

IMPLANTACIÓN DE LOS RECOMBINADORES AUTOCATALÍTICOS PASIVOS EN LA CENTRAL NUCLEAR DE COFRENTES

El proyecto de implantación de recombinaidores pasivos autocatalíticos (PAR) en C.N. Cofrentes tiene su origen en los requisitos establecidos por el CSN relativos a las pruebas de resistencia de las centrales nucleares españolas.

El proyecto, realizado íntegramente en Iberdrola, se inició en el año 2013 con el análisis del dimensionamiento de los PAR y fue apreciado favorablemente por el Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) en abril de 2015.

Se han instalado 47 PAR en contención y 6 PAR en el pozo seco y se han completado los procedimientos requeridos de vigilancia y mantenimiento, estando los equipos actualmente operativos.

INTRODUCCIÓN

A raíz del accidente de la central nuclear de Fukushima Dai-ichi, el 11 de marzo de 2011, se llevan a cabo en las centrales nucleares españolas pruebas de resistencia para verificar las medidas de seguridad ante escenarios accidentales extremos, incluyendo su progresión hasta daño al combustible. Derivado de este proceso, C.N. Cofrentes propone la implantación de recombinaidores pasivos autocatalíticos (PAR) en contención y pozo seco para el control de los gases combustibles liberados durante un hipotético accidente severo. El CSN, a través de una Instrucción Técnica Complementaria, fija el 31 de diciembre de 2016 como fecha límite para su implantación y establece los criterios de evaluación del diseño.

En un escenario de pérdida de la refrigeración en vasija con descubrimiento del núcleo, se emiten grandes cantidades de hidrógeno a la contención procedentes de la oxidación de las vainas de zircaloy de los elementos combustibles y también de las estructuras internas de la vasija. Si el accidente progresa hasta el fallo de la vasija, el combustible reubicado puede seguir reaccionando con el hormigón de las estructuras de la contención, generando nuevo hidrógeno y también monóxido de carbono. Ambos son gases no condensables que reaccionan en presencia de oxígeno de forma exotérmica. A medida que las concentraciones de los gases combustibles son mayores, la intensidad de la reacción también crece, acompañándose de incrementos de presión inicialmente subsónicos (combustiones con deflagración) y finalmente supersónicos (combustiones con detonación) y que suponen una amenaza a la integridad estructural de la contención. Los límites máximos de concentración de

hidrógeno en volumen permitidos para C.N. Cofrentes en contención son función de la presión, estableciéndose un valor envolvente del 7% para el rango de presiones de contención admisible en accidente severo.

El proyecto PAR de C.N. Cofrentes se inicia con el análisis de liberación y distribución de gases en contención, realizado con códigos de simulación que identifican las zonas de riesgo y permiten medir su reducción ante distintas configuraciones de PAR y continúa con la fase de ingeniería de proyecto, que comprende la compra, montaje, pruebas y puesta en servicio de los equipos.

En el análisis se tuvieron en cuenta las recomendaciones del IAEA-TEC-DOC-1661 y se emplearon márgenes de seguridad tanto sobre la actuación de los sistemas de mitigación como sobre el impacto de la fenomenología de accidente severo, buscando siempre la maximización del riesgo por combustión. Así, no se dio crédito al sistema de ignitores ya existente, formado por dos divisiones de ignitores tipo "bujía" (18+18), una de ellas con alimentación adicional desde baterías, que se encuentran distribuidos por la contención (12 en zona de pozo húmedo, 14 en el volumen intermedio y 10 en la zona superior) y que cumplen con los criterios del 10 CFR 50.44 y la R.G 1.7.

Con este proyecto se dota a la planta de un sistema pasivo que minimiza el riesgo de combustión en contención y pozo seco de forma eficaz para toda secuencia de accidente severo.

ANÁLISIS DE DISTRIBUCIÓN DE GASES COMBUSTIBLES EN CONTENCIÓN

El análisis de distribución de gases combustibles en contención se realizó



CÉSAR SERRANO SANTAMARÍA

Ingeniero especialista del Departamento de Generación Nuclear
IBERDROLA INGENIERÍA Y CONSTRUCCIÓN S.A.U.

Ingeniero industrial por la ETSII de Madrid en la especialidad de Técnicas Energéticas.



MONTSERRAT GONZÁLEZ SISTERNAS

Ingeniero de Sistemas. Servicio Técnico de C.N. Cofrentes.
IBERDROLA GENERACIÓN NUCLEAR.



