

HERRAMIENTAS DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL PARA LA GESTIÓN DE COMBUSTIBLE IRRADIADO



MARTA BERRIOS TORRES

Ingeniera Nuclear
ENUSA INDUSTRIAS AVANZADAS S.A. S.M.E.



ALFONSO BARBAS ESPA

Ingeniero Nuclear
ENUSA INDUSTRIAS AVANZADAS S.A. S.M.E.

INTRODUCCIÓN

En una central nuclear, los elementos combustibles de óxido de uranio se introducen en el reactor, donde el alto flujo neutrónico induce reacciones nucleares como la fisión o diversas formas de activación. Además de desprender energía neta, el combustible sufre distintos cambios, de entre los cuales es especialmente significativo el cambio en su composición. En definitiva, debido a estas reacciones, las pastillas de óxido de uranio que se introducen en el reactor terminan conteniendo un amplio espectro de isótopos, entre los que podemos encontrar prácticamente la totalidad de elementos de la tabla periódica en distintas formas de agregación. Aunque en términos absolutos solo una parte minoritaria del uranio se ve afectada (en torno a un 93 % sigue siendo uranio al final de la vida útil del elemento), ese 7 % confiere propiedades completamente diferentes al elemento combustible, entre ellas la emisión de calor residual o de radiación neutrónica y gamma que condicionan su gestión posterior.

Un parámetro principal en la gestión del combustible irradiado es el quemado, que expresa la cantidad de energía que se ha obtenido (que, en última instancia, hace referencia al número de fisiones producidas) por unidad de uranio inicial (MWd/MTU). El quemado correlaciona fuertemente con diversas características del combustible como su calor residual, su radiactividad o su reactividad, por lo que suele usarse como indicador a la hora de gestionar su almacenamiento o transporte.

PREDICCIÓN DEL QUEMADO

Dado que el quemado no es un parámetro que se pueda medir directamente, es imposible utilizar medios puramente experimentales, por lo que su medición suele involucrar métodos mixtos, que incorporan simulaciones validadas con valores de planta o bien medidas reales del elemento apoyadas por simulaciones. Los métodos basados en simulaciones consisten en reproducir los ciclos de operación del reactor con todos sus elementos (validados mediante los parámetros reales obtenidos en planta) y utilizar distintas aproximaciones multinivel para determinar el transporte neutrónico y, con ello la cantidad de energía extraída de cada uno de los elementos combustibles.

En el caso de los métodos mixtos, lo habitual es medir la radiación gamma y neutrónica en el entorno del elemento por medio de detectores. La radiación que emite un elemento depende directamente de su isotopía mientras que esta, por su parte, depende del quemado, por lo que podemos trazar una relación entre estas magnitudes. No obstante, la relación de la isotopía con el quemado no es sencilla ni unívoca. Por un lado, la isotopía es una magnitud multidimensional, incluyendo un valor para cada uno de los cientos de isótopos que se pueden medir, mientras que el quemado es un valor único. Esta diferencia de dimensiones subtiende el hecho de que un mismo quemado se puede obtener con historias de irradiación diferentes (por ejemplo, con diferentes espectros neutrónicos, etc.) y, por tanto, los valores de algunos isótopos pueden tener una

correlación muy baja con el quemado o muy dependiente de terceros parámetros.

La idea consiste, por tanto, en escoger un conjunto mínimo de magnitudes a medir y de datos conocidos que permitan modelar la relación entre las primeras y el quemado con suficiente precisión. Las condiciones serían la de ser fácilmente mensurables y guardar la mayor correlación posible con el quemado. En concreto, suelen utilizarse las medidas de emisión neutrónica (que en su mayor parte y con los tiempos de enfriamiento habituales suelen provenir de los isótopos pares del curio) y las de emisión gamma en el pico del ^{137}Cs , que es especialmente reconocible y correlaciona, en una buena aproximación, linealmente con el quemado.

