

Propulsión nuclear en la marina mercante: retos para su introducción

TRADUCCIÓN Y RESUMEN DEL LIBRO BLANCO PUBLICADO POR DNV

La necesidad de descarbonización del transporte marítimo está llevando a considerar opciones energéticas que durante décadas han resultado inviables para la flota mercante mundial. Tras unos pocos proyectos civiles en los años 60 y 70 del siglo pasado, que no tuvieron éxito, la energía nuclear vuelve a aparecer como alternativa de propulsión por no producir emisiones y por unos costes potencialmente más estables que opciones como los combustibles sintéticos.

A cambio, su introducción tendrá que superar barreras mucho mayores: una inversión inicial alta; unas exigencias de seguridad y protección muy

superiores a las habituales del transporte marítimo convencional y la necesidad de combinar dos entornos regulatorios, el marítimo y el nuclear, muy distintos.

Para DNV, la aceptación de la energía nuclear como sistema de propulsión a bordo de los buques mercantes civiles dependerá de la capacidad para demostrar, de forma verificable, que los riesgos de seguridad, protección y de usos indebidos (la posibilidad de utilizar tecnología nuclear civil como base para el desarrollo de un arsenal militar) están sujetos a una supervisión capaz de generar confianza pública y coherencia internacional.

La vuelta de la propulsión nuclear marítima civil

La experiencia civil con buques nucleares a lo largo de la historia ha sido escasa y no consiguió una consolidación comercial. Los proyectos *Savannah* (1962), *Otto Hahn* (1964) y *Mutsu* (1969) demostraron la viabilidad técnica, pero no la operativa o económica. Equipados con reactores de agua a presión (*Pressurized Water Reactor, PWR*), similares a los utilizados en instalaciones terrestres, exigían una continua monitorización y sistemas de seguridad activos. A esto se sumaba la pérdida de capacidad de carga por la instalación nuclear y la necesidad de grandes dotaciones (hasta tres veces más personal que un mercante convencional, en el caso del *Savannah*) altamente cualificadas, lo cual tenía un impacto directo en los costes operativos y en la complejidad de la operación.

Así pues, aunque algunos países, en particular Estados Unidos, Reino Unido, Francia, Rusia y China, utilizan hoy en día la energía nuclear de forma extensiva

tanto en el ámbito civil como en el militar, su despliegue en la generación eléctrica en tierra y en la propulsión nuclear marítima no avanzó como se esperaba. Sin embargo, actualmente la energía nuclear está resurgiendo como una fuente de energía libre de emisiones frente a los combustibles fósiles, tanto para la generación en plataformas marítimas como para sistemas de propulsión.

Según DNV, este interés se explica por una menor dependencia de la infraestructura tradicional de suministro de combustibles y por la posibilidad de operar a la velocidad de proyecto del buque sin verse penalizado por las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), ya que muchos buques navegan por debajo de esa velocidad para reducirlas.

Preparación de la tecnología de propulsión nuclear civil

La propulsión nuclear marítima no se reduce a instalar un reactor a bordo de un buque. El principal desafío se encuentra en lo que el libro blanco de

DNV denomina el 'ciclo del combustible nuclear', es decir, el conjunto de etapas que abarca desde la extracción del mineral, el enriquecimiento y la fabricación del combustible, la operación del reactor y la generación de energía, hasta el almacenamiento y la disposición final del combustible gastado, que sigue siendo altamente radiactivo. Este ciclo está perfectamente definido en el sector nuclear terrestre, pero la limitada experiencia marítima no ha permitido su desarrollo.

Según DNV, solo Rusia, único país que ha seguido operando buques nucleares para uso civil, ha desarrollado un ciclo de combustible nuclear marítimo a escala industrial, con diez rompehielos nucleares con base permanente en Murmansk y una central nuclear flotante operativa en Pevek.

Dentro del 'ciclo del combustible nuclear' marítimo existen una serie de elementos diferenciadores respecto a la generación de energía nuclear terrestre. Entre ellos destacan los puertos y astilleros.

A diferencia de una central nuclear convencional, una instalación nuclear marítima se desplaza y opera dentro de una red internacional de escalas. Eso convierte a puertos y astilleros en elementos críticos de ese ciclo: recargas de combustible, inspecciones programadas,

(PASA A PÁGINA 21)

DNV

Tres de los ocho rompehielos nucleares de la flota rusa actualmente en activo // ROSATOM.



(VIENE DE PÁGINA 20)

mantenimiento general del buque y, por supuesto, la gestión, el traslado y el almacenamiento de los residuos asociados al combustible gastado.

Todas estas operaciones son complejas y deben llevarse a cabo con las correspondientes licencias, medidas de seguridad y planes de emergencia. Para DNV, las operaciones nucleares deberían coincidir con los periodos de mantenimiento del buque. En la práctica, esto encaja con el ciclo de varadas obligatorias cada cinco años, lo que obliga a diseñar rutas logísticas y puntos de servicio muy concretos, previamente autorizados.

