

ENERGÍA NUCLEAR EN EL TRANSPORTE MARÍTIMO DE ALTA VELOCIDAD *

Julio Vergara Aimone **



Introducción.

En un artículo anterior de Revista de Marina, se expuso acerca de la oportunidad de reactivación del transporte marítimo en el segmento de transporte rápido, aprovechando el incremento de intercambio comercial, para arrebatar una parte del transporte aéreo de menor valor unitario. Esta posibilidad se lograría en la medida que la arquitectura naval explorase agresivamente nuevos diseños hidrodinámicos para escapar de las limitaciones impuestas por la resistencia al avance, lo cual está acoplado al uso de propulsores diferentes a la hélice y a la instalación de mayor potencia en los buques.

También se señaló que ya existen empresas participando en el transporte rápido, y otras de creciente envergadura se disponen a salir pronto al mercado. Entre éstos destaca la firma *FastShip Atlantic Inc.*, configurada para competir contra la aviación en el transporte de carga transatlántica, comunicando los puertos de Filadelfia y Cherburgo, los cuales serán equipados con instalaciones dedicadas para un manejo rápido y automatizado de contenedores en modalidad *Roll-On Roll-Off*, y así poder ofrecer una

alta rotación. Ya se ha aprobado parte de las obras portuarias que se dedicarán a este servicio. Para ser efectivo, se contempla un sistema logístico ampliado, de modo de evitar que los beneficios del transporte marítimo rápido se diluyan por limitaciones o retrasos en la distribución final de la carga.

En el presente artículo, se intenta demostrar la viabilidad económica de la propulsión nuclear como fuente de poder alternativa para alta demanda de potencia. Para el desarrollo de este ejercicio, se ha elegido el proyecto *FastShip* como referencia, pudiendo adaptarse éste a diseños análogos de alto consumo de combustible. Por esto, primero se intentará confirmar la viabilidad económica de este proyecto, definiendo el marco de operación rentable, para luego evaluar la factibilidad de la propulsión nuclear en el mismo tipo de servicio, con el mismo casco, velocidad, ruta y tipo de propulsores. En este trabajo se expondrá la planta nuclear que mejor se acomoda a este tipo de buques, y se definirán sus atributos y limitaciones.

El Proyecto *FastShip*.

Éste corresponde a un sistema de transporte marítimo de alta velocidad que ha despertado interés comercial en el corto plazo, utilizando para ello una flota de cuatro buques con monocasco de semiplaneo

* Adaptado de la presentación "Nuclear Power in High-Speed Cargo Vessels", dada el 2 de junio de 2000, en la ciudad de Victoria, Canadá, en la Conferencia "High-Speed Vessels 2000 & Beyond".

** Capitán de Fragata, Licenciado en Ciencias Navales e Ingeniero Naval Mecánico (A.P.N.). M.B.A. de la Universidad Adolfo Ibáñez. Ph.D. en Nuclear Materials Engineering, M.Sc. en Naval Architecture and Marine Engineering, M.Sc. en Materials Engineering, y M.Sc. en Nuclear Engineering del Massachusetts Institute of Technology. Profesor de Postgrado de Arquitectura, Construcción e Ingeniería Naval de la A.P.N. Destacado Colaborador, desde 2001.

(SPMH), -geometría común en lanchas rápidas-, alta potencia instalada y propulsores eficientes. Este buque ha sido proyectado por la firma Thornycroft, Giles & Co. para *FastShip Atlantic Inc.* del Estado de Virginia, la cual está asesorada por el Departamento de Ingeniería Oceánica de MIT en los aspectos de diseño del casco y simulación de su rendimiento marino, y por el Centro de Estudios de transporte más el Departamento de Ingeniería Aeronáutica de MIT en los aspectos de mercado.

Las dimensiones de este buque son notables. Su eslora total es de 262 metros, similar a la de otros portacontenedores, pero su manga es de 40 metros, necesaria para un planeo estable. Esta manga lo limita al transporte de rutas abiertas, pero le permite una carga y descarga expedita por la popa mediante *Alicon*, un sistema neumático avanzado de manejo de carga. Su calado hidrostático será de 10 metros, para un desplazamiento total cercano a 31.000 tons., de los cuales el 30% está dedicado a la carga, toda bajo cubierta, lo que aparte de ofrecer una mejor protección, asegura la estabilidad transversal. Su capacidad nominal será de 1.432 contenedores TEU, y se complementa con un sistema logístico integral de entrega "puerta a puerta" en 7 días. Su costo anticipado es de US\$ 130 millones, pero se estima que su costo real será cercano a los US\$ 230 millones. La figura 1 permite apreciar la forma del casco.

