

EL 3D DE LA SEGURIDAD NUCLEAR: DIGITALIZACIÓN, DATOS Y DECISIÓN



RAFAEL ANTONIO TORRES
MÁRQUEZ

Principal Simulation Software Engineer
WESTINGHOUSE NUCLEAR SPAIN

La seguridad nuclear se ha encontrado en los últimos años con retos, en un entorno cambiante, más restrictivo y regulado, y en el que el punto de vista de la sociedad juega un papel especial. Para enfrentar estos retos con todas las garantías de éxito, la seguridad nuclear ha hecho uso de todas las herramientas tecnológicas que se han puesto a su alcance y las herramientas 3D han abierto una infinidad de utilidades y campos de aplicación que han ido evolucionando y mejorando en los últimos años.

Para abordar esta mirada de aplicaciones, herramientas y nuevas funcionalidades de aplicativos ya existentes, necesitamos realizar una clasificación de las mismas y, para ello, haremos uso de la metáfora que nos otorga las tres dimensiones del dominio espacial. El eje del modelado de instalaciones y sistemas nucleares, es la base en la que se alzan los otros dos ejes, la visualización y análisis interactivo en espacios 3D por un lado, y la simulación y el análisis predictivo por otro.

LAS MEJORAS TECNOLÓGICAS

Los avances tecnológicos, electrónicos y en computación que han acaecido en las últimas décadas han afectado de forma transversal al resto de tecnologías. De tal forma que, la evolución del tamaño de integración en los microprocesadores ha seguido una tendencia exponencial de miniaturización, caracterizada por la reducción constante del tamaño de los transistores (medido en nanómetros, nm) y el aumento en su densidad, cumpliendo con la Ley de Moore, que predice la duplicación de transistores aproximadamente cada dos años. Tanto que en los años 80 hablábamos de 3500nm, en los 90 de 800nm y en la actualidad de procesa-

dores de vanguardia que utilizan procesos de fabricación de 5 nm, 3 nm y se investigan nodos inferiores, acercándose a tamaños equivalentes a una proteína o virus.

El otro factor importante es la computación y la evolución de la potencia de cálculo, medida en FLOPS (operaciones de punto flotante por segundo), que representa el crecimiento exponencial de la capacidad de procesamiento en computadoras y consolas, pasando de realizar operaciones complejas en superordenadores a tener gigaFLOPS(10^9) de potencia en el bolsillo. En los 90 esta tasa, aunque realmente los dispositivos no contasen con componentes que realizaran las operaciones en punto flotante, rondaba los 100megaFLOPS(10^6), mientras que hoy en día algunos móviles ya superan el teraFLOPS(10^{12}) y la industria de supercomputación trabaja en los petaFLOPS(10^{15}).

Y después de todas estas cifras, ¿qué implicaciones tiene tanto número? Pues evidentemente, con el último ejemplo vemos hacia donde hemos ido. Tenemos al alcance de la mano, literalmente, dispositivos muy manejables y con una capacidad de cómputo millones de veces el ordenador utilizado para poner al hombre en la luna. Esto aplicado a los dispositivos 3D, escáneres, GPS, sistemas de visión, cámaras y videocámaras, computadoras... han reducido su tamaño y mejorado el procesamiento de datos interno preparándolos para poder trabajar en ordenadores que han reducido los tiempos de procesamiento automático de días a minutos.

La consecuencia directa de todos estos avances es la disponibilidad de todos estos dispositivos al consumidor básico, podríamos hablar de la democratización de la tecnología 3D.



Figura 1. Escáneres láser Leica.

