

Aplicaciones industriales de entornos de realidad virtual y de realidad aumentada

Alfonso Martín-Erro, María del Mar Espinosa Escudero y Manuel Domínguez
Ingeniería del Diseño. ETSII - Universidad Nacional de Educación a Distancia - UNED

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/6989>

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos veinte años se ha progresado significativamente en la investigación e innovación relativa al desarrollo de entornos en *realidad virtual* (RV) y en *realidad aumentada* (RA) y, a día de hoy, se han cosechado numerosos progresos.

Sus principales aplicaciones abarcan sectores como ocio, simulación, enseñanza, arqueología o medicina. De igual modo, se han estudiado las posibles aplicaciones de estas tecnologías en el ámbito industrial, resultando de probada utilidad tanto en etapas de desarrollo del producto como en fases posteriores de su ciclo de vida.

La realidad virtual y la realidad aumentada pueden emplearse en fases de diseño conceptual, de detalle, validación y fabricación, así como en apoyo a tareas de montaje o mantenimiento. La realidad virtual facilita la implementación del diseño conceptual asistido por ordenador, la visualización de prototipos virtuales en estos entornos, así como la posibilidad de simular el montaje y desmontaje de componentes que traen consigo una importante mejora en la detección de no conformidades antes de la fabricación del producto.

Igualmente, es posible efectuar ensayos de mantenimiento en prevención de posibles problemas en puesta en servicio. Tanto la realidad virtual como la realidad aumentada facilitan el trabajo en proyectos de ingeniería colaborativa, generando entornos comunes de trabajo para los equipos de diseño implicados ubicados en sus diferentes localizaciones. El fruto de esta investigación en realidad virtual se plasma en sectores

como el de la automoción o el de la aeronáutica, donde a día de hoy se emplean con éxito sistemas de realidad virtual en tareas de revisión del diseño y del montaje.

2. REALIDAD VIRTUAL Y REALIDAD AUMENTADA

2.1. REALIDAD VIRTUAL

Un sistema de realidad virtual es aquel capaz de transmitir información a los sentidos de un usuario, de tal forma que éste no pueda distinguir si el entorno es real o no [1]. Aparte, el usuario debe sentirse inmerso en el mundo virtual e interactuar con éste.

Para ello se precisará, por una parte, de los medios de visualización necesarios para reproducir el entorno virtual y, por otra, de los sistemas de interacción hombre-máquina. Los dispositivos de visualización pueden ser convencionales, como pantallas de proyección estereoscópicas, o bien específicos para realidad virtual como los cascos *HMD* (siglas de *head mounted display*, Fig. 1) o las cuevas de entorno virtual automático (Fig. 2).

Los *HMD* son dispositivos que permiten reproducir imágenes creadas por ordenador sobre una pantalla muy próxima a los ojos; las cuevas de entorno vir-

tual automático, más conocidas por su acrónimo en inglés, *CAVE* (Fig. 2), son salas de forma cúbica donde se proyectan imágenes estereoscópicas en el frente de la sala, en los lados y en el suelo. El usuario, mediante unas gafas especiales, puede visualizar en tres dimensiones.



Fig. 2: Sala CAVE de la universidad de Illinois

En cuanto a los dispositivos físicos y de control pueden emplearse interfaces convencionales tales como ratones o joysticks, o específicos como los *datagloves* (guantes capaces de enviar o recibir datos).

Estos dispositivos consisten en un par de guantes con sensores incorporados que proporcionan información de los movimientos de la mano del usuario, pudiendo así generar un sistema de interacción más intuitivo que con un ratón o un *joystick*. Un paso más en este sentido son las denominadas interfaces de manipulación directa, o interfaces naturales por seguimiento del movimiento de la mano, empleando sistemas de detección adecuados. El sistema comercial *KINECT* emplea un sistema de detección de este tipo por infrarrojos.

Dado que en realidad virtual se procura dotar de una sensación - lo más cercana a la realidad - de estar inmerso en el entorno, se han desarrollado interfaces que proporcionan información sensorial al usuario.