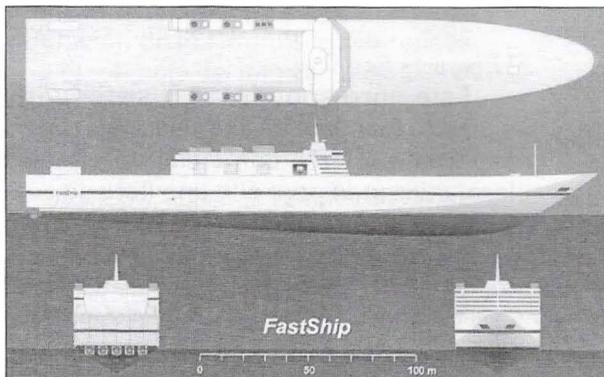


Fig. 1. Silueta del buque rápido portacontenedores "FastShip".

Está diseñado para una velocidad de crucero de 37.5 nudos, con una opción de velocidad máxima cercana a 42 nudos, para cubrir el tramo entre Filadelfia y Cherburgo en menos de cuatro días, el cual completa en forma puntual y confiable debido al uso de un casco en V a proa, de un plano de flotación relativamente lleno, de abanico y de un espejo de popa ancho, los cuales son atributos típicos de un buen comportamiento marino, (aparte de la eslora). Su planta propulsora estará compuesta por cinco turbogás de más de 50 MW_b (al freno) cada una, derivadas del modelo aeronáutico Trent de Rolls Royce plc., utilizadas en los aviones Boeing 777, girando a 3.600 rpm, cada una de las cuales accionará un waterjet KaMeWa con un impulsor de 3.25 m. de diámetro, para una potencia de 50 MW_s (al eje) girando a 200 rpm, vía cajas reductoras Philadelphia Gear, de dos etapas de reducción. Esta planta GAG-HD será 25% más poderosa que la de los portaaviones de propulsión nuclear de la clase Nimitz. Su peso, incluyendo las turbogás, cajas y propulsores, superaría las 1000 toneladas. La empresa firmó un acuerdo para obtener 25 turbogás Trent por casi mil millones de dólares, y por 21 cajas reductoras, por casi US\$ 35 millones.

Uno de los aspectos más llamativos de este concepto será su elevado consumo de combustible, debido a la alta resistencia y velocidad del buque. Aún operando en condiciones nominales, con turbinas cuyo consumo específico de combustible (CEC) no tiene precedentes en el mercado de las turbogás, cada una consumiría casi 240 toneladas al día, lo cual equivale a un valor cercano a US\$ 850 mil por viaje. Por ello, el factor combustible representará más de un tercio del costo total de operación del servicio, similar a la proporción de costos de combustible en los aviones comerciales. Este singular aspecto es importante para el éxito del proyecto, pues su rentabilidad prácticamente se esfuma con un incremento de 40% en el costo del combustible.

La Viabilidad Económica del Transporte Rápido.

La estrategia básica de negocio del proyecto *FastShip* se sustenta en la alta velocidad de tránsito que le permite una travesía transatlántica de menos de 4 días, y en la puntualidad que le ofrece una baja dependencia del estado de mar sumado a una sobrepotencia suficiente para recuperarse de las eventuales situaciones de clima extremo. Adicionalmente, se basa en un trayecto sin escalas entre dos puertos dedicados, y sincronizados con camiones y trenes hacia los terminales periféricos, sumado a un despacho directo puerta a puerta. Por último, contará con un ágil sistema de aduanas, y el embarque *Alicon*, para rotar estos buques sin demora.

El principal desafío es generar una demanda que justifique este servicio. La demanda básica de carga ya existe, pero deben motivarse los incentivos de cambio desde los servicios vigentes, en particular en el segmento de transporte de bienes de menor costo unitario del transporte aéreo vigente, que hoy supera siete veces el valor nominal del transporte marítimo directo, y además debe generar nueva demanda, la cual se aprecia posible con la consolidación de la industria de carga express (130 a 4.500 kgs). Así, será posible el envío expedito de repuestos pesados o voluminosos no atendidos por aviones comerciales, y otros productos como computadores, equipos electrónicos y electrodomésticos, etc., que se encarecen innecesariamente por avión. Por otro lado, se abre una posibilidad de comercializar alimentos de mediano valor y productos perecibles, a grandes distancias. La firma *FastShip* espera una penetración de mercado del 7% del transporte marítimo del océano Atlántico Norte.

Se ha estimado que la utilidad por un buque es de US\$ 30 millones anuales. Este valor considera ingresos a una tarifa preferencial de US\$ 38/kg. con un factor de servicio del 90% y un factor de carga del 70%, para contenedores de 7.25 tons/TEU. Los costos de operación son de US\$ 190 millones, en los

cuales destaca el costo de combustible con el 35% del total, a casi el 90% de la potencia nominal. Para el control del buque, se asumen dos dotaciones de 12 hombres cada una. La tasa interna de retorno es de 12% antes de impuestos, lo cual confirma el atractivo límite de este tipo de negocios hipercompetitivos. No obstante, se estima que existe un potencial comercial que justifica el proyecto, que encuentra el mayor interés y atractivo en el mercado de bienes que no es atendido hoy por el transporte aéreo o marítimo convencional.

