

COMBUSTIBLE TOLERANTE AL ACCIDENTE SEGÚN LA TAXONOMÍA VERDE DE LA UE



PILAR ORTEGO RESA

Combustible Diseño Nuclear
IBERDROLA GENERACIÓN NUCLEAR



CRISTINA MUÑOZ-REJA

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

INTRODUCCIÓN

En 2020, con el objeto de cumplir con los objetivos del *European Green Deal* para 2030, la Comisión Europea publicó un Reglamento de taxonomía verde, un sistema de clasificación de las actividades económicas y tecnologías de generación de energía eléctrica con el que se busca ofrecer a las empresas e inversores una definición clara de lo que es o no sostenible desde el punto de vista ambiental para la mitigación del cambio climático y que estarán dotadas de financiación europea.

A principios de 2022, la Comisión analizó ciertos aspectos de esta taxonomía, que habían quedado sin resolver, a través de Actos Delegados Complementarios (CDA), entre los cuales regulaba las actividades relacionadas con la energía nuclear [1].

Durante el desarrollo del Acto Delegado [1] se constata, entre otros aspectos, que existe en el mercado el llamado combustible tolerante a accidentes (*Accident Tolerant Fuel*, ATF), que ofrece una mayor protección ante accidentes derivados de daños estructurales en el combustible o los componentes del reactor.

El Acto Delegado no incluye una definición explícita de combustible tolerante al accidente pero el uso de los mismos en proyectos relacionados con la construcción de nuevas plantas nucleares de generación eléctrica o de prolongación de vida de las existentes, se impone como uno de los

requisitos en los criterios técnicos de taxonomía (*Technical Screening Criteria*) para la energía nuclear. Además, se establece 2025 como el año a partir del cual este tipo de combustible debe estar en uso, una vez aprobado por los organismos reguladores nacionales correspondientes, en las centrales nucleares que opten a las subvenciones de la Unión Europea.

Ante esta situación, la industria europea, representada por *nucleareurope* (anteriormente FORATOM), decidió activar un grupo de trabajo, compuesto por expertos en combustible nuclear de los diferentes estados europeos (*Ad Hoc Group*) con el objeto de ayudar a clarificar, en la medida de lo posible, la definición operativa del combustible ATF.

En primer lugar, una de las características atribuidas al combustible ATF en el Acto Delegado es que este combustible se encuentra disponible en el mercado actualmente para su incorporación al reactor.

El análisis realizado por el grupo de expertos del Acto Delegado Complementario llegó a la conclusión, consensuada entre todos los países participantes, de que existen combustibles actualmente operando en la mayor parte de las plantas nucleares europeas que cumplen las características establecidas en los diferentes apartados del Acto Complementario atribuidas al combustible tolerante al accidente.

TECNOLOGÍAS ATF DISPONIBLES A NIVEL COMERCIAL

Una de las características más destacables de la industria nuclear es la búsqueda de la excelencia en todas sus facetas. En lo que se refiere al combustible nuclear, cada nueva modificación realizada en los diferentes diseños disponibles en el mercado siempre se ha caracterizado por la mejora de algún aspecto relacionado con la fiabilidad del combustible o de su respuesta frente a los accidentes postulados.

Estas modificaciones siempre son aprobadas por los organismos reguladores de cada país sobre la base de la mejora de la seguridad nuclear y de los principios de defensa en profundidad.

Esta continua mejora evolutiva de los combustibles se ha dado y continúa dándose en todas las tecnologías existentes en los reactores de agua ligera (BWR, PWR y VVER) y en las distintos componentes que los forman tales como las pastillas de uranio, vaina, canal (en BWR) o el diseño mecánico del elemento.

Desde el punto de vista de la definición de combustible tolerante al accidente en el marco de la taxonomía, los combustibles que han ido incorporando alguna de estas modificaciones de diseño, con el objetivo de mejorar la respuesta ante accidentes o la propia fiabilidad de combustible se consideran combustibles tolerantes al accidente. A continuación se describe una muestra de las diferentes mejoras incorporadas a los diseños de combustible con el objetivo de mejorar la seguridad.

