

MODELIZACIÓN DEL SISTEMA DE VENTILACIÓN DE UNA CONTENCIÓN DE TIPO PWR-W EN GOTHIC 8.3(QA): CONCLUSIONES DE INTERCON3D



ALBERTO GARCÍA HERRANZ
Investigador Predoctoral
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID (UPM)



CARLOS VÁZQUEZ RODRÍGUEZ
Investigador Posdoctoral
FORSCHUNGSZENTRUM JÜLICH (FZJ)



GONZALO JIMÉNEZ
Profesor titular
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID (UPM)



IGNACIO MOLINA DE LA PEÑA
Inspector
CONSEJO DE SEGURIDAD NUCLEAR (CSN)

1. LA PROPUESTA DE INTERCON3D

El edificio de contención de las centrales nucleares es un componente crucial para la gestión de accidentes, dado que representa la última barrera frente a potenciales liberaciones radioactivas al exterior [1]. Este edificio está diseñado para soportar las condiciones asociadas a eventos postulados dentro de la base de diseño (DBAs), y, para tecnologías más avanzadas, incluso condiciones más allá de la base de diseño (BDBA) o accidentes severos con deterioro total o parcial del núcleo [2]. Para gestionar estos escenarios accidentales, la contención incluye sistemas de seguridad y mitigación, cuyo objetivo es minimizar las consecuencias de accidentes que pongan en riesgo su integridad. Los sistemas de seguridad asociados a la tecnología PWR, como los rociadores, refrigeradores y las columnas de hielo, tienen como función principal despresurizar el edificio y enfriar los componentes durante un accidente. Por otro lado, los sistemas de mitigación, como los Recombinadores Pasivos Autocatalíticos (PARs), están diseñados para gestionar escenarios más allá de la base de diseño, concretamente el hidrógeno presente en la contención.

La presencia de sistemas de seguridad y mitigación debería ser suficiente para asegurar la integridad de la contención. Sin embargo, el uso de estos sistemas puede resultar en dificultades en la gestión de los accidentes. Un ejemplo de esto es el incremento de la concentración de hidrógeno por

actuación de los rociadores, destacado por Dimmelmeier et al. en [3] y Vázquez-Rodríguez en [4]. Existen otros ejemplos en la literatura que se centran también en el desempeño de los rociadores, sin embargo, pocos autores a nivel internacional analizan el impacto sobre la gestión de un accidente severo del sistema de ventilación de seguridad. La función de este sistema es la misma que la de los rociadores, por lo que su operación puede verse también sujeta a inconvenientes relacionados con la presencia de gases inflamables. Los estudios que existen sobre esta línea, como el realizado por Kapulla et al. en [5] o por Soloviev et al. en [6], no abordan en profundidad su desempeño junto con otros sistemas para una contención completa. Los motivos expuestos impulsaron el nacimiento del proyecto nacional INTERCON3D, financiado por el Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) para analizar en profundidad la interacción de diferentes sistemas de seguridad de contención seca tipo PWR Westinghouse (PWR-W) en condiciones de accidente severo. Este proyecto busca identificar estrategias alternativas en la operación de los sistemas que permitan reducir el riesgo de combustión de hidrógeno. INTERCON3D se contextualiza dentro de los trabajos del grupo de investigación en seguridad nuclear de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM) con el código termo-hidráulico GOTHIC.

A lo largo del siguiente artículo, se evalúa el desempeño de los sistemas de seguridad y mitigación del edificio de contención. En primer lugar, la sección 2 describe las

especificaciones principales de estos sistemas. Tras ello, en la sección 3 se detalla el proceso de creación de modelos con el código GOTHIC 8.3(QA). Finalmente, las secciones 4 y 5 exponen los resultados de las simulaciones y las conclusiones principales del trabajo.