Un reactor en el mar no es una central en tierra y su diseño está condicionado por múltiples factores externos. Está expuesto al movimiento del mar, a veces con oleaje violento, a vibraciones, a restricciones de espacio y peso dentro del buque y a perfiles operativos muy distintos de los de una central nuclear terrestre.

Para evaluar la situación actual de la tecnología nuclear marítima, el libro blanco de DNV enumera una serie de características preferidas en los prototipos de reactores que se están desarrollando actualmente para uso marítimo.

En primer lugar, el tamaño y la configuración del sistema: uno, dos o más módulos. A mayor número de módulos, en principio, mayor coste, peso y empacho a bordo, pero también mayor redundancia, fiabilidad y potencia disponible. No obstante, a partir de cierto umbral, el empleo de módulos estandarizados de reactores pequeños instalados en serie podría abaratar costes y simplificar procesos, mejorando la fiabilidad global. Estudios previos han determinado que una potencia

del orden de 40 MW sería suficiente para cubrir las necesidades energéticas de un portacontenedores de 15.000 TEU. Persiste, sin embargo, la duda de si una serie de reactores más pequeños, estandarizados e instalados en una configuración multirreactor, sería más adecuada para la navegación mercante que un único gran reactor. Esa opción podría simplificar la operación y el mantenimiento y, en consecuencia, reducir o incluso eliminar la necesidad de disponer a bordo de una tripulación especializada.

Para que la propulsión nuclear marítima sea aceptable a escala comercial y regulatoria, se insiste en priorizar la 'seguridad inherente' y, cuando sea posible, la seguridad pasiva (sin intervención humana inmediata ni sistemas activos, como bombas o válvulas). Es aquí donde aparecen alternativas a los reactores de agua a presión utilizados hasta la fecha en instalaciones terrestres y en la propulsión naval militar, como, por ejemplo, los sistemas de cuarta generación refrigerados por sales fundidas o metales líquidos.

Un requisito operativo es que el intervalo entre recargas de combustible sea de al menos cinco años para coincidir con las varadas programadas del buque. De este modo, las recargas solo se llevarían a cabo en determinados astilleros designados, con la infraestructura y el personal cualificado necesarios.

Finalmente, cabe considerar la configuración del sistema de propulsión: nuclear-mecánica frente a nuclear-eléctrica. En la nuclear-mecánica, el calor del reactor se convierte en energía mecánica mediante turbinas de vapor acopladas a la línea de ejes. En la nuclear-eléctrica, el reactor alimenta un turbogenerador que suministra electricidad a los motores de propulsión y al resto de sistemas del buque.

Familias tecnológicas candidatas: de lo probado a lo avanzado

Históricamente, tanto los buques militares propulsados por energía nuclear como los escasos proyectos civiles han optado por reactores de agua a presión (PWR), por ser una tecnología madura y probada en instalaciones terrestres, aunque sus inconvenientes para hacerlos comercialmente viables son bien conocidos. La experiencia militar con esta tecnología es extensa, pero su traslación al ámbito civil no es directa. Son necesarios estándares verificables, transparencia regulatoria y aceptación pública.

Pero el interés actual se extiende a varias familias de reactores avanzados, muchas de ellas agrupadas bajo el paraguas de los pequeños reactores modulares (SMR) y de diseños aún más compactos. Entre estas opciones se encuentran los reactores refrigerados por gas de alta temperatura con combustibles tipo

(PASA A PÁGINA 22)

TIPOS DE REACTORES NUCLEARES PARA USO MARÍTIMO						
	Nuclear convencional	Nuclear avanzado				Otros
Tipo de reactor, térmico/rápido	Reactores de agua a presión (PWR)	Reactores de alta/ muy alta temperatura (VHTR)/(HTR)	Reactores refrigerados por sales fundidas (MSCR)	Reactores refrigerados por metal líquido (LMCR)		Reactores de tubo de calor
	Térmico	Térmico	Térmico	Rápido	Intermedio/ rápido	Térmico
Potencia nominal MWt, SMR/microreactor/ batería nuclear	Por encima de 20 MWt SMR	Por encima de 10MWt SMR, microreactor, batería nuclear	Por encima de 10 MWt SMR, microreactor	SMR, microreactor	Por encima de 10 MWt SMR, microreactor	Hasta 5 MWt batería nuclear
Refrigerante	Agua	Refrigerado por gas (helio) (monofásico)	Sal fluorurada	Sal clorurada	Plomo	Sodio o equivalente
Moderador	Agua	Grafito	Grafito, otros materiales			Grafito, otros materiales
Tecnología del combustible, material, geometría, homog./heterog.	UO ₂ combustible cerámico HALEU* barras heterogéneo	TRISO HALEU* heterogéneo	TRISO combustible en esferas HALEU* heterogéneo	Combustible líquido homogéneo	Cerámico metálico barras heterogéneo	Nitruro de uranio, aleaciones uranio-zirconio, barras, heterogéneo
Proyectos relevantes	• KEPCO (News, 2020) • Prodigy (Floating Nuclear Reactor Project Set for 2030 Debut in Canada, 2024)	• HOLOS (Holosgen, 2025) • BWXT (BWXT, 2022) • Nano Nuclear Energy, antes Ultrasafe (Energy, 2025)	• Kairos Power (Power K., 2025) • Seaborg Technologies (Seaborg, 2025) • Jiangnan shipyard (NucNet, 2024)	• Naarea (Naarea, 2025) • Core Power (Terrapower) (Power C., 2025)	• Newcleo (NewCleo, 2025)	• Westinghouse (eVinci) con Prodigy (Westinghouse, 2025) • Core Power (Terrapower) (Power C., Benefits of the Heat Pipe Reactor, 2025)

