

Formación de personal técnico en ensayos no destructivos por ultrasonidos mediante realidad virtual

Technical staff training in ultrasonic non-destructive testing using virtual reality

Diego Vergara-Rodríguez¹, Manuel Rodríguez-Martin¹, Manuel-Pablo Rubio-Cavero², Jesús Ferrer-Marín¹, Francisco-Javier Núñez-García¹ y Luisa Moralejo-Cobo³

¹ Universidad Católica de Ávila (España)

² Universidad de Salamanca (España)

³ Intertek Ibérica Spain S.LU (España)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8444>

INTRODUCCIÓN

El ensayo por ultrasonidos (UT, del término inglés *ultrasonic testing*) es un método de ensayo no destructivo (END) de examen volumétrico que está firmemente asentado tanto en el ámbito profesional como en el de investigación, y que es usado fundamentalmente para la detección y análisis de discontinuidades internas en materiales. Para llevar a cabo esta función, la ejecución del UT precisa de personal técnico muy especializado, así como una gran inversión de tiempo [1]. Al permitir detectar las discontinuidades internas, este ensayo cubre las limitaciones técnicas de otros END más simples, por ejemplo, líquidos penetrantes, partículas magnéticas, corrientes inducidas, etc. Otro tipo de END que también facilita la detección de defectos internos es la radiología industrial [2], pero el UT presenta algunas ventajas frente a los ensayos radiológicos: (i) los equipos son más pequeños, manejables e ino cuos; y (ii) no emiten radioactividad, por lo que no requieren medios de transporte especiales ni medidas específicas de protección radiológica del personal. Por ello, a día de hoy, la técnica de los ultrasonidos se considera una de las más versátiles [3] por su facilidad para el transporte y por posibilitar el diagnóstico rápido y limpio de numerosos defectos e imperfecciones. Su aplicación viene regulada por estándares internacionales, siendo la norma UNE-EN-ISO 16810:2014 la que establece los principios generales del examen mediante ultrasonidos. La técnica de los UT se fundamenta en la propagación de ondas acústicas de alta frecuencia

con una velocidad característica para cada material. Es estos casos, el objetivo principal de estos END es detectar en el interior del material la presencia de discontinuidades (anomalías o defectos) mediante la captación de la señal de la onda reflejada. Así mismo, se puede determinar también su profundidad, forma y tamaño, caracterizando cada imperfección dentro de la clasificación de defectología contemplada en la normativa de calidad aplicable.

Los principales dispositivos utilizados en los UT son los palpadores (transductores), los bloques de calibración y los equipos de ultrasonidos (dispositivos encargados del procesamiento de la señal y de la visualización). Al recibir una señal eléctrica, el elemento piezoeléctrico del transductor procede a la generación de ondas ultrasónicas de alta frecuencia desde la superficie de contacto hacia el interior del material (la energía mecánica de vibración se propaga a través de los materiales como presión acústica dentro del espectro del ultrasonido). Cuando se presenta una anomalía en la continuidad del material (por ejemplo, grietas, poros, inclusiones de escoria, etc.), parte de la energía de la onda será reflejada (eco) hacia la superficie donde se encuentra posicionado el transductor o sensor encargado de la recepción. De manera inversa a la generación de la onda ultrasónica, cuando el transductor recibe una onda ultrasónica reflejada, la transforma en una señal eléctrica y el equipo permite que esta se muestre en la pantalla, pudiéndose obtener así información detallada de la anomalía: ubicación, tamaño, orientación y otras características. Cuanto menor es la frecuencia del transductor, mayor penetración hacia el interior del material alcanza la onda ultrasónica, pero, a su vez, la resolución de los resultados disminuye. De este modo, para cubrir la totalidad de necesidades de penetración existen diferentes tipos de transductores (desde 50 kHz hasta 200 MHz de frecuencia).