Si esta modalidad de transporte se compara con un servicio regular a 16.5 nudos, sujeto a los contratiempos climáticos y a la disponibilidad de carga, considerando ingresos a una tarifa de US\$ 22/kg. con un factor de servicio del 90% y un factor de carga del 62%, para contenedores de 8.2 tons/TEU. El margen será de US\$ 8 millones anuales, cifra que contempla costos de operación de casi US\$ 43 millones. La tasa interna de retorno de esta modalidad es de 7.5%.

La Opción de Propulsión Nuclear en el Transporte Rápido.

Para verificar la viabilidad de la propulsión nuclear en esta forma de transporte, se utilizará el concepto *FastShip*, manteniendo las condiciones originales de servicio, así como el mismo casco, potencial nominal y tipo de propulsores.

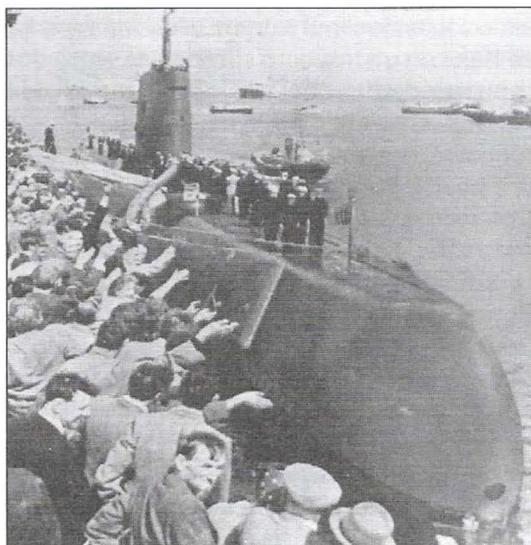
Antes, se estima conveniente resumir las aplicaciones de propulsión nuclear naval y mercante, así como sus atributos y limitaciones. La energía nuclear de potencia nació en el submarino SSN *Nautilus* en 1955, con un reactor de uranio enriquecido y agua a presión como refrigerante y moderador de neutrones (PWR), para explotar su principal atributo: poder contener una gran cantidad de energía en un pequeño volumen. De hecho, un reactor con algunos cientos de kilos de uranio puede operar durante varios años, según el diseño que se elija, entre muchos posibles. No es anormal que una planta nuclear naval opere 1.200 días a plena potencia (casi un millón de

millas náuticas con una sola carga de combustible), y hoy en día, Rolls Royce y General Electric son capaces de producir un corazón cuyos elementos combustibles no son reemplazados en operación, los cuales se eliminan junto con el buque al término de su vida útil. Por otro lado, los reactores de generación eléctrica normalmente recargan un tercio a un cuarto de su combustible cada 18 a 24 meses.

En la práctica, la propulsión nuclear ha sido utilizada en las Armadas de países con desarrollo nuclear, y se ha concentrado en submarinos de diversos tamaños y usos, en algunos cruceros, y en grandes portaaviones. En los primeros, por su furtividad que exige independencia del aire, y en los últimos por su alta demanda de potencia, la que de ser provista por combustibles fósiles les restringiría su autonomía y la capacidad de combustible para los aviones. En el caso de los cruceros, la propulsión nuclear sustituyó a la propulsión a vapor, siendo estas plantas bastante parecidas, reemplazando las calderas tradicionales por reactores e intercambiadores de calor en la producción de vapor. No obstante, se estima que después de la consolidación de las turbogás, la energía nuclear no se utilizará en cruceros, a menos que la demanda de potencia al eje sea muy elevada, esto es sobre unos 100 MWs, o bien que los combustibles se encarezcan mucho, o que evolucione algún reactor muy simplificado y por ende más barato que los actuales.

La experiencia comercial ha sido escasa. Ésta se concentró en dos buques de carga general, y uno experimental, sin ninguna opción práctica, y habría sido más bien un ejercicio para demostrar una supremacía tecnológica, pues la propulsión nuclear, en las condiciones actuales, sólo parece justificarse para altas demandas de potencia o trayectos muy largos. Esto no significa que sea una opción limitada. Al contrario, debería estar presente para las aplicaciones que reúnan estos requisitos y como sustituto potencial para cuando los combustibles fósiles se encarezcan sin vuelta atrás o cuando se restrinja su uso por razones

ambientales. Estos últimos dos supuestos son reales, en especial el aspecto ambiental, que está siendo regulado. La propulsión nuclear también resulta apropiada en rompehielos y buques de transporte y escolta en el Ártico, como la ha empleado Rusia, principalmente por la autonomía y el imperativo de no detenerse en la masa de hielo.



