

INNOVACIONES EN VÁLVULAS PARA LA SEGURIDAD NUCLEAR EN PWRs



ARNALDO LABORDA RAMÍ
Trabajador en activo de C.N. Ascó
CEO - ASVAD INTL SL
Con el apoyo de Ringo Válvulas SL

1. INTRODUCCIÓN

Cada uno de los accidentes nucleares acaecidos hasta la fecha nos ha ido mostrando todas aquellas debilidades de diseño, de mantenimiento o de las propias organizaciones, que se encontraban ocultas hasta el momento del accidente.

El accidente de Fukushima nos vino a alertar sobre las debilidades latentes de las plantas ante eventos más allá de su diseño, y en particular ante una situación muy específica y peligrosa: La pérdida total del suministro eléctrico por un largo periodo de tiempo. Es el accidente denominado SBO (*Station Black-out*), o también ELAP (*Extended Loss of AC Power*), y es muy peligroso, ya que además de venir acompañado por un accidente LOCA (*Loss Of Coolant Accident*), imposibilita a la organización el utilizar los medios normales de mitigación de accidentes.

Entre todos los aspectos que se revisaron tras el accidente de Fukushima [1], había uno que, aunque ya era conocido, todavía no se había evaluado lo suficiente ante un accidente SBO. Este problema era el de la introducción indeseada de gases incondensables (nitrógeno) en el RCS desde los acumuladores de seguridad. Este problema se describe en el Apartado 2.

El resultado de dicha evaluación fue la redacción de una estrategia (FSG-10) [2] que indicaba cómo y cuándo el personal debía aislar estos acumuladores del RCS mediante el cierre de sus válvulas de aislamiento. En el Apartado 3 se explica brevemente esta estrategia, y cuáles son las debilidades que ponen en cuestión su efectividad.

Finalmente, en el Apartado 4, se presenta una válvula de nuevo diseño (**ASVAD**) [3], que instalada en los acumuladores es capaz de evitar por sí sola y de una manera automática, autónoma y pasiva los efectos indeseables de la inyección del nitrógeno al RCS.

2. EL PROBLEMA DEL NITRÓGENO

En todas las plantas PWR (*Pressurized Water Reactor*), la despresurización del RCS (*Reactor Coolant System*) es el proceso natural tras el accidente. Cuando la presión baja lo suficiente, se produce la inyección pasiva de los acumuladores de seguridad, que son unos depósitos conteniendo agua altamente borada y presurizados con nitrógeno a altas presiones (~45 bar).

Esta inyección que es pasiva y automática, contribuye a reponer el inventario del sistema y a mantener la subcriticidad del reactor. Sin embargo, estos acumuladores que tanto nos han ayudado a mitigar el LOCA, pueden convertirse en un peligro mayor cuando finaliza su inyección. Tras inyectar toda su agua, va a ser este nitrógeno propulsor el que se introducirá en el RCS si no se hace nada por evitarlo.

Rápidamente, este nitrógeno ocupará toda la parte superior del reactor, desplazando al refrigerante y al vapor si lo hubiera. En esta zona se produce una burbuja que, calentada por el vapor que proviene del núcleo, vuelve a subir la presión en el RCS. Esta subida de presión va a mantenerse durante un tiempo, dado que aunque la presión disminuye continuamente por el LOCA, en cuanto baja un poco, vuelve a entrar nitrógeno y se recupera nuevamente.

El peor efecto de esta subida de presión es que por un lado, acelera la pérdida de inventario a través de la fuga y, por el otro, complica **o incluso imposibilita la inyección** desde las bombas de baja presión. Cuando el inventario se está reduciendo constantemente, y no puede rellenarse con las bombas disponibles, el descubrimiento del núcleo resulta inevitable, y tras ello el sobrecalentamiento y daño del combustible.