EL MODELADO DE INSTALACIONES Y SISTEMAS NUCLEARES

Todos estos dispositivos nos permiten la obtención de modelos tridimensionales, que servirán de base para el resto de las dimensiones pero que, por sí solos, ya tienen una gran utilidad. Los escáneres por medio de nubes de puntos a veces integrando imágenes de cúpula, los GPS permitiendo una localización más precisa de dichas nubes, las cámaras y videocámaras generando imágenes de altísima resolución y los computadores permitiendo el procesamiento de toda esta información:

- Espacios abiertos y cerrados, que permiten el modelado exterior e interior de edificios y entornos de la central, son los denominados modelos “as-built”. Estos modelos se pueden utilizar directamente en la **preparación de trabajos** identificando interferencias o vulnerabilidades y **planificando** intervenciones de **mantenimiento o modificaciones de diseño** con mayor seguridad, y que, desde el punto de vista de la seguridad nuclear, ayudan a reducir la tasa de accidentes por el conocimiento del medio de antemano, reduciendo las exposiciones a radiaciones ionizantes [1]. Así, ante un trabajo, sabemos qué nos vamos a encontrar sentados frente a un ordenador desde una oficina, totalmente a salvo y antes de acometerlo. Con videos-modelos y foto-modelos 3D se nos permite establecer recorridos seguros por la planta con diferentes grados de inmersión mejorando de nuevo el conocimiento del medio a través de la formación. De igual forma, todos estos modelos se pueden utilizar para la **formación** en conocimiento del medio. Formar al empleado y al visitante por dónde tiene que pasar, trabajar o, incluso, no pasar, es fundamental para este conocimiento del medio y actuar de una forma segura.
- Piezas y componentes, el modelado de piezas y componentes a partir de nube de puntos y la utilización de modelos CAD han abierto un amplio rango de aplicaciones, desde la **formación** en el conocimiento de los componentes para, por ejemplo, procedimientos de montaje y desmontaje en tareas de mantenimiento, a tareas de **planificación** en **modificaciones de diseño** y **mantenimiento**, como con los modelos anteriores pero a me-

nor escala, y también como estos se pueden utilizar para la **preparación de trabajos**. Si por ejemplo queremos reemplazar una válvula por el modelo nuevo de un fabricante, la representación CAD nos permite incluirla en la representación del edificio donde se encuentra la válvula a reemplazar y decidir de antemano si la nueva se ajusta a lo previamente existente. Además, se han utilizado para procesos de **ingeniería, instrumentación y control y fabricación**, como por ejemplo la producción de piezas o componentes fundamentales por medio de la impresión 3D aditiva [2].



Figura 2. Componente desarrollado por Westinghouse con tecnología 3D. (Fuente: Westinghouse).

- Sistemas, el modelado focalizado en sistemas concretos hacen posible generar representaciones digitales precisas de reactores, sistemas de contención, circuitos de refrigeración u otras infraestructuras críticas. El modelo “as-built” resultante es detallado y preciso. Precisión que no sólo sirve a tareas de **ingeniería y formación** sino también a **análisis, operación y mantenimiento**. Por ejemplo, supongamos que necesitamos saber la inclinación real que tienen todas las tuberías de un sistema: tendremos que escanear todo el sistema con una alta resolución e incluso geolocalizarlo [3].

LA VISUALIZACIÓN E INTERACCIÓN CON LOS MODELOS 3D

En esta dimensión de nuestra metáfora vamos a inyectar a los modelos 3D una dosis de información e interacción. Pertenecen a este grupo las aplicaciones de realidad virtual (RV), realidad aumentada (RA) y realidad mixta (RX), las aplicaciones que visualizan cierta información focalizando en contextos determinados y las visualizaciones que cooperan con otras aplicaciones para formar un producto mejorado, como por ejemplo la combinación de RV y un Building Information Management (BIM) / Product Lifecycle Management (PLM).

La RV, quizás la más extendida de estas tecnologías, y que en todas sus formas (sistemas inmersivos, RX, RA, 3D realista, recorridos virtuales, etc.) respalda la máxima de que “el 80% de la información nos llega de forma visual”. Esto es precisamente lo que hace tan poderosas a estas herramientas, ya que no sólo proporcionan la información visual, sino que muestran la información inyectada que podemos definir como real, pudiendo interactuar con ella.

