

EVALUACIÓN DE LA IMPLEMENTACIÓN DE RECOMBINADORES AUTOCATALÍTICOS PASIVOS (PAR) EN UNA CONTENCIÓN TIPO KONVOI CON EL CÓDIGO GOTHIC 8.1

En este artículo se describe la evaluación de la implementación de Recombinadores Autocatalíticos Pasivos (PAR) para una contención PWR tipo Konvoi como fruto de una colaboración internacional entre el Paul Scherrer Institute (PSI) y la Universidad Politécnica de Madrid. En este trabajo se analiza el tamaño, localización y número de PAR capaces de minimizar el riesgo de combustión que surge de la descarga de hidrógeno en el edificio de contención durante un accidente severo. Para las simulaciones se ha utilizado un modelo 3D detallado de la contención desarrollado con el código GOTHIC 8.1. En primer lugar, se analizaron e identificaron los caminos preferentes de hidrógeno y los puntos de acumulación sobre un caso base sin ninguna medida de mitigación. Posteriormente, se incorporó al modelo una configuración preliminar de PAR y se simuló la secuencia bajo las mismas condiciones del caso base. Los resultados demuestran que la implementación de PAR elegida ofrece una mejora en la secuencia accidental analizada, conduciendo a una disminución de la concentración de hidrógeno por debajo del límite de flamabilidad (concentración de hidrógeno por debajo de 7%) en todos los compartimentos de la contención.

INTRODUCCIÓN

La producción, distribución y combustión de hidrógeno en una contención durante un accidente severo representa una de las mayores amenazas a la integridad de dicha contención. La implementación de Recombinadores Autocatalíticos Pasivos (PAR) para reducir la concentración de hidrógeno durante accidentes severos es objeto de estudio en muchas centrales nucleares. Dicha reducción se produce mediante la conversión del hidrógeno en vapor de forma controlada. El estudio presentado en este artículo analiza el tamaño, ubicación y número de PAR necesarios para minimizar el riesgo derivado de una descarga de hidrógeno y su distribución en el edificio de contención de un reactor PWR tipo Konvoi durante un accidente severo.

Con el fin de seleccionar el conjunto de herramientas adecuadas para este tipo de análisis, hay algunas publicaciones que establecen las pautas a tener en cuenta para la distribución de hidrógeno y la implementación de PAR. El informe IAEA TECDOC-1661 (IAEA, 2011) proporciona

una guía en la gestión de accidentes severos en relación con la aplicación de diversas estrategias para la mitigación de riesgo de hidrógeno. Estas medidas incluyen el uso de recombinares catalíticos para la reducción de la concentración de hidrógeno. Esta guía además sugiere una posible configuración de PAR incluyendo número y ubicación. En ella también se recomienda el uso de códigos CFD y/o códigos de contención 3D como GOTHIC o GASFLOW.

Otra referencia importante en este contexto la encontramos en el proyecto PARSOAR, relativo a la evaluación del riesgo de hidrógeno en la contención de una central nuclear, centrándose en el desarrollo de medidas de defensa en profundidad (Bachelier et al., 2003). Uno de los objetivos de este proyecto fue la elaboración de una guía de implementación de recombinares de hidrógeno. Esta guía indica que, una vez fijados el número y la ubicación de los PAR, se debe realizar un análisis de eficacia de la instalación de dichos recombinares mediante la comparación de las secuencias con y



EMMA LÓPEZ-ALONSO CONTY

Estudiante de doctorado
ETSII-UPM



DAVIDE PAPINI

Científico en el Departamento de
Termohidráulica, Energía Nuclear y
Seguridad
PAUL SCHERRER INSTITUTE (PSI)



GONZALO JIMÉNEZ VARAS

Profesor Ayudante Doctor en el
Departamento de Ingeniería Energética
ETSII-UPM

EVALUATION OF PASSIVE AUTOCATALYTIC RECOMBINERS (PARS) PERFORMANCE FOR A PWR-KONVOI CONTAINMENT TYPE WITH GOTHIC 8.1 CODE