VICENTE ZURIAGA RODRÍGUEZ

Responsable del Proyecto Fukushima. Departamento Técnico Nuclear.
CENTRAL NUCLEAR DE COFRENTES
Ingeniero Industrial por la ETSII de Valencia, con la especialidad de Electrónica y Automática.

IMPLEMENTATION OF PASSIVE AUTOCATALYTIC RECOMBINERS AT COFRENTES NUCLEAR POWER PLANT

Implementation of Autocatalytic Passive Recombiners (PAR) at Cofrentes NPP was performed in response to the requirements established by the CSN regarding Stress Test in Spanish Nuclear Power Plants.

This project, carried out entirely in Iberdrola, began in 2013 with the analysis for the dimensioning of the PARs and was favourably approved by the CSN in April 2015.

Finally, 47 PAR in containment and 6 PAR in drywell have been installed and the monitoring and maintenance procedures have been completed, being the equipment currently in operation.

con los códigos de EPRI MAAP4.07 y GOTHIC8.0. Para la determinación de las tasas de liberación de gases combustibles a contención en las secuencias de accidente severo se utilizó el código MAAP4.07 y para la distribución de los gases en contención se utilizó el código GOTHIC8.0 con modelización 3D. Los análisis con GOTHIC se realizaron con la participación de un equipo de la Universidad Politécnica de Madrid, bajo la dirección del Dr. Gonzalo Jiménez.

Generación de gases combustibles y liberación a contención

El análisis de generación de gases combustibles se realiza con el código MAAP 4.07, a partir de un modelo de Planta utilizado en los análisis probabilistas de seguridad APS Nivel 2, considerando los procesos físicos vinculados a un accidente severo, tanto los previos al fallo de la vasija (*in vessel*) como los posteriores (*ex vessel*). El análisis identifica los escenarios que maximizan la liberación de hidrógeno a contención y pozo seco, usando criterios de selección tanto probabilistas como deterministas e incertidumbres (Tabla 1).

La consideración realista del accidente severo y su diversidad muestran una gran variabilidad en las tasas de generación, siendo los periodos limitantes los vinculados a los procesos iniciales de degradación, relocalización del combustible y fallo de la vasija, fundamentalmente.

Durante la fase *ex vessel*, si no existe refrigeración del combustible relocalizado, continúa la generación de gases combustible: hidrógeno procedente del zircaloy y materiales estructurales no reaccionado en la fase *in vessel* y monóxido de carbono e hidrógeno procedente de la interacción del núcleo fundido con el hormigón. En esta fase no existe una variabilidad significativa en las tasas de liberación a contención, la cual es muy dependiente del tipo de

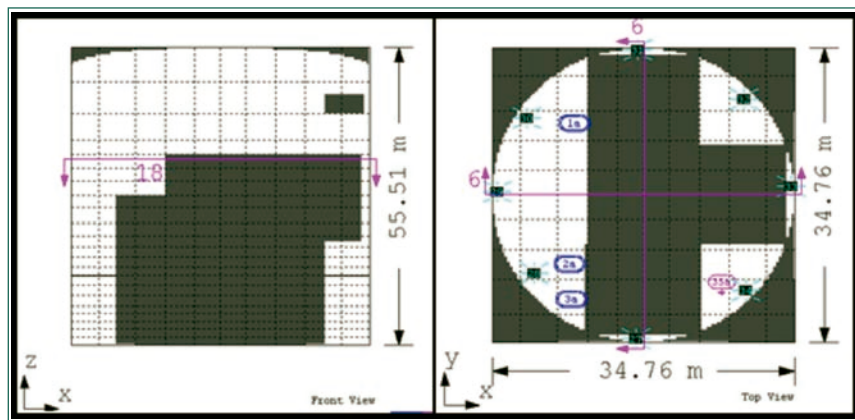


Figura 1. Mallado de la contención en GOTHIC8.0.

hormigón en contención. Así, para hormigones calizos y en condiciones limitantes se pueden alcanzar tasas medias de hasta 0,9 kg/s, muy superiores a las del hidrógeno. Estas tasas son difícilmente gestionables con PAR y sólo el rápido consumo del oxígeno durante la recombinación previa permite limitar el riesgo de combustión.

