
XE-DET, UNA HERRAMIENTA PARA EL ANÁLISIS DE RESULTADOS DURANTE UN FLUX-TILT

Ignacio Collazo Nieto^{1*}, Maria Anaya Lázaro¹, Alberto Concejal Bermejo¹, Jose Ignacio Roselló García²

¹Iberdrola Generación Nuclear, C/ Tomás Redondo 1. 28033. Madrid

²GDES Energy Services S.A.U., Ronda Auguste y Louis Lumière 15. 46980 Paterna (Valencia)

[*icni@iberdrola.es](mailto:icni@iberdrola.es)

Sinopsis

Cuando se detecta la presencia de un elemento combustible defectuoso en el núcleo de un reactor BWR, resulta crítico proceder a la localización temprana de la celda afectada, con el fin de adoptar de manera oportuna las acciones operativas necesarias que eviten la progresión y agravamiento del fallo.

Una de las maniobras empleadas habitualmente en la industria para la identificación de la celda que alberga el defecto es el denominado ensayo de supresión de potencia (Power Suppression Test), también conocido como flux-tilt. Esta maniobra consiste en la modificación controlada de la potencia local de cada celda del núcleo, mediante la inserción selectiva de la barra de control asociada, con el objetivo de provocar una respuesta observable en la señal radioquímica del sistema. Dicha respuesta puede ser caracterizada bien a través de la toma de muestras gaseosas en la estación de pretratamiento, o bien mediante la monitorización en línea del sistema de off-gas.

La interpretación de la respuesta radioquímica obtenida puede verse significativamente afectada cuando la variación de potencia local induce una respuesta directa en el propio elemento defectuoso, lo que puede originar indicaciones espurias o falsos positivos asociados al movimiento de las barras de control de celdas adyacentes o no defectuosas.

Con el fin de facilitar la interpretación de los resultados y apoyar la toma de decisiones operativas tras la ejecución de esta maniobra, Iberdrola Generación Nuclear ha desarrollado la herramienta XeDeT. Esta aplicación permite discriminar el impacto radioquímico individual del movimiento de cada barra de control y, mediante el empleo de modelos de difusión, asigna una probabilidad cuantificada de presencia de fallo a cada una de las celdas del núcleo. Esto proporciona un marco analítico más robusto para la identificación del elemento combustible defectuoso y mejora la fiabilidad del diagnóstico.

PALABRAS CLAVE: PST, Flux-tilt, XeDeT

1. INTRODUCCIÓN

La integridad del combustible constituye uno de los pilares fundamentales para la operación segura y fiable de una central nuclear. En los reactores BWR, la aparición de un defecto en una o varias varillas combustibles supone la pérdida de la primera barrera de contención frente a los productos de fisión, lo que puede dar lugar a un incremento de la actividad radiactiva en los sistemas de la planta y condicionar tanto la estrategia operativa como la gestión posterior del ciclo.

La operación con combustible defectuoso requiere la adopción de medidas específicas destinadas a limitar la liberación de productos de fisión y minimizar el riesgo de degradación adicional del fallo. Para ello, resulta esencial detectar el defecto lo antes posible, identificar con precisión la celda afectada y establecer estrategias de operación que permitan reducir la potencia local en la zona implicada, así como controlar las variaciones de potencia previstas durante el resto del ciclo.

Tradicionalmente, la detección de fallos de combustible en la CN Cofrentes se basaba en el análisis periódico de muestras gaseosas procedentes de la línea de pretratamiento del sistema Off-Gas, complementado con la vigilancia de radioisótopos de yodo en el refrigerante. Sin embargo, la frecuencia de muestreo, normalmente semanal, podía dificultar la identificación temprana de determinados defectos, especialmente cuando se producían variaciones significativas de potencia entre campañas de toma de muestras. En estas circunstancias, un fallo inicialmente incipiente podía evolucionar hasta comprometer la continuidad de la operación y requerir actuaciones correctivas de mayor impacto.