EQUIPOS Y CORRELACIONES PARA LA PREDICCIÓN DEL QUEMADO

Dentro de la familia de equipos SICOM, desarrollados con Tecnatom, ENUSA cuenta con el equipo SICOM-NG-FA [1], que permite medir el quemado de un elemento combustible basándose en medidas de su emisión neutrónica y gamma. Estas medidas se obtienen fijando el instrumento de medida al elemento combustible en el interior de la piscina y recorriendo dos veces sus cuatro caras a una velocidad conocida (Figura 1). A efectos del quemado, el valor de emisión neutrónica y gamma se obtendrá promediando los valores obtenidos para cada cara del elemento. De estas medidas, se obtendrá el quemado a través de correlaciones que reproducen las isotopías presentes. Para ello es preciso considerar cuatro factores:

- La relación entre las partículas emitidas totales (incluyendo reacciones secundarias) por el combustible y las captadas por el detector. En esta relación incluyen diversos efectos experimentales como los geométricos, la eficiencia del propio detector o la interacción de las partículas con el medio, y se captura por medio de una calibración inicial.
- La relación entre las partículas emitidas debido a las desintegraciones propias del combustible y las emitidas por reacciones secundarias. Mientras que esa relación es unitaria para gammas, la presencia de restos de ^{235}U y ^{239}Pu hacen que, en el caso de los neutrones, sea pre-

ciso considerar el factor de multiplicación subcrítica del sistema.

- La relación entre las partículas emitidas por desintegraciones del combustible y la isotopía, que se obtiene fácilmente con un cálculo determinista a partir de los datos nucleares.
- Finalmente, la relación entre la isotopía y el quemado que es, por todo lo dicho hasta ahora, la más difícil de describir.

Los últimos tres factores son los que se incluyen en las nuevas correlaciones que ENUSA ha desarrollado para obtener el quemado a partir de la fuente neutrónica y la actividad del ^{137}Cs . Estas correlaciones, así como la metodología de calibración, han sido incorporadas en el *software Supervisor* que procesa las señales de los detectores del equipo y calcula los perfiles axiales y el quemado medio del combustible inspeccionado.

El ajuste de las nuevas correlaciones se ha llevado a cabo simulando un conjunto de datos sintéticos generados mediante cálculos con SCALE 6.2 [2], empleando una población aleatoria de historias de irradiación. Para ello, se ha diseñado un espacio de parámetros relevantes (enriquecimiento inicial, quemado, número de ciclos...) y un método de selección basado en variables aleatorias sesgadas, con el fin de obtener una población representativa del inventario de una piscina de combustible gastado. Para evitar un espacio dimensional exageradamente grande, que obligaría a contar con una muestra mayor para reproducirlo convenientemente, estas simulaciones se han realizado asumiendo una serie de simplificaciones (ausencia de venenos consumibles, ausencia de perfil de quemado, etc.), cuyo impacto en la emisión gamma y neutrónica del combustible se ha evaluado mediante cálculos de sensibilidad específicos, a fin de valorar si es preciso incluir un sesgo en la correlación para incluir su efecto.

IA COMO HERRAMIENTA

Una de estas simplificaciones es la de considerar que los elementos no tienen venenos consumibles. En el estudio de sensibilidad pertinente se ha observado, en el caso de la fuente neutrónica, que existe una dependencia no lineal relevante de la presencia de venenos consumibles que pueden ser (1) integrados (barras de gadolinio con pastillas de $\text{Gd}_2\text{O}_3 + \text{UO}_2$) y (2) discretos (dispositivos WABA, *Wet Annular Burnable Absorber*), por lo que resulta necesario incorporar un sesgo en la correlación que, en función de los venenos consumibles contenidos, pueda corregir los resultados iniciales. El modelo con el sesgo incorporado debe ser capaz de predecir *online* el efecto de los venenos sobre la fuente neutrónica. En la física del problema influyen multitud de parámetros con dependencias no lineales, lo que requiere la generación de un modelo complejo utilizando herramientas de aprendizaje supervisado. De entre las distintas técnicas de Inteligencia Artificial disponibles se ha seleccionado como herramienta para la predicción del efecto de los venenos sobre la fuente neutrónica (y, por tanto, de los sesgos que se aplicarán sobre las correlaciones) los procesos gaussianos, que han mostrado un comportamiento robusto y poca sensibilidad al tamaño de la base de datos disponible.

