia humana a tiempos y formas imposibles de determinar con precisión. En aplicaciones modernas, se distinguen tres niveles de aplicación: “estratégico” (liderazgo, tareas cognitivas, largos plazos resolutivos), “táctico” (gestión, tareas cognitivas y consideraciones operativas, plazos resolutivos cortos) y “operativo” (ejecución de tareas, tendientes a lograr resultados inmediatos). El campo estratégico estuvo tradicionalmente implementado a través del planteo de situaciones teóricas [21], el táctico por planteo de escenarios concretos, como por ejemplo juegos de guerra [22], y el operativo por la recreación de situaciones para el ensayo de la ejecución de las operaciones a entrenar.

En ámbitos castrenses, se entiende por “sistema de simulación” un “artilugio con cierto grado de sofisticación con el objetivo de capacitar a individuos, secciones u organizaciones” [4]. A partir de la evolución de los sistemas de simulación para el entrenamiento surgieron soluciones puramente mecánicas, como subcalibrado de armas, polígonos interactivos, etc. Las principales ventajas de los sistemas de simulación respecto de entrenamiento real son ahorro de costos, conservación de material, impacto ecológico, repetibilidad y variación de situaciones, seguridad operativa y disponibilidad de los medios de entrenamiento, entre otros [4]. Respecto del estrés, los simuladores favorecen la confianza de los individuos mediante la mejora de habilidades necesarias para su desempeño. No obstante, el exceso en el uso de simuladores y la falta de entrenamiento operativo real puede causar una

adaptación inconsciente en el usuario al simulador, en particular hacia las simplificaciones propias del mismo, que siempre existen, afectando la efectividad de su entrenamiento, en función de lo cual sería recomendable una práctica balanceada entre simuladores y distintas formas de entrenamiento operativo real [4].

Los primeros simuladores basados en computadoras presentaron modelos virtuales, en su mayoría numéricos, en los que el usuario podía interactuar principalmente mediante la manipulación de variables por medios primitivos de interacción, que emulaban acciones específicas en un escenario real. Una de las aplicaciones más exitosas de estos simuladores fueron los sistemas de capacitación para seguridad en las centrales nucleares, que presentaban modelos complejos con numerosas variables dinámicas y un conjunto de operaciones que un usuario podía aplicar al sistema [23], [24].

Una etapa más avanzada de simuladores, desde el punto de vista de tecnología inmersiva, fueron los simuladores de vuelo. Su historia se remonta al primer simulador, desarrollado por Edwin Link en 1929, y se encuentra ampliamente desarrollada en numerosos estudios específicos [25]. Un avance de interés para diversas aplicaciones surgido de los simuladores de vuelo fueron las plataformas de movimiento, resultando la configuración propuesta por Stewart en 1965 la más exitosa, que consta de un sistema de actuadores paralelos que permite mover la cabina del simulador con 6 grados de libertad, en un rango acotado, con el fin de proveer estímulos creíbles a la propiocepción del usuario, según las aceleraciones lineales y velocidades de giro del vehículo tripulado [26], [27]. Esta solución resultó luego extendida para dar soporte al movimiento de simuladores de todo tipo de vehículos. Actualmente, la inclusión de estas plataformas es lo que diferencia “simuladores de vuelo completos” de “entrenadores de vuelo”, según estándares internacionales [28], [29]. Con el tiempo, los avances en sistemas gráficos relegaron la necesidad de disponer de un servidor dedicado y costoso, como los provistos en su momento por la empresa Silicon Graphics Computer Systems, en favor de hardware que actualmente y para la mayoría de los propósitos es asequible por prácticamente cualquier consumidor final. En la actualidad hay diversos simuladores avanzados, desde proyectos libres de código abierto como FlightGear, hasta productos COTS de alto rendimiento como el próximo Microsoft Flight Simulator, X-Plane 11 de Laminar Research, DCS World, de Eagle Dynamics y P3D, de Lockheed Martin. Todos estos simuladores ofrecen la posibilidad de desarrollar extensiones a través de interfaces para el agregado de dispositivos de entrada-salida, captura de datos de telemetría de vuelo e integración con herramientas de terceros, como por ejemplo programas de control de misión y debriefing, nuevos vehículos y terrenos con mayor detalle.

Los simuladores de vuelo han liderado la industria no sólo por la aplicación y desarrollo de novedades tecnológicas [30], sino también por la formalización de su uso como herramientas de capacitación, a través de la especificación de estándares internacionales y programas formales de entrenamiento y evaluación [28], [29].

Con la mayor accesibilidad a sistemas gráficos de calidad, también se empezaron a producir simuladores de conducción de vehículos, atendiendo una industria más limitada en términos de recursos por operario respecto de la aeronáutica. En general, la aplicación de estos simuladores se ha visto acotada a casos profesionales en la industria logística y a la conducción de vehículos militares y de emergencias (patrulleros y ambulancias), reportando

algunas publicaciones impactos mensurables en operaciones reales en la mejora de capacidades y en la baja de accidentes [3]. Sucesivas familias de simuladores se han desarrollado para todo tipo de vehículos navales, con estándares regidos por la International Maritime Organization (IMO), pudiendo de forma general establecerse la categoría para todas estas familias de simuladores como “simuladores de vehículos”.

Simuladores de maquinaria pesada (grúas, guinches, etc.) presentan interfaces similares a las de los vehículos, mediante tableros de control (con volantes, botones y palancas), y visualización de cabina, y se encuentran mayormente vinculados a la industria logística.

A partir de este análisis, este trabajo propone una taxonomía para simuladores según su “tipo de control”. “Simuladores de Control Instrumental” (SCI) son aquellos en que el usuario interactúa con el entorno simulado a través de instrumentos en tableros de control. En los “Simuladores de Control Corporal” (SCC), el espacio personal del usuario y el movimiento de su cuerpo se ven involucrados en la acción del simulador de forma natural, en tanto que los “Simuladores de Control Autónomo” (SCA) no involucran interacción humana, y se utilizan para validación de modelos teóricos, ensayos y entrenamiento de sistemas de inteligencia artificial, etc., y no son por lo tanto el objeto de este trabajo.

Los SCC que actualmente tienen mayor campo de aplicación son los simuladores para entrenamiento médico, en tanto soluciones modernas han permitido el reemplazo de otras puramente mecánicas como maniqués, cadáveres y animales. En particular, esta área lidera también la aplicación de RV y dispositivos hápticos (“táctiles”), presentando ya probadas ventajas de estas tecnologías respecto de otras soluciones [6].

La retroalimentación háptica en estos simuladores es intrínsecamente más compleja que en los simuladores de vuelo, en que los controles con resistencia mecánica interactiva y las plataformas de movimiento brindaban todos los estímulos necesarios. Los simuladores médicos suelen recrear interacciones físicas de las manos, eventualmente a través de instrumentos quirúrgicos como pinzas, tornos, jeringas, etc., con estructuras complejas como huesos, carne, tendones, cartílagos y venas. A pesar de la complejidad de estas interacciones, diversas soluciones hápticas ya reportan resultados favorables en capacitación formal [6], [7]. Técnicamente, se diferencia la retroalimentación de fuerza/torque de la retroalimentación táctil, en tanto que la primera está relacionada con sensaciones nerviosas musculares, tendinosas y esqueléticas asociadas a la propiocepción, y la segunda a sensaciones causadas por terminaciones nerviosas ubicadas debajo de la piel, asociadas al frío, al calor y a las diversas texturas perceptibles por el tacto. La mayoría de los dispositivos hápticos en aplicación se refieren a la retroalimentación de fuerza y torque [7].