2. CARACTERÍSTICAS DE LOS SISTEMAS DE SEGURIDAD Y MITIGACIÓN DE LA CONTENCIÓN

Como se ha comentado anteriormente, los sistemas de seguridad de la contención permiten tanto prevenir como mitigar las consecuencias de un accidente durante el desarrollo mismo. En diseños de tipo PWR-W, el sistema de rociadores representa la forma más eficaz para refrigerar el interior de la contención. Los rociadores de este sistema se distribuyen en forma de anillos en la zona más elevada del edificio de contención. Este sistema opera en dos modos, el modo inyección, donde los rociadores se alimentan a través del tanque de agua de recarga, y el modo recirculación, donde estos se alimentan directamente de los sumideros de la contención. El cambio de modo se lleva a cabo tras generarse la señal de bajo nivel en el tanque de recarga. El sistema de rociadores actúa automáticamente tras generarse la señal de alta presión en contención. Su diseño debe asegurar que las gotas inyectadas alcanzan el 90% del volumen libre del edificio [1]. Para contenciones con sistema de ventilación de seguridad, como es el caso de la que se expone en el presente artículo, se consideran dos trenes redundantes de 100 boquillas cada uno. Estas boquillas son capaces de suministrar hasta 0,001 m³/s de gotas de aproximadamente 1000 µm [7].

Por otro lado, el sistema de ventilación es el encargado de evacuar la carga térmica en operación, compartir la carga térmica con los rociadores en emergencia, y proporcionar unas condiciones adecuadas en parada. En este caso, el sistema de ventilación hace uso de ventiladores y cambiadores de calor para evacuar eficientemente el calor. Este

sistema consta de diferentes subsistemas encargados de filtrar el aire y evacuar calor de zonas y componentes específicos, como la cavidad o el mecanismo de accionamiento de las barras de control. Sin embargo, los refrigeradores son los componentes principales de este sistema. Para diseños como el que se expone en el presente artículo, existen dos trenes redundantes de dos unidades cada uno. Cada una de estas cuenta con cuatro cambiadores de calor, alimentados desde el exterior de la contención, y un ventilador de alta-capacidad que aporta un caudal en el rango de 20-50 m³/s. Estas unidades se distribuyen sobre el suelo de operación, tomando el aire caliente de su alrededor en operación y distribuyéndolo a estancias inferiores mediante una estructura de conductos y patinillos. Durante una emergencia su funcionamiento cambia mediante unas compuertas ubicadas en la parte superior de estas unidades, pasando a refrigerar la zona superior del edificio de contención.

Por otra parte, los sistemas de mitigación como los recombinadores autocatalíticos pasivos (PARs), lidian con las consecuencias tras el daño al núcleo. Estos dispositivos reducen la concentración de gases inflamables de forma pasiva, mediante el uso de elementos catalíticos. En estos elementos se favorece la recombinación de elementos inflamables como H₂ o CO. A pesar de su funcionamiento simple y eficaz, es necesario estimar adecuadamente su ubicación y número de unidades para asegurar su correcto desempeño en un edificio como el de contención. Concretamente, en el modelo que se expone en el presente artículo, se han introducido 40 unidades, ubicadas según las directrices genéricas sugeridas por la IAEA [8].

3. METODOLOGÍA PARA LA GENERACIÓN DE MODELOS 3D CON GOTHIC 8.3(QA)

Como se muestra en la **Figura 1**, la metodología desarrollada por el grupo de investigación de la UPM para la creación de modelos de contención consta de 3 etapas. La primera