Distribución de gases en contención y riesgo de combustión

El análisis de distribución de hidrógeno se realizó con el código GOTHIC 8.0 mediante un modelo detallado 3D de contención y pozo seco, el cual permite tratar la asimetría de la descarga a contención y del flujo de los gases entre compartimentos. El modelo, tipo *Nesting Dolls*, consta de 12 volúmenes con un mallado diferenciado por cotas y entre sí, que generan más de 3.600 nodos computacionales (Figura 1).

El ajuste del modelo GOTHIC8.0 se realizó mediante pruebas de validación tanto de efectos separados (estratificación por descarga en piscinas y por difusión en atmósfera), basados en la reproducción de experimentos de la instalación Poolex, como de efectos integrados, mediante la comparación con MAAP4.07.

Cada PAR se modelizada mediante una función de control que simula la

eficiencia del recombinador según el funcionamiento especificado por el fabricante. En cada paso de tiempo el código ajusta la masa recombinada y la energía liberada en la reacción en base a la eficiencia obtenida de la función.

El análisis de los escenarios limitantes se realiza, inicialmente sin PAR, para identificar las zonas de paso preferente y de acumulación, mediante un visualizador gráfico, a partir de las cuales se planifica la distribución de PAR (Figura 2).

Posteriormente y centrándose en la fase *in vessel*, se establecen distintas configuraciones PAR a analizar, para la cual se tienen en cuenta:

- Los caminos preferenciales de tránsito del hidrógeno en contención y pozo seco calculados con GOTHIC 8.0.
- Los criterios de distribución utilizados en el estudio de instalación de los ignitores.
- Información de detalle recopilada durante los *walk-down* a planta.
- La actuación de sistemas de mitigación con impacto relevante en la distribución de gases en contención y pozo seco.
- Su impacto sobre la reducción significativa de las concentraciones de hidrógeno con riesgo para la integridad de la contención (Figura 3).

ESCENARIO (Condición limitante)	H ₂ IN VESSEL					H ₂ EX VESSEL				
	Generado			SRV	LOCA	DCH	Debris jet-water	MCCI		
	Masa (kg)	Tasa media (kg/s)	Tasa máx. (kg/s)	Tasa máx. (kg/s)	Tasa máx. (kg)	Masa (kg)	Masa (kg)	Masa (kg)	Tasa media (kg/s)	Tasa máx. (kg/s)
LOCA (Descargas <i>in vessel</i> a pozo seco)	571,8	0,1	1,755	0,2	0,654	0,0	86,5	1435	0,02	0,092
Transitorio/SBO alta presión (Descargas <i>in vessel</i> a contención)	551,5	0,12	11,25	50,38	-	59,7	415,3	0,0	0,0	0,000
Transitorio/SBO baja presión (Descargas <i>ex vessel</i>)	229,1	0,032	1,190	0,787	-	0,0	0,0	1684	0,023	0,081

Tabla 1. Escenarios de liberación de gases combustibles limitantes analizados con MAAP4.07.

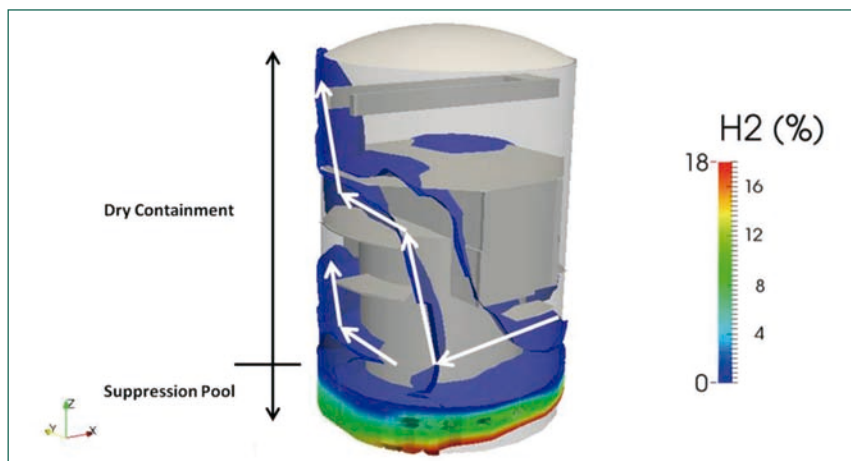


Figura 2. Análisis de paso preferente y acumulación de H₂ en contención.