La RV también comenzó a mostrar resultados positivos en aplicación a simuladores de entrenamiento para personal operativo de plantas industriales [1], implementando combinadas interacciones artificiales con acciones propias de actividades específicas en entornos virtuales. La aplicación de los simuladores a la educación es difícil de distinguir de la aplicación de los videojuegos a este mismo fin. Desde los primeros juegos educativos, como el “Logo Programming” o “The Oregon Trail”, estas prácticas están aún lejos de alcanzar un nivel de estandarización como por ejemplo el de los simuladores de vuelo, mientras que numerosos estudios han reportado diversos resultados y factores que atenúan

su efectividad. El término “juegos serios” refiere al uso de videojuegos con fines serios, distintos al entretenimiento, en tanto que “Game Based Learning” (GBL) refiere a “el uso de tecnología basada en juegos para ofrecer, apoyar y mejorar la enseñanza, el aprendizaje y la evaluación”, resultando que la inclusión de videojuegos en el proceso de enseñanza tiene implicancias cognitivas, afectivas y conductuales [31]. Otros estudios han encontrado una correlación en médicos cirujanos entre habilidad en los videojuegos y habilidades quirúrgicas laparoscópicas, concluyendo que los videojuegos podrían ser una herramienta de capacitación para estas operaciones [32]. Otros estudios se han enfocado en el desarrollo de habilidades motoras en niños mediante videojuegos [33], [34].

La “ludificación” (gamification) es definida como un “término general para el uso de elementos de videojuegos (en lugar de juegos completos) para mejorar la experiencia del usuario y su participación y compromiso en servicios y aplicaciones que no son un juego”, apelando a la psicología emocional de los videojuegos y a la “tecnología persuasiva” [35]. Diversos estudios dan cuenta de los resultados positivos obtenidos con técnicas de ludificación, así como también de algunos riesgos e implicancias de su utilización [36], [37].

Zyda [38], estableció que “la aplicación de tecnologías de juegos y simulaciones a dominios que no son de entretenimiento resulta en juegos serios”. El término fue extendido para referirse también al aprendizaje mejorado por computadora [39], y se volvió objeto de estudio formal [31], [40]. Las áreas más involucradas en juegos serios son militares, gubernamentales, educativas, corporativas y de atención médica, entre otros, y los actores más típicos involucrados son investigadores, desarrolladores de juegos y consumidores en sus roles para el desarrollo del mercado, además de ser los usuarios finales [39]. Los deportes electrónicos (eSports) completan el panorama, integrando una industria del entretenimiento masiva que moviliza mundialmente más recursos que, por ejemplo, el cine, e involucra audiencias que superan a las de los deportes tradicionales [41].

Este trabajo considera dos paradigmas para el despliegue e instalación de simuladores: modelo centralista y modelo distribuido. El primero es el propio de simuladores complejos, que requieren instalaciones especiales y tienden a instalarse en centros de simulación, como podrían ser simuladores de vuelo completos certificados. El paradigma distribuido apunta al uso de plataformas en la nube para la distribución de contenido de entrenamiento que sea posible de utilizar con hardware relativamente estándar de mercado, como por ejemplo a través de dispositivos móviles Android o iOS, visores de RV como Oculus Quest, o de RA como Microsoft HoloLens.

La adopción de tecnologías de videojuegos por parte de diversas industrias ya es una tendencia generalmente aceptada [8], [4]. Por otra parte, la adaptación de videojuegos para su uso en simuladores dio lugar al término “simuladores ligeros”, en tanto estos no desarrollan su infraestructura tecnológica sino que explotan capacidades de modding de videojuegos lanzados al mercado [2], mientras que otros enfoques abordan el desarrollo de simuladores a partir de frameworks profesionales provistos por la industria formal [42], y otros directamente abordan el desarrollo a partir de “motores de juegos”, que son las herramientas profesionales más comunes en la industria de los videojuegos.

Paul et. al. definen “motor de juegos” como una “plataforma para realizar tareas comunes relacionadas a los juegos, como renderizado, cálculos relacionados con la física y entrada



de datos, para que los desarrolladores puedan centrarse en los detalles que hacen que su juego sea único” [43]. Los motores de juegos pueden caracterizarse por la licencia de producto, funcionalidades, periféricos (en particular para este estudio interesan los frameworks de RV y RA), lenguajes y plataformas soportados, rendimiento, etc. La comunidad de desarrolladores es también un valor agregado importante, ya que los motores de juegos presentan un “efecto de red”, que tiende a favorecer a los que logran una ventaja inicial ante iguales condiciones (éxito para los que tienen éxito) [44]. Los motores de juegos presentan estructuras tendientes a organizar los proyectos, y se puede hallar en su implementación los patrones de diseño de la programación orientada a objetos clásica [45], [46]. Los motores de juegos, de alguna manera son una gran implementación del patrón “método plantilla”, tal como lo definió la “Gang of Four” [45].

Diversos motores de juegos ofrecen productos maduros en el mercado para dar soporte a simuladores de todo tipo. Entre ellos, el motor de juegos Unity lidera ampliamente el mercado de desarrollos independientes, de pequeña a mediana escala, así como también por gran ventaja el mercado de aplicaciones de RV y RA [47], [48], entre otros.

### **2.3 Realidad Virtual y Realidad Aumentada**

La inmersión es un fenómeno mental, mayormente deseable a los fines de diversas expresiones artísticas, como la narración y la pintura. Relacionada con la concentración, y a veces también con la imaginación, la inmersión se basa en actividades cognitivas complejas que crean sentido y coherencia a partir de interacciones con factores externos relacionados.

Algunos trabajos estudian la historia de la RV a partir de los primeros estudios de la visión estereoscópica de Wheatstone y Brewster de primera mitad del siglo XIX [49], [50], [5]. Mazurik diferencia la RV “de escritorio” (PC convencional), “de pecera”, basada en sistemas CAVE [51], e “inmersiva”, basada en cascos (Head Mounted Display, HMD) [5]. En el presente trabajo se toma la definición de Steuer de RV: “entorno real o simulado en el que un perceptor experimenta telepresencia”, basado en la “telepresencia” (experiencia de presencia en un entorno a través de un medio de comunicación) y en la “presencia” (sensación de estar en un ambiente) [52]. Otros conceptos importantes son la “vivacidad” (riqueza del ambiente), “interactividad” (posibilidades de interacción), “amplitud sensorial” (cantidad de sentidos involucrados) y “profundidad sensorial” (resolución de cada nivel perceptivo) [52]. A su vez, Morton Heilig, creador de Sensorama, atribuyó a cada sentido perceptivo humano una participación en la experiencia total de presencia: vista 70%, audición 20%, olfato 5%, tacto 4% y gusto 1% [5].

Cruz-Neira et. al. introdujeron el concepto de CAVE, un arreglo inmersivo de pantallas envolventes con seguimiento de posición de la cabeza del usuario y gafas con obturación alternada y sincronizada con las pantallas, a la vez que presentaron una detallada caracterización de los sistemas de visualización para RV [52]. Otras soluciones intermedias buscan extender la inmersión más allá de las pantallas renderizables a través de luces estroboscópicas y leds [53], [54], entre otros.

El mareo por movimiento en RV ha sido ampliamente estudiado y, en determinadas situaciones, puede imponer restricciones de diseño a las experiencias o favorecer soluciones de compromiso, sobretodo relacionadas con la navegación [5].

Las tres ilusiones de la RV [55] propuestas por Mel Slater son: “ilusión de lugar” (fenómeno perceptivo), “ilusión de plausibilidad” (fenómeno cognitivo) e “ilusión de encarnación” (fenómeno perceptivo y cognitivo relacionado a la apropiación del cuerpo virtual), vinculada esta última al paradigma de la “ilusión de la mano de goma” [56].

Para la medición de presencia en RV se toman los cuestionarios de presencia (PQ) y tendencias inmersivas (ITQ) [57], con las consideraciones propuestas por Schwind, de evitar eventos de “interrupción de inmersión” (BIP) [58]. La “presencia” en RV continúa siendo explorada a fin de explotar el potencial de esta tecnología en aplicaciones “sociales”, a través de la interacción entre personas mediante avatares expresivos [59], [60].