The study presented in this work analyses the evaluation of Passive Autocatalytic Recombiners (PARs) performance for a PWR-Konvoi containment type as a result of an international collaboration between the Paul Scherrer Institute (PSI) and the Universidad Politécnica de Madrid (UPM). The implementation study analyzes the size, location and number of the PARs to minimize the risk arising from a hydrogen release and its distribution in the containment building during a hypothetical severe accident. A detailed 3D model of containment was used for the simulations developed for the GOTHIC 8.1 code. In the first place, the hydrogen preferential pathways and points of hydrogen accumulation were studied and identified starting from the base case scenario without any mitigation measure. The severe accident scenario chosen is a fast release of hydrogen-steam mixture from hot leg creep rupture during SBO (Station Black-Out) accident. Secondly, a configuration of PARs was simulated under the same conditions of the unmitigated case. The PAR configuration offered an improvement in the chosen accidental scenario, decreasing the hydrogen concentration values below the flammability limit (hydrogen concentration below 7%) in all the containment compartments.

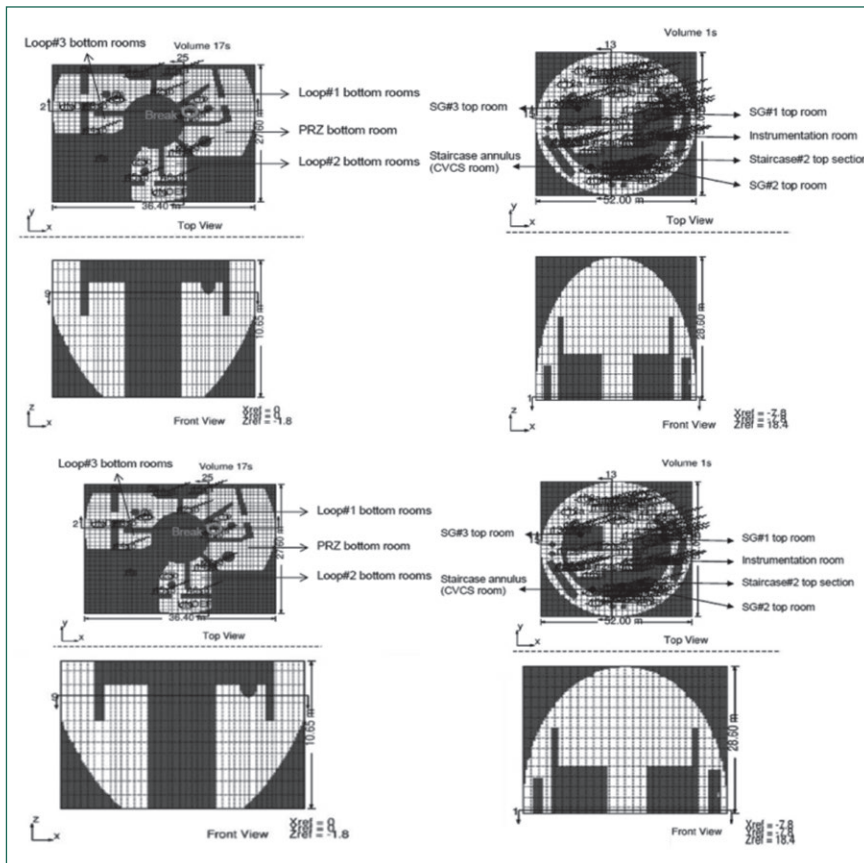


Figura 1. Detalle de la nodalización 3D del volumen inferior de la contención (zona de la rotura) y el volumen superior de la contención (domo). (Papini et al. 2015a) (Papini et al., 2015b).

sin PAR, mostrando la reducción en la mezcla de gases de combustión. Para llevar a cabo este tipo de análisis se requieren códigos con capacidades 3D. Los cuales, han demostrado ser esenciales para simular la geometría compleja de un edificio de contención, normalmente muy asimétrico.

Este tipo de análisis con modelos 3D se han realizado para varios tipos de contención: Candu (Chan, 2003); C.N. Cofrentes (Serrano et al., 2016), C.N. Almaraz (García et al., 2015) y EPR, (HSE, 2011a) y (HSE, 2013).