*HALEU: Uranio de Alto Ensayo y Bajo Enriquecimiento

(VIENE DE PÁGINA 21)

TRISO (combustible nuclear avanzado compuesto por micropartículas de uranio recubiertas por capas de materiales cerámicos que confinan la radiación); los reactores refrigerados por sales fundidas (con variantes de combustible sólido o disuelto) y los reactores rápidos refrigerados por metal líquido.

En el ámbito marítimo existe interés por proyectos para reactores refrigerados por plomo, un metal con un elevado punto de ebullición, aunque con el reto de mantener las temperaturas por encima del punto de fusión para evitar la solidificación del refrigerante. Se trata de una alternativa al sodio, un elemento muy reactivo con agua u oxígeno.

También aparecen los sistemas de tubos de calor (*Heat Pipe Reactors*), que se

caracterizan por transferir calor sin equipos auxiliares complejos, por ejemplo, bombas. Con un mantenimiento mínimo, son especialmente adecuados para operar en lugares remotos y aislados; de hecho, se utilizan en aplicaciones espaciales. Como contrapartida, no tienen una trayectoria operativa extensa en rangos de potencia de varios MW.

Acuerdos y normativas internacionales y nacionales

El reto regulatorio para la adopción de la energía nuclear marítima a gran escala se define por una doble exigencia. Por un lado, se debe cumplir el marco marítimo internacional (seguridad del buque, prevención de la contaminación, inspecciones por el Estado rector del puerto, etc.) y, simultáneamente, el marco nuclear

(seguridad radiológica, seguridad física, salvaguardias, evitar usos indebidos, preparación ante emergencias). El transporte marítimo internacional se apoya en un sistema relativamente armonizado de convenios y roles (Estados de bandera, ribereños y portuarios; organizaciones internacionales; inspecciones y certificaciones), mientras que la regulación nuclear es nacional, con un sistema de licencias por país.

En principio, los buques nucleares tienen los mismos derechos de paso inocente y libertad de navegación que los convencionales. Dentro de los instrumentos marítimos, el Convenio Internacional para la seguridad de la vida humana en el mar (Convenio SOLAS) establece el marco de requisitos básicos, y el Código de Seguridad para Buques Mercantes Nucleares (CSNMS, 1981) es una guía para el proyecto, construcción, operación y certificación de buques mercantes nucleares. Hay que tener en cuenta que estas disposiciones se formularon con supuestos asociados a los reactores PWR, por lo que ya se ha iniciado el proceso

(PASA A PÁGINA 23)

(VIENE DE PÁGINA 22)

de actualización del marco. El Comité de Seguridad Marítima de la OMI ha decidido actualizar secciones relevantes del Convenio SOLAS y del CSNMS por estar desfasadas.

Los Estados de bandera van a tener un papel fundamental, puesto que son los encargados de emitir certificados específicos, aprobar el manual operativo, evaluar la seguridad y establecer la cobertura de responsabilidad. Los Estados ribereños también pueden imponer requisitos no discriminatorios, regular el acceso a puerto y exigir medidas de preparación ante emergencias. A estos actores se suma la función histórica de las sociedades de clasificación como tercera parte independiente con presencia global, capaces de apoyar una aplicación más uniforme de un marco marítimo que, por naturaleza, requiere coherencia internacional.

Además, el Organismo Internacional de Energía Atómica está impulsando la iniciativa ATLAS (*Atomic Technologies Licensed for Applications at Sea*) con el fin de establecer un marco global para el despliegue seguro de aplicaciones nucleares civiles en el mar, incluidos los pequeños reactores modulares (SMR) y las centrales nucleares flotantes. También han surgido otras iniciativas, como la Organización de la Energía Nuclear Marítima (NEMO).