La principal evolución en los últimos tiempos de la técnica de los ultrasonidos en términos de END se basa (i) en el desarrollo de nuevos protocolos de ensayo denominados *phased array* [1,4] y (ii) en nuevas metodologías de aplicación que combinan los ultrasonidos con otro tipo de sensores, por ejemplo, los termográficos [5]. La diferencia principal de la técnica *phased array* respecto al UT convencional radica en el hecho de que los transductores contienen entre 16 y 256 elementos piezoeléctricos individuales que pueden trabajar por separado. Éstos se pueden posicionar en disposición de fila, de anillo o de círculo, o también en formatos más complejos. En esta modalidad, la frecuencia del transductor normalmente queda dispuesta en el rango de 2 MHz a 10 MHz. Un sistema *phased array* también incluye sofisticados algoritmos de procesamiento capaces de gobernar la sonda multi-elemento, recibir y digitalizar los ecos de retorno, y trazar esa información de eco en formatos estandarizados. A diferencia del UT tradicional, el sistema *phased array* tiene la capacidad de implementar un barrido del haz de ultrasonidos a través de una suerte de ángulos refractados a lo largo de una determinada trayectoria recorrida por el transductor, o enfocarse dinámicamente a diferentes profundidades al mismo tiempo, aumentando así tanto la flexibilidad como la capacidad en las configuraciones de inspección. Además, con la técnica *phased array* la matriz de ultrasonidos en fase permite realizar inspecciones múltiples sin la necesidad de reconfigurar el protocolo, permitiendo la obtención de una mejor sensibilidad y cobertura [4]. El output del sistema se asemeja más a una imagen en penetración de la sección del material (Fig. 1) y, por ende, los resultados aportan más información en menor tiempo de ensayo que las técnicas convencionales.

Otro ámbito innovador de desarrollo de la técnica ultrasónica se basa en la hibridación de la misma con la técnica de termografía activa [6]. En esta técnica se puede utilizar un pulso de ultrasonido de 20-100 kHz para la estimulación energética, el cual es aplicado en un punto de la estructura a fin de generar un campo vibratorio inducido en el sólido. Esto hace que en los contornos de las grietas o delaminaciones aumente el rozamiento y que,

por lo tanto, la energía disipada devenga en un aumento de temperatura en la zona del defecto, que es detectado así por una cámara infrarroja cuyo campo visual cubre la zona a inspeccionar (Fig. 2).

La técnica de UT es aplicada por personal técnico altamente especializado, que previamente ha tenido que ser habilitado para ello a través de una formación reglada específica. En España, dicha formación se imparte habitualmente en forma modular (nivel I, II y III), en base a la normativa internacional que regula los requerimientos del personal de inspección en ultrasonidos, UNE-EN ISO 9712. De

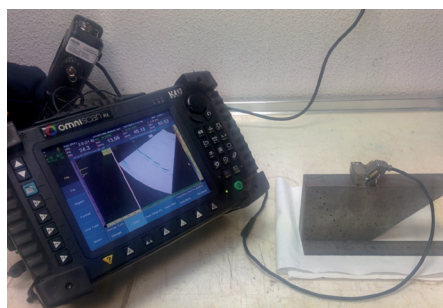


Fig. 1: Output generado en el display durante la ejecución de un UT phased array: el corte del mapa es una señal ultrasónica similar a la obtenida con el UT tradicional (parte izquierda), aunque el output aportado presenta una mayor complejidad (parte derecha)

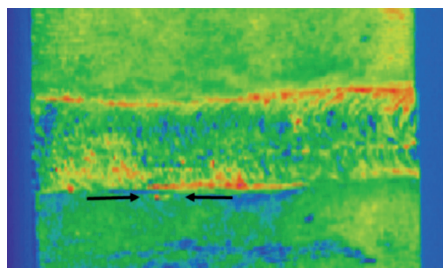


Fig. 2: Ejemplo de registro de termografía activa sobre soldadura para la detección de una fisura (indicada con la flecha) en la zona de transición de un cordón de soldadura de acero

este modo, la complejidad de la aplicación del protocolo de toma de datos en el ensayo de ultrasonidos y la interpretación de los resultados hace propicio el desarrollo de nuevos métodos de formación [7], por ejemplo, el uso de entornos virtuales que permitan el adiestramiento tanto de técnicos en materia de inspección de soldaduras como de estudiantes de ingeniería. A su vez, el alto precio de los equipos de ensayo, de la formación del personal instructor y la necesidad de tener diferentes especímenes de ensayo con diferentes patologías, hace que el proceso de formación de estas técnicas se desarrolle en entornos altamente especializados, a los cuales, en ocasiones, no es fácil tener acceso. Por este motivo, las plataformas virtuales interactivas (PVI), denominadas como labo-

ratorios virtuales (LV) cuando simulan el funcionamiento de un laboratorio real, han supuesto una incipiente revolución en la formación técnica por paliar varios inconvenientes propios en este ámbito: (i) maquinaria de grandes dimensiones y de costes muy elevados [8]; (ii) existencia de riesgos laborales relacionados con la integridad física del personal que ejecuta el ensayo [2]; (iii) aulas sobresaturadas [9].