Estos dispositivos de retroalimentación son capaces de proporcionar sensación táctil, de peso y de inercia. Un tipo de estos dispositivos muy empleado son los de simulación de fuerza (hápticos). Actualmente existen muy diversos tipos de dispositivos hápticos disponibles tanto en el mercado como en proyectos



Fig. 1: Ejemplo de un casco HMD (creative commons-SENSICS)

de investigación. Dentro de estos últimos se encuadra el dispositivo háptico desarrollado por la empresa SENER para el proyecto REVIMA, cuyo cometido consiste en simular la sensación de colisiones entre la herramienta y la maqueta digital del motor de una aeronave (Fig. 3).

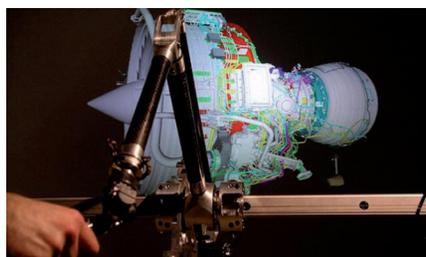


Fig. 3: Dispositivo háptico (cortesía CEIT)

2.2. REALIDAD AUMENTADA

La *realidad aumentada* es una combinación del entorno real con elementos virtuales, con los que el usuario interactúa en tiempo real; combina y registra objetos virtuales y reales y se ejecuta interactivamente en tiempo real [2].

La tecnología de la realidad aumentada emplea, como interactivos, dispositivos de visualización similares a la realidad virtual, pero permitiendo ver el escenario real. Se añaden, además, los sistemas necesarios para integrar la información física existente con la información virtual. Para lograrlo se precisa de la capacidad de reconocimiento y rastreo de los objetos del mundo real que interactúen con los elementos virtuales.

Para ello se emplean varios métodos: unos emplean los datos de geolocalización y de orientación que nos proporciona un GPS (sistema de geoposicionamiento por satélite), otros métodos usan marcadores (Fig. 4), que consisten en elementos con caracte-



Fig. 4: Tipos de marcadores empleados en realidad aumentada

rísticas geométricas o patrones únicos que les posibilitan ser detectados con facilidad por el sistema para incorporar imágenes, textos, vídeos y objetos 3D, al entorno real y poderlos manipular e incluso hacer que interactúen entre sí.

En este sentido, uno de los objetivos de la investigación en realidad aumentada es la consecución de sistemas de detección y rastreo efectivos sin el uso de marcadores; como ejemplo se puede comentar el proyecto del CEIT para detección de marcadores de objetos, mediante extracción automática de características geométricas y reconocimiento de objetos 3D en tiempo real [3,4].

Los dispositivos de visualización en realidad aumentada se sitúan entre la realidad y nuestros ojos para, de este modo, ver la realidad aumentada a través de la pantalla. Comúnmente se emplean los sistemas *see-through*, que permiten visualizar directamente la escena real y representar los elementos virtuales necesarios. Dispositivos de este tipo pueden ser cascos HMD, comentados anteriormente, gafas especiales (Google *glass*) o bien pantallas de visualización transparentes dispuestas sobre una mesa de trabajo, sistema utilizado en 2010 por Van Waardhuizen, Oliver y Gimeno [5].

En cuanto a sistemas de rastreo se emplean cámaras digitales, sensores ópticos, acelerómetros, sistemas de geoposicionamiento por satélite (GPS), giróscopos o sensores infrarrojos, tecnologías que ofrecen varios niveles de precisión; como medios interactivos se emplean dispositivos similares a la realidad virtual, como los guantes especiales que incorporan marcadores para el seguimiento y control de los movimientos de la mano.

Una novedad es el empleo de sistemas de detección por infrarrojos para el seguimiento del usuario para que éste pueda interactuar con el sistema mediante el registro de su movimiento. En este sentido se está empleando la tecnología ya desarrollada en los videojuegos (como el sensor *KINECT*). Por último, está ya siendo posible el uso tanto de tabletas como de teléfonos inteligentes como dispositivos de visualización y de interacción en realidad aumentada, al incorporar elementos necesarios para visualización y detección tales como cámaras, sensores MEMS, acelerómetros, o GPS.