En el resto del artículo se describe el proceso de análisis seguido para obtener la localización, tamaño y número de PAR con objeto de ser instalados en una contención tipo Konvoi para minimizar el riesgo de combustión de hidrógeno. Para ello se ha desarrollado un modelo detallado 3D de la contención mediante el código GOTHIC 8.1. Este código permite modelar múltiples aspectos de la compleja geometría de la

contención con más detalle que el que normalmente se considera en los análisis de contención, (EPRI, 2014). El escenario de accidente severo elegido es una liberación rápida de una mezcla de hidrógeno y vapor a través de una ruptura por fluencia durante una secuencia tipo *Station Black-Out* (SBO). En primer lugar, los caminos preferentes de hidrógeno y los puntos de acumulación se identificaron a partir del caso base sin mitigación. Posteriormente, se evaluó la eficacia de la configuración de PAR mediante la comparación de la secuencia sin y con recombinadores con el fin de cuantificar la reducción del riesgo de combustión.

EVALUACIÓN DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE PAR Modelo utilizado y escenario elegido

Las distribuciones de hidrógeno y otros gases han sido estudiados con el có-

digo de contención GOTHIC 8.1. Se ha utilizado un modelo 3D detallado de una contención tipo PWR-Konvoi para las simulaciones. La modelización 3D ha sido necesaria, ya que el modelo ha tenido que ser capaz de simular las descargas de masa y energía dentro de la contención y tener en cuenta la transferencia de calor, condensación de vapor y los efectos de turbulencia en cada una de las distintas regiones de la misma, (EPRI, 2014).

El modelo está formado por un conjunto de 40 volúmenes de control en un tipo de modelización llamada *multizona*. Los quince grandes volúmenes de contención se subdividen en una geometría completa en 3D, mientras que los volúmenes restantes son volúmenes tipo *lumped*. Este tipo de modelo permite tener una malla más detallada en las regiones de interés, como es la zona donde se produce la rotura del RCS (*Reactor Coolant System*) durante el accidente. La Figura 1 muestra el diagrama y nodalización de los principales volúmenes de control con geometría 3D los cuales representan el compartimento inferior, donde tiene lugar la rotura (Vol.17s en la Figura 1), y la sección superior del domo (Vol.1s en la Figura 1). El modelo completo se compone de 37.000 celdas, y 171 estructuras de calor para modelar la capacidad calorífica de las estructuras y la transferencia de calor entre el fluido y dichas estructuras, descrito en (Papini et al., 2015a) (Papini et al., 2015b).

Tal y como se ha mencionado anteriormente el escenario de accidente severo considerado ha sido un SBO con rotura por fluencia de la rama caliente que produce una liberación súbita de una mezcla de vapor e hidrógeno. El escenario fue elegido para estudiar el comportamiento de contención después de una liberación rápida de pocos segundos de una cantidad considerable de hidrógeno.

La fuente de masa y energía se obtuvo con el código Melcor. Como medida conservadora, la masa de hidrógeno introducida en las simulaciones con GOTHIC se incluyó un factor de seguridad del 100%, duplicando la cantidad mediante Melcor, un total de 312 kg de hidrógeno. El transitorio del caudal descargado a través de la rotura se muestra en



Figura 2, el cual tiene una composición de 40% de hidrógeno y 60% de vapor. La concentración de vapor de agua en la atmósfera de la contención en el instante de la rotura es del 45% debido a la apertura previa de las válvulas de alivio del presionador y la posterior apertura del tanque de alivio del mismo. En el análisis sólo se han considerado los primeros 1000 s del transitorio después de la rotura, centrándose en la fase de liberación súbita de hidrógeno.

Validación de la función de control desarrollada para la eficiencia de los PAR

El rendimiento del PAR se define mediante la función de tasa de recombinación que depende de la presión y concentración de los gases presentes en contención. En GO-THIC, el PAR se modela con una combinación de un componente recombinador de hidrógeno y las características del *Flow Path* en el que se encuentra. Las características de la geometría y la tasa de recombinación son específicas de cada PAR.

La eficiencia del PAR se simula mediante una función externa (*Dynamically Linked Library, DLL*) que se usa en cada paso de tiempo por el componente recombinador de hidrógeno e implementado en el modelo mediante variables de control. Esta función externa ha sido realizada por los desarrolladores del código (NAI), cuya primera versión fue presentada en el grupo de usuarios de GO-THIC en Pisa, en mayo de 2013, (Visser et al., 2013). Esta función de control simula la eficiencia de un PAR Areva-Siemens tipo FR90-150 y la fórmula de tasa de recombinación correspondiente fue publicada en el congreso NURETH2013 (Visser et al., 2013).