La RA se remonta en su historia a la “ilusión del fantasma de Pepper” del siglo XIX, técnica aún hoy utilizada para producir “fantasmas” en videos sin edición digital de imágenes. Militarmente se aplicó a miras holográficas y de aviones de combate, resultando paradigmáticos los Head-Up Displays (HUD). La RA se relaciona a la superposición de imágenes [5], aunque en este trabajo se prefirió considerarla a partir de una extensión de los conceptos de Steuer de la RV, abstrayendo el concepto de la implementación tecnológica, entendiendo finalmente la RA de forma abarcativa como el enriquecimiento de la realidad a través de la presentación de información útil, oportuna e interactiva por diversos medios.

A los dispositivos de RA previamente mencionados, se agregó la novedad de los HMD basados en hologramas con seguimiento de posición. Aún sin llegar al mercado masivo, se destaca el dispositivo Microsoft Hololens. Por otro lado, los dispositivos móviles también presentan numerosas aplicaciones basadas en RA no inmersiva.

El “continuo de virtualidad” presenta una visión integradora respecto de los extremos de RV y RA, pasando por un intermedio variable de Realidad Mixta (RM), que puede basarse en la virtualización de entornos y objetos reales o en la interactividad espacial con elementos virtuales [61].

Este trabajo se basa en que la RA en HMD presenta potencial para su combinación con un enfoque de “Internet de las Cosas” (Internet of Things, IoT) [62], a fin de presentar hologramas al usuario y combinarlos con objetos reales interactivos.

Aplicaciones de RV a simuladores de entrenamiento se pueden encontrar ampliamente en diversos ámbitos [1], [2], [6], entre otros. No obstante, previo a la realización de este trabajo, no se tuvo novedad de la aplicación de RA a simuladores, siendo las aplicaciones actuales más comunes y en estudio videojuegos georreferenciados [63], turismo [64] y militarmente la presentación interactiva de información [65], [66], [67].

### **3 Descripción del Problema**

### **3.1 Caso de Estudio de RV: Control de Evacuación de Almacén Industrial**

La situación concreta para la que se desea entrenar al usuario es el recorrido de un almacén industrial IMO, certificado IMDG [68], para un control posterior a una evacuación de emergencia [69]. El usuario, encargado de seguridad, deberá recorrer las instalaciones de forma metódica, reportar los incidentes de seguridad encontrados y cumplir pautas como revisar la presencia de personal reportado como faltante en el área de encuentro. Es deseable que el encargado pueda orientarse en las instalaciones en condiciones de nula luminosidad, por lo que deberá utilizar una linterna para orientarse en el interior del depósito, que debe tener múltiples niveles y encontrarse lleno de mercadería en todas las áreas.

### **3.2 Caso de Estudio de RA: Intervención en Crisis CBRN**

El objetivo de este trabajo fue proporcionar apoyo para la capacitación de SCA a través de tecnologías de RA para la intervención en casos de crisis por liberación de agentes radiológicos, establecidos internacionalmente dentro de la categoría de materiales peligrosos CBRN (del inglés, químicos, biológicos, radiológicos y nucleares) [70], [71]. La tarea puntualmente encomendada en el marco de un proyecto fue desarrollar un modelo de contaminación cruzada interactiva en una escena de RM para usuarios múltiples simultáneos, constituida a partir de visores de RA Microsoft Hololens y objetos físicos interactivos, así como el uso de trajes CBRN profesionales y un radiómetro simulado, proporcionar elementos de ludificación para enriquecer la situación y métricas de evaluación para dotar de significado a las acciones realizadas en la simulación, tanto para los usuarios como para los instructores.

## **4 Soluciones Implementadas**

### **4.1 Caso de Estudio de RV: Control de Evacuación de Almacén Industrial**

Se desarrolló una aplicación en Unity, con el framework VR Cardboard SDK, actualmente liberado por Google como proyecto de código abierto, para simular la situación descrita en el apartado anterior. La simulación se puede ejecutar con dispositivos Android estándar, comúnmente provistos por empresas de logística a sus empleados, y podría compilarse en forma equivalente una versión para iOS (iPhone).

Tras las consideraciones presentadas de mareo en RV, se diseñó una navegación basada en teletransportación con transiciones atenuadas, y se utilizó como método de interacción principal la mirada (“interactive gaze”). A su vez, se encaró un enfoque de “simuladores ligeros” [2], adaptando un videojuego previamente publicado por el autor en la tienda de aplicaciones Android “Google Play”. El simulador plantea, finalmente, un paradigma de despliegue distribuido, según se describiera previamente, a través de los canales tradicionales de distribución de aplicaciones para dispositivos móviles.

El simulador presenta una escena inicial de briefing, que posibilita repasar con el usuario la información del experimento dentro del entorno virtual [58], una escena en que el usuario puede recorrer las instalaciones que deberá revisar durante el ejercicio, en tiempo diurno y con buena iluminación, y el escenario en que se debe ejecutar el control de post evacuación, en tiempo nocturno y con corte de luz total. Las instalaciones son un almacén industrial IMO con elementos IMDG, con playas de estacionamiento, muelles de carga y descarga y edificio de tres pisos. Durante el ejercicio el usuario debe utilizar una linterna para poder ver, que acompaña de forma flexible y natural la mirada del usuario, sostenida por un “cuerpo virtual” [55], que rota suavemente acompañando la cabeza y apuntando con el brazo según la mirada (cinemática inversa). El sistema reporta al concluir el tiempo total del recorrido, las zonas visitadas e incidentes de seguridad detectados. Se abordó el estrés a partir de limitaciones de tiempo, presión por los resultados, oscuridad del entorno y necesidad de utilizar una linterna, modelado de sonidos y situaciones de peligro, así como la necesidad de encontrar a una persona reportada como desaparecida [11], [12], [4].

#### **4.2 Caso de Estudio de RA: Intervención en Crisis CBRN**

La contaminación se modeló como un sistema de partículas discretas e interactivas para ser visualizado con una aplicación desarrollada en Unity para el visor de RA Microsoft HoloLens. Las partículas de contaminación se implementaron como hologramas con un tamaño medio de 10 cm, con una animación cíclica de ligera contracción y expansión de tamaño y con un color verde semitransparente, de manera que resultaran visibles para el usuario como un indicador intuitivo de los objetos y áreas contaminadas (cuando fuera activada la visualización de la contaminación), pero que aún así no interfirieran con la visión del SCA de los distintos objetos reales de la escena.

El proyecto planteó el uso de objetos reales interactivos, para lo cual se utilizaron dispositivos POZYX de seguimiento de posición en las áreas de interés, así como el modelado, por ejemplo, de un radiómetro simulado que reacciona a los campos de radiación virtuales de la escena. A su vez, con el conocimiento previo de los objetos estáticos, como paredes y muebles de la escena, el sistema de contaminación puede hacer un seguimiento de la simulación, implementando interacciones de pasaje de contaminación entre todos los objetos que componen la escena de RM, tanto reales como virtuales y estáticos o dinámicos. El sistema modeló también la limpieza de contaminación cruzada a partir de una manguera física con seguimiento de posición, que lanza un líquido virtual, y un cepillo físico, que debe “frotarse” varias veces sobre objetos contaminados. Ambos mecanismos permiten la limpieza de la contaminación de la escena. También se modeló en una escena separada el procedimiento por el que los SCA ejecutan la descontaminación de sus trajes CBRN al salir de áreas contaminadas, para no expandir la contaminación [71]. La visualización de los campos de radiación se implementó con sistemas de partículas semitransparentes, variables con la intensidad de la radiación y una codificación de colores según su peligrosidad (rojo zona mortal, amarillo zona peligrosa).