Este efecto fue “descubierto” en el 2007 durante experimentos realizados en las instalaciones LSTF en Japón,

con experimentos como el SB-PV-03 [4], que tuvo que ser abortado para proteger la instalación ante los nefastos efectos del nitrógeno. Posteriormente y en otra instalación diferente, PWR PACTEL en Finlandia, sufrieron idéntica suerte y por los mismos motivos [5].

Desgraciadamente, este efecto no es el único que ocurre. En cuanto se descubren las ramas calientes, una buena parte de este nitrógeno alcanzará los Generadores de Vapor (GV). Aquí el nitrógeno entrará en los tubos en U y ocupará toda su parte superior. En este punto, y al igual que una burbuja en una vena, el nitrógeno va a interrumpir el flujo de refrigerante que, por circulación natural, está extrayendo el calor residual del núcleo. Esta circunstancia dificulta gravemente la refrigeración del núcleo, pudiendo llegar a su fusión si no se encuentran otras vías alternativas de refrigeración. Hay numerosos estudios que lo corroboran. [6], [7], [8].

Y aquí no acaban las nefastas actividades del nitrógeno. Recientes estudios metalográficos [9] han constatado que la simple presencia de nitrógeno cerca del combustible, incluso en bajas concentraciones, **acelera significativamente las reacciones de oxidación del zirconio** de las vainas del combustible. Esta circunstancia puede reducir el tiempo disponible para evitar daños al combustible. Como se puede observar, TODOS sus efectos son negativos.

En el caso que nos ocupa, nos estamos enfrentando a la inyección de grandes cantidades de gas, a presiones relativamente elevadas, directamente en el interior del sistema, y con escasa capacidad de poder evacuarlo con facilidad. Un solo acumulador dispone de nitrógeno suficiente para poder llenar por completo todo el volumen del RCS una vez despresurizado. Y las plantas disponen de un acumulador por lazo, por lo que el problema se multiplica por tres o por cuatro. Esta amenaza del nitrógeno se convierte en permanente y a

largo plazo, ya que, una vez dentro del sistema, va a ser muy difícil eliminarlo a posteriori.

No debemos olvidar que la probabilidad de que suceda esta indeseada inyección durante un accidente SBO+LOCA es muy elevada, básicamente por las siguientes razones:

- El nitrógeno **YA ESTÁ DENTRO DEL SISTEMA** y además en grandes cantidades.
- Tiene un camino **DIRECTO y ABIERTO** hacia el Reactor.
- En **TODO MOMENTO** está intentando entrar al RCS.
- Si no se recupera a tiempo la energía, **la simple evolución natural del accidente** llevará directamente a la inyección del nitrógeno.
- La tendencia natural (y constante) del RCS es la despresurización.

Por tanto, -y si la organización no hace nada por evitarlo- es solo cuestión de tiempo que este nitrógeno entre en el RCS y complique la refrigeración del núcleo.

3. LAS ESTRATEGIAS ACTUALES

El PWROG (*Pressurized Water Reactor Owners Group*) escribió en su día una serie de guías de actuación ante accidentes severos, “*Flex Support Guidelines*” o FSG, en las que se describían las estrategias a realizar para la recuperación y mitigación de este tipo de accidentes. Estas guías han servido a las distintas plantas para escribir sus propios procedimientos. Una de estas guías, la FSG-10, se escribió específicamente para mitigar el problema de la inyección indeseada del nitrógeno.

Esta guía FSG-10 trata específicamente sobre las maniobras a realizar para el aislamiento de los Acumuladores de Inyección de Seguridad, para evitar dicha inyección de nitrógeno.