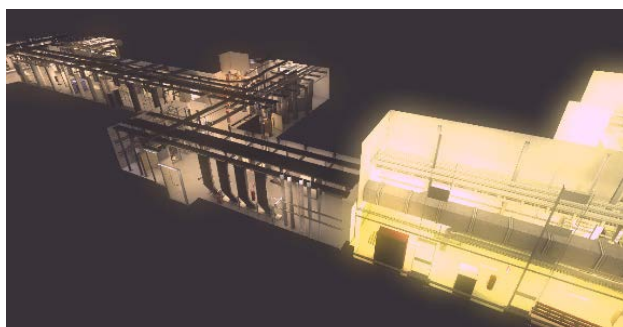


Figura 3. Modelo 3D “as built”. (Fuente: Westinghouse).

Las aplicaciones de estas tecnologías son numerosas, destacando principalmente la **formación** en el sentido más amplio de la definición: la posibilidad de visualizar el comportamiento completo de una planta ante una serie de operaciones o acciones; la posibilidad de entrenar en el manejo o uso de maquinaria mediante VR mixta; la **formación** operativa a través de la virtualización de interfaces; la **formación en seguridad** directamente con un sistema de guiado; e incluso la formación visual o el conocimiento del entorno que permite a una persona acceder virtualmente a una instalación antes de acceder físicamente.

De hecho, una RV puede formar parte de otras. Por ejemplo, podemos añadir a la RV de una sala de control otra RV de un sistema independiente, como una grúa o una máquina de recarga, o podemos incorporar información procedente de un BIM/PLM dentro de una representación 3D coordinada.

Una aplicación de RA puede ser una aplicación proyectándose en cualquier espacio de la realidad; de hecho, sería como representar un documento, modelo o información digital procedente de la realidad sobre la propia realidad (la funcionalidad más común de la RA). Pero además también podemos añadir la RA en otra aplicación. De este modo, disponemos de aplicaciones de RV en las que la información puede presentarse en modo RA: procedimientos de montaje u operación, documentación de un PIM o BIM, un modelo CAD o el despiece de un componente, etc.



Figura 4. Entrenamiento de operación con RA. (Fuente: Westinghouse).

Pero las aplicaciones no terminan ahí, especialmente aquellas basadas en modelos “as-built”, a los que hemos “super-avitaminado” con más información y la interactividad. Estos modelos son perfectos para la **planificación y preparación** de trabajos, ya que permiten reducir la entrada en áreas restringidas o controladas, con lo que ello implica para la seguridad nuclear, recopilando previamente los requisitos del entorno desde la pantalla del ordenador (¿hay espacio para un andamio?, ¿qué herramientas se necesitan?, ¿hay espacio para el componente?, etc.); la **formación** tanto en procedimientos, en operación y en el propio espacio; y, lo más importante, para **trabajos de ingeniería**, como estudios de ingeniería o sustitución de componentes.

Quizás el máximo exponente de esta dimensión sean los gemelos digitales que permiten a los especialistas explorar virtualmente las instalaciones, recrear escenarios operativos o entrenar procedimientos de emergencia. Tanto es así que, si volvemos al inicio, retomamos la RV y añadimos la información de la planta en tiempo real, podremos disponer de un sistema de entrenamiento en un entorno digital casi real y, mediante herramientas alternativas, predecir comportamientos anómalos, recomendar procedimientos e incluso tomar decisiones.

Pero esta herramienta no se detiene en su evolución. Su flexibilidad y modularidad, junto con la integración de nuevas tecnologías, permitirán mejorar la eficiencia de los procesos en las centrales. Las plantas llevan años utilizando RV y han entendido perfectamente que los gemelos digitales son esa herramienta que, desde el punto de vista de las pruebas, confirma la máxima:

“Las pruebas virtuales no conllevan costes, pérdidas ni riesgos, pero sí beneficios.”