El menor poder de cómputo de los dispositivos HoloLens respecto de los equipos utilizados para el desarrollo hizo necesarias algunas optimizaciones, como por ejemplo evitar ciertos eventos de colisiones. En general, se estableció que la contaminación entre puntos en

contacto permanente alcance un equilibrio, pero que permanezca activa por ejemplo ante un desplazamiento relativo de los objetos, para reflejar nuevas áreas contaminadas en ambos, o ante el contacto con otros objetos diferentes.

Al concluir la acción se presentaron tres métricas de desempeño a los usuarios: *elusión de acumulación de radiación*, puntuación inversa a la acumulación de dosis de radiación, *evasión de propagación de contaminación*, puntuación inversa a la diseminación de contaminación cruzada, y *tiempo de exposición*, puntuación inversa al tiempo que el SCA se expuso a radiación peligrosa en el escenario.

## 5 Resultados Obtenidos

### 5.1 Caso de Estudio de RV: Control de Evacuación de Almacén Industrial

Se realizaron experiencias con un público diverso y se tomó nota de los resultados entregados por el simulador para aplicar un ciclo integral de técnicas de ciencias de datos. A tal fin se utilizó un entorno Python de Jupyter Notebook en la plataforma gratuita Cognitive Labs, de IBM. Los campos más significativos para caracterizar a los usuarios fueron: segmento de edad (1:18-30 años, 2:31-45 años, 3:46+ años), experiencia previa en RV (si-no), uso de tecnología (1 a 5), experiencia en seguridad (brigadista de evacuación, si-no), y se probó con usuarios sentados en una silla rotativa y con usuarios de pie. En cuanto a los resultados, se utilizaron los cuestionarios PQ e ITQ [57] con un sistema de conversión a puntaje numérico propio, las métricas provistas por el sistema de zonas visitadas, incidentes de seguridad reportados y tiempo de ejecución, y también se tomó nota de si el usuario reportó el más mínimo síntoma de mareo o no durante o luego de la experiencia.

Tras reiteradas iteraciones en el procesamiento de los datos, se pudieron establecer relaciones de interés, en particular algunas relaciones lineales, presentadas en un mapa de calor entre las variables mencionadas en el anexo 2 de este trabajo.

Los síntomas de mareo hallados fueron mínimos y se presentaron en pocos usuarios, que los describieron como “cierta extrañeza”, pero no impidieron el desarrollo del ejercicio, y se los relacionó puntualmente a movimientos muy rápidos y esporádicos con la cabeza. Se probó el simulador con un celular Android 9 de gama media (Huawei Mate 10 Pro, BLA-L29, 6 GB RAM). Llamativamente, los usuarios primerizos en RV tendieron a reportar menos alguna incomodidad que los usuarios con experiencia previa en RV.

Se halló un incremento en el tiempo de ejecución con la edad, y un decremento del tiempo de ejecución con el mayor uso de tecnología. Todos los usuarios pudieron completar los ejercicios sin necesidad de interrumpir la experiencia, no se halló impacto en realizar el ejercicio de pie o sentado. Los síntomas de mareo presentados fueron mínimos y temporales, y no afectaron los resultados finales negativamente de los usuarios que los reportaron. Todos los usuarios reportaron positivamente las tres ilusiones de la RV enunciadas por Slater [55], aún siendo que los usuarios tecnológicamente más expertos reportaron como menos realista la experiencia que los menos avanzados.

El resultado más importante parecería ser que los usuarios brigadistas de evacuación obtuvieron mejores resultados que usuarios sin esta experiencia, por lo que el simulador desarrollado cumpliría la “validez de constructo” [6]. Determinar la validez de transferencia requeriría mayores pruebas y el seguimiento de los usuarios en el tiempo.

## **5.2 Caso de Estudio de RA: Intervención en Crisis CBRN**

Se realizaron pruebas con SCA expertos de Fuerzas de Seguridad Europeas en Bratislava, utilizando los trajes CBRN operativos reales, con el visor de RA Hololens corriendo la aplicación de la simulación dentro del traje. Se realizaron 3 pruebas independientes con equipos de 2 integrantes cada uno. Cada prueba consistía en una recorrida de un laboratorio clandestino, identificación de fuentes de radiación con un radiómetro simulado, evitando a su vez desparramar contaminación por el escenario, que podía ser visible o no como hologramas sobre los objetos. Se constituyeron dos escenarios diferentes de prueba, y un tercer ejercicio para cada equipo que consistió en la ejecución del procedimiento de descontaminación, previo a abandonar el área contaminada, para lo cual las zonas del traje CBRN eran superpuestas con hologramas que iban cambiando de color a medida que se limpiaban con una manguera virtual. Los resultados se tomaban alternadamente de distintos ejercicios, para evaluar el impacto de la presión debida a la medición de los resultados.

El limitado campo de visión en los hologramas, propio de la primer versión de los dispositivos Hololens, resultó significativo a los fines de dotar de conciencia situacional inmersiva e interactividad amplia, profunda e inmediata a los agentes SCA, en el contexto de la escena de RM. No obstante lo cual, direccionando la cabeza de forma apropiada, los SCA pudieron interactuar con los distintos hologramas, tanto elementos virtuales superpuestos, como bombas caseras y cadáveres, o artificiales, como campos de radiación o indicadores de contaminación. A su vez, tras pruebas de campo, la opacidad de los indicadores de contaminación debió ser incrementada, respecto de las pruebas hechas durante el desarrollo, por la transparencia intrínseca de los hologramas en la escena.

El comportamiento autónomo de la contaminación hizo necesario determinar un tiempo de inicialización, en que la escena alcance su estado de equilibrio, para que los objetos contaminados traspasen la contaminación configurada en sus puntos de contacto inicial con otros objetos (por ejemplo, piso y paredes). Tras este tiempo inicial el modelo de contaminación presentó el comportamiento deseado en todos los casos de entrenamiento.

Todos los usuarios reportaron como útil la visualización de los aumentos, tanto de campos de radiación como de elementos de contaminación. Estos elementos se reportaron como útiles para la enseñanza más que para evaluación, dada su inexistencia actual en herramientas operativas de campo. También se mencionó la oportunidad de utilizar estos elementos en aplicaciones CBRN reales, así como la necesidad de estandarizar un “lenguaje visual” para comunicar campos de radiación y elementos contaminados “in situ”.

Dada la experiencia de los agentes voluntarios, los puntajes de ludificación no fueron reportados como un elemento de estrés, aunque la inclusión de estos elementos en un programa de evaluación formal, en palabras de los voluntarios, podría resultar una herramienta de evaluación de desempeño significativa. Por la misma razón, tampoco se

pudo determinar “la validez de constructo” [6] de este simulador, por la falta de posibilidad de comparar los resultados con usuarios no expertos, aunque la complejidad del uso del radiómetro podría dar cuenta de este hecho por sí mismo. La determinación de la validez de transferencia requeriría mayores pruebas y el seguimiento de los voluntarios en el tiempo.

## 6 Conclusiones

Se pudieron aplicar conceptos de las neurociencias modernas concretos, presentados al principio de este trabajo, al diseño de simuladores para entrenamiento en situaciones de alto riesgo. Estas consideraciones de la mente humana se pudieron aplicar, luego, no sólo al diseño de los simuladores, sino también a las pruebas con voluntarios, de manera de facilitar su mejor posible desempeño y experiencia en el uso del simulador, evitar condicionamientos y sesgos particulares, tanto con un público diverso, como en la experiencia de RV, como con un público hiper especializado, como en la de RA.

Las tecnologías utilizadas de RV y RA permitieron dar soporte a experiencias inmersivas de entrenamiento con fines específicos. Ambas tecnologías, por otra parte, permitieron implementar simuladores con costos relativamente muy bajos, en comparación a entrenamientos con despliegue operativo real en campos de prueba realistas.

Se trató el desarrollo de estos simuladores en el marco moderno de la industria profesional y el ámbito de la investigación aplicada, así como sobre conceptos fundamentales de “simuladores de entrenamiento”.