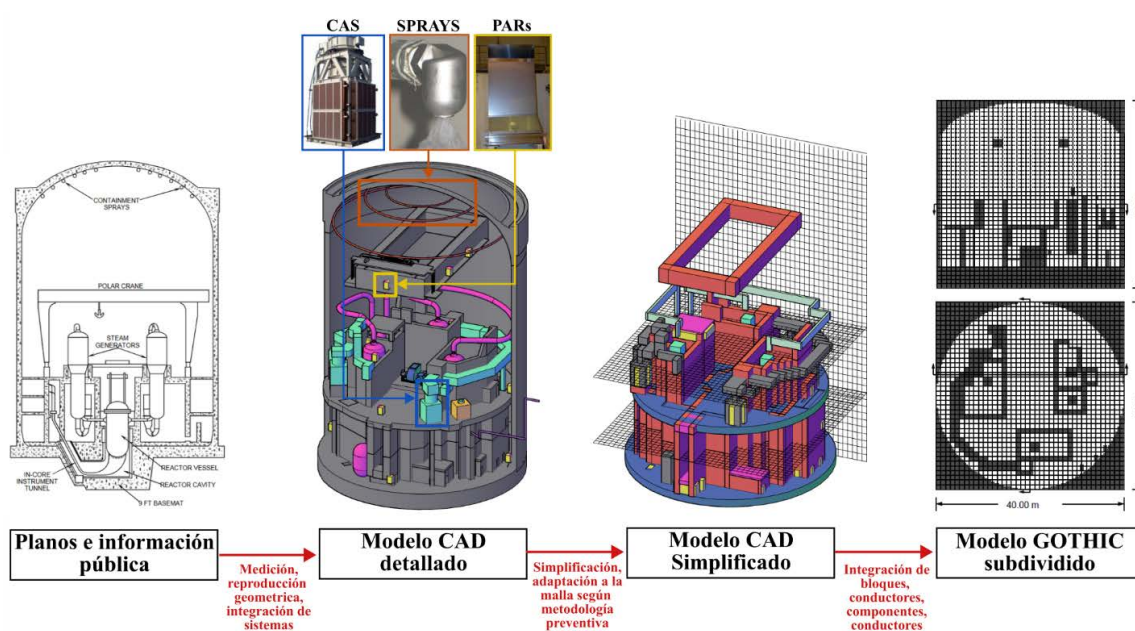


Figura 1. Metodología para la generación de modelos complejos en GOTHIC.

es un estudio de los planos e información disponible en el grupo de investigación o en fuentes públicas. Esta etapa permite, mediante el empleo del software AutoCAD, construir un modelo tridimensional que incluye tanto la geometría como la localización de los equipos asociados a los sistemas de seguridad principales. Concretamente, un modelo semejante al modelo CAD detallado que se muestra en la **figura 1**, perteneciente al edificio de contención seca de diseño Westinghouse, fue presentado por primera vez por R. Bocanegra en [9].

La segunda etapa consiste en una simplificación de la geometría del modelo CAD anteriormente mencionado. Esta simplificación conlleva la adaptación geométrica a una malla cartesiana, que asegura la independencia hidráulica de espacios, sacrificando la precisión geométrica para bloquear el paso entre celdas pertenecientes a espacios independientes. Esta optimización, cuyo objetivo es mejorar la estabilidad y reducir el tiempo de computación, ha sido denominada “metodología preventiva” [10] y proviene del conocimiento adquirido durante los proyectos GO-MERES [11] y AMHYCO [12] sobre el tratamiento de la geometría por parte del código GOTHIC.

Por último, la tercera etapa de la metodología involucra el uso de scripts para introducir los bloques simplificados y ubicar los conductores térmicos. Estos scripts aprovechan la capacidad de GOTHIC para operar mediante comandos para automatizar tareas repetitivas. De esa forma se optimiza la introducción de la compleja geometría asociada a una contención completa. Por último, los elementos asociados a sistemas de seguridad que no se encuentran implementados han sido introducidos mediante scripts o manualmente utilizando componentes propios del código.

4. EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE LOS SISTEMAS

El código GOTHIC 8.3(QA) es un código termo-hidráulico específico para aplicaciones relacionadas con el edificio de contención, por lo que se hace necesario introducir los datos de la liberación de masa y energía calculados con otros

códigos. En este caso, los datos pertenecen a un accidente simulado con el modelo de circuito primario de un PWR-W 3-lazos desarrollado por la UPM [13]. Este modelo, ejecutado con el código MELCOR, se ha utilizado para simular un escenario de rotura en doble guillotina en la rama fría del circuito primario. En el transcurso de este accidente se postula un retraso de 15 min en la actuación de la inyección de baja presión. Esto maximiza la generación de hidrógeno (~ 300 kg) en el núcleo debido a la oxidación en las vainas de Zr en presencia de vapor. Por otro lado, las condiciones iniciales proceden de un transitorio de estabilización, en el que los diferentes equipos asociados al CAS operan de forma continua hasta alcanzar un estado estacionario. Las condiciones iniciales del transitorio de estabilización fueron fijadas en: T_{cont} (39 °C), P_{cont} (101.3 kPa), humedad relativa (77.5 %), T_{amb} (24 °C), nº de unidades de ventilación disponibles (3/4).

Los casos que se exponen a lo largo del apartado tienen en cuenta diferentes configuraciones de sistemas de seguridad. Estos consideran la actuación individual de los sistemas de rociadores y ventilación de seguridad, con la intervención de uno y dos de sus trenes redundantes. De igual forma, se analiza el desempeño de ambos sistemas combinados, considerando diferente número de refrigeradores en operación. Adicionalmente, se introduce un caso que considera el fallo de las compuertas de descarga de los enfriadores.