Teniendo en cuenta todos estos aspectos, en este artículo se muestra un innovador LV diseñado en base a la realidad virtual para la formación de personal técnico en END, concretamente en el UT. El artículo, además, busca ser extensible a cualquier lector al aportar una metodología de diseño sistemático para crear un LV o PVI de este tipo, indicando a tal efecto programas utilizados, diagrama de flujo del diseño, recomendaciones a partir del análisis de resultados, etc.

2. HERRAMIENTAS UTILIZADAS

Como las herramientas de animación digital y de diseño tridimensional han experimentado un amplio desarrollo y distribución en los últimos años, no es necesario el uso de equipos sofisticados para poder diseñar una PVI basada en realidad virtual. De este modo, la mayoría de ordenadores comerciales son capaces de soportar con fluidez los programas necesarios para tal fin. A tal efecto y para dejar patente la ausencia de necesidad de equipos costosos, para crear el LV mostrado en este artículo se ha utilizado un ordenador con procesador de doble núcleo de 8 GB de RAM y una tarjeta gráfica de Nvidia® GeForce GTX 660 de 2GB. Los programas necesarios para el diseño de este LV han sido: AutoCAD® 2016, SketchUp Pro® 2016 y Unity® 5.

Los archivos de AutoCAD® 2016, en su edición para estudiantes, presentan compatibilidad directa con el resto de programas de diseño asistido por ordenador. Además, esta versión incorpora una serie de recursos inteligentes que permiten el desarrollo de diseños 2D de alta calidad de forma más eficiente. La versión SketchUp Pro® 2016, que sirve para el modelado de contenido tridimensional, permite la importación y exportación de archivos en distintos formatos, además de no requerir equipos potentes ni estar exclusivamente limitada a sistema operativo alguno. Por último, el software Unity® 5, basado en un motor gráfico de videojuego multiplataforma con tecnología de animación Mecanim, ofrece soluciones de desarrollo para Microsoft Windows, Mac OS X o Li-

nux. Este motor gráfico permite modelar con el máximo realismo posible, siendo capaz de proporcionar sombras dinámicas, render de texturas y proporcionar efectos de post-procesamiento de pantalla completa. Dispone también de soporte integrado para Nvidia®, para el motor de física PhysX y para el cálculo de colisiones. Además, proporciona un alto grado de compatibilidad con distintos programas de diseño (3Ds Max®, Cinema 4D®, SketchUp® y AutoCAD®) y de animación.

3. METODOLOGÍA DE DISEÑO

La metodología de diseño del LV del UT expuesto en este artículo sigue un proceso secuencial dividido en tres fases bien diferenciadas (Fig. 3): fase 1: *análisis de las necesidades y planteamiento del problema*; fase 2: *proceso técnico de virtualización*; y fase 3: *evaluación de resultados*.

3.1. FASE I: ANÁLISIS DE NECESIDADES Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La finalidad de la primera fase, que se basa en el estudio y análisis de necesidades, es encontrar el problema en materia de instrucción del UT al que se pretende dar solución y plantear un proceso de virtualización que cubra una necesidad real de formación. De esta forma, se consigue evitar la pérdida de tiempo y de recursos para aquellos casos que no tengan una utilidad real o que no sirvan de complemento para la formación del personal técnico: de ahí la importancia de esta fase. Para poder realizar la recreación virtual del UT con fines formativos, el ensayo a virtualizar tiene que atesorar las siguientes características: que exista una necesidad real de adiestramiento para la ejecución del ensayo, que el éxito de dicha ejecución dependa de la habilidad del inspector, y que exista un entorno tangible y real a recrear que se pueda virtualizar con la suficiente fidelidad (contextos reales de un laboratorio, entornos in-situ con instalaciones, etc.).