Con el objetivo de mejorar la capacidad de detección y seguimiento de este tipo de eventos, desde 2017 la CN Cofrentes dispone de un sistema de monitorización en línea del Off-Gas desarrollado por GDES Technology for Services (GDES T4S), empresa surgida de la colaboración entre GD Energy Services (GDES) e Iberdrola. Este sistema proporciona información continua sobre la evolución de la actividad de los gases nobles presentes en la línea de Off-Gas y permite correlacionar dicha información con las condiciones operativas de la planta. Gracias a esta capacidad de monitorización continua, es posible detectar de forma más temprana la aparición de defectos de combustible, evaluar su evolución y analizar la respuesta radioquímica asociada a las maniobras de operación del reactor.



Figura 1. Sistema de monitorización en continuo del off-gas.

Una vez confirmada la existencia de un elemento combustible defectuoso, la localización precisa de la celda afectada pasa a ser una prioridad operativa. Para ello, una de las metodologías más extendidas en la industria nuclear es el denominado Power Suppression Test (PST), también conocido como flux tilt. Esta maniobra consiste en modificar de forma controlada la distribución espacial de potencia mediante movimientos selectivos de barras de control, analizando posteriormente la respuesta radioquímica

observada en los sistemas de vigilancia. La correlación entre los movimientos realizados y la variación de la actividad medida permite inferir la ubicación más probable del defecto.

No obstante, la interpretación de los resultados de un PST puede resultar compleja cuando la respuesta observada se ve afectada por fenómenos de interacción neutrónica entre regiones próximas del núcleo. En determinadas circunstancias, el movimiento de barras adyacentes al elemento defectuoso puede generar señales indirectas o falsas indicaciones que dificultan la identificación inequívoca de la celda responsable del incremento de actividad. Por este motivo, disponer de herramientas capaces de evaluar cuantitativamente el área de influencia de cada maniobra constituye un factor clave para aumentar la fiabilidad del diagnóstico.

La experiencia adquirida durante la gestión del fallo de combustible detectado en el ciclo 25 de operación de la CN Cofrentes, referencia [1], impulsó a Iberdrola Generación Nuclear a desarrollar una herramienta específica de análisis denominada XeDeT (Xenon Detection Tool). Esta aplicación combina datos operativos y radioquímicos con modelos de difusión para generar mapas probabilísticos de localización del defecto, apoyando al analista en la interpretación de los resultados obtenidos durante los ensayos PST. En los apartados siguientes se describen la arquitectura, funcionalidades y proceso de validación de la herramienta, así como su aplicación práctica al análisis del fallo de combustible detectado durante el ciclo 26 de operación.

2. DESCRIPCIÓN DE LA HERRAMIENTA XeDeT

2.1 Fundamento y objetivos

XeDeT (Xenon Detection Tool) es una herramienta desarrollada por Iberdrola Generación Nuclear para apoyar el análisis e interpretación de los resultados obtenidos durante ensayos de supresión de potencia (Power Suppression Test, PST) realizados en reactores BWR. Su finalidad principal es proporcionar una estimación cuantitativa de la probabilidad de que una determinada celda del núcleo contenga un elemento combustible defectuoso a partir de la respuesta radioquímica observada durante la ejecución del ensayo.

La localización de un fallo de combustible mediante un PST se basa en la correlación existente entre las modificaciones locales de potencia producidas por el movimiento de las barras de control y la variación de la actividad de los productos de fisión liberados por el elemento defectuoso. Sin embargo, la interpretación de dichas respuestas puede verse dificultada por los efectos de acoplamiento neutrónico entre regiones próximas del núcleo, así como por los fenómenos de difusión asociados al transporte de los gases de fisión. Como consecuencia, una misma señal radioquímica puede estar influenciada por movimientos realizados en posiciones distintas de la ubicación real del defecto.

Con el objetivo de reducir esta incertidumbre, XeDeT integra información operacional y radioquímica para construir mapas probabilísticos de localización del fallo. La herramienta permite evaluar de manera sistemática el impacto individual de cada movimiento de barra de control y estimar la contribución relativa de las distintas regiones del núcleo a la señal observada en el sistema de monitorización de gases.