Los conceptos de “validez de constructo” y “validez de transferencia” proveyeron un marco sólido para constatar la validez del diseño e implementación de un simulador para el entrenamiento.

Los “juegos serios” y la “ludificación”, por otra parte, ofrecen bases conceptuales sólidas al fenómeno de que las tecnologías de videojuegos han avanzado sobre ámbitos tradicionalmente diferenciados, como el de la industria y diversas aplicaciones profesionales. Estas consideraciones resultaron fundamentales para elaborar una “visión estratégica”, de cara al desarrollo de simuladores de entrenamiento.

Las tecnologías de RV, RM y RA pueden proporcionar experiencias inmersivas muy poderosas, en una medida aún no circunscripta. No obstante este hecho, brindar experiencias significativas con estas tecnologías se puede lograr por medios relativamente simples para audiencias diversas en edad y experiencia tecnológica.

Las plataformas nativas de aplicaciones para dispositivos móviles, así como otras tiendas en línea, pueden dar soporte a un despliegue masivo de simuladores basados en contenido, utilizando hardware estándar de mercado, por ejemplo para capacitar ciudadanos en casos de una catástrofe generalizada o empleados de una empresa multinacional.

## Anexo 1. Capturas de simulador de RV



Fig. 1. Sala de Briefing, en visión estereoscópica, tal como se presenta al usuario. Escena inicial para repaso del plan de acción con el usuario ya inmerso en el entorno virtual. Se repasa el plan con un mapa de las instalaciones.



Fig. 2. Detalle exterior de instalaciones. Los paneles en el suelo son para posibilitar la navegación en la escena. Las puertas también se abren con la mirada interactiva.



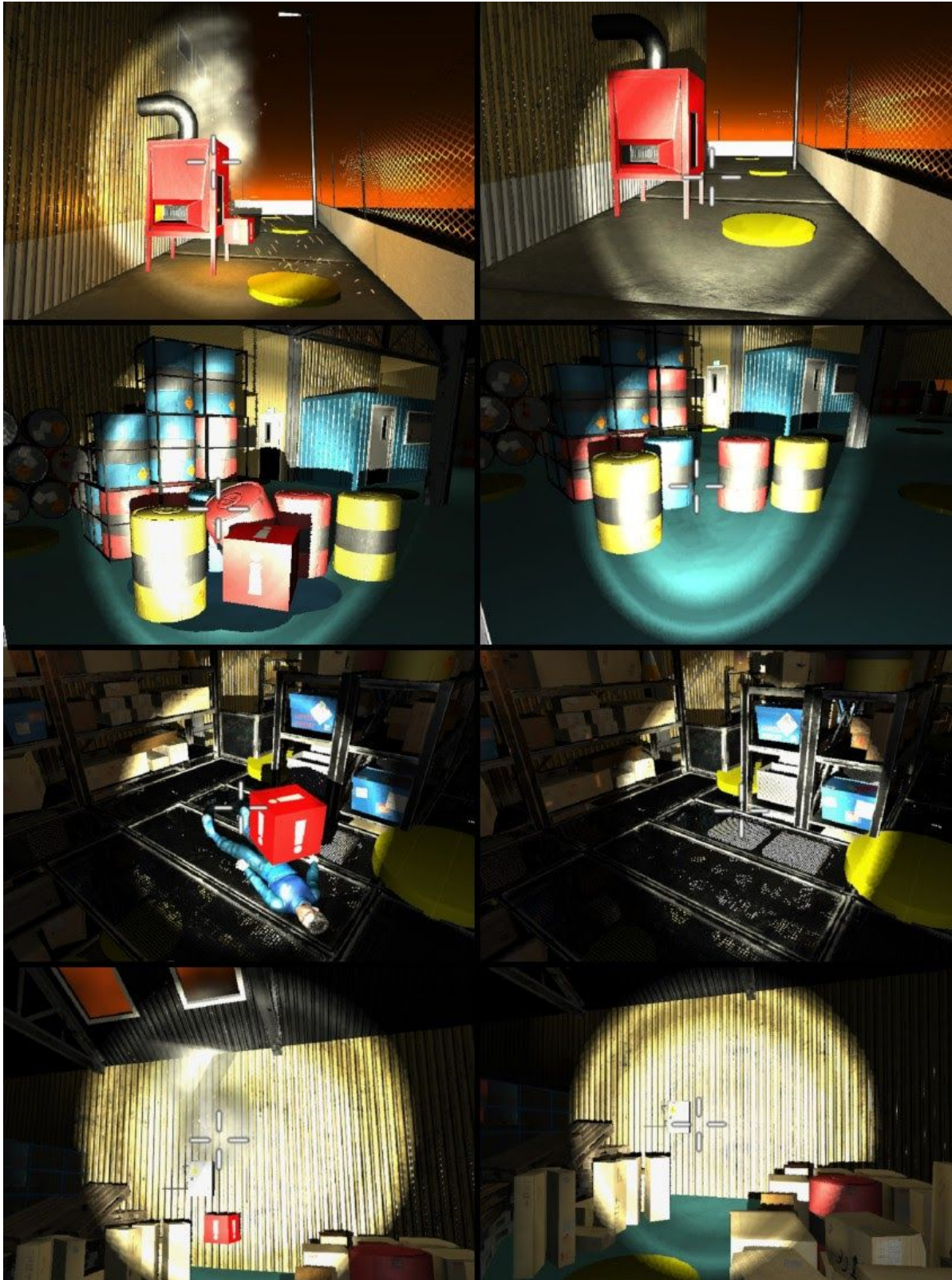


Fig. 3. Detalle de los incidentes de seguridad. Instalaciones en llamas, barriles con derrames inflamables, personal muerto en la escena y un tablero humeante. El cubo rojo provee el medio de interacción para que el usuario reporte el incidente y sea removido de la escena, dando por cumplida la tarea requerida al respecto.

## Anexo 2. Resumen de resultados obtenidos con el simulador de RV

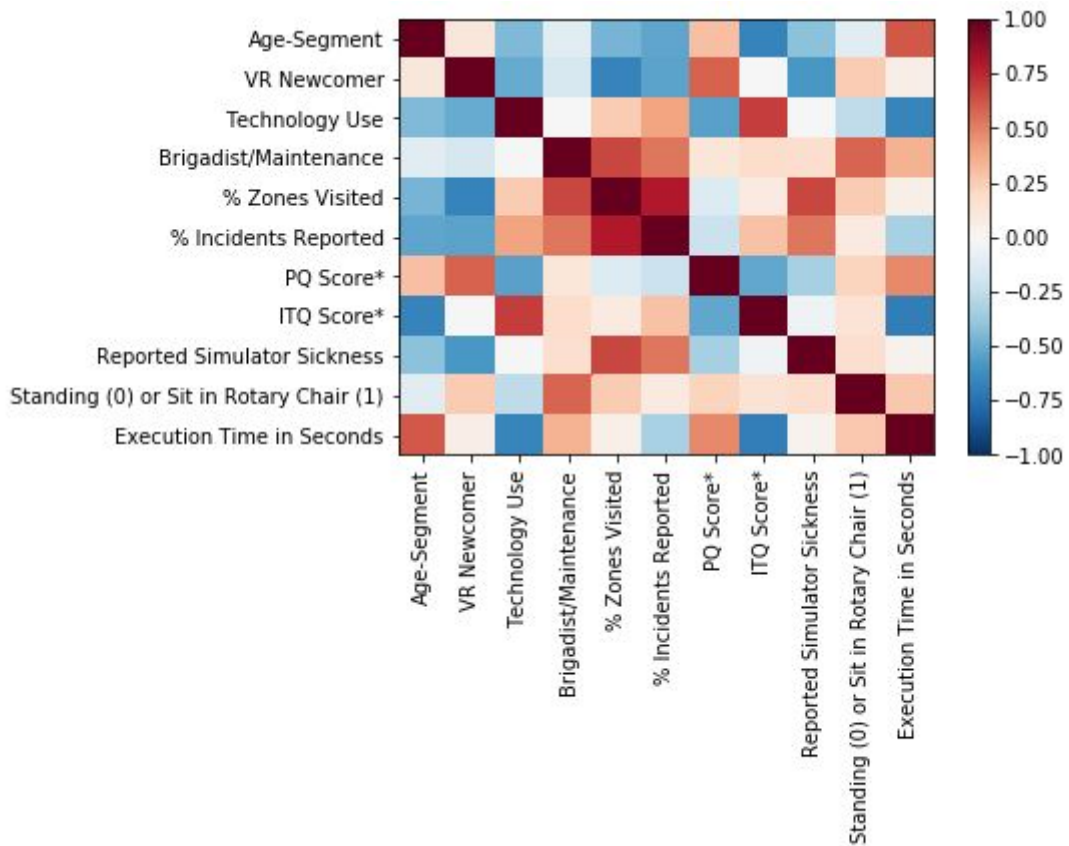


Fig. 4. Mapa de calor con las correlaciones lineales entre las variables definidas para caracterizar a los usuarios y las métricas de desempeño.