En primer lugar, un análisis convencional de presión y temperatura, cuyos resultados se muestran en la **Figura 2**, arroja diferencias relevantes entre los diferentes casos de estudio. Cabe destacar que este análisis se ha realizado mediante el uso de variables globales, presiones y temperaturas medias ponderadas por volumen. Como se esperaba, la introducción de los sistemas de seguridad genera una disminución de la temperatura en el interior de la contención. Esta disminución produce un efecto de condensación que despresuriza la contención rápidamente. Más concretamente, puede observarse que el efecto de la actuación individual de los sistemas genera un comportamiento similar en

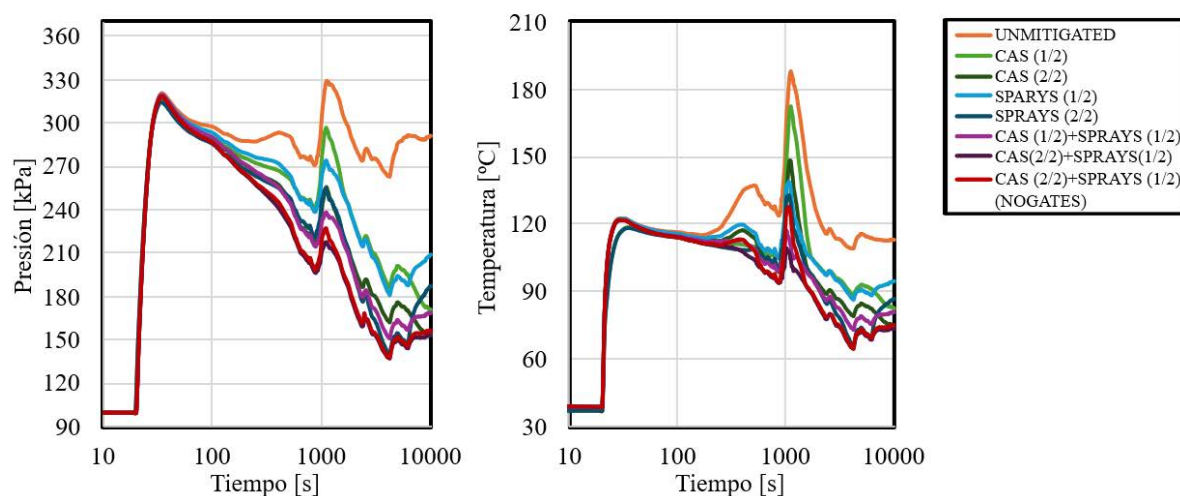


Figura 2. Evolución de presión y temperatura para diferentes configuraciones.

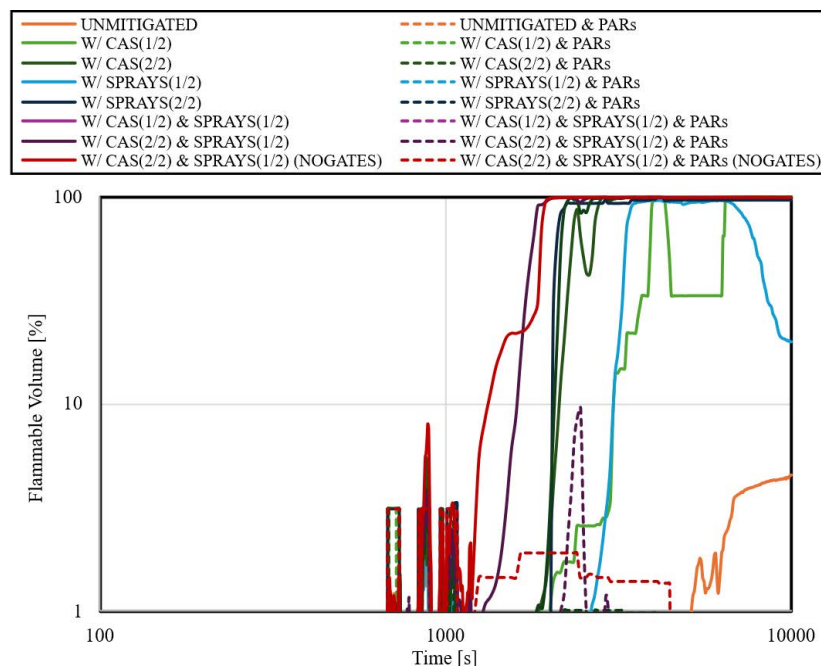


Figura 3. Evolución porcentual del volumen en condiciones de inflamabilidad para diferentes configuraciones.