SSN. *Nautilus*.

Hasta la fecha, prácticamente la totalidad de los reactores navales ha sido similar al del SSN *Nautilus*, con las evoluciones propias de la tecnología, pero manteniendo las limitaciones intrínsecas de este tipo de reactor. El otro concepto explorado en la propulsión ha sido el reactor refrigerado por metal líquido (LMR), que aprovecha la gran capacidad de transferencia de calor de los metales fundidos (por ejemplo, eutéctico de plomo-bismuto). Así, se puede contar con reactores compactos y livianos que no requieren operar a alta presión, como ha sido el caso de los PWR para evitar que el agua cambie de fase y ello afecte su manejo y control. El reactor LMR se ha utilizado en submarinos de alto rendimiento en la armada rusa (SSN clase Akula y Alfa) y se probó en el segundo submarino nuclear de EUA, el SSN *Seawolf*, pero se desechó tempranamente por

aprehensiones y dificultades con su estabilidad química. Se puede apreciar entonces que la tecnología nuclear, a pesar de presentar muchas opciones de diseños innovadores en variadas formas, ha sido conservadora.

La principal razón de esta letargia, ha sido la cultura de la seguridad. De este modo, los nuevos reactores sólo son evoluciones naturales de diseños ya probados. Esta cultura se manifiesta en dos ámbitos. Por un lado, en la utilización de sistemas redundantes que evitan una posible excursión no controlada de potencia o una pérdida de la refrigeración, que eleven su límite de diseño la temperatura del corazón del reactor y lo destruyan, permitiendo el escape de material radiactivo al medio ambiente a través de las barreras físicas (vainas, vasijas, etc.). Por otro lado, se manifiesta en la utilización de un pesado y voluminoso blindaje para evitar la exposición de los operadores a la radiación (neutrones, gama y beta) que es propia de la operación normal de estas plantas. Estas razones hacen que estos reactores sean caros y pesados, y que además, dada la excesiva redundancia de equipos y sistemas de control, se configure una especie de trampa viciosa, y no resulten ser lo seguros que correspondería esperar en estas fuentes de poder, a causa de esos agregados. Por encima, estas plantas se vuelven más complejas y caras de operar y de mantener, se les exigen estándares de calidad poco comunes en otros tipos de plantas y se vuelven muy engorrosas de licenciar.

Un inconveniente de la propulsión nuclear, en especial la basada en el ciclo térmico de *Rankine*, ha sido la necesidad de remover permanentemente el calor residual del corazón. Aún después de apagarse, el corazón queda caliente, y se le debe proveer de un flujo de refrigeración durante un largo tiempo, lo cual exige mantener varios servicios en funcionamiento.

En resumen, la tecnología nuclear presenta un potencial en la propulsión de buques, pero se estima que se le ha impedido evolucionar lo suficiente. En este aspecto, hay

otros dos elementos que pueden justificar su estigmático estado actual, y que han evaporado su uso comercial. El primero es la percepción del público, que guiada por grupos de presión, usualmente bajo el argumento de la ecología, han conseguido restringir el acceso a varios puertos comerciales de importancia. Esa percepción es un agente poderoso, capaz de impulsar regulaciones de variada naturaleza, aunque no se tenga el respaldo científico, carezca de ecuanimidad y produzca el efecto inverso. Es difícil enfrentar este desafío, en especial con algunos casos de negligencia en la industria nuclear, pero se estima que el agravamiento de efectos adversos en las tecnologías alternativas -particularmente efectos ambientales globales- redundarán en una creciente aceptación. El segundo argumento descansa en el control de la tecnología nuclear, la cual dada su relación indirecta con las armas nucleares, se ha mantenido en pocas manos, con los efectos propios de cualquier monopolio. Esto también es difícil de resolver, pues una industria regulada ya es compleja y cuesta desarrollarla, y con mayor razón lo será esta industria sobre-regulada. Un remedio en el mediano plazo es la fluencia de la tecnología, que permite a otros países reproducirla y desarrollar nuevos diseños y materiales, lo que a su vez obligará a los controladores a innovar y a abrirse a los mercados. Para aminorar ambos inconvenientes, hay organismos internacionales reconocidos, los cuales fijan los umbrales de diseño, recomiendan especificaciones y procedimientos, y respaldan que bajo ciertas condiciones, se puede contar con una opción eficaz y confiable.

Se estima que la propulsión nuclear resultaría apropiada para buques tipo *FastShip* o diseños similares, por la elevada demanda de potencia y el alto factor de utilización esperado de la planta de poder. Así, evitaría algunas de las desventajas de las turbogás aeroderivativas, en particular su alto consumo de combustible, como también su impacto ambiental, el nivel de ruido, etc.

Tecnología Nuclear para Propulsión.