Debido a las condiciones extremas alcanzadas durante el accidente severo analizado, tales como la alta temperatu-

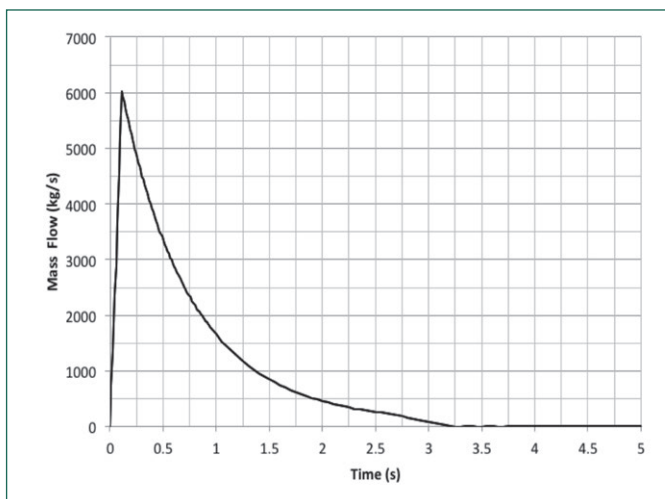


Figura 2. Mezcla de hidrógeno y vapor a través de la rotura implementado en el modelo de GO-THIC.

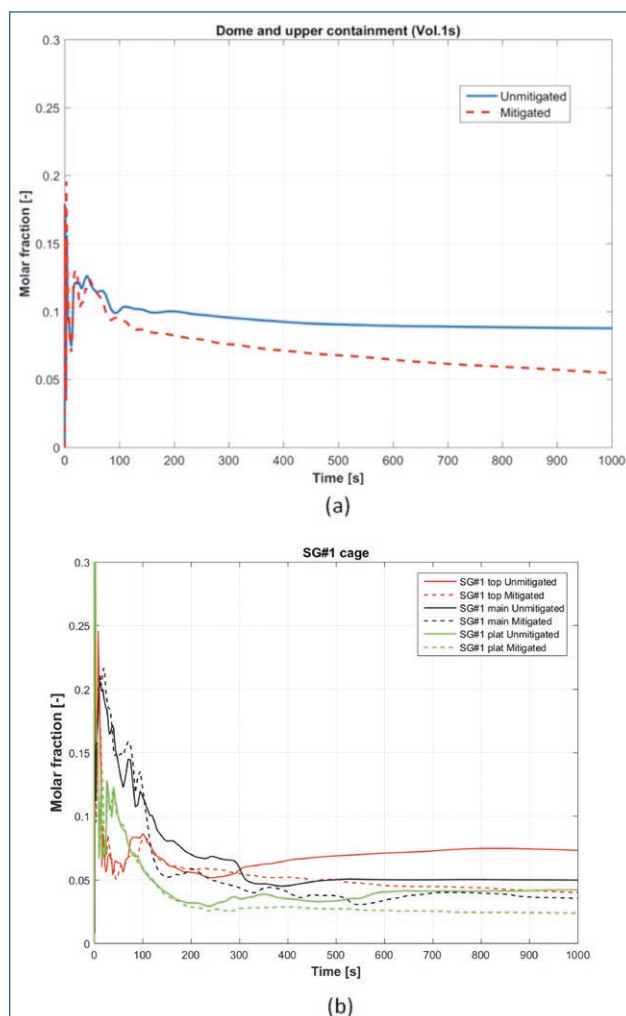


Figura 3. Concentración local de hidrógeno en los volúmenes de control más significativos: contención superior con el domo (Vol.1s) y caja del generador de vapor 1 en el cual la rotura tiene lugar (Vol.2s, Vol.3s and Vol.5s).

ra en el compartimiento de la rotura; la baja concentración de oxígeno producida por el desplazamiento de la atmósfera inducido por el jet; o la concentración elevada de vapor; las condiciones bajo las cuales el PAR tiene un funcionamiento óptimo no se cumplen durante todo el transitorio.