3. APLICACIONES INDUSTRIALES DE LA REALIDAD VIRTUAL Y LA REALIDAD AUMENTADA

Una de las aplicaciones más importantes de la realidad virtual es la simulación que, fundamentalmente, se aplica en tareas de entrenamiento: permite a los cirujanos simular operaciones complejas en quirófanos virtuales (ya en uso en la Facultad de Medicina de la Universidad Complutense de Madrid), a diseñadores de automóviles probar los vehículos en carreteras ficticias, a los astronautas moverse en entornos peligrosos, a futuros conductores de trenes el entrenamiento en cabinas seguras (operativas en la Escuela de Ingenieros Industriales de la UPM), o también en enseñanza en medicina para recorrer partes del cuerpo humano; en arqueología permite la reconstrucción de ruinas, o paisajes.

A las precitadas aplicaciones cabe añadir la utilización en otras modalidades de enseñanza y los videojuegos. El uso de realidad aumentada en dispositivos móviles ha impulsado interesantes aplicaciones como reconocimiento y localización de zonas geográficas desconocidas, representando información contextual sobre el escenario real.

El sector industrial no ha sido ajeno a estos progresos, siendo numerosas las investigaciones en torno al uso de estas tecnologías como apoyo a los procesos de desarrollo de productos. En diseño incluye herramientas de modelado directo en 3D, así como técnicas de visualización de prototipos y realizar cambios donde sea necesario, logrando, por lo tanto, una mejor comprensión del diseño, además de detectar cualquier no conformidad antes del comienzo del proceso de fabricación, lo que implica ahorros en costes y tiempos.

Se ha estudiado el uso de la realidad virtual y la realidad aumentada en simulación de montaje de componentes, o simulación de la distribución en planta de factorías. En fase de servicio se emplean sistemas de realidad virtual en tareas de entrenamiento de nuevos sistemas, así como el uso de realidad aumentada en apoyo a tareas de mantenimiento.

3.1. DISEÑO

Como ayuda al proceso de diseño conceptual los entornos de realidad vir-

tual pueden facilitar un espacio de desarrollo creativo, al proporcionar medios intuitivos de interacción.

El proyecto VR4D, liderado por el organismo francés para el desarrollo de la tecnología CLARTE (*Organisme de transfert technologique et de recherche appliquée intervenant sur la thématique de la réalité virtuelle*) junto con las Escuelas de Diseño y de Minas de Nantes, han desarrollado el producto *Virtual Sculptor* (esculpido digital), que permite crear formas tridimensionales en un entorno de realidad virtual.

CLARTE ha obtenido, además, resultados en relación al ensamblaje de componentes virtuales en 3D. Helen Perkunder, de la Universidad Técnica de Berlín estudió en 2010 las posibilidades de la realidad virtual en el modelado libre empleando el software de bocetado *FiberMesh* adaptado a realidad virtual. Otro enfoque de modelado en realidad virtual es el desarrollado por las Universidades Técnicas y de las Artes de Berlín.

Los autores del proyecto, Stark, Wiese e Israel emplearon un sistema de bocetado libre generando un modelo que después es transferido a un sistema de diseño asistido convencional (Fig. 5).



Fig. 5: Herramienta de bocetado en un entorno de RV-CAD de la Universidad de Berlín

Se están desarrollando igualmente aplicaciones en entornos de realidad aumentada para el diseño conceptual, donde los usuarios, empleando interacción gestual, pueden crear nuevos diseños en un entorno combinado de objetos reales y virtuales. Un proyecto de este tipo es el desarrollado por L.X. Ng de la Universidad de Singapur denominado ARCADE [6], donde los usuarios pueden crear nuevos diseños modificando y combinando objetos reales y virtuales.

Marc Fuge, de la Universidad Carnegie Melon presentó en 2012 un proyecto que utiliza una metodología de diseño a partir de la creación de formas

simples empleando un guante interfaz similar al *dataglove* anteriormente comentado [7]. El sistema traduce los gestos para representar la geometría deseada, en forma de superficies y de nubes de puntos, de tal manera que los diseñadores puedan explorar los diseños conceptuales sin necesidad de operaciones detalladas (Fig. 6).