3.2. FASE II: PROCESO TÉCNICO DE VIRTUALIZACIÓN

Una vez realizado el estudio de necesidades y habiendo sido planteado el problema (fase 1), se procede a fijar los requerimientos que ha de tener el LV. En la Tabla 1 se han materializado estos requerimientos como *criterios de diseño* generales. En base a éstos se establecen cuáles son las herramientas necesarias tanto para diseñar tridimensionalmente cada elemento como para generar la ani-

Criterio de realidad (C1)	Criterio de economía (C2)	Criterio de calidad (C3)
- Modelado realista de equipos y materiales. - Posibilidad de introducir presentaciones y archivos de contenidos. - Contextualización del entorno real. - Integración de diseños de marca corporativa.	- Flexibilidad de adaptación a diferentes archivos de contenidos (unidades técnicas) en función del usuario de destino. - Flexibilidad de adaptación para otros niveles de formación u otros entornos virtuales. - Estandarización del entorno de formación (familiarización). - Posibilidad de integración en plataformas virtuales de formación.	- Almacenaje de datos para evaluar el rendimiento de la actividad - Almacenamiento de datos para la evaluación ulterior del manejo del usuario. - Buzón para las recomendaciones de los usuarios. - Creación de tutoriales para el manejo de la plataforma.

Tabla 2: Criterios establecidos para el diseño de laboratorios virtuales en END

mación que recree con fidelidad el ensayo. Seguir este proceso de criterios delimitará el cumplimiento de los objetivos del LV y, por ende, ayudará a finalizar satisfactoriamente todo el procedimiento. Para el presente caso de estudio se han tenido en cuenta tres tipos de criterios (Tabla 1): *criterio de realidad* (C1), *criterio de economía* (C2) y *criterio de calidad* (C3).

Seguir el *criterio de realidad* (C1) es imprescindible, ya que la fidelidad del LV y sus elementos se torna crucial para integrar al técnico en formación en un contexto real del UT y que, de este modo, pueda identificar futuros dispositivos y tecnologías sin necesidad de haberlas visto antes en un contexto real. Para garantizar este requerimiento se debe analizar si se dispone de herramientas que permitan recrear con fidelidad los diferentes equipos

a través de un software de diseño en 3D o si, por el contrario, fuera necesario algún tipo de aplicación de la ingeniería inversa para el escaneo tridimensional de la geometría del equipo, pieza o espécimen. Otra faceta importante dentro de este criterio de realidad es la posibilidad de que se puedan insertar presentaciones y archivos complementarios en el LV, permitiendo al técnico en formación acceder a ellos sin necesidad de salirse del entorno virtual.

El segundo criterio de diseño es el *criterio de economía* (C2), que deberá tenerse en cuenta en base a los recursos disponibles. A fin de reducir costes, se deberá plantear, con arreglo a este criterio, la flexibilidad del entorno virtual para adaptarse a diferentes unidades didácticas o técnicas. De este modo, se podrá reutilizar la plataforma para distintos ni-

veles de formación o para otros objetivos diferentes. De igual modo, es recomendable que el proceso de diseño permita que el entorno realizado sea extensible para adaptaciones a recreaciones de otros tipos de ensayos, con el objeto de reducir el trabajo y optimizar tiempos si existen elementos comunes que pueden reciclarse para nuevos fines. Por otro lado, la estandarización del entorno se estima como práctica recomendable para evitar que el personal en formación tenga que readaptarse a nuevos entornos para otros ensayos o prácticas.

El último criterio a tener en cuenta para un buen diseño del LV es el *criterio de calidad* (C3). Este tiene por objeto garantizar la calidad de la formación impartida a través del LV utilizando tanto sistemas de análisis de calidad internos como externos.