La función externa se modificó de acuerdo con las limitaciones de los PAR relativas a la concentración de hidrógeno máxima que el PAR es capaz de recombinar que se fijó en 8%, correspondiente a una temperatura en la placa del catalizador de 800°C, ver (Bachelierie et al., 2003) y (NEA, 2010) para más detalles. En las simulaciones, cuando se alcanza dicha temperatura, el PAR deja de funcionar.

Dimensionamiento y localización de PAR

Después de los análisis de sensibilidad realizados en relación con el tamaño de los recombinadores, y teniendo en cuenta los criterios propuestos por (Bachelierie et al., 2003), el PAR Areva-Siemens FR1-1500T fue elegido para simular el escenario accidental (AREVA, 2011). Este PAR ofrece la tasa de recombinación más alta.

A partir de los resultados del caso base sin medidas de mitigación, se estudiaron los caminos preferentes de hidrógeno y los puntos de acumulación. Los caminos preferentes en esta secuencia han resultado ser los cajones de los generadores de vapor y el presionador, los cuales ofrecen un camino directo desde la parte inferior de la contención al domo, donde el hidrógeno se acumula.

La configuración preliminar de PAR sería aquella que permitiera que el riesgo de combustión de

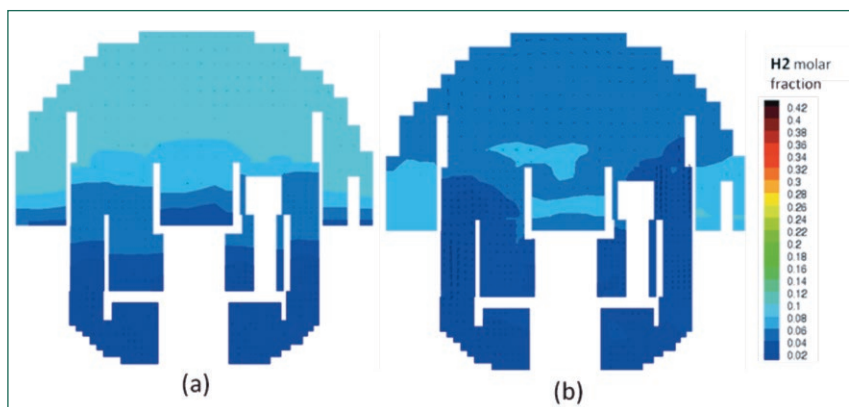


Figura 4. Concentración de H₂ en la contención a los 1000 s del transitorio : (a) escenario no mitigado y (b) escenario mitigado.

hidrógeno estuviera dentro de unos límites aceptables, y además consiguiera que la tasa de recombinación de cada PAR sea aceptable. La configuración de PAR utilizada y descrita en este documento consiste en 40 PAR repartidos por todo el recinto de contención: 21 unidades situadas en la región del domo; 15 unidades colocadas en los cajones de los generadores de vapor; y cuatro unidades situadas en la parte inferior de la contención.

La ubicación de los PAR en la región del domo se estableció utilizando criterios similares a los de los sistemas de ignitores dentro de la contención, incluyendo un criterio 30 grados de separación entre ellos para evitar interacciones (IAEA, 2011). Del mismo modo, se tomaron algunas consideraciones adicionales como la alta temperatura de los gases de salida del PAR, evitando el mal funcionamiento de los sistemas localizados en las cercanías del recombinador.

Los datos de las tasas de recombinación de hidrógeno de cada PAR fueron analizadas con el fin de evaluar el rendimiento individual de cada PAR. Este análisis permitió la identificación de regiones en las que los PAR podrían no funcionar correctamente o regiones de acumulación de hidrógeno, donde se podrían necesitar más recombinadores.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A lo largo de este trabajo se han analizado la eficiencia y la reducción del riesgo de combustión mediante la instalación de PAR. Para

realizar dicho análisis se han comparado el escenario no mitigado (caso base) con el escenario con los recombinadores implementados.