- **Pastillas de combustible PWR y BWR:** en los últimos tiempos se han desarrollado pastillas de uranio con diferentes aditivos con el objetivo de mejorar los márgenes de seguridad gracias a su mayor ductilidad, que limita la tensión de la vaina durante un transitorio y presentan una menor liberación de gases de fisión ante accidentes debido a su mayor tamaño de grano.
- **Vainas de combustible:** existen en el mercado diferentes aleaciones mejoradas aplicables al diseño de las varillas de combustible que contienen las pastillas de uranio. Estos nuevos materiales reducen la corrosión y, por tanto, la liberación y/o captura de hidrógeno, mejorando la respuesta ante accidentes del combustible. Como ejemplo de estos nuevos materiales de vaina en PWR se encuentra el Zirlo Optimizado de Westinghouse (también en VVER) o el M5 de Framatome.

- **Material del canal en BWR:** la estabilidad geométrica de los canales de combustible presentes en los diseños aplicables a los reactores de agua en ebullición (BWR) es fundamental para prevenir un exceso de fricción entre la barra de control y el elemento combustible. Un arqueo excesivo del canal podría impedir potencialmente la inserción de la barra de control en caso de requerir una parada inmediata del reactor. Por este motivo se han desarrollado en los últimos años aleaciones resistentes al arqueo, que han mejorado la respuesta del combustible ante accidentes al eliminar el riesgo de fricción excesiva por arqueo.
- **Diseño mecánico del elemento:** numerosas mejoras han sido incorporadas a los diseños mecánicos por los suministradores de combustible; desde la utilización de rejillas espaciadoras más resistentes a la mejora de la fiabilidad del combustible mediante la utilización de filtros antipartículas cada vez mas eficientes.
El uso de barras de longitud parcial y su estratégica localización contribuye, junto con las barras de agua, a aumentar las absorciones de neutrones disminuyendo la reactividad del elemento (BWR) y mejorando el margen de parada. El número de varillas de combustible por elemento ha ido aumentando desde los inicios de los BWR, de 6x6 a 10x10 e incluso 11x11. Esta evolución hacia un mayor número de varillas con menor diámetro reduce la potencia por varilla, así como las temperaturas de la vaina y el combustible y el *stress* de la vaina. De esta manera se consigue una mayor flexibilidad en el diseño de elemento y núcleo así como una ganancia en los márgenes de seguridad.

Un ejemplo muy claro del esfuerzo de la industria en el desarrollo de combustibles cada vez más seguros y fiables es el desarrollo de nuevos materiales para los canales de combustible BWR resistentes al arqueo. La solución aportada por los tres grandes desarrolladores de combustible para los canales BWR introducidos recientemente en los reactores comerciales, da buena cuenta de ello. Así el *Low Tin Zirlo* (LTZ) de Westinghouse, el NSF (aleación de zirconio) de GNF y la aleación Z4B de Framatome han demostrado su efectividad ante potenciales problemas de inserción de barras de control.

Como dato relevante, la introducción de estos 3 materiales se inició hace más de 10 años y, aún hoy, todavía no hay un núcleo entero operando compuesto por ellos.

En el caso de la C.N. Cofrentes, se empezó implementando el LTZ en 2007 para luego incluir NSF y Z4B en 2015 y 2019, respectivamente. En la actualidad, 15 años después, el 99,4 % del núcleo está formado por canales con estos materiales ATF. En la Tabla 1 se presenta la distribución de

CICLO	BOC	NÚMERO DE CANALES POR MATERIAL Y CICLO					TOTAL	% (LTZ+NSF+Z4B)
		LTZ	NSF	Z4B	Zr-2	Zr-4		
17	28/07/2007	4			616	4	624	0,64 %
18	16/10/2009	4			617	3	624	0,64 %
19	09/11/2011	12			569	43	624	1,9 %
20	28/10/2013	76			456	92	624	12,2 %
21	11/11/2015	200	48		211	165	624	39,7 %
22	27/10/2017	285	171		61	107	624	73,1 %
23	05/12/2019	327	253	12	1	31	624	94,9 %
24	13/12/2021	200	412	8	2	2	624	99,4 %

Tabla 1. Introducción de material de canales ATF en la central nuclear de Cofrentes.

canales por ciclo en la C.N. Cofrentes y el porcentaje de material resistente al arqueo en cada uno.