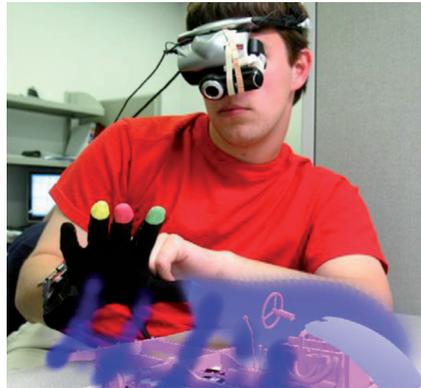


Fig. 6: Diseño de formas libres en realidad aumentada desarrollado por Marc Fuge

Otros sistemas de diseño conceptual en realidad aumentada emplean un entorno de trabajo de escritorio. El proyecto AUGMENTABLE [5], ya comentado, desarrollado en 2010 por Van Waardhuizen de la Universidad Estatal de Iowa, consiste en una estación de trabajo formada por una pantalla transparente de 40 pulgadas, cámaras y una unidad de proceso para el reconocimiento y seguimiento empleando marcadores de color en las manos.

3.2. PROTOTIPOS

El uso de la realidad virtual en manipulación de prototipos virtuales es la aplicación más desarrollada y de plena implementación en la industria. Un proyecto pionero fue REVIMA, liderado en 2003 por el CEIT (Univ. de Navarra) junto con las empresas SENER e I.T.P. (Fig. 3), para la validación de los diseños a partir de maquetas digitales de motores completos.

Consiste en un entorno semi inmersivo que cuenta con un háptico desarrollado específicamente, cuya función es simular una herramienta para efectuar estudios de accesibilidad a elementos del motor por medio de simulación de colisiones. Un paso más en este campo es el proyecto *Dhergo*, también del CEIT, para el desarrollo de maniqués digitales con objeto de facilitar el dise-

ño ergonómico de productos, simulando la interacción completa del cuerpo humano en la realización de tareas.

En el sector de la automoción se emplean técnicas de realidad virtual en las tareas de revisión del diseño y en tareas de valoración de los interiores de vehículos. Compañías como Jaguar o Peugeot emplean salas CAVE para tareas de revisión del diseño. Ford desarrolla sus proyectos en su Laboratorio de Evaluación Virtual (*immersive Virtual Evaluation lab.*, conocido por sus siglas *iVE*); en el caso del diseño del modelo Lincoln MKS, el *iVE* realizó numerosas iteraciones del panel central del automóvil con el fin de encontrar la posición óptima de los controles y las pantallas de visualización no solo desde un punto de vista estético y de visibilidad, sino también para ayudar a los ingenieros y diseñadores a ver la apariencia de determinados diseños y configuraciones antes de ser fabricados. Ford estima que el uso de estas herramientas de revisión del diseño supone una reducción de tiempo de desarrollo de 8 a 14 meses.

Para efectuar estas tareas de revisión del diseño de detalle se debe llevar a cabo un proceso de transferencia desde los modelos informáticos del sistema de diseño asistido a los modelos de realidad virtual. El sistema *ENVIRON*, desarrollado por A. Raposo de la Universidad de Río de Janeiro en 2006, es una herramienta de intercambio de datos desde modelos de diseño asistido por ordenador - DAO a modelos de realidad virtual mediante la reducción del tamaño del fichero DAO, la incorporación de las propiedades del material y la redefinición de superficies complejas del fichero DAO para producir una representación de realidad virtual mejorada. También Kim y Weissman, del Instituto de Interfaces Gráficas de Corea presentaron en 2006 el sistema experimental de intercambio de datos MEMPHIS, que integra sistemas de gestión de datos de producto, diseño asistido por ordenador y de realidad virtual a través de interfaces comunes.