En los 1000s del transitorio simulado, los recombinadores instalados fueron capaces de reducir la concentración de hidrógeno entre un 30% y 40% en los diferentes volúmenes de control. La Figura 3 muestra la concentración de hidrógeno en los volúmenes de control más representativos: la sección superior del domo (vol.1s) y la caja del generador de vapor 1, correspondiente al generador más cercano a la descarga (vol.2s, vol.3s y vol.5s). La concentración de hidrógeno alcanzó el 8.8% en el domo (vol.1s) para el escenario sin mitigar, mientras que en el escenario mitigado la concentración alcanzó el 5.5%. Los PAR instalados en la sección de la cúpula fueron capaces de reducir casi en un 40% la concentración. La parte superior del generador de vapor 1 (vol.2s), la sección principal (vol.3s) y la plataforma del generador, zona lateral por encima de la rejilla (vol.5s) la concentración de hidrógeno se reduce 30% a 45%.

La diferencia entre las concentraciones de hidrógeno a lo largo de contención para ambos casos se muestra en la Figura 4: caso sin mitigación (Figura 4 (a)) y con PAR (Figura 4 (b)). La parte superior de la contención es una región con circulación a bajas velocidades, controlada por los flujos ascendentes y descendentes de vapor y la condensación del vapor sobre las estructuras. La atmósfera en esta región permanece estratificada en el es-

cenario sin mitigación, Figura 4 (a). Por el contrario, en el escenario con mitigación, el funcionamiento de los PAR mezcla la atmósfera en el domo de contención de modo que el gas se propaga hacia la parte inferior, aumentando ligeramente la concentración de hidrógeno en esta región, la Figura 4 (b).

La configuración preliminar de PAR propuesta es capaz de reducir la concentración de hidrógeno por debajo del 7% en todos los volúmenes de control. Sin embargo, esta configuración es una solución parcial, ya que una liberación de hidrógeno repentina y significativa tal como se observa en el escenario simulado es difícil de controlar en su fase inicial, independientemente del número de recombinadores instalados.

El análisis de la viabilidad de esta configuración de PAR incluyó el estudio de los perfiles de consumo de oxígeno. Se requiere un alto excedente de oxígeno para un funcionamiento correcto del PAR. Un factor mínimo $[2 \cdot \text{CO}_2 / \text{CH}_4]$ entre 2 y 3 es necesario (NEA, 2010), en comparación con el ratio estequiométrico de $\text{O}_2 : \text{H}_2$ de 1: 2. Por lo tanto, la concentración de oxígeno limita la tasa de recombinación a largo plazo. La concentración de oxígeno se reduce a lo largo del transitorio debido al proceso de recombinación, que alcanza un 10% para el escenario analizado. La descarga rápida que ocurre en el escenario desplaza la atmósfera en la parte inferior de la contención, reduciendo casi a cero la concentración de oxígeno y por tanto, impidiendo el correcto funcionamiento de los recombinadores al inicio del transitorio. Los PAR situados en dicha zona iniciarán su funcionamiento normal una vez que se recupere la concentración de oxígeno.

CONCLUSIONES

En el estudio presentado en este artículo se analiza la localización, tamaño y número de Recombinadores Autocatalíticos Pasivos (PAR) para ser instalados en una contención tipo PWR-Konvoi para minimizar el riesgo de combustión de hidrógeno.

Para ello se realiza un análisis de eficacia de la instalación de PAR mediante la comparación de la se-



cuencia sin mitigar (caso base) y la secuencia mitigada con los recombinadores implementados con el fin de cuantificar la reducción del riesgo de combustión. El análisis mostró una reducción de entre 30% a 45% de la concentración de hidrógeno. El riesgo de combustión de hidrógeno se reduce hasta valores de concentración de hidrógeno por debajo del límite de flamabilidad (concentración de hidrógeno por debajo de 7%) en todos los compartimentos de contención.

Sin embargo, independientemente de la cantidad de PAR implementados, una liberación repentina y significativa de hidrógeno no es posible controlar como sucede en el comienzo del transitorio escogido. Los PAR son incapaces de recombinar grandes cantidades de hidrógeno en cortos periodos de tiempo, como por ejemplo, durante los primeros 10s de transitorio. En esos casos, la implementación de los PAR son una solución parcial y es mejor tener una gestión de hidrógeno basada en términos de procedimientos operacionales.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren expresar su agradecimiento al Instituto Paul Scherrer (PSI) donde fue realizado el estudio en el marco de las ayudas GENTLE "Student Research Experience" concedidas a través de la Comisión Europea (EC).