El predominio del PWR en la generación nucleoelectrónica y en la propulsión nuclear, se debe a la temprana elección del agua como refrigerante, por sus cualidades como moderador, capacidad de transferencia de calor, disponibilidad y costo, versatilidad para bombeo, y su relativa estabilidad química en operación.

El PWR es un reactor robusto y probado en la propulsión de buques de guerra y submarinos, pero por su peso específico y volumen se aprecia prohibitivo para propulsar de buques mercantes. Ese peso es debido a que este reactor requiere grandes presiones para mantener al refrigerante en estado líquido y así proveer una eficiencia térmica satisfactoria. Además, exige control de sus condiciones químicas para reducir los efectos mecánicos y radioquímicos de los productos de corrosión. Asimismo, a menos que estos reactores se simplifiquen, resultan relativamente caros cuando su potencia es inferior a los 500 MWe. El reactor de agua en ebullición (BWR) abre posibilidades de un menor costo de inversión, pero este diseño no ha encontrado justificación en el ambiente marítimo, pues el cambio de fase y las aceleraciones dificultan el control de potencia, y además demanda blindar toda la planta, por arrastre de productos radioquímicos.

Un reactor apto para esta aplicación es el refrigerado por algún gas y moderado por grafito. Esta es una evolución del primer reactor nuclear artificial, el reactor CP-1 (*Chicago Pile-1*) de Enrico Fermi. Este tipo de reactor ha sido utilizado ampliamente en generación eléctrica, en particular en el Reino Unido, donde tempranamente se exploró el reactor tipo Magnox (llamados así por sus vainas de magnesio-aluminio-berilio), y luego en los reactores avanzados refrigerados por gas (AGR), mientras la mayoría de los países se concentraba en la línea de reactores PWR. A pesar de este predominio, varios

países construyeron reactores refrigerados por gas, incluyendo el reactor a gas de alta temperatura (HTGR), para mayor eficiencia térmica. Pero estos reactores tenían intercambiadores de calor gas-agua para producir vapor y generar electricidad mediante un ciclo térmico *Rankine*, lo cual anulaba la eficiencia potencial.

Un reactor nuclear óptimo para propulsión es el reactor refrigerado por gas helio, en la versión GT-MHR (reactor modular acoplado directamente a una turbina de helio) utilizando un ciclo térmico *Brayton*, pues califica para una planta más compacta. Este concepto, que combina las experiencias de las turbogás industriales y aeroderivativas e intercambiadores compactos con los reactores AGR, ha despertado el interés de varias empresas para generar electricidad, debido a la afinidad entre el combustible y el refrigerante, que le permite alto grado de quemado sin degradación mecánica de las barreras de contención del combustible, y la temperatura lograda permite una eficiencia térmica muy superior al 32% de un PWR típico, además de ser poco sensible a las aceleraciones que pudiera experimentar el buque en la navegación. Esta planta tiene la ventaja de que el gas refrigerante se expande directamente en una turbina de helio, con lo cual se puede impulsar directamente un waterjet, vía reductores. Conceptualmente, esta planta es similar a una turbogás aeroderivativa, con la diferencia que sustituye los

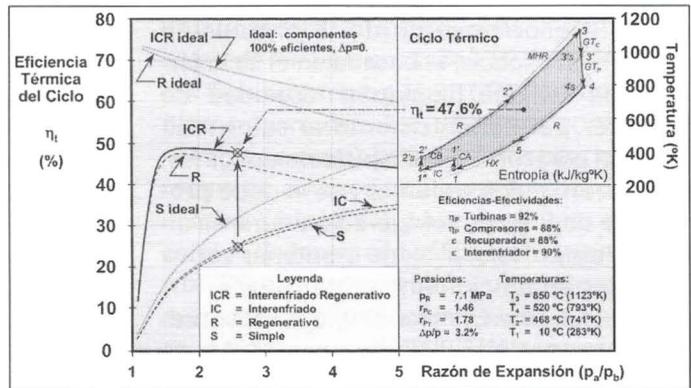


Fig. 2. Opciones de ciclo térmico cerrado para helio.

quemadores de esa última por un reactor nuclear y que opera con helio en ciclo cerrado, en vez de aire en ciclo abierto, con lo cual se reduce la carga de compresión. Para elevar la eficiencia térmica sobre aquella de un ciclo simple, se utiliza un recuperador de calor, que reduce el tamaño del reactor aportando energía residual desde las turbinas, más un preenfriador, y un interenfriador para reducir la potencia de compresión. La figura 2 muestra las opciones de ciclo térmico cerrado, utilizando componentes reales e ideales. La elección del ciclo ICR (versión nuclear y de ciclo cerrado de la nueva turbogás WR-21 de Northrop Grumman y Rolls Royce) es evidente y en éste se recomienda una relación de compresión de 2.7, con dos compresores. Por otro lado, la utilización de una turbina de poder independiente de los compresores facilita el control del reactor y de la potencia a los ejes propulsores. Así, utilizando un arreglo optimizado de componentes, se lograría un rendimiento térmico de 47.6%.¹