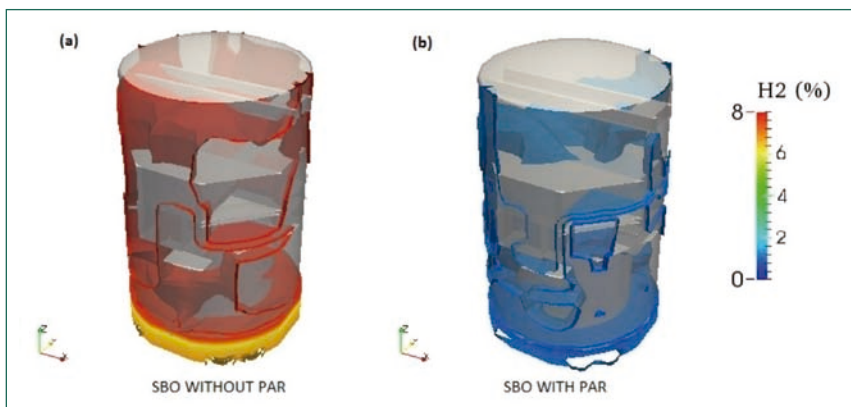


Figura 3. Distribución de H₂ en contención con/sin PAR.

Escenarios	Transitorio/SBO baja presión	Transitorio/SBO alta presión	LOCA
Duración fase <i>in vessel</i> (s)	15000	9500	13700
H ₂ total liberado (kg) (% Zr de núcleo reaccionado)	229,1 (14,3)	551,5 (46,3)	571,8 (44,2)
H ₂ recombinado (%)	99,9	81,1	94,8
Hidrógeno recombinado en (kg):			
- Contención zona baja (19 PAR)	98,8	183,5	228,7
- Contención zona media (21 PAR)	96,5	192,3	228,9
- Contención zona alta (7 PAR)	31,5	63,9	76,1
- Pozo seco (6 PAR)	2,1	7,6	8,5
H ₂ promedio en contención (%):			
- Desde el inicio de la liberación hasta el final de la fase <i>in vessel</i>	1,4	2,6	4,1
- Al final de la fase <i>in vessel</i>	0,6	1,4	0,8
Reducción de la ventana de tiempo con riesgo para la integridad de la contención	99,9	87,9	92,5

Tabla 2. Recombinación de hidrógeno con configuración de PAR optimizada (fase *in vessel*).

Para determinar el riesgo de la combustión sobre la integridad de la contención se realiza un posprocesado de los datos en cada nodo, basado en el principio de Le Châtelier, que identifica los nodos con concentración de H₂ mayor del 7% y su duración (ventanas de riesgo).

La distribución optimizada de PAR (47 contención + 6 pozo seco) es fruto del análisis de distintas configuraciones de PAR, tanto en número como

en ubicación, que minimizan las ventanas de riesgo.

La ubicación de PAR en contención se realiza a todas las alturas, considerando los puntos de acumulación y los caminos preferenciales de paso. La ubicación de PAR en pozo seco se realiza en la zona alta, próxima a los puntos de descarga por las rompedoras de vacío y el sistema de mezcla de atmósferas pozo seco/contención.

Las principales conclusiones a esta configuración final de PAR son:

- Se consigue una alta eficiencia, tanto en la cantidad total de hidrógeno recombinado como en la reducción de la ventana de riesgo para la integridad de la contención.
- Los PAR de contención funcionan con un alto rendimiento, superior al 90%, reduciéndose ligeramente con la altura. Los PAR en pozo seco sólo funcionan con altos rendimientos al inicio de la fase *ex vessel*, recombinando hidrógeno y monóxido de carbono hasta el agotamiento del oxígeno.
- El incremento de temperatura media en el nodo de descarga de los PAR oscila entre los 30°C y los 55°C.

EVALUACIÓN DE TECNOLOGÍAS, COMPRA Y SUMINISTRO DE EQUIPOS

Tras las primeras revisiones de los cálculos de distribución de gases en contención y pozo seco se edita la especificación técnica de compra con la definición de los requisitos generales para el suministro de materiales, fabricación y pruebas de los equipos a suministrar.

Tras el proceso de petición de ofertas y evaluación, en base a las tecnologías existentes en el mercado, se concluye que el modelo que mejor se adapta a los requisitos de C.N. Co-frentes en cuanto a tasa de recombinación, tamaño y versatilidad en la instalación principalmente es el PAR tipo FR1-1500T de Areva, cuya fabricación y suministro cumple con los estándares definidos en ISO 9001:2008 y 10CFR50 Apéndice B.