Los autores también quieren extender su agradecimiento a la cátedra Goded del Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) y la Universidad Politécnica de Madrid por su apoyo complementario para el desarrollo de este proyecto. ■

- (AREVA, 2011) AREVA Passive Autocatalytic Recombiner. Hydrogen Control and Mitigation for Combustible Gas Control.
- <http://us.aveva.com/home/liblocal/docs/Solutions/literature/PAR%20Passive%20Autocatalytic%20Recombiner.pdf>
- (Bachelier et al., 2003) Bachelier, E., Arnould, F., Auglaire, M., de Boeck, B., Braillard, O., Eckardt, B., Ferroni, F., Moffett, R. "Generic approach for designing and implementing a passive autocatalytic recombiner PAR-system in nuclear power plant containments". Nuclear Engineering and Design 221 (2003) 151-165
- (Chan, 2003) Chan, C.K. "Hydrogen Behaviour in Containment". AECL Technologies Inc.. Presented to US Nuclear Regulatory Commission in May 6-7, 2003. NRC Accession number: ML031340411
- (EPRI, 2014) GOTHIC Thermal Hydraulic Analysis Package, Version 8.1(QA). September 2014. EPRI, Palo Alto, CA: 2014.
- (García et al., 2015) M.García, P. García, F. Martínez, R. Pérez y E. Huélamo. Modelo de un sistema de control de gases combustibles en el edificio de contención, previsto específicamente para la C.N. Almaraz con el código GOTHIC. Reunión Anual de la Sociedad Nuclear Española, A Coruña, 2015.
- (HSE, 2011a) Office for Nuclear Regulation An agency of HSE. Generic Design Assessment – New Civil Reactor Build. Step 4 Fault Studies – Containment and Severe Accident Assessment of the EDF and AREVA UK EPR™ Reactor. ONR-GDA-AR-11-020b, Rev. 0.
- (HSE, 2013) Office for Nuclear Regulation An agency of HSE. Generic Design Assessment – New Civil Reactor Build. GDA Close-out for the EDF and AREVA UK EPR™ Reactor GDA Issue GI-UKEPR-RC-01 Revision 1 – Combustible Gas Control Systems. ONR-GDA-AR-12-019, Rev. 0.
- (IAEA, 2011) IAEA TECDOC-1661 "Mitigation of Hydrogen Hazards in Severe Accidents in Nuclear Power Plants". International Atomic Energy Agency, Vienna, 2011.
- (NEA, 2010) "THAI Project. Hydrogen and Fission Product Issues. Relevant for Containment Safety Assessment under Severe Accident Conditions." Final Report. NEA/CSNI/R (2010)3
- (Papini et al., 2015a) Papini, D., Steiner, P., Andreani, M., Niceno, B., Klügel, J.-U. and Prasser, H.-M. "Simulation of the hydrogen distribution in a power plant using the GOTHIC code." Proceedings of the 7th European Review Meeting on Severe Accident Research (ERMSAR-2015) Marseille, France, March 24-26, 2015.
- (Papini et al., 2015b) Papini, D., Steiner, P., Andreani, M., Niceno, B., Klügel, J.-U. and Prasser, H.-M. "Simulation of Hydrogen Distribution in the Containment during a Severe Accident with fast Hydrogen-Steam release" Proceedings of the 16th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermalhydraulics (NURETH-16), Chicago, IL, USA, August 30 – September 4, Paper 13337, 2015.
- (Serrano et al., 2016) Serrano C., Jimenez, G., Molina, M. C., López-Alonso, E., Justo, D., Zuriaga, J. V., González, M. "Proposed methodology for Passive Autocatalytic Recombiner sizing and location for a BWR Mark-III reactor containment building." Annals of Nuclear Energy, en prensa, disponible online en sciencedirect.
- (Visser et al., 2013) Visser, D.C., Agostinelli, G., Siccama, N.B., and Komen, E.M.J., "Hydrogen risk assessment - Hydrogen distribution and mitigation," NURETH15-489, The 15th International Topical Meeting on Nuclear reactor Thermalhydraulics, Pisa, Italy, 2013.