TECNOLOGÍAS ATF EN FASE EXPERIMENTAL

Además de las mejoras mencionadas en el apartado anterior en cuanto al combustible nuclear se refiere, pero aún en fase de investigación y desarrollo, se encuentran otros nuevos combustibles, los cuales son conocidos en la industria como E-ATF (*Enhanced-ATF*). En este sentido, existen numerosos proyectos a nivel mundial para el desarrollo de combustibles con la capacidad de dotar a los sistemas de seguridad de un mayor tiempo de actuación en caso de accidente (los llamados *coping times*) evitando así el deterioro del núcleo.

En la actualidad, ninguno de estos nuevos desarrollos se encuentra suficientemente testado como para que su operación sea admitida en recargas de reactores comerciales por la autoridad reguladora y tampoco están disponibles a nivel comercial, imposibilitando aún su uso generalizado en reactores comerciales.

Dentro de estos proyectos experimentales, existen dos tipos bien diferenciados en función de la base de la evolución de sus mejoras: los que podrían estar operativos a “corto plazo” (*near-term ATFs*), los cuales se basan en modificaciones de materiales ya existentes y en un estado más avanzado de investigación; y los que lo estarán en el “largo plazo” (*long-term ATFs*), basados en materiales avanzados y en un estado muy preliminar de investigación sin garantía cierta de poder llegar a ser soluciones viables en el futuro.

Las principales líneas de investigación para los ATF a corto plazo son:

- Recubrimiento de cromo para la vaina,
- Aleaciones FeCrAl para la vaina, y,
- Mejoras adicionales en el campo de las pastillas dopadas.

En cuanto a las líneas de investigación de los ATF a largo plazo estarían, entre otros:

- Materiales para la vaina: SiC como material base.
- Materiales para la pastilla: nitruros de uranio, siliciuros y carburos, además de combustibles metálicos (aleaciones U-Zr) y TRISO-SiC.

Estado, fases y duración del desarrollo y licenciamiento de proyectos E-ATF

Como ya se ha mencionado, los proyectos relacionados con el concepto de E-ATF en el largo plazo se encuentran aún en una fase muy preliminar sin garantía cierta de éxito.

Por otro lado, los relacionados con el concepto E-ATF en el corto plazo se encuentran en una etapa más avanzada de pruebas para demostrar que estas nuevas tecnologías funcionan, al menos, tan bien como las que actualmente hay implementadas, tanto a nivel de operación normal como accidental. Esto requiere, entre otros, de unas pruebas de irradiación que, por lo general, solo involucran a unas cuantas varillas de E-ATF, en una planta nuclear en concreto con la aprobación del organismo regulador correspondiente.

Sin embargo, los ensayos antes de la irradiación de unas pocas barras o su irradiación son solo los primeros pasos para obtener el licenciamiento para operación comercial en recargas, de un nuevo combustible en un país concreto ya que, también se completan la inspección del E-ATF en la planta o incluso, su transporte a celdas calientes donde sufran ensayos tanto destructivos como no destructivos.

En ocasiones, la varilla irradiada se fragmenta y se vuelve a fabricar para ensayos específicos en un reactor experimental ante condiciones accidentales. Todo este proceso, desde el final de la irradiación hasta la obtención de datos acerca del comportamiento del nuevo material, conlleva décadas. Tras esta etapa empezaría el proceso de licenciamiento como tal con el organismo regulador.

Una vez licenciado el E-ATF, el reactor necesitaría de varias recargas completas con ese nuevo combustible (de 4 a 6 años) para tener un núcleo completo y que se pueda considerar que se ha producido el cambio a tecnología E-ATF.

En la Figura 1 se muestra un ejemplo optimista de lo que podría durar el desarrollo de un nuevo E-ATF, aunque existen muchas otras consideraciones a tener en cuenta y que podrían extender el proceso considerablemente antes de tener la nueva tecnología disponible a nivel comercial.