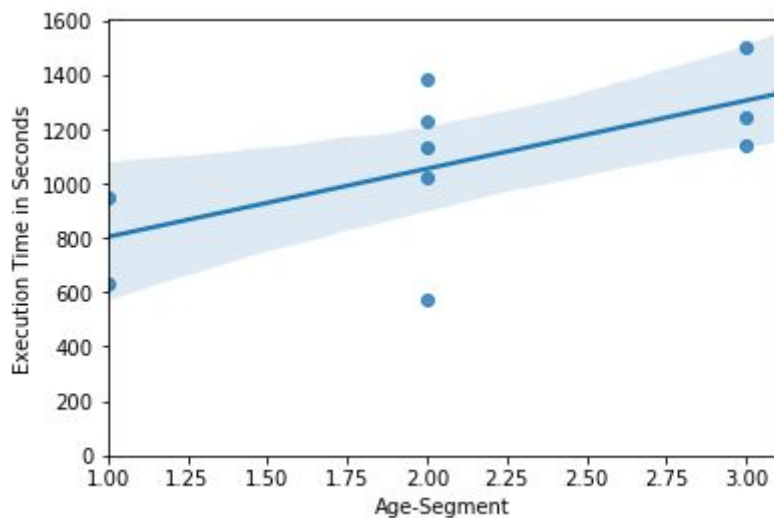


Fig. 5. Comparativa entre segmento de edad y tiempo de ejecución en segundos.

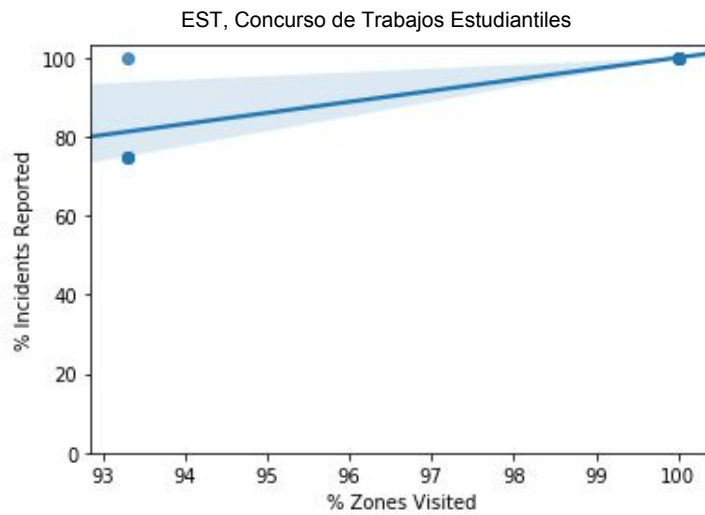


Fig.6. Comparativa entre porcentaje de zonas visitadas e incidentes reportados.

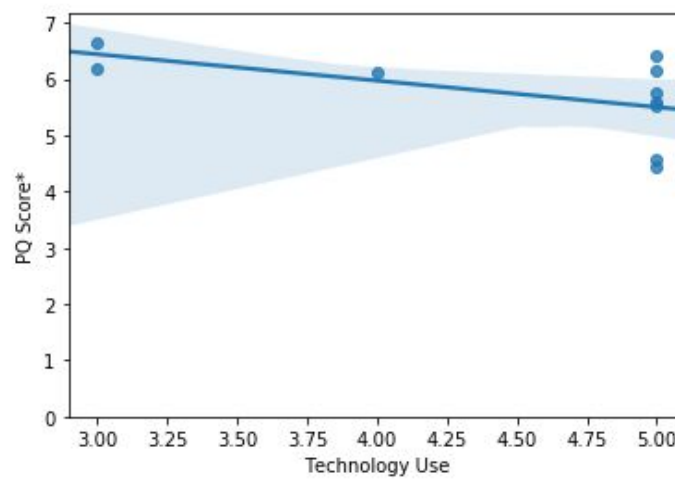


Fig. 7. Comparativa entre uso de tecnología y puntaje de experiencia de presencia.

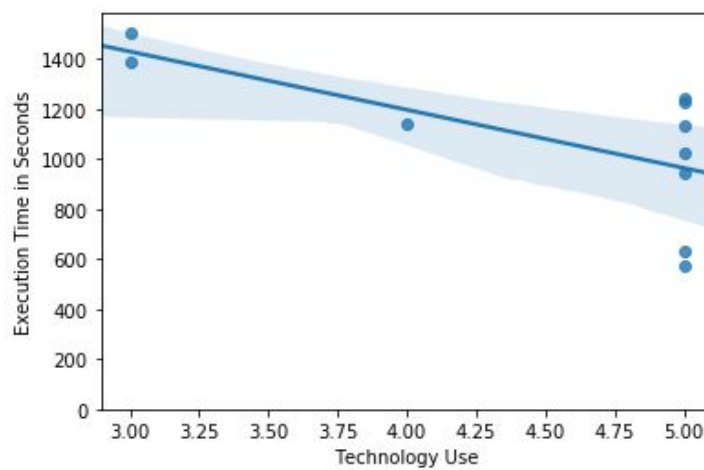


Fig. 8. Comparativa entre uso de tecnología y tiempo de ejecución en segundos.

**Anexo 3. Capturas del simulador de RA**

Fig. 9. Visión de campos de radiación (partículas rojas y amarillas), elementos virtuales (cadáver, barril con una bomba encima, en el fondo) y partículas de contaminación en la pared derecha y en el suelo a través de un Hololens. Barra azul de oxígeno remanente en el tanque, a la izquierda, y colorada, de dosis de radiación acumulada, a la derecha (vacía, al momento de la captura). Punto de calibración en el suelo.



Fig. 10. Vista de instrumentos de laboratorio con partículas de contaminación superpuestas, barras de oxígeno remanente en tanque en azul, a la izquierda, y acumulación de dosis equivalente a la derecha, en rojo (vacía al momento de la captura).



Fig. 11. Visualización de los objetos virtuales superpuestos los de la imagen anterior, utilizados únicamente para detectar colisiones y hacer el seguimiento de la contaminación cruzada. Esta visualización tiene únicamente fines ilustrativos, no siendo estos elementos visibles durante el tiempo del ejercicio.

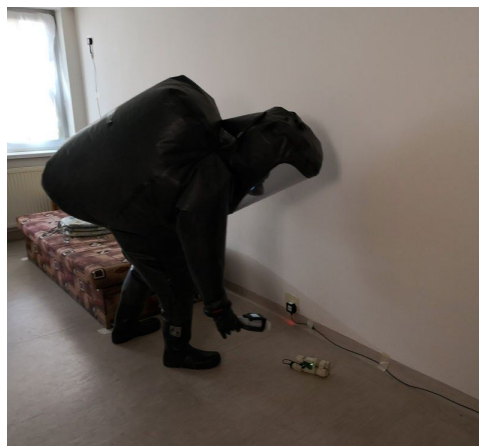


Fig. 12. SCA con traje CBRN, midiendo con un radiómetro una fuente de radiación detectada en un dispositivo sospechoso. Dentro del traje el usuario utiliza un visor Hololens.