El gas helio se utiliza por varias razones. Es un gas monoatómico de bajo peso molecular por lo que requiere una *relación de compresión* relativamente baja para alcanzar su rendimiento óptimo, que opera a 300 °C menos que una turbogás, lo cual expone una carga termomecánica menor a los álabes de las turbinas. Posee alto *calor específico*, alta *constante de gas* y una *conductividad térmica* relativamente alta, propiedades con las cuales se logran componentes compactos. Por otro lado, su baja densidad permite lograr flujos elevados sin restricción por aproximación a la velocidad del sonido, que es un factor limitante en las turbinas convencionales. Por ser un gas inerte, se reduce la activación radiactiva de la maquinaria. La principal limitación de este gas, que se encuentra en el gas natural, es su costo.

Desde la perspectiva ambiental, estos reactores no emiten productos de combustión a la atmósfera, con lo que aventajan a las

turbogás, en especial si persiste el problema potencial del recalentamiento global. La versión *FastShip* turbogás dispersaría medio millón de toneladas de anhídrido carbónico y miles de toneladas de óxidos nitrosos por año. El impacto ambiental de cada buque nuclear consistiría en una fracción de lo anterior debido a la maquinaria auxiliar y alrededor de 6 toneladas sólidas de combustible nuclear gastado al año, de los cuales una gran fracción es reciclable y reutilizable, dejando algunos cientos de kgs. por buque-año para ser confinados en espera de un prolongado decaimiento natural. Además un sistema cerrado no expone ductos al ambiente lo que implica menor nivel de ruido.

Dado el bajo CEC, el costo de combustible con un sistema nuclear no superaría los US\$ 150 mil por viaje, ejemplificado en el *FastShip*. Además, como el costo del uranio es menos de un tercio del costo del combustible terminado, esta forma de transporte marítimo resultaría estable a las variaciones de precio del recurso. Si el costo del petróleo se incrementara en un 50%, el costo de operación del *FastShip* se elevaría en un 10% haciéndose poco viable con las tarifas originales. En contraste, si el costo del uranio se incrementara en un porcentaje similar, el costo de operación de un *FastShip* nuclear se elevaría en menos de un 1%.

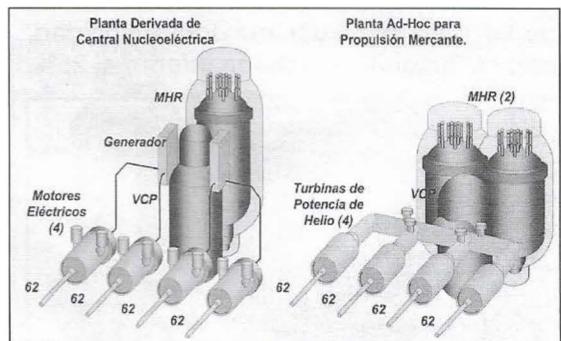


Fig. 3. Alternativas más extremas de Planta Propulsiva: a) derivada de Central Nucleoeléctrica y b) Ad-Hoc para Propulsión Mercante.

1. Esta eficiencia es superior a la de una turbogás de ciclo abierto, simple o ICR, teniendo presente que las eficiencias térmicas de sistemas nucleares y fósiles son conceptualmente diferentes.

Descripción de la Planta Propulsora Nuclear.

En general, existe una amplia gama de plantas GT-MHR posibles, con los siguientes conceptos más extremos: a) Un reactor MHR nucleoelectrico comercial de 540 MWt (térmicos) en 2 vasijas paralelas conectadas vía ductos de alta presión, dentro de un contenedor radiológico. Incluye el reactor en su vasija, adaptado para una aplicación propulsiva, una vasija de conversión de potencia VCP -con sus turbocompresores e intercambiadores de calor- más un generador alterno de 257 MWe (eléctricos) montado verticalmente sobre la VCP, que entrega poder a cuatro motores eléctricos acoplados a cada waterjet, y b) Dos reactores MHR compactos ad-hoc de 270 MWt cada uno, con 1 VCP con sus turbocompresores verticales, y 4 turbinas de potencia horizontales de 62.5 MWs cada una, acopladas a waterjets. La figura 3 indica estas posibilidades, que son caras, la primera por el costo de los motores eléctricos y la segunda por factores de producción.