Park, de la Universidad de Seúl, propone un sistema de elaboración de maquetas basado en la tecnología de realidad aumentada, donde es posible la modificación interactiva de formas, colores y texturas en una evaluación del diseño tangible. En el caso práctico emplea maquetas físicas de reproductores

portátiles y, por medio del uso de la realidad aumentada, los usuarios pueden experimentar cambios en las características del producto tales como su color e incluso usar sus pequeñas pantallas táctiles. Además, los usuarios podían decidir sobre un modelo de diseño que ellos tenían que evaluar y construirlo montando sus piezas.

El sistema GARDE, presentado por L.X. Ng de la Universidad de Singapur, permite, mediante la interacción gestual, la visualización de un modelo 3D en un entorno de realidad aumentada, así como su evaluación y modificación, que se reflejarán en el modelo y en paralelo en una aplicación DAO convencional vinculada al sistema. Otro proyecto de prototipado en realidad aumentada es el llevado a cabo por el grupo UNICAD, de la Universidad de Alicante, en colaboración con el Instituto Tecnológico del Calzado y Conexas (INESCOP), desarrollando un prototipo virtual de calzado por medio de técnicas de realidad aumentada. Como dispositivo de interacción emplean un guante 3D para facilitar el diseño a través del reconocimiento de gestos y manipulación de los modelos, similar al *dataglove* ya comentado.

3.3. FABRICACIÓN

La realidad virtual se ha implementado en técnicas de simulación de la distribución en planta (en inglés, *factory layout simulation* - FLS) [8]. Existen aplicaciones comerciales, como *Tecnomatix Factory FLS* de Siemens o el *Teamcenter Manufacturing Plant Simulation* de UGS.

La industria las emplea para afinar los resultados teóricos antes de la implementación; sin embargo estos sistemas solamente sirven para la simulación de los estudios teóricos realizados de forma convencional, y no para diseñar directamente la forma de la factoría. Otros inconvenientes de estos sistemas son el tiempo consumido en la modelización de todo el espacio de la factoría y sus instalaciones en 3D detallado, lo cual no es productivo ya que para los estudios de simulación solo se requieren zonas o equipos específicos de la factoría sin la necesidad de representarla en su totalidad.

Se han realizado estudios de aplicaciones de simulación de distribución en planta basados en realidad aumentada;

se han empleado sistemas muy básicos, como la interfaz tangible de usuario (en inglés, *tangible user interface* - TUI), que utiliza elementos reales (ladrillos) sobre los que se proyectan los objetos virtuales. Otro método reemplaza estos “ladrillos” por marcadores y el resultado se puede visualizar en un monitor por medio de una cámara sencilla. Sin embargo, estas soluciones basadas en realidad aumentada no han conseguido superar a las basadas en realidad virtual.

Siltanen, del centro de investigación VIT de Finlandia, ha desarrollado un método basado en realidad aumentada para gestión del espacio disponible en planta; cuando se instala una nueva maquinaria en el espacio disponible el diseñador utiliza su ayuda para asegurarse de que hay espacio suficiente para esa máquina.

La realidad aumentada capacita la comunicación en tiempo real entre el mecánico y el diseñador permitiendo la implementación de cambios de última hora en los modelos.

3.3.1. Planificación de montaje

Los sistemas de realidad virtual permiten planificar, por medio de prototipos virtuales, las secuencias de montaje haciendo posible detectar y corregir posibles problemas con el consecuente ahorro en coste e incremento de la calidad. Un ejemplo se encuentra en el sector de la automoción como es el sistema empleado en la factoría Ford de Almussafes, que emplea una sala de realidad virtual en tareas de revisión del montaje.

En el entorno de la realidad aumentada, S.K. Ong y Z.B. Wang de la Universidad Técnica de Singapur, presentaron en 2009 un proyecto de simulación

de tareas de montaje en un entorno de realidad aumentada por manipulación directa, es decir, sin ningún tipo de interfaz. Para ello desarrollaron un método, denominado 3DNBHI mediante el cual se detectan y rastrean las manos del usuario para conseguir interacciones entre los dedos y los objetos virtuales. Una aplicación de realidad aumentada en tareas de apoyo al montaje en planta de producción es el desarrollado por Luis Matey y Diego Borro, del CEIT [9]. Este sistema emplea un dispositivo móvil para disponer de las instrucciones de ensamblaje directamente en el puesto del operario. Esto es especialmente importante en entornos de trabajo con poca accesibilidad, donde no es posible consultar la documentación técnica.