2.2 Metodología de análisis

La metodología empleada por XeDeT se fundamenta en la integración de tres fuentes principales de información: la secuencia de movimientos de barras de control realizada durante el PST, la evolución temporal de la actividad registrada en el sistema de monitorización del Off-Gas y la distribución espacial de las posiciones del núcleo susceptibles de contener el defecto.

Para cada movimiento de barra, la herramienta identifica la respuesta radioquímica asociada y evalúa su intensidad relativa. Posteriormente, mediante modelos de difusión espacial, asigna pesos probabilísticos a las posiciones cercanas al punto donde se ha producido la perturbación neutrónica. Este enfoque permite representar matemáticamente la influencia que un movimiento concreto puede ejercer sobre elementos combustibles situados en celdas adyacentes.

La combinación de las señales obtenidas a lo largo de toda la secuencia del PST genera un modelo global de probabilidad que integra de forma coherente la información procedente de cada uno de los movimientos realizados. Como resultado, la herramienta produce un mapa bidimensional del núcleo en el que cada celda recibe una puntuación relativa asociada a la probabilidad de contener el elemento combustible defectuoso. Este procedimiento permite transformar un conjunto complejo de señales operacionales y radioquímicas en una representación visual fácilmente interpretable por los analistas de combustible, facilitando la identificación de las posiciones más probables y reduciendo la dependencia de interpretaciones exclusivamente cualitativas.

2.3 Arquitectura funcional

XeDeT ha sido desarrollada bajo una arquitectura modular que permite automatizar tanto la recopilación de datos como su posterior tratamiento analítico. La herramienta obtiene información de los sistemas históricos y de monitorización de planta, incorporando de forma sincronizada señales relacionadas con la posición de las barras de control y con la actividad de los gases nobles presentes en el sistema Off-Gas, Figura 2.

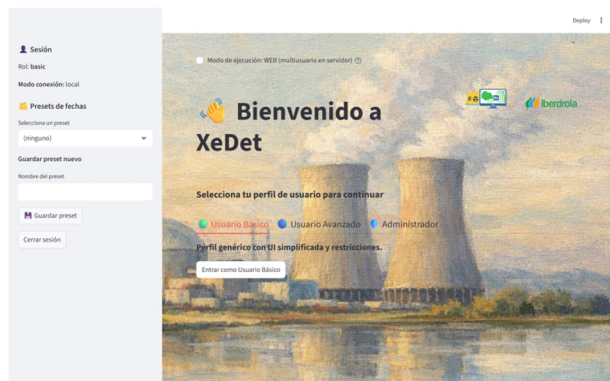


Figura 2. Interfaz gráfica de XeDeT.

Una vez recopilados los datos necesarios, los distintos módulos de cálculo ejecutan las etapas de validación, procesado y análisis probabilístico. Esta estructura modular facilita la incorporación de mejoras metodológicas, la validación independiente de los modelos implementados y la adaptación de la herramienta a nuevas estrategias de análisis.

Los resultados son presentados mediante representaciones gráficas y mapas de probabilidad que permiten identificar de forma inmediata las regiones del núcleo con mayor compatibilidad con la respuesta observada durante el ensayo. Adicionalmente, la herramienta genera automáticamente los ficheros de trabajo y documentación necesarios para la trazabilidad del análisis realizado.

2.4 Capacidades y aplicaciones

XeDeT ha sido concebida como una herramienta de apoyo a la toma de decisiones durante la gestión de defectos de combustible. Entre sus principales aplicaciones se encuentran la interpretación de ensayos PST, el análisis retrospectivo de eventos históricos y la evaluación de estrategias alternativas de localización de fallos.

La herramienta permite además comparar distintos modelos de difusión y criterios de ponderación, proporcionando al analista una evaluación objetiva de la sensibilidad de los resultados frente a las hipótesis consideradas, Figura 3. Esta capacidad resulta especialmente útil en situaciones en las que múltiples movimientos de barras generan respuestas positivas o cuando la zona sospechosa abarca una región extensa del núcleo.