Son muchas las plantas que están asumiendo este reto y que adoptan el gemelo digital como una herramienta cotidiana, evolucionando en paralelo al avance de esta tecnología. Ya se están dando los primeros pasos para lograr la integración total de todas las tecnologías. [4] [5]

Estas herramientas mejoran la formación de los operadores, facilitan la comunicación entre expertos y permiten anticipar posibles problemas antes de que se produzcan en el mundo real. Destacamos cómo es posible transformar la forma de trabajo:

- **Segura y fiable:** Manteniendo el control total sobre el contenido y los datos en entornos regulados.

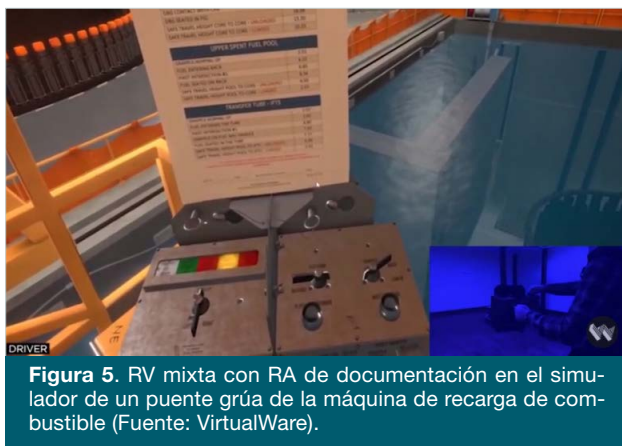


Figura 5. RV mixta con RA de documentación en el simulador de un puente grúa de la máquina de recarga de combustible (Fuente: VirtualWare).

- **Multiusuario y multilocalización:** Conectando equipos en diferentes puntos geográficos y dispositivos que pueden cooperar.
- **Eficiente:** Permitiendo un ahorro masivo de costes y eliminando riesgos operativos.

Es una tecnología transversal que redefine la eficiencia en toda la cadena de vapor de la planta, y por tanto, la seguridad nuclear, desde la concepción hasta el producto final. Con esto estamos llegando a la tercera dimensión.

RV CON SIMULACIÓN Y ANÁLISIS PREDICTIVO

Los gemelos digitales integrados con herramientas de cálculo avanzado, inteligencia artificial (IA), modelización matemática y la información de planta permiten simular fenómenos complejos: flujos térmicos, dispersión de radiación, comportamiento estructural o propagación de accidentes, entre otros. Al combinar estos modelos con datos operativos y algoritmos de análisis, es posible evaluar escenarios hipotéticos, optimizar decisiones de seguridad y reforzar la capacidad de respuesta ante situaciones críticas. Lo que algunos han llamado la “bola de cristal digital”, que anticipa el futuro para mejorarlo y evitar errores, y ya sabemos lo que esto supone desde el punto de vista de la seguridad nuclear.

Junto a estos gemelos digitales se han desarrollado ecosistemas de investigación centrados en el **comportamiento humano en entornos de riesgo**, incluyendo **salas de control nucleares, la toma de decisiones en condiciones de incertidumbre o estrés** y la **seguridad y el comportamiento de sistemas críticos**, desde la perspectiva de un enfoque multidisciplinar en: psicología aplicada, ingeniería nuclear, ciberseguridad, psicología del comportamiento y simulación inmersiva.

Para ello se utilizan gemelos digitales con simuladores de las salas de control, las cuales se monitorizan en todo momento por una serie de cámaras y micrófonos que permiten estudiar:

- el análisis de los comportamientos,
- la interacción hombre-máquina en salas de control casi digitales.
- el comportamiento de los operadores en escenarios normales y de emergencia.
- el diseño y evaluación de interfaces avanzadas y pantallas de alto rendimiento que deben minimizar el error humano.