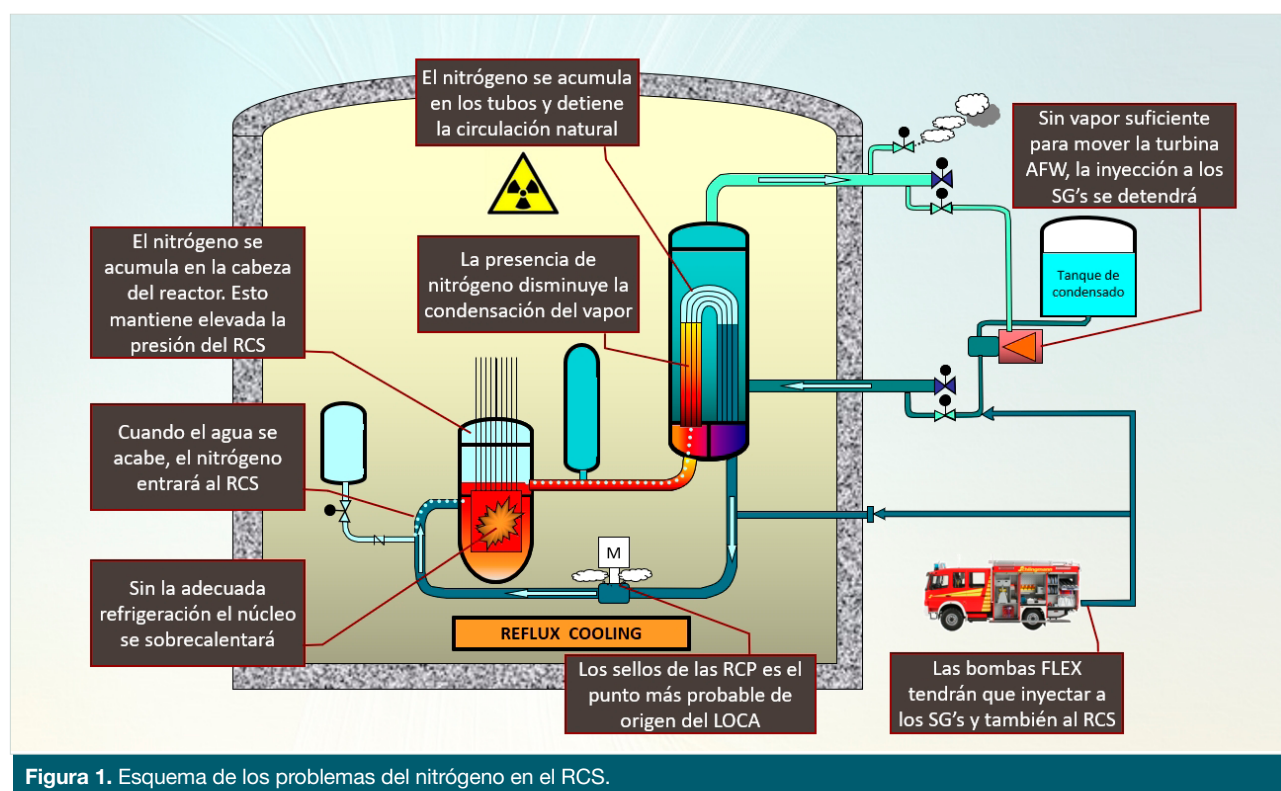


Figura 1. Esquema de los problemas del nitrógeno en el RCS.

Con los actuales diseños de las centrales PWR, solo hay tres estrategias posibles:

1. Cerrar (a tiempo) las válvulas de aislamiento de los acumuladores, o
2. Ventear (a tiempo) el nitrógeno de los acumuladores a la atmósfera, o
3. Bombear agua al RCS de manera constante para mantener su presión por encima del punto de inyección del nitrógeno.

Todas estas estrategias requieren del trabajo conjunto de los siguientes recursos:

- **EQUIPOS ACTIVOS:** Necesitamos disponer de equipos FLEX que puedan funcionar sin energía eléctrica: o bien un generador diésel, o una potente bomba diésel para inyectar al RCS.
- **ESFUERZO HUMANO:** El trabajo constante y coordinado de los operadores, y su disponibilidad.
- **TIEMPO:** Las estrategias deberán ejecutarse en el momento adecuado y simultáneamente sobre todos los acumuladores. Son estrategias críticas en el tiempo.
- **FIABILIDAD TOTAL:** Todo debe funcionar sin fallos, incluso en condiciones de accidente. Un solo elemento que falle de entre todos los implicados arruinará toda la estrategia y la inyección del nitrógeno no podrá evitarse desde alguno de los acumuladores.