En conjunto, XeDeT constituye una herramienta de ingeniería que combina conocimientos de física de reactores, comportamiento del combustible y análisis de señales para proporcionar una estimación robusta y cuantificable de la ubicación probable de un elemento combustible defectuoso. Su utilización contribuye a mejorar la interpretación de los resultados obtenidos durante los ensayos PST, reducir los tiempos de análisis y aumentar la confianza en las decisiones operativas adoptadas durante la gestión de fallos de combustible.

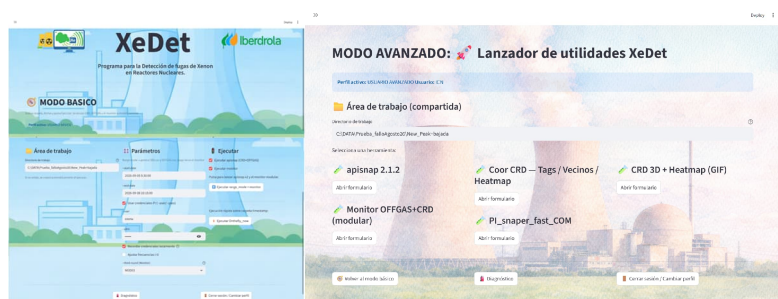


Figura 3. Interfaz gráfica de XeDeT. Modo Básico vs. Modo Avanzado

2.5 Validación de la herramienta

La validación de XeDeT se llevó a cabo mediante una estrategia escalonada orientada a evaluar tanto la capacidad predictiva de los modelos implementados como su aplicabilidad en condiciones reales de operación. Para ello, se emplearon ensayos PST (Power Suppression Test) correspondientes a eventos de combustible defectuoso cuya localización final era conocida, permitiendo contrastar de forma objetiva los resultados obtenidos por la herramienta con la posición real del elemento afectado.

El proceso de validación se estructuró en dos fases complementarias. En una primera etapa se reconstruyeron eventos históricos anteriores al desarrollo de la aplicación, utilizando registros operativos, movimientos de barras de control y datos radioquímicos almacenados en los sistemas de planta. Este enfoque permitió verificar la consistencia de los modelos de análisis en un entorno controlado, donde la ubicación del defecto era conocida de antemano.

Posteriormente, la herramienta fue aplicada a nuevos ensayos PST realizados durante la explotación de la unidad, evaluando su comportamiento en tiempo real como soporte al proceso de toma de decisiones. Esta segunda fase permitió valorar no solo la precisión de los algoritmos, sino también la utilidad práctica de la herramienta en escenarios operativos caracterizados por incertidumbre y disponibilidad limitada de información.

Uno de los primeros casos utilizados para la validación correspondió al PST realizado el 6 de febrero de 2016. A partir de la reconstrucción de la secuencia de movimientos de barras y de la respuesta radioquímica registrada durante el ensayo, XeDeT generó un mapa de probabilidad que identificó como posición más probable la celda 12-21, coincidiendo exactamente con la ubicación real del elemento combustible defectuoso determinada posteriormente durante la investigación del evento, Figura 4 (izquierda).

Este resultado constituyó una primera demostración de la capacidad de la herramienta para reproducir correctamente eventos históricos y para relacionar de forma coherente las señales observadas con la distribución espacial del núcleo. Asimismo, permitió ajustar determinados parámetros de los modelos de difusión empleados, mejorando la estabilidad de las predicciones obtenidas.

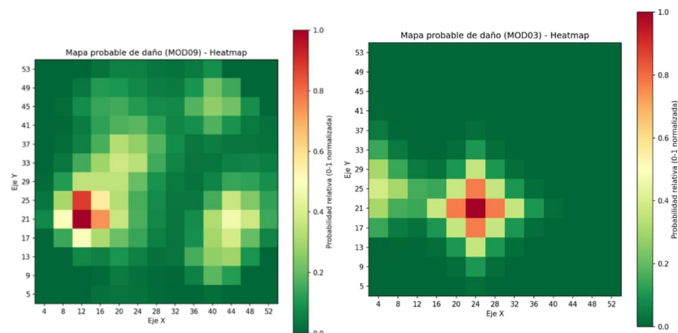


Figura 4. Mapa de probabilidades de XeDeT. PST 6 de Febrero 2016 (Izquierda) y PST 16 de Mayo 2024 (Derecha)

Una vez completada la fase inicial de calibración y validación, la herramienta se aplicó a ensayos PST más recientes con el objetivo de comprobar la robustez de los modelos en condiciones operativas actuales. Entre ellos destaca el ensayo realizado el 16 de mayo de 2024, asociado a un nuevo evento de combustible defectuoso.