presión y temperatura entre casos con el mismo número de trenes en operación. Sin embargo, el cambio a modo recirculación (~ 6000 s) genera una presurización causada por la introducción de gotas calientes. En esta etapa, la alimentación de los rociadores proviene directamente del sumidero de la contención, sin pasar por ninguna etapa de enfriamiento intermedia. Los casos con la operación combinada (rociadores + CAS) muestran las despresurizaciones más rápidas, sin embargo, no muestran elevadas diferencias al final del transitorio. A la vista de esos resultados se pueden destacar tres puntos: i) la semejanza en los resultados de los casos de sistemas individuales verifica como estos se diseñan para compartir la carga térmica en emergencia, ii) Existen diferencias en el ritmo de despresurización entre casos de operación individual de sistema y combinada, iii) Es poco relevante la actuación de las compuertas de los refrigeradores.

Por otro lado, un análisis más profundo del impacto de estos sistemas se ha llevado a cabo mediante cálculo del porcentaje de volumen libre de la contención en condiciones de inflamabilidad. Esta figura de mérito es altamente relevante porque busca estudiar la generación y propagación de nubes inflamables por parte de los sistemas de seguridad. Para la obtención de esta variable se utilizan los límites de inflamabilidad superior e inferior. Estos límites marcan la concentración mínima y máxima de H_2 necesario para que se produzca una combustión en presencia de un foco caliente. La cuantificación de estos límites proviene de una linealización del diagrama ternario de Shapiro-Moffete, propuesta por J. M. Martín-Valdepeñas en [14], y cuyo objetivo es considerar su variación con la temperatura de la mezcla de gases. El cálculo se puede llevar a cabo para cada una de las celdas del modelo, permitiendo calcular el volumen inflamable total como la suma del volu-

men de todas las celdas en condiciones de inflamabilidad.

Los resultados de este cálculo para las configuraciones anteriormente mencionadas se incluyen en la **figura 3**. Esta figura muestra como los sistemas de seguridad toman un papel relevante en la propagación del volumen inflamable debido a la elevada condensación del vapor liberado, esto conduce a un aumento en la concentración de hidrógeno. Por otro lado, existen diferencias relevantes entre configuraciones, siendo la más desfavorable el caso con las compuertas de los refrigeradores cerradas, debido al impacto combinado de los sistemas en las zonas altas y bajas de la contención. Por otro lado, esta figura muestra como la reducción del uso de estos equipos retrasa la propagación de las nubes inflamables. Los únicos casos en los que puede reducirse esta propagación son en los que incluyen PARs. Sin embargo, en estos casos se pueden observar valores que rozan el 10 %, relacionados con la aparición de nubes inflamables locales.

Los resultados de la **Figura 3** son ilustrados en la **Figura 4**, tomando las capacidades de GOTHIC y PARAVIEW. Esta figura solo incluye los casos con actuación de ambos sistemas de seguridad. En esta figura, se puede observar la aparición de nubes inflamables en el interior de los refrigeradores y su propagación hacia el domo. La reducción en el número de refrigeradores provoca propagaciones más tardías, mientras que la introducción de PARs reduce poco a poco el riesgo, aunque no es capaz de captar las nubes locales asociadas al sistema de ventilación. Por último, destaca el caso con las compuertas cerradas, que muestra como los conductos alcanzan condiciones de inflamabilidad antes que el resto de la contención, propagando el gas seco por las estancias inferiores de la contención rápidamente.