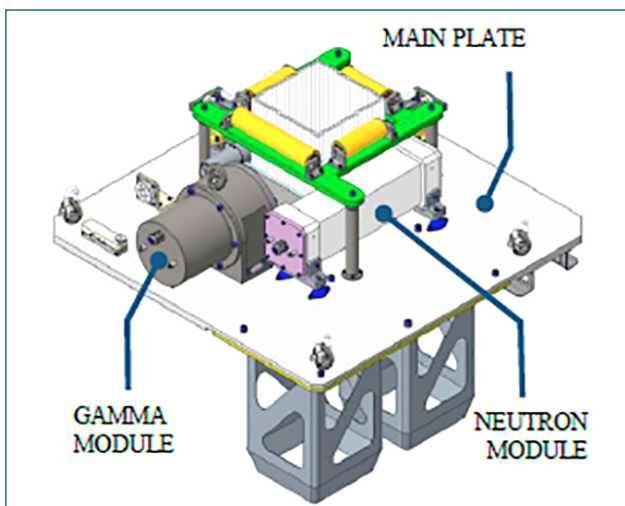


Figura1. Componentes principales del equipo SICOM-NG-FA [1].

GENERACIÓN DE DATOS

Venenos consumibles integrados

Para entrenar y validar la herramienta, se ha generado una población de elementos sin venenos y otra de elementos con distinto número (entre 8 y 24) y concentración (entre 4 % y 8 %) de barras de Gd, y el mismo enriquecimiento medio en ^{235}U . Para las dos poblaciones, se simulan en Polaris historias de irradiación hasta diferentes quemados (entre 15 000 y 60 000 MWd/MTU) y en ORIGEN diferentes tiempos de enfriamiento (que finalmente es un parámetro que no se correlaciona significativamente con la fuente neutrónica). Todo el proceso se ha llevado a cabo con la ayuda de una herramienta programada en Python que automatiza a través de plantillas los cálculos y hace un tratamiento posterior de los resultados.

Venenos consumibles discretos

Con una metodología equivalente a la anterior, se ha generado una población de elementos sin venenos y otra con WABA en 9 pasos de quemado, 4 enriquecimientos iniciales de ^{235}U y distinto número de barras con WABA (entre 4 y 24). Para simular la retirada de los WABA se ha simulado con TRITON un primer quemado de 21 000 MWd/MTU con presencia de WABA seguido de otro hasta 60 000 MWd/MTU sin ella. Los resultados finales se han obtenido mediante un cálculo de ORIGEN a 10 años de enfriamiento, ya que un estudio de sensibilidad específico ha revelado que no hay diferencias relevantes relacionadas con este parámetro. Todo el proceso se ha realizado a través de herramientas automatizadas de gestión de datos programada en Python.

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Para cada uno de los venenos se ha entrenado un proceso de regresión gaussiano implementado en Python mediante la librería *Scikit learn* [3] que permita predecir el efecto de los venenos sobre la fuente neutrónica y así poder corregir la correlación empleada para la predicción del quemado del elemento. Como kernel se ha utilizado una combinación lineal de una Función de Bases Radiales (RBF) y uno blanco. En las Figuras 2 y 3 se puede observar las predicciones al 95 % de los modelos de regresión obtenidos, fijando el número de barras de gadolinio y de WABA para que sea representable en 2D.

En el caso de las barras de gadolinio, el efecto en la fuente neutrónica depende del número de barras, la concentración del veneno y el quemado del elemento, siendo máximo el efecto global entre 15 000 y 20 000 MWd/MTU y prácticamente nulo para altos quemados. Es interesante destacar que en el modelo de barras de gadolinio se observa una incertidumbre elevada para quemados superiores a 45 000 MWd/MTU, que se debe a la falta de datos de entrenamiento a partir de ese quemado. Esta limitación no es preocupante, ya que el efecto del Gd una vez que se ha quemado es nulo, y por tanto no es necesario aplicar la corrección sobre la predicción de la correlación.