Este diseño consta de una caja de acero inoxidable con una entrada de gases por la parte inferior y una salida en la parte superior con cobertura horizontal para protegerse frente a la aspersión de agua o a la deposición de aerosoles. A la entrada se ubican las placas, construidas de un material metálico revestido de un elemento catalizador en el que se induce la reacción de recombinación de forma espontánea. El calor de la reacción modifica la densidad de los gases e induce un flujo natural en el dispositivo, manteniendo su funcionamiento de forma pasiva (Figura 4).

El modelo FR1-1500T tiene un peso de 130 kg y contiene 150 placas catalíticas de 140 x 290 mm dispuestas verticalmente en un cajón inferior. La recombinación se inicia con una concentración de H₂ o CO en volumen superiores al 2% y temperatura de



Figura 4. PAR FR1-1500T de Areva.

70°C y se mantiene siempre que sea mayor del 0,5%. Según las pruebas del fabricante, la tasa de recombinación de H_2 es 5,36 kg/h a 1,5 bar(a) y 4%. La tasa de recombinación volumétrica del CO es un 46% superior a la del H_2 .

La selección de PAR de tamaño grande reduce el número total de equipos a instalar y minimiza las dosis recibidas por actuaciones de mantenimiento y pruebas (criterio ALARA).

Su funcionamiento ha sido testado por Areva de forma eficiente en condiciones diversas de presión, temperatura y concentraciones de vapor y gases combustibles y también en situaciones extremas vinculadas al accidente severo.

También se incluyó en el suministro el *Transportable Inspection and*



Figura 5. Equipo de medida y regeneración de placas (TIRE).



Figura 6. PAR en hueco equipos Contención.

Regeneration Equipment (TIRE), que es el equipo necesario para inspección de las placas catalíticas y su regeneración en caso de que fuera necesario. Este equipo se usa para la comprobación de la operabilidad de las placas catalíticas durante las pruebas programadas para la comprobación de su capacidad de recombinación de gases combustibles. En caso de pérdida de eficiencia, el equipo tiene una opción de regeneración de las placas, sometiendo a alta temperatura para eliminar impurezas o humedad que hubieran podido depositarse en su superficie (Figura 5).

INSTALACIÓN Y PUESTA EN SERVICIO

La ubicación definitiva de los PAR ha requerido tener en cuenta una serie de consideraciones de seguridad, relacionadas con la operación del equipo, su potencial impacto sobre equipos cercanos necesarios en la gestión del accidente y los requisitos de mantenimiento y prueba.

Los PAR están atornillados sobre un marco fabricado con perfiles metálicos. Para el anclaje de la estructura soporte a la estructura del edificio se han usado placas embebidas existentes en las paredes del blindaje biológico (PAR en pozo seco) y estructuras metálicas existentes (las que sujetan pasarelas, estructuras, etc.).

Las estructuras de los soportes han sido calculadas sísmicamente de acuerdo a los espectros SME (*Safety Margin Earthquake*) de los edificios para las distintas elevaciones. Los propios PAR están calificados sísmica-

mente por el fabricante, de manera analítica, para un espectro envolvente que cubre los mencionados anteriormente.

La instalación de los PAR ha tenido dos fases, una primera fase de instalación de las seis unidades ubicadas en el pozo seco, durante la recarga 20, donde también se realizó la puesta en marcha del TIRE y se impartió formación al personal de la planta y una segunda fase de montaje de los 47 PAR de contención, realizada con la planta en operación durante el ciclo 21, siendo finalizada antes del 31 de diciembre de 2016.

Los lugares seleccionados para su ubicación, según el análisis de distribución de gases, han sido en su mayor parte de difícil acceso y con limitaciones de espacio e interferencias, lo que unido al tamaño y cantidad de equipos instalados ha dificultado las labores de montaje.

CONCLUSIONES

El proyecto de instalación de 47 PAR en contención y 6 PAR en pozo seco de C.N. Cofrentes, iniciado a raíz de las pruebas de resistencia y realizado íntegramente en Iberdrola, ha sido culminado a finales del 2016.

Gracias al dimensionamiento y funcionamiento pasivo de los equipos instalados, C.N. Cofrentes amplía el rango y severidad de los escenarios accidentales para los cuales dispone de un control eficiente de los gases combustibles, minimizando aún más el riesgo de daño a la contención. ■