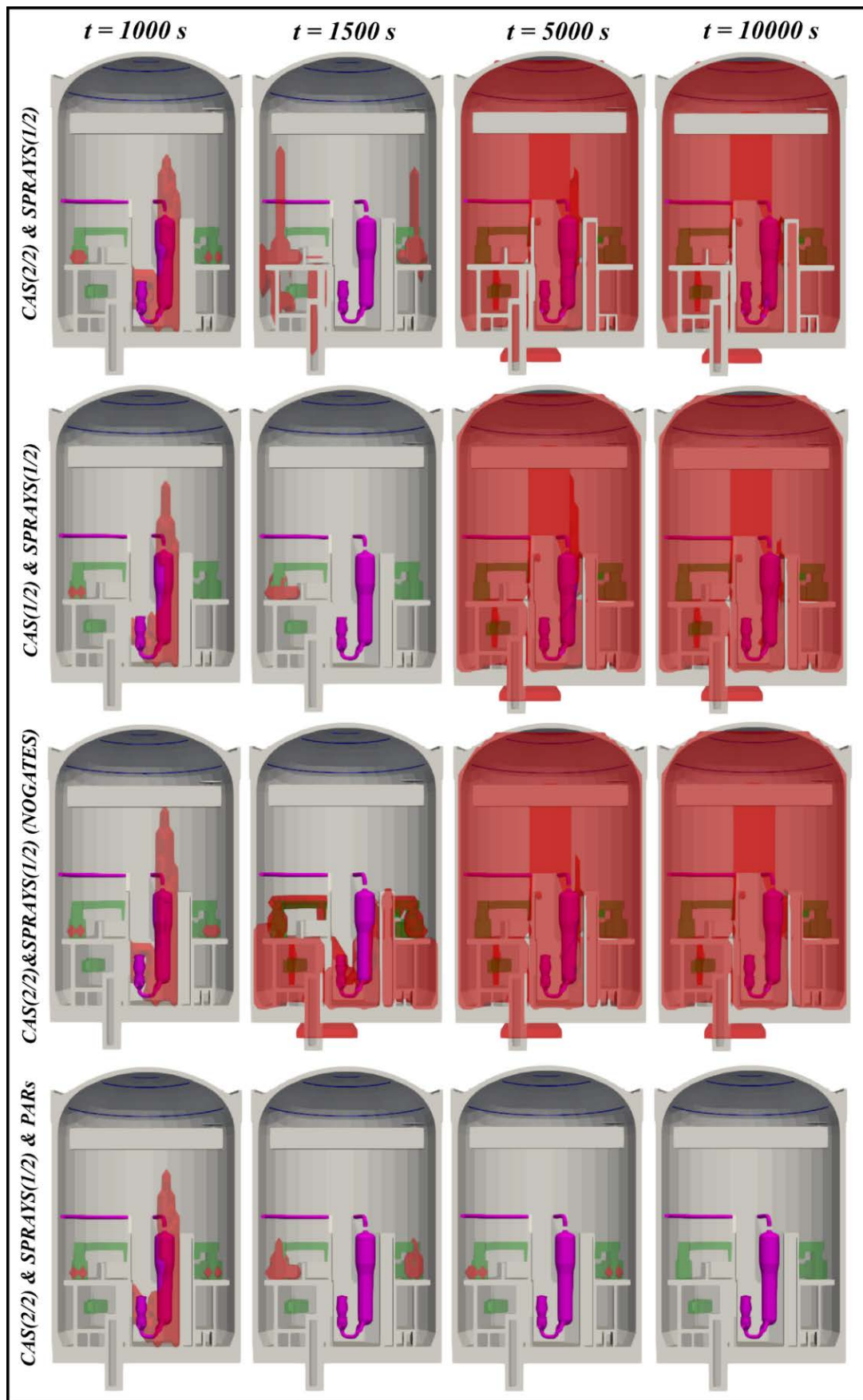


Figura 4. Generación y propagación de nubes inflamables para casos con ventilación y rociadores.

5. CONCLUSIONES

Las simulaciones realizadas en el contexto de INTER-CON3D con el software GOTHIC han permitido identificar desafíos en el uso de sistemas de seguridad en presencia de gases inflamables. A pesar de que los sistemas de seguridad produzcan un efecto favorable durante la evolución del accidente, como la rápida despresurización y la refrigeración de la contención, estos favorecen una mayor condensación del vapor liberado en la rotura. Esto provoca la generación de nubes inflamables, que se propagan a través de la contención ocupando el volumen libre total de la contención en los casos sin PARs. Por ello, la instalación de PARs sirve como medida eficaz frente a la propagación de las nubes inflamables, aunque siguen produciéndose nubes locales con riesgo de combustión por actuación de los sistemas de refrigeración.