En este caso, el análisis efectuado por XeDeT identificó como posición más probable la celda 24-21, reproduciendo nuevamente la localización real del defecto, Figura 4 (derecha). La coincidencia entre el resultado calculado y la posición finalmente confirmada aportó una evidencia adicional de la capacidad de la herramienta para discriminar correctamente la región responsable de la respuesta radioquímica observada durante el ensayo.

Además de la correcta identificación de la posición candidata, los resultados obtenidos mostraron una adecuada separación entre las posiciones de mayor probabilidad y el resto de localizaciones del núcleo, lo que facilita la interpretación de los mapas generados y mejora su utilidad como herramienta de apoyo al análisis

Los distintos casos analizados evidencian que los modelos implementados en XeDeT son capaces de reproducir con precisión la respuesta observada durante los ensayos PST y de identificar de forma consistente las posiciones asociadas a elementos combustibles defectuosos. La herramienta ha demostrado ser especialmente útil en situaciones donde múltiples movimientos de barras generan respuestas positivas o donde la interpretación visual de las señales resulta ambigua.

La utilización de modelos probabilísticos permite integrar simultáneamente la información procedente de todos los movimientos realizados durante el ensayo, reduciendo la influencia de señales aisladas y proporcionando una visión global del comportamiento observado. Este enfoque contribuye a aumentar la objetividad del análisis y aporta un criterio adicional para respaldar las decisiones adoptadas por los especialistas de combustible.

En conjunto, los resultados obtenidos durante el proceso de validación confirman la capacidad de XeDeT para reproducir eventos históricos conocidos y para proporcionar estimaciones fiables de localización en condiciones reales de operación. Estos resultados avalan su utilización como herramienta de apoyo en la identificación temprana y gestión de fallos de combustible en reactores BWR.

3. APLICACIÓN AL PST DEL FALLO DEL CICLO 26

A finales de diciembre de 2025 se observó un incremento significativo de la actividad de Xe-133 en las muestras de pretratamiento de gases obtenidas en la CN Cofrentes, pasando de valores de fondo del orden de 0,21 $\mu\text{Ci/s}$ a valores próximos a 1,42 $\mu\text{Ci/s}$. Durante este periodo, el sistema de monitorización en línea del Off-Gas se encontraba temporalmente fuera de servicio por actividades de mantenimiento, por lo que el seguimiento inicial del fenómeno se realizó mediante un incremento de la frecuencia de muestreo radioquímico.

El análisis conjunto de las medidas radioquímicas y de los indicadores habitualmente utilizados para la vigilancia de la integridad del combustible confirmó la existencia de un defecto de pequeña magnitud en el núcleo correspondiente al ciclo 26, Figura 6.

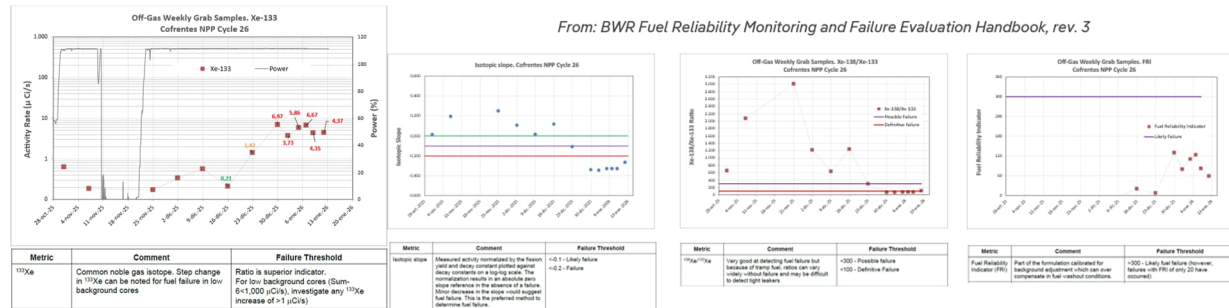


Figura 6. Distintos métodos de detección de fallo de combustible

Una vez verificada la presencia del fallo, se consideró prioritario determinar su localización con el fin de implantar medidas operativas que limitaran la potencia en la región afectada y redujeran la probabilidad de degradación adicional del defecto.