3.4. OPERACIÓN EN SERVICIO

Una de las principales aplicaciones de la realidad virtual es la generación de entornos para la enseñanza. En el caso de puesta en servicio, es posible realizar el aprendizaje de las tareas de mantenimiento utilizando sistemas basados en realidad virtual, lo que se ha demostrado más operativo que el empleo de maquetas digitales.

Por otra parte, la realidad aumentada puede aplicarse con éxito en tareas reales de mantenimiento: las interacciones en el entorno realidad aumentada pueden facilitar la gestión de los datos de mantenimiento y permitir colaboración remota, tales como los sistemas KARMAR, que emplea un visualizador basado en sensores, o el sistema *ARVIKA*.

3.5. INGENIERÍA COLABORATIVA

La posibilidad de generar entornos virtuales permite optimizar el proceso de ingeniería colaborativa, generando



Fig. 7: Sistema 3DNBHI

espacios virtuales comunes; los diferentes usuarios localizados en diferentes ubicaciones pueden cooperar, explorar y analizar el mismo modelo en tiempo real.

En la red integrada de RV presentada en 2009 por Alexopoulos de la Universidad de Patras en Grecia, los usuarios participaron en una sesión colaborativa donde los diseñadores podían visualizar y cambiar los atributos del modelo geométrico, mientras cualquier cambio del diseño se distribuía en tiempo real a los modelos visualizados por todos los usuarios participantes.

En el trabajo, propuesto en 2010 por Morad Mahdjoub de la Universidad de Belfort-Montbéliard [10], se empleaba un sistema multi agente en una plataforma de realidad virtual donde desde un entorno colaborativo, empleando herramientas de realidad virtual, se analizaban varios aspectos de un prototipo virtual tales como la fabricación, mantenimiento, fiabilidad o ergonomía.

En el caso de la realidad aumentada, los sistemas desarrollados en ingeniería colaborativa se aplican principalmente en la visualización de los modelos de diseño para la evaluación del diseño y toma de decisiones. También es posible la presentación de otro tipo de datos relativos a los objetos representados; esta información puede consistir en metadatos, símbolos predefinidos o anotaciones realizadas por los diferentes usuarios. La visualización de un sistema de realidad virtual se puede extender a una plataforma consistente en dos o más plataformas conectadas. Esto permite a los usuarios de diferentes localizaciones cooperar, explorar, y analizar en el mismo modelo en tiempo real.

Además de un sistema de mera visualización, se han desarrollado sistemas experimentales de co-diseño en entornos de realidad aumentada: estos sistemas permiten a los diseñadores localizados en distintas ubicaciones efectuar cambios en los modelos en tiempo real.

Un caso es el trabajo desarrollado en 2009 por Shen, Ong y Nee de la Universidad de Singapur (Fig. 9) que proponen una aplicación de la realidad aumentada en apoyo al proceso de diseño en un entorno colaborativo entre miembros de un equipo multidisciplinar. En este caso las modificaciones efectuadas por cada usuario se presentan de forma

dinámica antes de la actualización del modelo DAO.

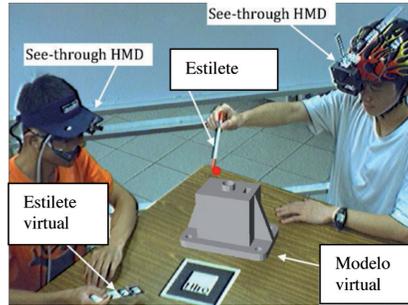


Fig. 8: Entorno de ingeniería colaborativa asistida por realidad aumentada según Shen

4. CONCLUSIONES

Las investigaciones en cuanto al uso en la industria de la realidad virtual en fases destacadas del ciclo de vida del producto han probado su potencialidad en la optimización de los procesos de desarrollo de producto, así como apoyo a las fases de servicio.