La evaluación de diferentes configuraciones ha permitido analizar las consecuencias asociadas a estrategias de operación alternativas o posibles fallos en estos sistemas. Los casos que consideran la actuación individual de la ventilación o los rociadores muestran comportamientos similares, impulsados por el rango de influencia de cada uno de los sistemas. Por otra parte, los casos con ambos sistemas en operación muestran una capacidad de refrigeración superior pero también una propagación más rápida de las nubes inflamables. Cabe destacar que el modo de operación de las compuertas tiene un impacto notable en la propagación de estas nubes a través de los conductos de ventilación.

Estos resultados llevan a dos directrices de operación en presencia de gases inflamables: i) priorizar el uso de los rociadores frente a la ventilación, ya que tiene una influencia global y ayudan a inertizar la contención y, ii) reducir el uso excesivo de unidades de refrigeración, adecuando su operación a las necesidades de refrigeración y contenido de hidrógeno.

REFERENCIAS

- [1] Westinghouse Electric Company LLC, «WESTINGHOUSE TECHNOLOGY SYSTEMS MANUAL». 2016.
- [2] M. Sonnenkalb, «Beyond design basis accidents and accident management», France, 2010.
- [3] H. Dimmelmeier, J. Eyink, y R. P. Martin, «The Impact of Early Spray Activation During a Postulated Severe Accident in the AREVA EPR™ Containment», ICAPP' 10. USA, 2010.
- [4] C. Vázquez-Rodríguez, «Advanced Implementation of the Spray Safety System into a 3D-GOTHIC PWR-W Containment Model and Its Impact on the Hydrogen Combustion Risk», PhD Thesis (UPM), Spain, 2023. doi: 10.20868/UPM.thesis.80762.
- [5] R. Kapulla, G. Mignot, y D. Paladino, «Large-Scale Containment Cooler Performance Experiments under Accident Conditions», Science and Technology of Nuclear Installations, vol. 2012, pp. 1-20, 2012, doi: 10.1155/2012/943197.
- [6] S. L. Soloviev et al., «Computational simulation of the heat and mass transfer processes occurring in the containment of Novovoronezh NPP II's units 1 and 2», NUCET, vol. 10, n.o 1, pp. 19-25, 2024, doi: 10.3897/nucet.10.122292.
- [7] J. Malet et al., «Gas entrainment by one single French PWR spray, SARNET-2 spray benchmark», Nuclear Engineering and Design, vol. 282, pp. 44-53, 2015, doi: 10.1016/j.nucengdes.2014.12.008.
- [8] IAEA, «Mitigation of Hydrogen Hazards in Severe Accidents in Nuclear Power Plants», IAEA-TECDOC-1661, 2011.
- [9] R. Bocanegra, G. Jimenez, y M. K. Fernández-Cosials, «Development of a PWR-W GOTHIC 3D model for containment accident analysis», Annals of Nuclear Energy, vol. 87, pp. 547-560, 2016, doi: 10.1016/j.anucene.2015.10.022.
- [10] C. Vázquez-Rodríguez et al., «The Preventive Methodology: A priori modification of the containment geometry to boost the computational efficiency of GOTHIC 3D models», Nuclear Engineering and Design, vol. 432, p. 113718, 2025, doi: 10.1016/j.nucengdes.2024.113718.
- [11] J. M. Martín-valdepeñas, G. Jimenez, y C. Vázquez-Rodríguez, «Proyecto GO-MERES de CSN/UPM sobre simulación con GOTHIC del comportamiento en contención del hidrógeno con rociadores y piscinas de supresión», Alfa 60, pp. 30-38, 2024, doi: https://www.csn.es/csn/revista-alfa/60.
- [12] G. Jiménez et al., «AMHYCO project – towards an enhanced accident management of the H2/CO combustion risk», NURETH-19, Belgium, 2022.
- [13] R. Bocanegra, M. Ruiz-Zapatero, G. Jimenez, y C. Queral, «Enhanced MELCOR models for standard PWR-Westinghouse design», NUTHOS-11. Korea; 2016.
- [14] J. M. Martín-Valdepeñas et al., «Improvements in a CFD code for analysis of hydrogen behaviour within containments», Nuclear Engineering and Design, vol. 237, n.o 6, Art. n.o 6, 2007, doi: 10.1016/j.nucengdes.2006.09.002. ■