Una planta más factible para el *FastShip*, por el pequeño volumen de producción, es un concepto GT-MHR similar a la planta b), pero con dos MHR estándares de 210 MWt en línea de crujía, cada uno alimentando a 2 VCP horizontales de 50 MWs cada una, acopladas a sus waterjets, para velocidad de crucero, más una turbogás con waterjet central de 50 MWs para dar máxima velocidad, con un factor de utilización inferior al 25%,

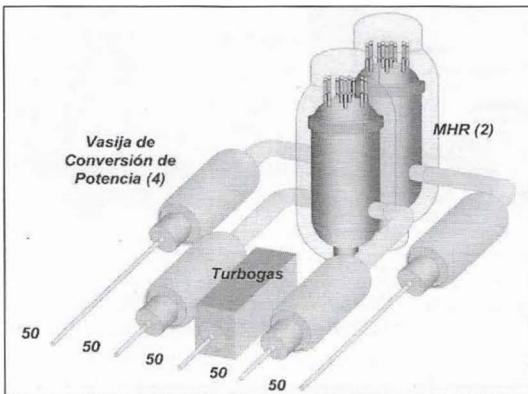


Fig. 4. Planta de propulsión híbrida (Nuclear-Turbogás).

la cual además sirve para maniobra en puerto y *take-home*. La figura 4 muestra este arreglo propulsivo.

Esta planta híbrida, que se muestra en tres vistas en el arreglo propulsivo de la figura 5, resulta conveniente pues es más barata que la versión b) puramente nuclear y opera también a un costo menor, a pesar que consume algo de combustible fósil. Pero, se estima que este arreglo es necesario por el perfil de utilización de los últimos 50 MWs, diferencia aproximada entre la potencia de crucero y la potencia máxima.

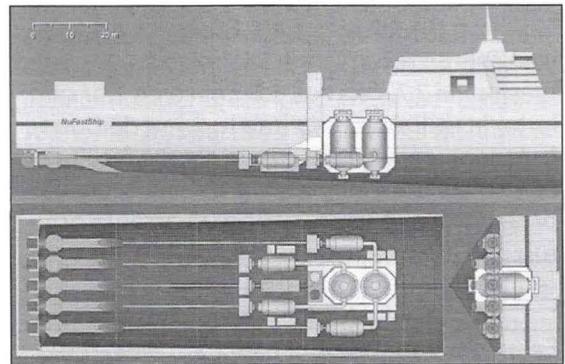


Fig. 5. Arreglo propulsivo nuclear-Turbogás en el transporte rápido "FastShip".

La figura 6 muestra el arreglo de la carga con esta planta híbrida. Este buque podría ahorrar más de 4500 toneladas de un combustible cuyo precio es volátil. Casi la mitad de este ahorro puede destinarse a mayor carga e ingresos.

El principal atributo de este reactor, cuando su potencia o su densidad de potencia es baja, es su capacidad para tolerar una pérdida de refrigeración sin producir la destrucción del corazón, factor crítico en la licencia de un reactor nuclear, además de la estabilidad e inocuidad del gas refrigerante. La seguridad reside en el combustible *micro-encapsulado*, que puede retener los productos radiactivos de fisión en el caso de un accidente, sumado a su capacidad de "apagarse" al excederse la temperatura de diseño (un efecto denominado *doppler*), y en la geometría del corazón que favorece su refri-

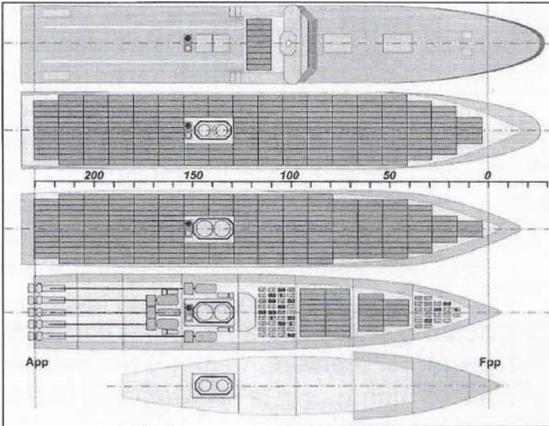


Fig. 6. Arreglo de carga del transporte rápido Nuclear "FastShip".

geración en forma natural. Cada elemento combustible es una matriz de grafito hexagonal-prismático de 0.8 m. de alto por 0.35 m. de ancho, con 94 "canales" con 3000 compactos de combustible, y 108 canales de refrigeración, las cuales se arreglan formando un corazón anular reflejado interna y externamente. Los compactos de combustible, de 1.2 cm. de diámetro y 5 cm. de alto, contienen decenas de miles de partículas refractarias diminutas (0.6 mm. de diámetro), con uranio envuelto en diversas capas de grafito poroso, carburo de silicio y carbón pirolítico (denominadas TRISO). Este combustible ha sido probado durante más de 25 años, a altas temperaturas, llegando casi al quemado teórico, y hoy está siendo reevaluado por el Departamento de Ingeniería Nuclear de MIT.