Con respecto a la presencia de WABA, la emisión neutrónica se ve afectada principalmente en el rango de quemados bajos disminuyendo este efecto cuando aumenta el quemado medio del elemento. También hay una dependencia relevante con el enriquecimiento inicial de ^{235}U y con del número de WABA insertadas, así como del diseño del elemento, por lo que el sesgo calculado incorpora un término dependiente

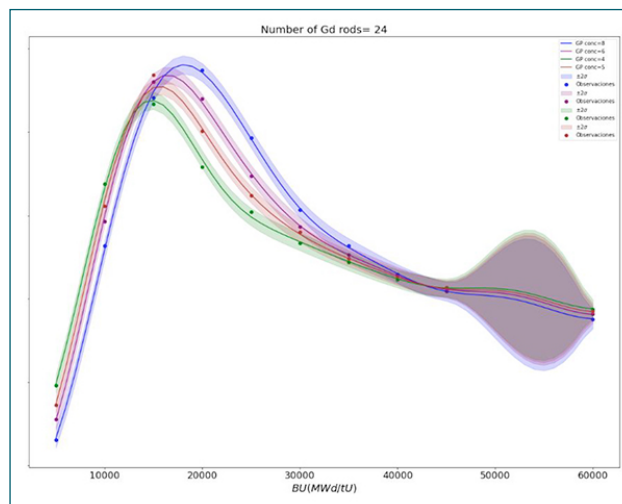


Figura 2. Modelo de regresión para 24 barras de Gd.

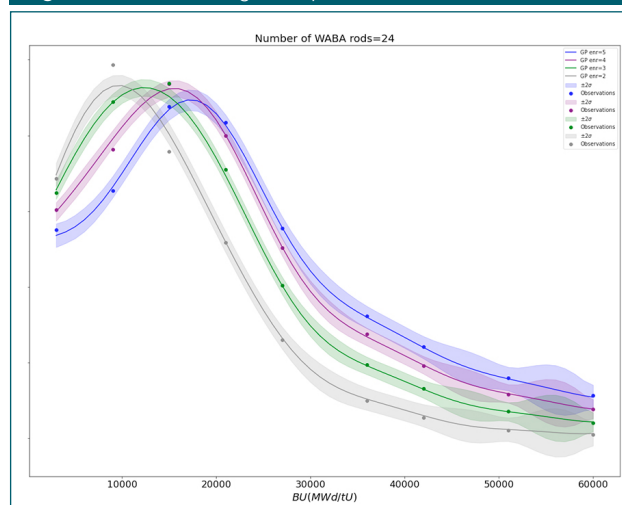


Figura 3. Modelo de regresión para 24 barras con WABA.

del cociente entre el número de barras con WABA y la masa de uranio del elemento.

Estos modelos representan relaciones no lineales multivariantes pero resultan relativamente sencillos de obtener gracias a esta técnica de aprendizaje supervisado y han sido incorporados en el *software Supervisor* que se suministra junto a equipo SICOM-NG-FA mediante scripts en Python [1]. De esta forma es posible corregir la predicción del quemado obtenida a partir de la emisión neutrónica y gamma, para elementos combustibles con venenos y reducir el error en la estimación.

Los autores quieren expresar su agradecimiento a Miriam Vázquez Antolín y Carlos Casado Sánchez por su contribución al desarrollo de este trabajo mientras formaban parte de ENUSA.

REFERENCIAS

- [1]. R. Rodríguez, J.M. Rodero, I. Sánchez, A. Ramos, M. Vázquez, H. Kim y M. Do, «Spent Fuel Burnup Measurement System. Evolution of SICOM-NG-FA for Republic of Korea Nuclear Power Plants », TopFuel, Raleigh, NC, 2022
- [2]. ORNL/TM-2005/39, Scale Code System Version 6.2.4, April 2020.
- [3]. «Scikit-learn: machine learning in Python - scikit-learn 0.24.2 documentation», 2022. <https://scikit-learn.org/stable/>