El encaje con el mundo nuclear introduce una figura organizativa especialmente exigente: el operador de la instalación, con obligaciones amplias en competencia técnica, cultura de seguridad, protección, aseguramiento financiero, desmantelamiento y, en muchos países, responsabilidades de largo plazo. Ese rol no coincide necesariamente con el perfil organizativo típico de un armador, lo que afecta directamente a la forma en que podría estructurarse la propiedad del reactor, su operación y la asignación de responsabilidades.

Modelos de negocio y costes

En el ámbito mercante, la decisión de inversión se mueve por los costes, disponibilidad, riesgo operativo, acceso a financiación y flexibilidad comercial. En el ámbito nuclear, los proyectos han estado históricamente asociados a licenciamiento complejo, percepción pública sensible, horizontes de décadas y

una relación estrecha con gobiernos y reguladores.

El reto comercial incluye definir quién es el operador responsable de la instalación, así como quién asume el combustible y el fin de vida, en un entorno donde la propiedad y el control operativo pueden separarse y los activos cambian de manos con frecuencia. Asignar ese rol al armador puede ser problemático por las enormes diferencias entre la organización típica de un armador y la de un licenciario nuclear terrestre (capacidades, cultura de seguridad, obligaciones a largo plazo).

Una opción destacada para compatibilizar ambas lógicas es la 'servitización' mediante leasing del reactor. En lugar de que el armador compre y opere un activo nuclear como propietario pleno, se plantea una relación contractual en la que el reactor se arrienda y se paga una cuota anual que integra amortización y condiciones financieras, más un componente de OPEX específico que incluya partidas como la monitorización remota, las recargas de combustible, fondos para el reciclaje del buque y otras obligaciones adicionales. Este enfoque puede estabilizar el coste energético y reducir la prima de riesgo asociada a la incertidumbre sobre los precios de los combustibles alternativos.

Conclusiones para que exista una adopción civil de la propulsión nuclear marítima

Así pues, la introducción comercial de la propulsión nuclear en buques mercantes queda condicionada a que concurren, simultáneamente, una serie de circunstancias.

● **Tecnología y operación adaptadas al mar.** La opción elegida será la que combine una tecnología compacta, con intervalos largos entre recargas de combustible, seguridad inherente o pasiva y una operación compatible con tripulaciones convencionales (debidamente formadas), apoyada en sistemas automáticos y con control y monitorización remotos. La potencia requerida depende de cada segmento y, en los buques de mayor porte, se maneja un rango de decenas de MW, con referencias de instalaciones máximas del orden de 100 MW en grandes buques.

● **Ciclo de combustible y logística portuaria.** No hay solución posible sin una infraestructura de puertos y astilleros especialmente habilitados para la recarga de combustible, el mantenimiento del buque, el almacenamiento intermedio y la gestión del combustible gastado, además de procedimientos robustos de transporte, seguridad física y protección radiológica. La experiencia rusa muestra que la continuidad del ciclo marítimo requiere organización e infraestructura dedicadas.

● **Marco regulatorio internacional y aceptación.** La existencia de instrumentos como SOLAS y CSNMS es relevante, pero también se reconoce que ciertas disposiciones se formularon pensando en reactores de agua a presión y pueden resultar restrictivas para tecnologías avanzadas; por tanto, es necesaria una renovación de dichos instrumentos, que ya está en marcha. La responsabilidad de los Estados de bandera, el poder regulatorio del Estado rector del puerto y el papel de las sociedades de clasificación serán determinantes para un tratamiento uniforme y predecible a escala global.

● **Modelo de negocio y asignación de responsabilidades.** El rol del titular responsable de la instalación nuclear y el reparto de obligaciones a largo plazo (incluido el reciclaje del buque) obligan a repensar propiedad y operación. El leasing del reactor aparece como un mecanismo para estabilizar costes y distribuir riesgos, pero su éxito dependerá de cómo se diseñe la gobernanza del sistema (quién opera, quién responde, quién asegura, quién gestiona los residuos y la cadena de suministro).

En términos de competitividad, el caso mejora cuanto más rápido y exigente sea el camino hacia el objetivo de cero emisiones netas (net-zero), porque eleva el coste total de las alternativas fósiles, penalizadas por sus emisiones de carbono, y desplaza la flota hacia combustibles más caros. Un entorno de precios de combustibles muy superiores a los actuales es el que haría económicamente plausible la entrada de la propulsión nuclear, teniendo en cuenta que los costes específicos de los reactores todavía son inciertos y dependerán de si se alcanza una producción en serie y estandarizada.

ANAVE, como editora de anave.es, no se hace responsable de la fidelidad de los datos publicados por las fuentes. Se autoriza la reproducción total o parcial de este artículo, siempre que se cite a ANAVE como fuente.