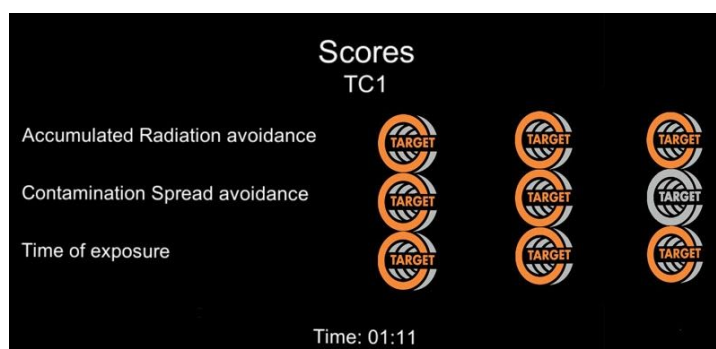


Fig. 13. Pantalla con métricas de desempeño presentada al usuario al concluir la tarea, en escala de cero a tres y representando el puntaje los emblemas coloreados.

## Anexo 4. Bibliografía y Referencias

1. Patle, D.S., Manca, S., Nazir, S., Sharma, S. : Operator training simulators in virtual reality environment for process operators: a review. *Virtual Reality*, págs. 1-19, 2018.
2. Backlund, P., Engström, H., Gustavsson, M., Johannesson, M., Lebram, M., Sjörs, E.: SIDH: a game-based architecture for a training simulator. *International Journal of Computer Games Technology*, vol. 2009, 2009.
3. Raheb, R.: Driver Training Simulators: Strategies and Tactics. *Fire Engineering*, vol. 165, n.o 8, 2012.
4. Guglielmone, J.: Los sistemas de simulación: otra forma de entrenar para el combate. *TEC1000 - Estudios de Vigilancia y Prospectiva Tecnológica en el área de Defensa y Seguridad*. 2016.
5. Mazuryk, T., Gervautz, M.: Virtual reality-history, applications, technology and future. Institute of Computer Graphics, Vienna University of Technology, Austria, 1996.
6. Vaughan N., Dubey, V.N., Wainwright, T.W., Middleton, R.G.:A review of virtual reality based training simulators for orthopaedic surgery. *Medical engineering & physics*, vol. 38, n.o 2, págs. 59-71, 2016.
7. Coles, T.R., Meglan, D., John, N.W., The role of haptics in medical training simulators: A survey of the state of the art. *IEEE Transactions on haptics*, vol. 4, n.o 1, págs. 51-66, 2011.
8. Smith, R.D.: Five forces driving game technology adoption. *Proceedings of the Interservice/Industry Training, Simulation, and Education Conference (I/ITSEC)*, Citeseer, 2008.
9. Cumpa, J.G.: Neurociencia cognitiva y educación. Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo. Escuela de Postgrado. Facultad de Ciencias Histórico Sociales y Educación. Maestra en Ciencias de la Educación Fondo Editorial FACHSE. Serie: Materiales del Postgrado, 2004.
10. Tirapu-Ustárroz, J., Luna-Lario, P.: Neuropsicología de las funciones ejecutivas. *Manual de neuropsicología*, vol. 2, págs. 219-59, 2008.
11. Salas, E., Driskell, J.E., Hughes, S.: The study of stress and human performance. *Stress and human performance*(A 97-27090 06-53), Mahwah, NJ, Lawrence Erlbaum Associates, Publishers, 1996., págs. 1-45, 1996.
12. Driskell, J.E., Johnston, J.H., Salas, E.: Does stress training generalize to novel settings?. *Human factors*, vol. 43, n.o 1, págs. 99-110, 2001.
13. Feltz, D.L., Landers, D.M.: The effects of mental practice on motor skill learning and performance: A meta-analysis. *Journal of sport psychology*, vol. 5, n.o 1, págs. 25-57, 1983.
14. Driskell, J.E., Copper, C., Moran, A.: Does mental practice enhance performance?. *Journal of applied psychology*, vol. 79, n.o 4, pag. 481, 1994.
15. Jackson, P.L., Lafleur, M.F., Maloian, F., Richards, C., Doyon, J.: Potential role of mental practice using motor imagery in neurologic rehabilitation. *Archives of physical medicine and rehabilitation*, vol. 82, n.o 8, págs. 1133-1141, 2001.
16. Pavlov, I.P., Thompson, W.H.: *The work of the digestive glands*. Charles Grin, 1902.
17. Bitterman, M.: Classical conditioning since Pavlov. *Review of General Psychology*, vol. 10, n.o 4, págs. 365-376, 2006.
18. Thorndike, E.L.: *Human Learning*, 1931
19. Ruiz, G.: *La cabeza del campeón - Cómo construir una mentalidad ganadora para la vida*. 2017.
20. Violanti, J.M.: Coping strategies among police recruits in a high-stress training environment. *The Journal of Social Psychology*, vol. 132, n.o 6, págs. 717-729, 1992.
21. Tzu, S.: *El Arte de la Guerra*. Editorial Andromeda, 2010.

22. Von Hilgers, P.: War games: a history of war on paper. MIT Press, 2012.
23. Neuman, P.: Power Plant and Boiler Models for Operator Training Simulators. IFAC Proceedings Volumes, vol. 44, n.o 1, pags. 8259-8264, 2011.
24. Neuman, P.: Power Plant and Turbogenerator models for Engineering and Training Simulators. IFAC Proceedings Volumes, vol. 45, n.o 21, pags. 313-318, 2012.
25. Page, R.L.: Brief history of flight simulation. SimTecT 2000 Proceedings, pags. 11-17, 2000.
26. Berger, D.R., Schulte-Pelkum, J., Bülthoff, H.H.: Simulating believable forward accelerations on a Stewart motion platform. ACM Transactions on Applied Perception (TAP), vol. 7, n.o 1, pag. 5, 2010.
27. Maraggi, S., Abbate, H.: Framework de control de movimiento de plataforma de de seis grados de libertad de tipo Stewart, servicios de movimiento para vehiculos en aplicaciones de simulación e integración con simuladores de vuelo. XIX Simposio Argentino de Ingeniería de Software (ASSE)-JAIIO 47, 2018.
28. U. S. D. o. T. Federal Aviation Administration: 14 CFR Part 60. NSP Consolidated Version, dirección: [https://www.faa.gov/about/initiatives/nsp/media/14CFR60\\_Searchable\\_Version.pdf](https://www.faa.gov/about/initiatives/nsp/media/14CFR60_Searchable_Version.pdf) (visitado 18-03-2019).
29. E. A. S. Agency: Certification Specifications for Aeroplane Flight Simulation Training Devices CS-FSTD(A) / Initial issue, dirección: [https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/CS-FSTD\(A\)%20Initial%20Issue.pdf](https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/CS-FSTD(A)%20Initial%20Issue.pdf) (visitado 18-03-2019).
30. Woodling, C., Faber, S., Vanbockel, J.J. Olasky, C.C., Williams, W.K., Mire, J.L., Homer, J.R.: Apollo experience report: Simulation of manned space flight for crew training.
31. Vlachopoulos, D., Makri, A.: The effect of games and simulations on higher education: a systematic literature review. International Journal of Educational Technology in Higher Education, vol. 14, n.o 1, pag. 22, 2017.
32. Rosser, J.C., Lynch, P.J., Cuddihy, L., Gentile, D.A., Klonsky, J., Merrell, R.: The impact of video games on training surgeons in the 21st century. Archives of surgery, vol. 142, n.o 2, pags. 181-186, 2007.
33. McGlashan, H.L., Blanchard, C.C., Sycamore, N.J., Lee, R., French, B., Holmes, N.P.: Improvement in children's fine motor skills following a computerized typing intervention. Human movement science, vol. 56, pags. 29-36, 2017.
34. Chwirka, B., Gurney, B., Burtner, P.A.: Keyboarding and visual-motor skills in elementary students: A pilot study. Occupational Therapy in Health Care, vol. 16, n.o 2-3, pags. 39-51, 2002.
35. Deterding, S., Sicart, M., Nacke, L., O'Hara, K., Dixon, D.: Gamification. Using game-design elements in non-gaming contexts. CHI'11 extended abstracts on human factors in computing systems, ACM, 2011, pags. 2425-2428.
36. Hamari, J., Koivisto, J., Sarsa, H.: Does gamification work? - a literature review of empirical studies on gamification. 2014 47th Hawaii international conference on system sciences (HICSS), IEEE, 2014, pags. 3025-3034.
37. Huotari, K., Hamari, J.: Denying gamification: a service marketing perspective. Proceeding of the 16th international academic MindTrek conference, ACM, 2012, pags. 17-22.
38. Zyda, M.: From visual simulation to virtual reality to games. Computer, vol. 38, n.o 9, pags. 25-32, 2005.
39. Susi, T., Johannesson, M., Backlund, P.: Serious games: An overview. 2007.