Con este objetivo, el 15 de enero de 2026 se llevó a cabo un ensayo de supresión de potencia (PST). Para minimizar el impacto de la maniobra sobre la operación de la unidad, el ensayo se ejecutó a una potencia aproximada del 65 % de la potencia térmica nominal, Figura 7. La secuencia de ensayo fue estructurada en dos fases sucesivas.

La primera fase consistió en la inserción y extracción secuencial de las barras correspondientes al patrón tipo tablero de ajedrez, con el propósito de identificar las zonas del núcleo que mostraban una respuesta radioquímica significativa. A partir de los resultados obtenidos se definió una segunda fase orientada a refinar el área de interés y aumentar la resolución espacial del diagnóstico, Figura 8.

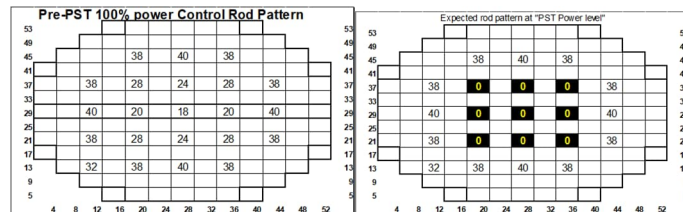


Figura 7. Esquema de barras de control al inicio del test

Desde los primeros movimientos realizados durante el ensayo se registró un comportamiento poco habitual caracterizado por la aparición de múltiples respuestas positivas consecutivas. Los ratios Xe-133/Xe-138 obtenidos durante los primeros pasos del PST mostraban indicaciones compatibles con la existencia de una extensa región candidata, dificultando considerablemente la identificación de una posición concreta del núcleo, Figura 9.

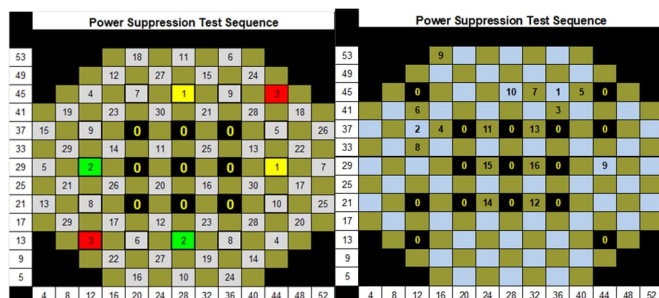


Figura 8. Secuencia de muestreo. Fases I&II

Si el análisis se hubiese basado exclusivamente en los resultados de las muestras radioquímicas, la zona sospechosa habría abarcado una fracción significativa del núcleo, reduciendo la capacidad de discriminación del ensayo. Este comportamiento sugería que algunos de los movimientos realizados podían estar produciendo respuestas indirectas asociadas al propio elemento defectuoso, generadas por modificaciones de la distribución global de potencia y no únicamente por perturbaciones locales.

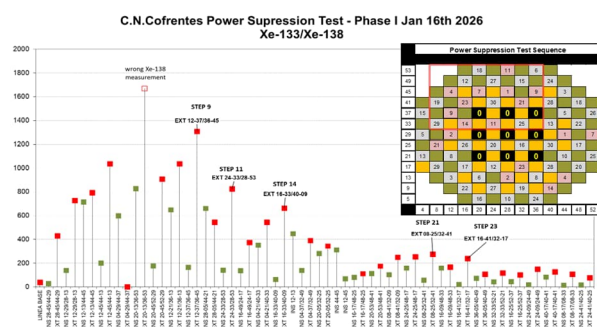


Figura 9. Resultados del PST. Fases I&II

La disponibilidad del sistema de monitorización en línea permitió un análisis más detallado de la evolución temporal de la actividad. El examen de las señales registradas mostró que los primeros movimientos del ensayo habían provocado variaciones significativas en la potencia radial del reactor, capaces de inducir respuestas adicionales del combustible defectuoso y, por tanto, de generar indicaciones que podían interpretarse erróneamente como señales positivas independientes, Figura 10.