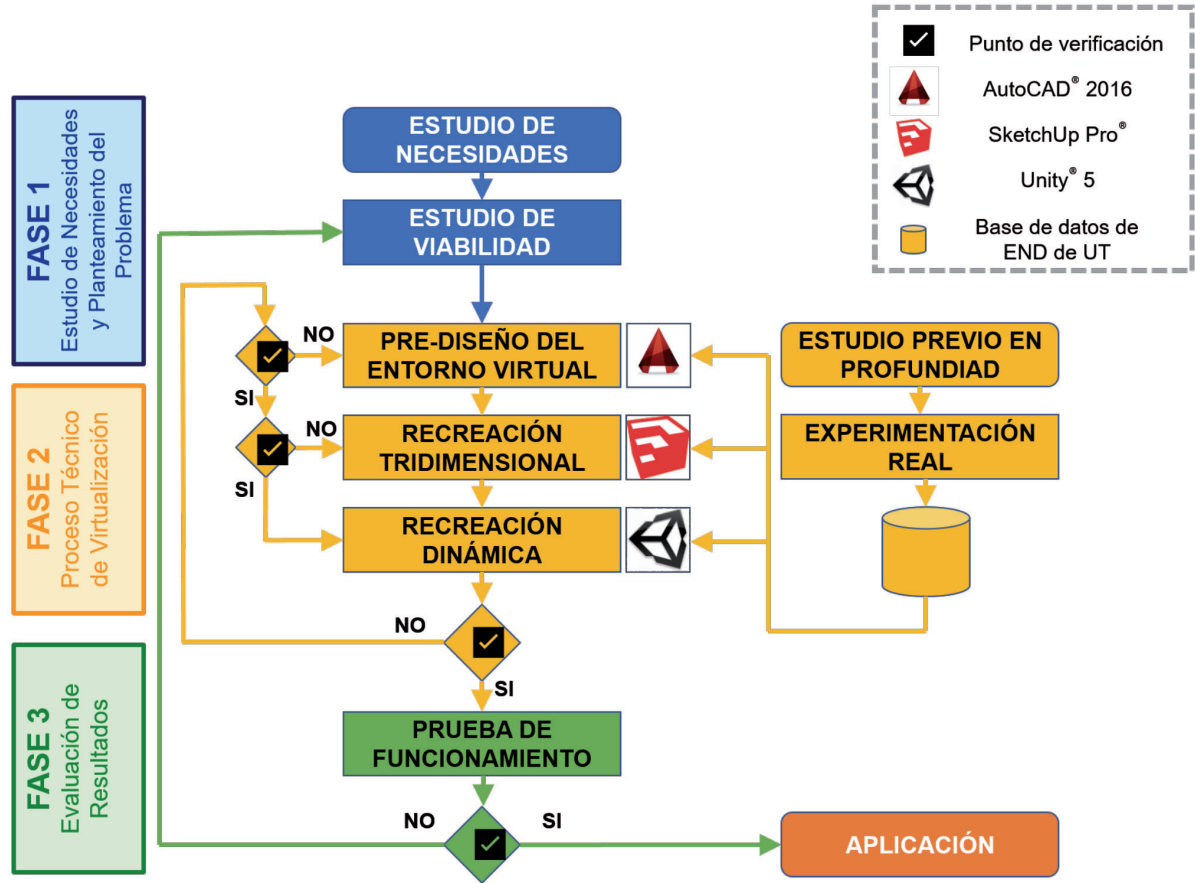


Fig. 3: Proceso integral de diseño del LV en el ámbito de los END

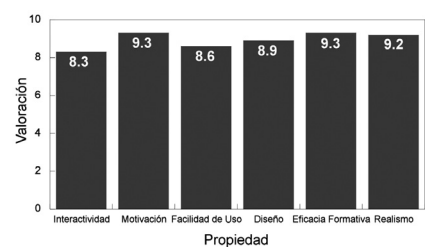


Fig. 4: Valoración de las propiedades más significativas del laboratorio virtual de ultrasonidos

El objeto final de este criterio es asegurar que el LV haya sido diseñado para evaluar correctamente los objetivos competenciales de formación que se pretenden cubrir. Tal como se ve en la Fig. 3, en la fase de prediseño se ha usado el programa AutoCAD® para crear contenido 2D así como un interfaz común para la sección de recursos didácticos del LV. Este contenido se visualiza en los distintos ejercicios prácticos de UT. En cambio, para la recreación del contenido tridimensional se ha usado el programa SketchUp®, que permite modelar elementos 3D alcanzando una gran fide-

dad de diseño entre el elemento virtual y el real. La implementación de los distintos elementos modelados tanto en AutoCAD como en SketchUp® ha sido desarrollada mediante el software Unity, que permite acceder de forma interactiva a cada una de las secciones del LV y operar con todos los elementos.