Incluso en el caso de que el equipo FLEX se haya desplegado con éxito, que los operadores hayan podido cerrar las válvulas de aislamiento a tiempo y que todo parezca controlado, resulta que tampoco podrá garantizarse que el nitrógeno quede contenido. Estas válvulas de aislamiento se mantienen desenergizadas el 99,999 % del tiempo, y solo se energizan dos veces cada ciclo: una para abrirlas y otra para cerrarlas. Están diseñadas para aislar agua, no gas, y NUNCA se les realiza una prueba de fugas, dado que su condición de seguridad es permanecer abiertas. ¡Y resulta que ellas son el centro de la estrategia FSG-10!

Estamos confiando el control del nitrógeno a desplegar (a tiempo) un procedimiento realizado por operadores estresados (hay un accidente en curso), y que utiliza una multitud de equipos complejos y activos, que hay que energizar y de los que no se conoce su estado. Y que un solo acumulador mal cerrado ya es suficiente para desencadenar todos los problemas.

Entonces:

¿Podremos dar unas garantías mínimas de evitar la inyección del nitrógeno?

¿Estaremos haciendo una apuesta arriesgada?

4. ASVAD, LA NUEVA ALTERNATIVA

El origen de la solución ASVAD se remonta al 2014 durante una sesión de formación sobre estas estrategias que se estaba dando al personal del PEI (Plan de Emergencia Interior) de Ascó. El redactor se dio cuenta de que estas estrategias eran bastante complicadas de ejecutar, y con un resultado incierto.

No solamente se quedó en la simple denuncia de esas debilidades, sino que se puso a pensar en encontrar algún otro sistema alternativo que pudiera evitar el problema de la inyección y que no tuviera las debilidades e inconvenientes de las estrategias anteriores.

El resultado de aquel esfuerzo fue el diseño de un nuevo elemento pasivo (válvula **ASVAD**) que es similar a una válvula de seguridad, pero con un funcionamiento inverso. Este elemento no alivia la presión cuando se supera un punto de tarado, sino que lo hace cuando la presión en el acumulador **desciende** por debajo de un determinado valor.

Esta válvula se instala en el lado nitrógeno de cada acumulador. Al estar sometida a la presión interior del mismo, puede detectar el final de la inyección de agua y es capaz de aliviar el nitrógeno residual del acumulador a la atmósfera antes de que este pueda entrar al RCS.

Básicamente, la válvula ASVAD se mantendrá cerrada mientras la presión en el acumulador sea normal. Durante