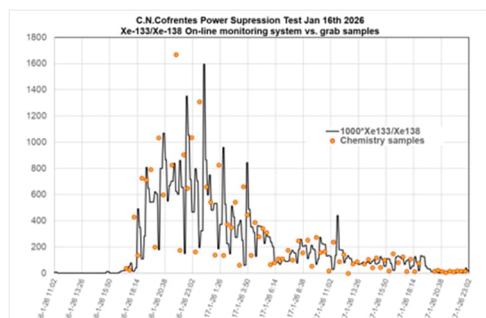


Figura 10. Resultados del PST. Fases I&II. Sistema de monitorización on-line

A partir de la información disponible tras la ejecución de las dos fases del PST, el análisis convencional identificó inicialmente la región asociada a la barra 12-37 como la candidata más probable para albergar el

defecto. Esta hipótesis era coherente con la intensidad de las señales observadas y con la interpretación realizada por el equipo de especialistas durante el desarrollo del ensayo.

Posteriormente, durante la ejecución del cambio de secuencia previsto para la operación del reactor, se mantuvo la vigilancia continua de la actividad mediante el sistema de monitorización del Off-Gas. En este periodo se observó una nueva respuesta significativa asociada al movimiento de la barra 20-41, aportando información adicional que permitió reorientar el diagnóstico hacia dicha región del núcleo, Figura 11. Como consecuencia, el equipo de análisis concluyó que la posición 20-41 constituía la ubicación más probable del elemento combustible defectuoso.

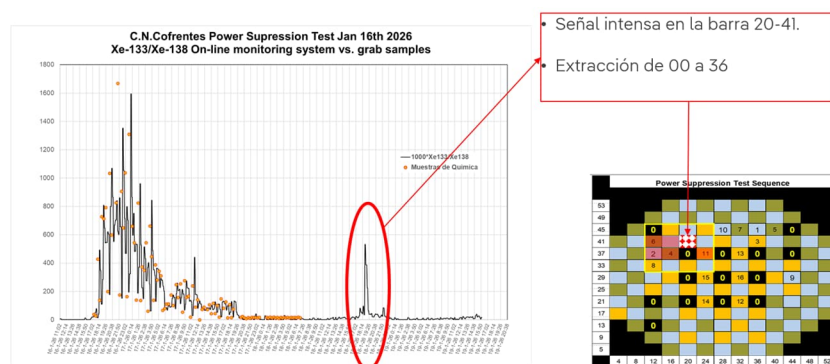


Figura 11. Resultados del PST. Fases I&II. Sistema de monitorización on-line

Con objeto de evaluar la consistencia de esta interpretación, los datos obtenidos durante el ensayo fueron procesados posteriormente mediante XeDeT. La ejecución del modelo estándar reprodujo el resultado inicialmente obtenido por los analistas, situando la posición 12-37 como la localización de mayor probabilidad. Sin embargo, la posición finalmente identificada como real, 20-41, aparecía ya incluida entre las principales posiciones candidatas del núcleo.

La aplicación de modelos de difusión más elaborados, incorporando diferentes estrategias de ponderación espacial, permitió mejorar la capacidad de discriminación del algoritmo. Bajo estas condiciones, XeDeT identificó la posición 20-41 como la localización más probable del defecto utilizando únicamente la información disponible antes del cambio de secuencia, Figura 12. Este resultado demuestra la capacidad de la herramienta para integrar señales complejas y extraer patrones que no resultan evidentes mediante el análisis convencional.