3.3. FASE III: EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS

En todas las referencias bibliográficas relacionadas con diseños de LV siempre hay un apartado en el que se evalúan los resultados, tanto a nivel de diseño de la propia herramienta como a nivel de eficacia formativa. Así, los parámetros más representativos a evaluar en este tipo de herramientas son [10]: (i) interactividad; (ii) motivación; (iii) facilidad de uso; (iv) diseño; (v) eficacia formativa (contenidos y diseño de ejercicios); (vi) similitud con la realidad (realismo); etc. De este modo, para conocer la opinión del LV del UT mostrado en este artículo, un total de 20 técnicos (ingenieros y estudiantes de ingeniería) fueron encues-

tados. En la Fig. 4 se muestra la media aritmética de los resultados plasmados en las encuestas (en una escala de 0 a 10), quedando así una evidencia cuantificable del potencial formativo de esta herramienta. La propiedad de interactividad, que es el menos valorado (aunque con una calificación elevada, de 8.3 puntos sobre 10), es debido a la exigencia actual de libertad de actuación que pide la sociedad en todos los recursos virtuales asociados a los video-juegos. Aun así, la dispersión de opiniones es baja (desviación típica de 0.34) y todos los encuestados valoraron dicha propiedad como mínimo con 8 puntos sobre los 10 posibles. Destacan tres propiedades de este LV por ser las más valoradas: la motivación a usar la herramienta, la eficacia formativa y la adaptación a la realidad.

4. RESULTADOS

Para comprender mejor el diseño del LV del UT, en la Fig. 5 se muestran varias imágenes del LV diseñado, donde se puede ver