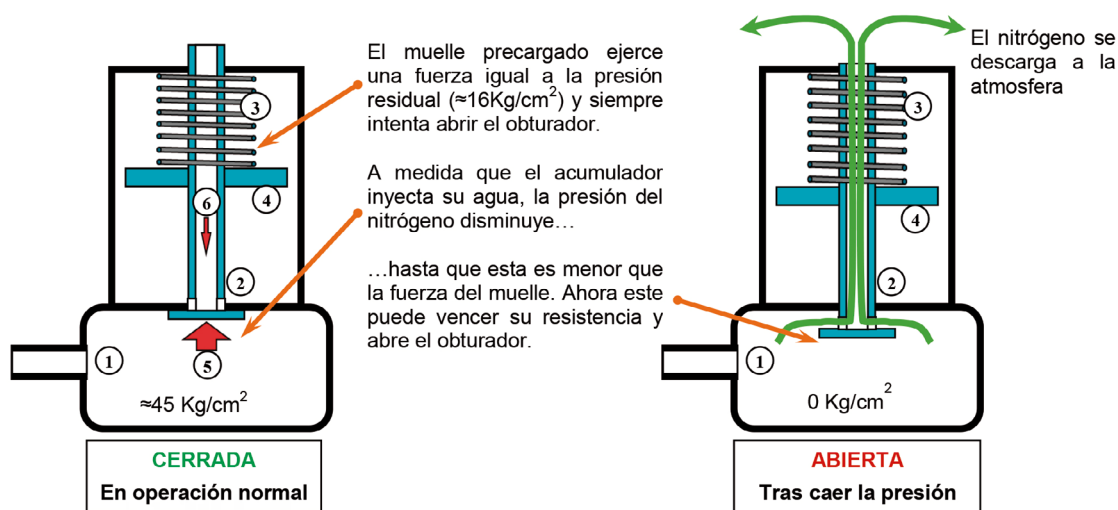


Figura 2. Esquema simplificado de ASVAD.

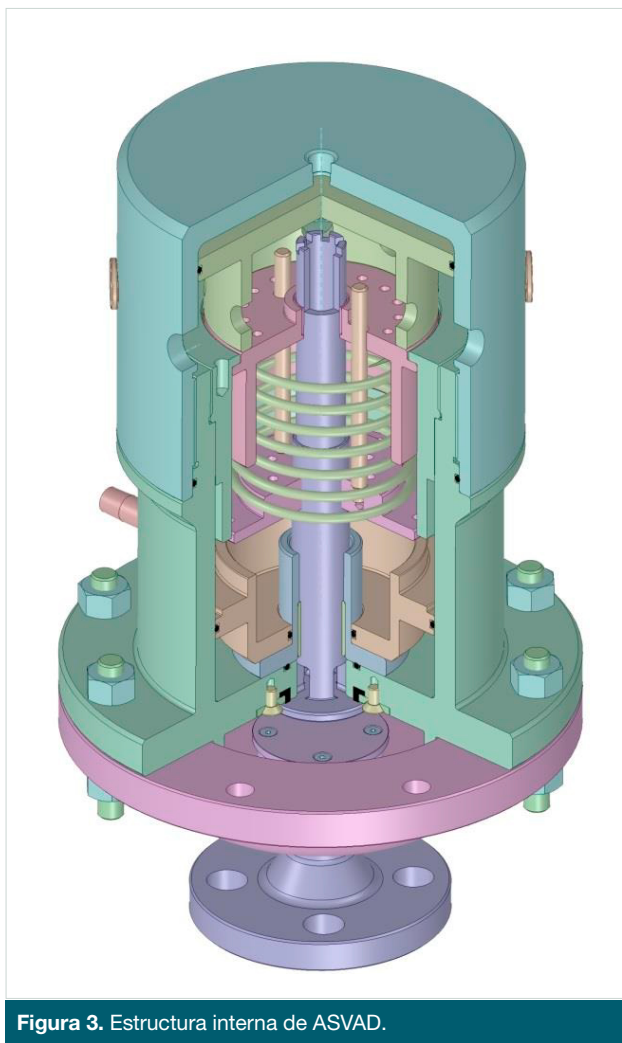


Figura 3. Estructura interna de ASVAD.

el accidente, y una vez la inyección pasiva del acumulador comienza, el nitrógeno va a ir expandiéndose en su interior a medida que el agua vaya saliendo. Ello conlleva un continuo descenso de la presión en su interior. Una vez que toda el agua ya ha salido, este nitrógeno alcanzará una presión residual que dependerá de varios factores, pero que en resumen son las cantidades volumétricas de agua y gas, y de su presión y temperatura iniciales.

Con las condiciones estándar de operación de estos acumuladores, esta presión residual se estima alrededor de unos 16 Kg/cm². La válvula ASVAD dispone de un muelle ajustable que puede precargarse a esa presión. Cuando esa presión se alcanza, la fuerza acumulada en el muelle hace que **la válvula abra automáticamente**, aliviando el gas a la atmósfera y, por tanto, evitando que acceda al RCS.