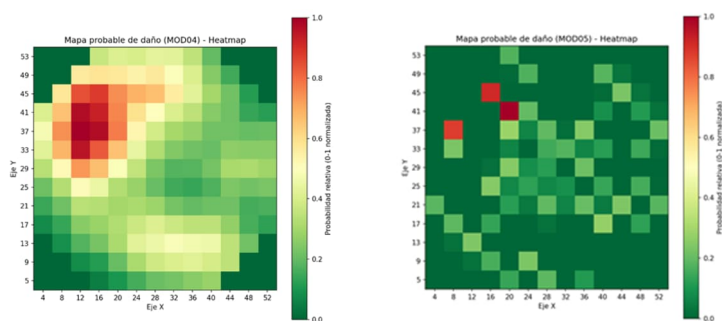


Figura 12. Resultados del PST. Mapa de probabilidad de fallo. XeDeT

El caso analizado constituye un ejemplo representativo de las dificultades que pueden presentarse durante la interpretación de un PST cuando existen múltiples respuestas positivas originadas por fenómenos de interacción neutrónica y variaciones globales de potencia. En estas circunstancias, la utilización exclusiva de criterios cualitativos puede conducir a zonas candidatas excesivamente amplias o incluso a interpretaciones ambiguas.

Los resultados obtenidos muestran que XeDeT proporciona una capacidad adicional de análisis al integrar de forma sistemática toda la información generada durante el ensayo y transformarla en distribuciones probabilísticas de localización del fallo. Su aplicación al evento del ciclo 26 permitió identificar correctamente la posición del elemento combustible defectuoso en un escenario especialmente complejo, confirmando el valor de la herramienta como apoyo al diagnóstico y a la toma de decisiones operativas.

4. CONCLUSIONES

La gestión de un combustible defectuoso exige una detección temprana del fallo y una localización precisa de la celda afectada para minimizar su evolución y garantizar el mantenimiento de unas condiciones de operación seguras. En este contexto, la correcta interpretación de los ensayos de supresión de potencia (PST) constituye un elemento clave para apoyar la toma de decisiones operativas.

La experiencia acumulada en CN Cofrentes ha puesto de manifiesto el valor del sistema de monitorización en línea del Off-Gas como herramienta para la detección temprana de defectos de combustible y para el seguimiento de la respuesta radioquímica asociada a los movimientos de barras de control. La disponibilidad de información continua permite mejorar significativamente la calidad del diagnóstico respecto a los métodos tradicionales basados exclusivamente en campañas periódicas de muestreo.

Con el objetivo de complementar este proceso de análisis, Iberdrola Generación Nuclear ha desarrollado la herramienta XeDeT, capaz de combinar información operacional y radioquímica para generar mapas probabilísticos de localización de fallos de combustible. La validación realizada sobre eventos históricos y casos reales ha demostrado la capacidad de la herramienta para reproducir correctamente la ubicación de elementos combustibles defectuosos y proporcionar un apoyo objetivo al trabajo de los analistas.

La aplicación de XeDeT al PST asociado al fallo detectado durante el ciclo 26 ha permitido evaluar su comportamiento en un escenario especialmente complejo, caracterizado por la presencia de múltiples señales positivas y una elevada incertidumbre en la interpretación de los resultados. En estas condiciones, la herramienta fue capaz de identificar correctamente la posición del elemento defectuoso mediante modelos avanzados de difusión y ponderación espacial, evidenciando su capacidad para discriminar entre señales directas e indirectas asociadas a los movimientos de barras de control.

Los resultados obtenidos confirman el potencial de XeDeT como herramienta de apoyo a la ingeniería de combustible en reactores BWR. Su utilización contribuye a reducir la incertidumbre asociada al análisis de los PST, mejorar la robustez de los diagnósticos y fortalecer el proceso de toma de decisiones durante la gestión de fallos de combustible. Asimismo, los resultados alcanzados permiten considerar futuras líneas de desarrollo orientadas a ampliar sus capacidades analíticas y su integración en las actividades de seguimiento y monitorización de la integridad del combustible.

5. REFERENCIAS

- [1] Y. Tofiño, A. Concejal, y J. Iglesias, «Gestión del ciclo con un combustible fallado », *51ª Reunión Anual de la Sociedad Nuclear Española*. Septiembre 2025.