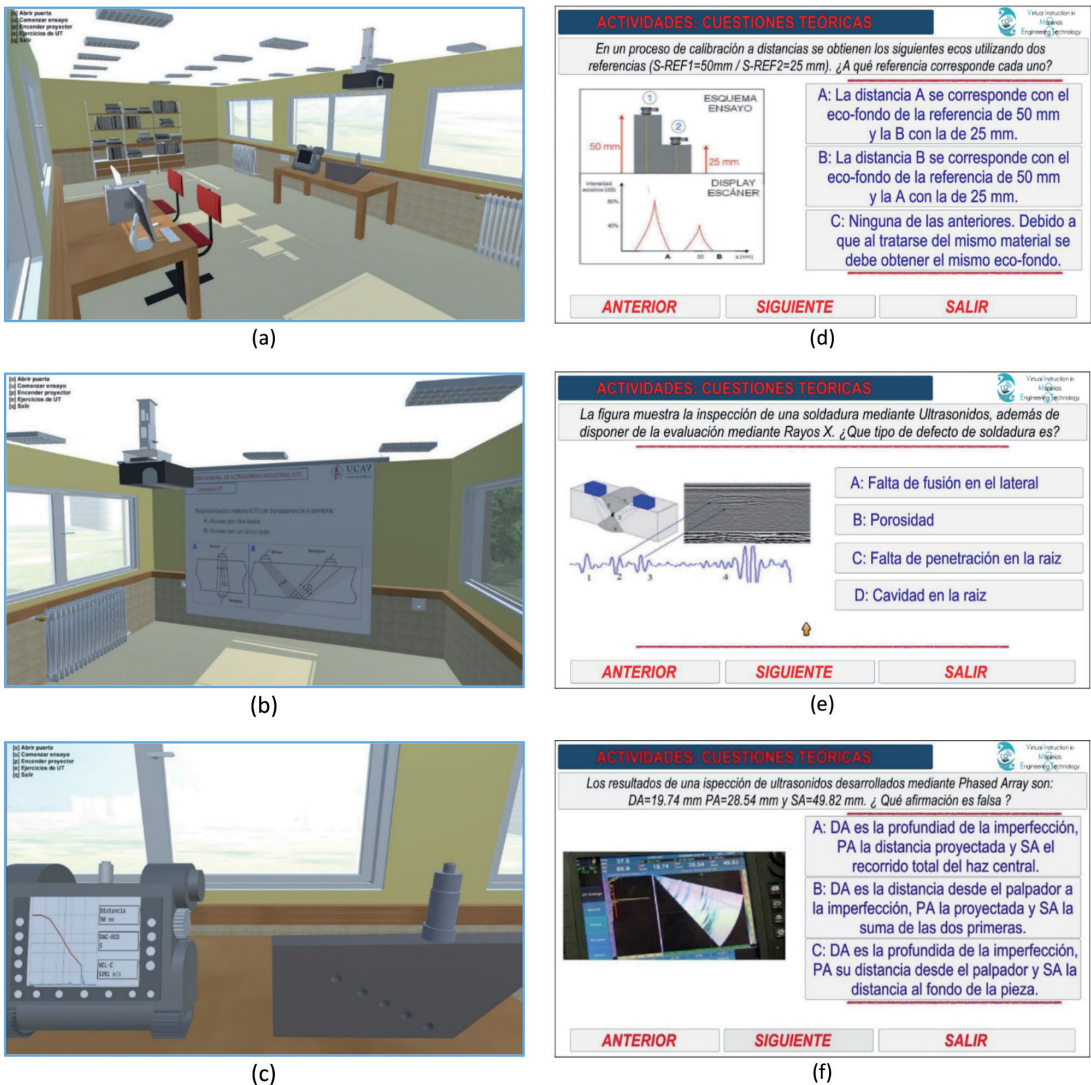


Fig. 5: LV de UT: (a) vista general en el interior del LV, (b) pizarra virtual con contenido teórico, (c) ejecución interactiva de un proceso de calibración del escáner de UT, (d) ejemplo de pregunta práctica de calibración; (e) ejemplo de pregunta práctica de inspección de soldaduras; (f) ejemplo de pregunta teórica

el entorno del propio laboratorio (Fig. 5a), la existencia de una pizarra digital en la que el usuario puede encontrar teoría básica del UT (Fig. 5b) y el proceso de calibración del escáner de ultrasonidos (Fig. 5c).

El usuario o personal en formación, puede moverse libremente dentro del entorno virtual, utilizando para ello los cursores del teclado ($\leftarrow \uparrow \downarrow \rightarrow$). Además, este LV sigue la programación basada en la filosofía WYSIWYG (*What you see is what you get*, lo que ves es lo que puedes hacer), es decir, que los resultados se ven directamente en el programa sin necesidad de renderizar ni exportar la aplicación para realizar comprobaciones. Por otro lado, dentro de las opciones de diseño en realidad virtual, este LV sigue la categoría *window to the world* (ventana al mundo), i.e. el usuario visualiza el LV como si estuviese mirando por una ventana. A mayores, se le han aplicado funciones de interactividad para que el usuario pueda actuar libremente con los elementos más significativos del LV (puerta, ordenador, demostración de ensayo, proyector para refuerzo de conocimientos, etc.). Por último, a modo de refuerzo para lograr el objetivo de formación especializada, se ha incluido una colección de ejercicios/problemas interactivos de un nivel I en la instrucción formativa de inspectores de END en UT (Figs. 5d, 5e y 5f), buscando con ello que el LV sea realmente eficaz para los fines previstos. Estos ejercicios tienen tres o cuatro posibles soluciones, y la propia plataforma informa al usuario de la respuesta correcta cuando se pulsa de forma acertada (activando la pregunta en color verde) o errónea (activando la pregunta en color rojo).

5. DISCUSIÓN

En el presente trabajo ha quedado descrita una metodología de diseño sistemática para virtualizar un laboratorio de END de ultrasonidos. Tal como se ha visto, es en la fase de análisis de necesidades (fase 1, Fig. 3) donde se estudia la viabilidad de que un determinado tipo de ensayo sea apto para su virtualización y para la generación de este tipo de materiales interactivos con fines formativos. Una vez asegurada la viabilidad, se deben seguir los pasos propuestos en la Fig. 3 para poder diseñar de forma exitosa un LV o una PVI. A modo de ejemplo, en este documento queda constancia de la posibilidad de diseñar un LV que englobe integralmente la técnica de los UT tradicionales con fines formativos (Fig. 5), basándose en la realidad virtual del tipo "window to the world". No es menos cierto que se tiene que seguir investigando en la posible aplicación de

este tipo de tecnologías (incluida la realidad virtual de inmersión (11), sobre todo para técnicas de ensayo que, por ser punteras o encontrarse en fase de desarrollo, son menos accesibles y su formación está menos democratizada: por ejemplo, las dos técnicas de UT descritas en la introducción: (i) ultrasonidos *phased array* (Fig. 1) y (ii) termografía activa (Fig. 2).