ASVAD se ha diseñado como un componente pasivo que carece de todos los inconvenientes descritos de las estrategias anteriores. La sencillez de su diseño y el estar construida casi por completo en acero inoxidable la convierten en un elemento **extremadamente fiable**.

La válvula ASVAD tiene un diseño **muy sencillo**, ya que consiste básicamente en una cámara de presión (1) conectada al acumulador. Esta cámara de presión

está cerrada por un obturador hueco (2). Solidario con el obturador y roscado alrededor de este, hay un disco de ajuste (4) y un muelle (3) que ejerce una fuerza hacia abajo, intentando abrir el obturador.

El funcionamiento de la válvula ASVAD está basado en el desequilibrio de las fuerzas ejercidas sobre el obturador. Por el lado inferior, tenemos la fuerza ejercida por la presión del acumulador sobre la superficie del obturador (5). Esta fuerza mantiene firmemente cerrado el obturador. Por el lado superior, tenemos la fuerza ejercida por el muelle pre-comprimido (6), que intenta abrir el obturador.

Mientras la fuerza ejercida por la presión normal del acumulador sea superior a la ejercida por el muelle, el obturador permanecerá cerrado y en reposo. En concreto, la fuerza ejercida por la presión normal del acumulador es unas tres veces superior a la fuerza ejercida por el muelle, lo que en operación normal garantiza su cierre.

Durante el accidente, a medida que el agua va saliendo del acumulador, el nitrógeno en su interior se expande, disminuyendo su presión. Una vez la fase líquida ha sido inyectada, queda una presión residual de gas que -ahora sí- debe ser evacuada. Cuando esta presión cae por debajo del punto de tarado de la válvula, la fuerza del muelle vence a la fuerza de la presión residual, y súbitamente el obturador se desplaza, quedando permanentemente abierta.

Ello permite la total despresurización del acumulador, y con ello evita completamente la entrada del nitrógeno al RCS. Como consecuencia secundaria, este nitrógeno va a ayudar a la inertización y refrigeración del interior de la contención.

Obviamente, el esquema indicado es una simplificación del diseño real de la válvula ASVAD. Su diseño real incluye otras funcionalidades opcionales como son la apertura y cierre remotos, información de la posición y ajuste fino de la presión de disparo. Incluso dispone de la funcionalidad de adaptar automáticamente su punto de actuación a las condiciones ambientales de la contención.

Su diseño también es adaptable a un amplio rango de especificaciones de funcionamiento, pudiendo ser personalizada dimensionalmente para cada aplicación concreta. Cumple con los estándares ASME Clase Nuclear 2, y supera sobradamente las especificaciones de accidente DBA (Design Basis Accident), incluyendo sismos más allá de los requeridos por especificación.

5. VENTAJAS OPERATIVAS DE ASVAD

Las ventajas principales de esta válvula son las siguientes:

- **DISPONIBILIDAD:** Una vez instalada en el sistema, ya se encuentra disponible desde el primer momento para realizar su función. No tiene periodos de inoperabilidad.
- **PASIVA:** Es un elemento completamente pasivo y no requiere de energía externa para su actuación. Solo utiliza la energía almacenada en su muelle.
- **AUTOMÁTICA:** No requiere de la atención de ningún operador ni del apoyo de instrumentación adicional. Por sí sola detecta el momento adecuado para el



Figura 4. Foto de la válvula ASVAD.

venteo del nitrógeno, y siempre después de finalizada la inyección de agua del acumulador.