Esto coincide con los retos identificados en la ingeniería de factores humanos, como la necesidad de interfaces mejoradas y análisis detallados de tareas, cualificación del personal y diseño de interfaces coherentes con los procedimientos operativos. Estas herramientas permitirán la investigación avanzada y aplicación, incluyendo el análisis de comportamiento, la toma de decisiones, el diseño de interfaces, y la evaluación de la seguridad operativa. [6]

Desde la perspectiva de la seguridad nuclear, el análisis del comportamiento humano en salas de control es esencial para validar el diseño, garantizar la operación segura, anticipar errores y cumplir los requisitos regulatorios de factores humanos. Estos estudios aportan evidencias científicas que permiten mejorar la seguridad, optimizar interfaces y asegurar que los operadores puedan responder eficazmente incluso en escenarios complejos.

CÓMO EL 3D ESTÁ CAMBIANDO LA SEGURIDAD NUCLEAR

La seguridad nuclear está viviendo una transformación profunda gracias a las tecnologías 3D, la realidad virtual y la simulación avanzada. Lo que antes requería entrar físicamente en áreas complejas o peligrosas, hoy puede hacerse desde un ordenador o unas gafas de realidad virtual.

En pocas palabras: los avances tecnológicos permiten trabajar mejor, más rápido y con menos riesgos.

Los modelos 3D de las instalaciones ayudan a conocer cada rincón de una planta sin necesidad de estar allí. La realidad virtual permite entrenar a los operadores como si estuvieran dentro de la central, pero sin exponerse a ningún peligro. Y los gemelos digitales —réplicas virtuales que funcionan igual que la planta real— permiten anticipar problemas antes de que ocurran. Todo esto se traduce en:

- Más seguridad para los trabajadores y el entorno.
- Menos errores gracias a entrenamientos realistas y análisis predictivos.
- Mejor toma de decisiones, porque se pueden simular escenarios complejos.
- Mayor eficiencia, reduciendo costes y tiempos de operación.

En definitiva, estas tecnologías no solo modernizan la industria nuclear: la hacen más segura, más fiable y mejor preparada para el futuro.

REFERENCIAS

- [1] «Consejo de Seguridad Nuclear,» [En línea]. Available: <https://www.csn.es/proteccion-radiologica>.
- [2] «Noticias. Foro Nuclear,» 5 Mayo 2020. [En línea]. Available: <https://www.foronuclear.org/actualidad/noticias/westinghouse-instala-el-primer-componente-impreso-en-3d-en-un-reactor-nuclear/>.

[3] J. Angás, X. Jardi, A. Pontes, I. Mach, F. Tarrasa y M. García, «Determinación de elevaciones reales de tuberías para ANAV y CNAT mediante tecnología de escaneado láser 3D,» Revista de la Sociedad Nuclear Española, nº 310, pp. 58-61.

[4] «Revista Nuclear España,» Sociedad Nuclear Española, 1 Febrero 2023. [En línea]. Available: [https://www.revistanuclear.es/tecnologia-e-innovacion/plantas-gemelas-digitales-anav-implanta-la-tecnologia-virtual-](https://www.revistanuclear.es/tecnologia-e-innovacion/plantas-gemelas-digitales-anav-implanta-la-tecnologia-virtual-para-ganar-en-eficiencia-y-productividad/)

[para-ganar-en-eficiencia-y-productividad/](https://www.revistanuclear.es/tecnologia-e-innovacion/plantas-gemelas-digitales-anav-implanta-la-tecnologia-virtual-para-ganar-en-eficiencia-y-productividad/).

[5] «Noticias. Foro nuclear,» 16 Febrero 2018. [En línea]. Available: <https://www.foronuclear.org/actualidad/noticias/la-industria-nuclear-ya-utiliza-tecnologia-3d/>.

[6] «Lancaster University,» Computing and Communications - News, 18 Noviembre 2025. [En línea]. Available: <https://www6.lancaster.ac.uk/scc/about-us/news/lancaster-university-to-create-2-million-nuclear-facility-control-room-simulator.> ■