6. CONCLUSIONES

Las necesidades en formación de personal cualificado para ensayos no destructivos (END), unido a la complejidad propia de la aplicación de los diferentes protocolos seguidos en los ensayos de ultrasonidos (UT) acerca de la toma de datos y su interpretación, hace adecuado el desarrollo de nuevas metodologías que fomenten la interacción del técnico en formación y que aporten un plus de realismo a los materiales habitualmente utilizados. Actualmente el acceso a este tipo de formación está realmente limitado por varios factores: (i) la sofisticación y el alto precio de ciertos equipos de UT, (ii) el personal que imparte la instrucción debe estar altamente cualificado, (iii) la necesidad de tener diversas probetas de ensayo con diferentes patologías. De este modo, al igual que en otros sectores empresariales, el proceso de formación del UT puede recibir un claro refuerzo a través de la virtualización de las metodologías seguidas tradicionalmente. Esto no elimina la necesidad de un instructor altamente cualificado, sino que facilita el proceso de formación tradicional con materiales de refuerzo, como son los laboratorios virtuales (LV). Estas innovadoras tecnologías aportan algunas ventajas claras: (i) *precio*: menor coste al poder usar dicho LV infinitas veces; (ii) *aplicabilidad*: posibilidad de usarse en cualquier equipo informático de gama media; (iii) *versatilidad*: capacidad de diseñar diferentes casos de estudio, tanto los más habituales como casos anómalos; (iv) *eficacia*: capacidad de formar al mismo tiempo a un mayor número de técnicos.

Los resultados tan positivos encontrados con el presente diseño de LV del UT animan a continuar con las investigaciones y seguir desarrollando este tipo de materiales: (i) de manera horizontal, desarrollando nuevos entornos virtuales para diferentes aplicaciones del UT como, por ejemplo, la técnica *phased array*, y (ii) de manera vertical, extendiendo las metodologías expuestas hacia otro tipo de END como son la termografía, las partículas magnéticas o los líquidos penetrantes.

PARA SABER MÁS

- [1] González-Fernández FJ, García-San Andrés MA, Sancho-de Mingo C, et al. "Sistema integral para la inspección automática por ultrasonidos de ruedas elásticas ferroviarias". DYNA Ingeniería e Industria. July 2011. Vol. 86. p. 281–291. <https://doi.org/10.6036/3986>
- [2] Vergara D, Rubio MP. "The application of didactic virtual tools in the instruction of industrial radiography". Journal of Materials Education. January 2015. Vol. 37. p. 17–26.
- [3] Rodríguez-Martin M, Lagüela S, González-Aguilera D, et al. "Cooling analysis of welded materials for crack detection using infrared thermography". Infrared Physics and Technology. November 2014. Vol. 67. p. 547–554. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2014.09.025>
- [4] Xiaoa K, Wang Q, Dong DH. "Post signal processing of ultrasonic phased array inspection data for non-destructive testing". International Symposium on Safety Science and Engineering in China. Procedia Engineering. October 2012. Vol. 43. p. 419–424. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.08.072>
- [5] Mendioroz A, Castelo A, Celorrio R, et al. "Characterization and spatial resolution of cracks using lock-in vibrothermography". NDT&E International. September 2014. Vol. 66. p. 8–15. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2014.04.004>
- [6] Rodríguez-Martin M, Lagüela S, González-Aguilera D, et al. "Active thermography. Part 1. Theoretical approach of infrared capture, data processing and classification". DYNA Ingeniería e Industria. September 2015. Vol. 90. p. 456–460. <https://doi.org/10.6036/7556>
- [7] Chong YB, Bennecer A, Hagglund T, et al. "A new synthetic training environment system based on an ICT-approach for manual ultrasonic testing". Measurement. July 2015. Vol. 71. p. 11–22. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2015.04.013>
- [8] Vergara D, Rubio MP, Prieto F, et al. "Enhancing the teaching/learning of materials mechanical characterization by using virtual reality". Journal of Materials Education. May 2016. Vol. 38. p. 63–74.
- [9] Vergara D, Rubio MP, Lorenzo M. "New approach for the teaching of concrete compression tests in large groups of engineering students". Journal of Professional Issues in Engineering Education and Practice. April 2017. Vol. 143. 05016009. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EI.1943-5541.0000311](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EI.1943-5541.0000311)
- [10] Vergara D, Lorenzo M, Rubio MP. "Chapter 8: Virtual environments in materials science and engineering: the students' opinion". In Handbook of research on recent developments in materials science and corrosion engineering education, Lim H. Ed.; Publisher: IGI Global: Hershey. 2015. p. 148–165. <https://doi.org/10.4018/978-1-4666-8183-5.ch008>
- [11] Vergara D, Rubio MP, Lorenzo M. "On the design of virtual reality learning environments in engineering". Multimodal Technologies and Interaction. June 2017. Vol. 1. Paper 11. <https://doi.org/10.3390/mti1020011>