- **SIMPLE:** Su diseño es extremadamente simple y basado en principios físicos universales.
- **EFFECTIVA:** Sustituye totalmente a las estrategias actuales FSG-10. Una vez actuada, despresurizará completamente el acumulador, evitando la posibilidad de inyecciones posteriores de nitrógeno. Los operadores podrán atender otras actuaciones más importantes.
- **FIABLE:** Su simplicidad y robustez le otorgan una gran fiabilidad. El accidente difícilmente podrá interferir en su funcionamiento. Su simplicidad minimiza el número de elementos que pueden fallar. Su construcción totalmente metálica la hace resistente a las condiciones post-LOCA.
- **SEGURA:** En operación normal, se mantiene firmemente cerrada. No interfiere. No añade ningún modo de fallo al sistema distinto de los ya analizados. Es intrínsecamente segura por diseño. Ello facilita su licenciamiento.
- **MANTENIBLE:** Casi sin mantenimiento. Sin

desgaste. Su mantenimiento es similar al de las válvulas de seguridad estándares. "Install & forget".

- **ECONÓMICA:** Muy fácil de instalar. Su vida calificada es indefinida: "Buy once, Use it forever".

6. UNA AYUDA EXTRA DURANTE EL ACCIDENTE

Aunque todas las ventajas descritas anteriormente ya son más que suficientes para justificar su instalación en los acumuladores de seguridad de nuestras plantas, aún existe una ventaja adicional que refuerza todavía más su utilización:

Los actuales procedimientos de emergencia de nuestras centrales, al no poder garantizar la total eliminación del nitrógeno, limitan la despresurización del RCS a un valor por encima de la presión de entrada del nitrógeno. Como hemos indicado antes, este valor ronda los 16 Kg/cm², pero al incluir un margen de seguridad, alcanza los 18-20 Kg/cm². Esta limitación obliga a la utilización de bombas que puedan inyectar su caudal contra dicha presión del RCS. Estas bombas tendrán que trabajar bajo esas exigentes condiciones.

Sin embargo, y si eliminamos la amenaza de la inyección, ahora **podremos despresurizar el RCS** por debajo de ese límite. Una despresurización adicional por debajo de los 5 kg/cm² disminuirá aún más la tasa de fugas y permitirá inyectar al RCS con otros sistemas alternativos, como podría ser el de contraincendios. Además, esa despresurización permitirá el funcionamiento de los equipos de emergencia en condiciones más relajadas. Esta posibilidad ya ha sido evaluada ante el mencionado experimento de LSTF. Con la válvula ASVAD instalada, el núcleo se salvaría [10].

Esta puede ser LA VENTAJA MÁS IMPORTANTE de todas las descritas, ya que facilitará la recuperación del accidente en el largo plazo.

7. CONCLUSIONES

La inyección del nitrógeno de los acumuladores representa una seria amenaza para la refrigeración del núcleo. Hay una elevada probabilidad de que el nitrógeno llegue al RCS y complique la recuperación del accidente.

Las estrategias actuales para evitar la inyección de nitrógeno confían demasiado en las acciones de los operadores y en la correcta respuesta de los equipos -activos- de mitigación de accidentes. Tal vez puedan ser aceptables, pero no como la principal y única barrera.

La instalación de la válvula ASVAD liberará a la organización de tener que afrontar este problema. El hecho de ser un componente pasivo, automático y completamente autónomo la convierte en la primera y más eficaz barrera para evitar la inyección de nitrógeno al RCS.

Poder despresurizar el RCS a presiones más bajas sin temor a la inyección del nitrógeno disminuirá la tasa de fugas en el sistema y permitirá el funcionamiento de los equipos de emergencia en condiciones más relajadas. Ello aumentará las posibilidades de recuperación de la planta en el largo plazo.

Varias organizaciones internacionales ya han evaluado la válvula ASVAD y han reconocido la importancia de su innovación:

- Concedida la Patente en Europa, USA, China, Japón, Corea del Sur, Rusia y Ucrania.
- Concedida la Aprobación del Consejo de Seguridad Nuclear Español (CSN) [11].
- Finalista en la categoría de Innovación en Seguridad Nuclear en la WNE 2022 World Nuclear Expo en París (entre 137 proyectos de 87 empresas).
- La Comisión Europea, EURATOM le concede el segundo premio del Nuclear Innovation Prize 2025 en la categoría de seguridad de los sistemas del reactor (entre 28 propuestas).