40. Woodrow Wilson Center: Serious Gaming Initiative Homepage, dirección: <https://www.wilsoncenter.org/program/serious-games-initiative/> (visitado 22-03-2019).
41. Electronic Sports Earnings: Top Games Awarding Prize Money HomePage, dirección: <https://www.esportsearnings.com/games> (visitado 27-03-2019).
42. AEGIS: 2010 Top Simulation and Training Companies. Military Training Technology Journal, published by KMI Media Group, PDFs, dirección: <https://aegistg.com/PDFs/Top%20Simulation%20&%20Training%20Companies%202010.pdf> (visitado 24-03-2019).
43. Paul, P.S., Goon, S., Bhattacharya, A.: History and comparative study of modern game engines. International Journal of Advanced Computed and Mathematical Sciences, vol. 3, n.o 2, pags. 245-249, 2012.
44. Senge, P.: The fifth discipline fieldbook: Strategies and tools for building a learning organization. Crown Business, 2014.
45. Gamma, E., Helm, R., Johnson, R., Vlissides, J.: Design Patterns: Elements of Reusable Object-Oriented Software. 1994.
46. Qu, J., Song, Y., Wei, Y.: Applying design patterns in game programming. Proceedings of the International Conference on Software Engineering Research and Practice (SERP), The Steering Committee of The World Congress in Computer Science, Computer, 2013, pag. 1.
47. Cowan, B., Kapralos, B.: A survey of frameworks and game engines for serious game development. 2014 IEEE 14th International Conference on Advanced Learning Technologies, IEEE, 2014, pags. 662-664.
48. Haas, J.K.: A history of the Unity game engine. Faculty of Worcester Polytechnic Institute, 2014.
49. Virtual Reality Society: Virtual Reality History HomePage, dirección: <https://www.vrs.org.uk/virtual-reality/history.html> (visitado 27-03-2019).
50. Virtual Speech: History of VR blog, dirección: <https://virtualspeech.com/blog/history-of-vr> (visitado 28-03-2019).
51. Cruz-Neira, C., Sandin, D.J., DeFanti, T.A., Keynon, V., Hart, J.C.: The CAVE: audio visual experience automatic virtual environment. Communications of the ACM, vol. 35, n.o 6, pags. 64-73, 1992.
52. Steuer, J.: Dening Virtual Reality: Dimensions Determining Telepresence. Communication in the age of virtual reality, Oxford: Routledge, 1993, cap. 3, pags. 33-56.
53. Hwang, A.D., Peli, E., Development of a headlight glare simulator for a driving simulator. Transportation research part C: emerging technologies, vol. 32, pags. 129-143, 2013.
54. Haycock, B., Campos, J., Koenraad, N., Potter, M., Advani, S.: Creating headlight glare in a driving simulator. Transportation research part F: trac psychology and behaviour, 2017.
55. Slater, M.: Place illusion and plausibility illusion can lead to realistic behaviour in immersive virtual environments. Philosophical Transactions of The Royal Society, 2009.
56. Botvinick, M., Cohe, J.: Rubber hands "feel" touch that eyes see. Nature, vol. 391, n.o 6669, pag. 756, 1998.
57. Witmer, B.G., Singer, M.J.: Measuring presence in virtual environments: A presence questionnaire. Presence, vol. 7, n.o 3, pags. 225-240, 1998.



58. Schwind, V., Knierin, P., Haas, N. Henze, N.: Using Presence Questionnaires in Virtual Reality. 2019.
59. Ruhland, K., Andrist, S., Badler, J., Peters, C., Badler, N., Gleicher, M., Mutlu, B., McDonnell, R.: Look me in the eyes: A survey of eye and gaze animation for virtual agents and artificial systems. Eurographics state-of-the-art report, 2014, pags. 69-91.
60. Ping, H.Y., Abdullah, L.N., Sulaiman, P.S., Halin, A.A., Computer facial animation: A review. International Journal of Computer Theory and Engineering, vol. 5, n.o 4, pag. 658, 2013.
61. Milgram, P., Kishino, F.: A Taxonomy of Mixed Reality Visual Displays. IEICE TRANSACTIONS on Information and Systems, vol. 77, n. o 12, pags. 1321-1329, 1994.
62. T.S.S of International Telecommunication Union (ITU): Next Generation Networks - Frameworks and functional architecture models - Overview of the Internet of Things - Recommendation ITU-T Y.2060. SERIES Y: GLOBAL INFORMATION INFRASTRUCTURE, INTERNET PROTOCOL ASPECTS AND NEXT-GENERATION NETWORKS, vol. Y.2060, n.o 1, pags. 1-22, 2012.
63. T.P.C. Niantic: Pokemon-Go homepage, dirección: <https://www.pokemongo.com/> (visitado 08-04-2019).
64. Gironacci, I.M., McCall, R., Tamisier, T.: Mixed reality collaborative storytelling. Proceedings of the 32nd International BCS Human Computer Interaction Conference, BCS Learning & Development Ltd., 2018, pag. 85.
65. Argenta, C., Murphy, A., Hinton, J., Cook, J., Sherril, T., Snarski, S.: Graphical user interface concepts for tactical augmented reality. Head-and Helmet-Mounted Displays XV: Design and Applications, International Society for Optics and Photonics, vol. 7688, 2010, pag. 76880I.
66. You, X., Zhang, W., Ma, M., Deng, C., Yang, J.: Survey on Urban Warfare Augmented Reality. ISPRS International Journal of Geo-Information, vol. 7, n.o 2, pag. 46, 2018.
67. 114. Amburn, C.R., Vey, N.L., Boyce, M.W., Mize, J.R.: The Augmented REality Sandtable (ARES). Army Research Lab Aberdeen Proving Ground MD Human Research and Engineering, inf. tec., 2015.
68. International Maritime Organization (IMO): IMDG Code english publications, dirección: <http://www.imo.org/en/Publications/IMDGCode/Pages/Default.aspx> (visitado 09-04-2019).
69. Koster, R.B., Stam, D., Balk, B.M.: Accidents happen: The influence of safety-specific transformational leadership, safety consciousness, and hazard reducing systems on warehouse accidents. Journal of Operations management, vol. 29, n.o 7-8, pags. 753-765, 2011.
70. Valentin, J.: The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. International Commission of Radiological Protection (ICRP), Annals of the ICRP, Publication 103.
71. International Committee of the Red Cross (ICRC): Chemical, Biological, Radiological and Nuclear Response - Introductory Guidance (for training purposes only). 2014.