Además de todos los requisitos para el licenciamiento del nuevo E-ATF, hay que tener en cuenta:

- Incluso si llegara al mercado un nuevo E-ATF, esto no significa que sea compatible con toda la tipología de reactores, razón por la cual no puede apostarse por la investigación de una sola solución E-ATF.
- Además, una vez la solución E-ATF esté en el mercado, la cadena de suministro tendrá que adaptar su capacidad de fabricación para abastecer todos los reactores a los que la solución vaya a aplicar.
- No existe un conocimiento avanzado sobre el comportamiento que los nuevos E-ATF tendrán en la segunda parte del ciclo ni su compatibilidad con los métodos de reprocesado actualmente existentes. Se necesita, por tanto,

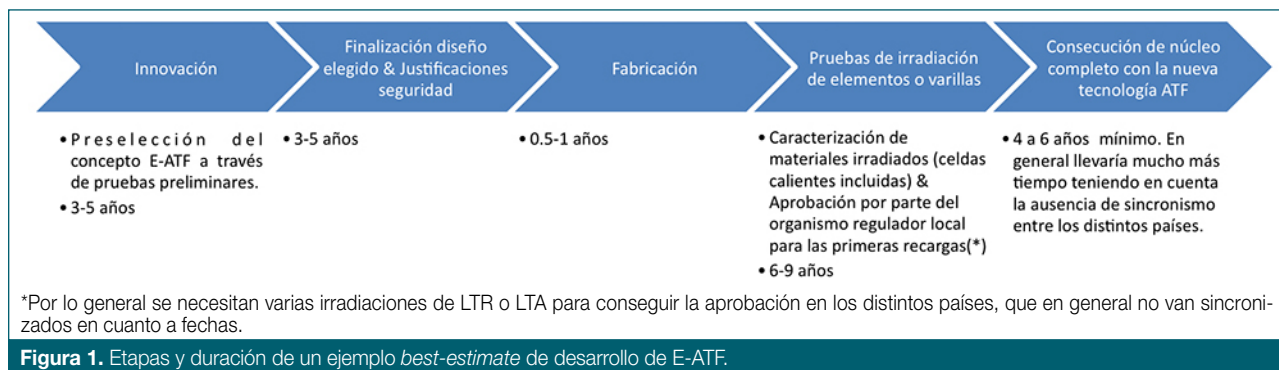


Figura 1. Etapas y duración de un ejemplo *best-estimate* de desarrollo de E-ATF.

integrar programas específicos de investigación en este sentido en el desarrollo de los E-ATF.

Estado actual general de desarrollo de proyectos E-ATF

Hasta el momento, tan solo hay alrededor de unas 300 varillas de E-ATF en LTA (elementos de demostración) o LTR (barras de demostración) distribuidas en algunos reactores alrededor del mundo. Considerando que un reactor tiene entre 25000 y 75000 varillas, el número total de varillas E-ATF bajo irradiación en todo el mundo representa tan solo un 1 % del total de las que operan en un solo reactor comercial. Ningún organismo regulador ha aprobado por el momento el uso de una recarga completa con tecnología E-ATF.

En cuanto a la cuantificación del aumento de los *coping times* de los E-ATF, los cálculos predicen un aumento de los mismos del orden de horas [2] lo que se considera una ganancia menor que la inicialmente esperada cuando se inició su desarrollo.

CONCLUSIONES

El sector nuclear se encuentra siempre inmerso en un continuo proceso de I&D para impulsar tecnologías ATF, que mejoren la tolerancia de los reactores nucleares ante accidente. De esta manera, cada versión nueva de un tipo de combustible es más segura que la anterior y ofrece mayor protección ante accidentes.

El AHG lanzado por *nucleareurope* en representación de la industria nuclear europea, ha analizado la situación de

las diferentes tecnologías comercialmente disponibles y ha constatado que:

- Tienen una probada resistencia a los accidentes y que, en la mayor parte de los diseños, han sido desarrollados con un objetivo de mejora en la seguridad por encima de un objetivo económico.
- Que son los únicos actualmente disponibles comercialmente.
- Que han sido aprobados para su operación por el regulador del país en el que operan.
- Y que, con los criterios técnicos de taxonomía verde redactados por la Comisión Europea en [1], son combustibles ATF.

El grupo también ha constatado la existencia de nuevas tecnologías futuras, en diferentes grados de maduración, como las denominadas E-ATF. Así como otros desarrollos aún más revolucionarios, en fase experimental. Tras el análisis de la planificación aproximada que se ha realizado, no se prevé tener ninguna de ellas implementada en un núcleo a gran escala antes de 2030.

REFERENCIAS

- [1]. «Annex 1 of the Commission Delegated Regulation (EU) 2022/1214 of 9 March 2022».
- [2] EPRI, «Gap Analysis of Accident Tolerant Fuel concepts, Higher Burnup, and Increased Enrichment Under Severe Accidents» 2021 Technical Report.■