El uso de esta tecnología supone la detección temprana de errores en el diseño y, por tanto, la reducción de costes debidos a no conformidades. La reducción en los tiempos de desarrollo es igualmente sustancial. Asimismo, en el caso concreto del diseño conceptual, supone una importante ayuda en el fomento del diseño creativo, así como la integración de esta fase crítica del desarrollo del producto en sistemas computacionales. En la revisión de prototipos, la tecnología de realidad virtual ha trascendido del campo de la investigación y ya es una herramienta implementada en la industria, como es el caso de la automoción o la aeronáutica.

La realidad aumentada ha recibido un importante impulso en esta última década al ser objeto de un mayor número de trabajos y de proyectos de investigación, tratando, junto con otras muchas aplicaciones, de estudiar su posible empleo en los procesos de desarrollo de productos. Comparada con la realidad virtual, la realidad aumentada requiere un equipo menos costoso y fácilmente disponible, como es el caso de las aplicaciones de realidad aumentada para dispositivos táctiles.

Mientras que el hándicap de la realidad virtual se centra en el coste de los equipos, el de la realidad aumentada lo está en el desarrollo del software adecuado, concretamente en la optimiza-

ción de los sistemas de detección y rastreo de objetos. Las tendencias apuntan a un mayor uso futuro de la realidad aumentada, sin perjuicio del uso de la realidad virtual. Se entiende que, en simulación, la realidad virtual desempeña una función más relevante. De igual modo, la realidad aumentada, gracias a los dispositivos móviles, aporta un importante valor añadido en cuanto a la movilidad y trabajo a pie de obra; de la misma forma que puede representar una ventaja en trabajos de rediseño empleando componentes reales. Pero es importante concluir que ambas tecnologías son complementarias, y su aplicación dependerá de cada caso concreto.

PARA SABER MÁS

- [1] Jimeno A, Puerta A. "State of the art of the virtual reality applied to design and manufacturing processes," The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 33, pp. 866-874, 2007.
- [2] Azuma R, Baillot Y, Behringer R et al. "Recent advances in augmented reality," Computer Graphics and Applications, IEEE, vol. 21, pp. 34-47, 2001.
- [3] Álvarez H y Borro D. "Junction assisted 3D pose retrieval of untextured 3D models in monocular images," Comput. Vision Image Understanding, vol. 117, pp. 1204-1214, 2013.
- [4] Sánchez JR, Alvarez H and Borro D. "Towards real time 3D tracking and reconstruction on a GPU using monte carlo simulations," in Mixed and Augmented Reality (ISMAR), 2010 9th IEEE International Symposium on, 2010, pp. 185-192.
- [5] VanWaardhuizen M, Oliver J y Gimeno J. "Table top augmented reality system for conceptual design and prototyping," in ASME 2011 World Conference on Innovative Virtual Reality, 2011, pp. 395-405.
- [6] Nee A, Ong S, Chryssolouris G et al. "Augmented reality applications in design and manufacturing," CIRP Annals-Manufacturing Technology, vol. 61, pp. 657-679, 2012.
- [7] Fuge M, Yumer ME, Orbay G et al. "Conceptual design and modification of freeform surfaces using dual shape representations in augmented reality environments," Comput. -Aided Design vol. 44, pp. 1020-1032, 2012.
- [8] Ong SK y Nee AYC. Virtual Reality and Augmented Reality Applications in Manufacturing. SpringerVerlag, 2004.
- [9] Borro-Yáguez D, Serván-Blanco J, Cordero-Valle JM, et al. "Sistema de manos libres para ayuda de ensamblaje en Aeronáutica." DYNA. vol. 86, 2011.
- [10] Mahdjoub M, Monticolo D, Gomes S, et al. "A collaborative Design for Usability approach supported by Virtual Reality and a Multi-Agent System embedded in a PLM environment," Comput. -Aided Des., vol. 42, pp. 402-413, 2010.
- [11] Delcano A., Solano GL, Del Río D, De la Cruz López M. "Potencialidades de la realidad virtual con VRML/X3D en proyectos de construcción". DYNA, vol. 82(3), pp. 15-25, 2007.