8. REFERENCIAS

[1] VARIOUS AUTHORS, WCAP-17601-P Rev.1, Reactor Coolant System Response to the Extended Loss of AC Power Event for Westinghouse, Combustion Engineering and Babcock & Wilcox NSSS Designs, Westinghouse Proprietary Class 2, (2013).

[2] VARIOUS AUTHORS, FSG-10 Rev.1, Passive RCS injection isolation. Background information for Westinghouse Owners Group Emergency Response Guidelines, PWROG, (2014).

[3] The ASVAD Valve: visit www.asvad-nuclear.com.

[4] TAKEDA, T., SUZUKI, M., ASAKA, H., NAKAMURA, H., 2006. Quick-look Data Report of OECD/NEA ROSA Project Test 6-2 (0.1% 15 Pressure Vessel Bottom Small Break LOCA Experiment). Tech. Rep. JAEA-Research 2006-9002, Japan Atomic Energy Agency.

[5] RIIKONEN, V., KOUHIA, V., et al. 2025. Experimental studies on nitrogen's effect on reactor core cooling during a hot leg SBLOCA in a scaled EPR model. Nuclear Engineering and Design 434 (2025) 113916

[6] KRÁL, P., HYVARINEN, J., PROSEK, A., GUBA, A., 2015. Sources and effect of non-condensable gases in reactor coolant system of LWR. In: NURETH-16. Chicago, IL, August 30–September 4, 2015. pp. 5194–5208.

[7] TAKASHI NAGAE, TOSHIKI CHIKUSA, MICHIO MURASE & NORITOSHI MINAMI, Analysis of Non-condensable Gas Recirculation Flow in Steam Generator U-Tubes during Reflux Condensation Using RELAP5, Journal of Nuclear Science and Technology, 44:11, 1395-1406 (2007).

[8] LI YUQUAN, HAO BOTAO, ZHONG JIA, AND WANG NAN, Comparative Experiments to Assess the Effects of Accumulator Nitrogen Injection on Passive Core Cooling During Small Break LOCA, Nuclear Engineering and Technology 49 54-70 (2017).

[9] MARTIN STEINBRUECK, FABIO OLIVEIRA DA SILVA, MIRCO GROSSE, Oxidation of Zircaloy-4 in steam-nitrogen mixtures at 600-1200°C, Journal of Nuclear Materials 490 226-237 (2017).

[10] J.FREIXA, A.LABORDA, V.MARTINEZ. Effectiveness of the ASVAD valve in a RPV bottom leak. 2021 Annals of Nuclear Energy. ELSEVIER <https://authors.elsevier.com/sd/article/S0306454921002632>

[11] The ASVAD Valve validation by the Spanish Consejo de Seguridad Nuclear (CSN): CSN/C/SG/TGE/24/05. INSI/OTROS/2022/128 02/02/2024 ■

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mis compañeros de C.N. Ascó los ánimos recibidos para llevar adelante este proyecto. Agradezco también al Equipo Directivo de **Ringo Válvulas**, que me ha apoyado y ha materializado el proyecto ASVAD. Por último, tengo que agradecer también a determinadas personas en el CSN, que me han facilitado el poder difundir esta alternativa en otros foros internacionales.

Quisiera ampliar mi agradecimiento a todas aquellas personas que al menos me han escuchado. El desarrollo de este proyecto me ha permitido observar lo difícil que es ser escuchado cuando solamente eres un individuo y no te respalda una organización reconocida.

Espero que esto no suceda con los lectores de este artículo, y que alguno de ellos me contacte, aunque solo sea para dar su opinión al respecto. La seguridad de nuestras plantas está en nuestras manos. **Hagamos que ocurra. Es nuestra responsabilidad.**

¡Gracias!