La figura 7 muestra el MHR, un corte del corazón para una densidad de potencia cercana a 5 MWt/m^3 (5% de un PWR) -que aprovecha la seguridad intrínseca del combustible- y una vista ampliada de la geometría del combustible propuesto para propulsión. Con esta densidad, este reactor alcanzaría la temperatura máxima permitida de 1600 (C después del segundo día, sin emitir productos radiactivos). La seguridad de este tipo de reactor es comparable o mejor que la de otros reactores.

Una versión alternativa de combustible, que configura el GT-MHR tipo *pebble bed*,

consiste en introducir las micropartículas en bolas de grafito de 6 cm. de diámetro, las que se reemplazan selectivamente durante su operación, mediante un sistema de monitoreo y clasificación. Este reactor, apto para generación eléctrica, hace más compleja la operación de una planta de propulsión, y dificulta las inspecciones de las agencias internacionales que salvaguardan la contabilidad del combustible nuclear.

El gas helio se inyecta al reactor a una presión de 7.1 MPa, proveniente de la VCP, asciende por la periferia y desciende por los canales de refrigeración de los elementos combustibles. Durante este paso, el gas refrigera al combustible, y regresa a la vasija de conversión de potencia, para expandirse en las turbinas de compresión y de potencia. Para una eficiencia térmica óptima se utiliza el ciclo ICR con los componentes necesarios dentro de la VCP, y para recuperar la caída de presión por la expansión térmica y fricción se usan compresores de baja y alta presión. La potencia de la planta se controla ajustando la presión del gas -sin perder eficiencia- o con un *by-pass* en la turbina de potencia. La figura 8 esquematiza el circuito de gas de un módulo GT-MHR aplicado a la propulsión del *FastShip*.

El peso específico estimado de una planta propulsora nuclear para un *FastShip*, basado en dos MHR, y cuatro VCP de 50 MW_s

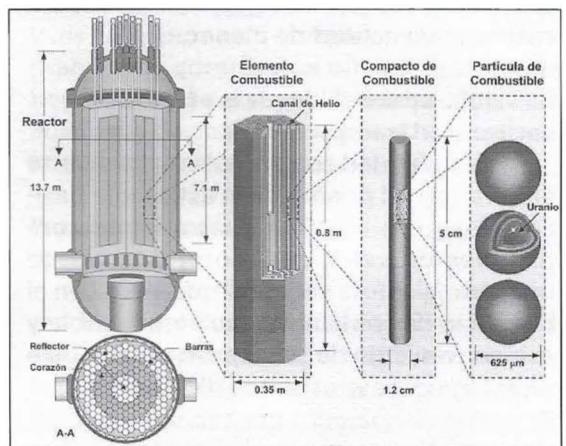


Fig. 7. Silueta del reactor GT-MHR y su combustible.

Componentes	Peso agregado (tons)	Peso removido (tons)
Vasija del Reactor (2)	270	} 2240 tons @ 11.2 kg/kW
Corazón del Reactor(2)	380	
Blindaje y Estructuras	1050	
Vasija conv. de potencia (4)	290	
Control de Helio	40	
Sistemas de Enfriamiento	15	
Gas Helio	5	
Equipamiento Auxiliar	150	
Descontaminación	40	
Turbogás y Equipo Auxiliar	50	250
Ductos de Aire y Escape	20	150
Combustible Turbogás	300	4800
Totales:	2610	5200
Ventaja Neta:	2590	

Tabla de pesos estimados de la Planta de Potencia.

cada uno, incluyendo el blindaje radiológico, y estructuras de colisión, es cercano a los 11 kg/kW, de acuerdo a lo indicado en la tabla. Si a esto se agregan y remueven pesos, se tiene una capacidad de carga adicional de casi 2.600 tons. respecto a la planta original.²

Una planta nuclear más poderosa (sin turbogás), de una potencia nominal de 250 MW_s en 4 propulsores, tendría un peso específico cercano a los 10 kg/kW, pero la ventaja de peso total sería similar.

Al mantenerse constante del peso del buque (casi no consume combustible), aparece una ventaja en la estabilidad y control de planeo, ya que éste no sufriría cambios de calado ni posición del centro geométrico de planeo durante la travesía, lo que hace innecesario mover grandes flujos o lastrar para mantener la actitud de planeo.

La viabilidad económica de la propulsión nuclear en el transporte rápido.

La viabilidad con propulsión nuclear se analiza bajo el prisma de la estrategia básica de negocio *FastShip* y las mismas condiciones de velocidad, comportamiento marino, y forma de embarque, pero con el beneficio de consumir poco combustible y el inconveniente de sobrepeso por blindaje radiológico y estructuras adicionales.

La utilidad estimada por buques es de US\$ 66 millones anuales, debido a la mayor capacidad de carga. Dicho valor contempla ingresos a una tarifa preferencial de US¢ 38/kg. Con un factor de servicio de 87%, un factor de carga de 70%, y contenedores de 7.25 tons./TEU. Este valor considera un costo de operación de casi US\$ 200 millones (en este caso el costo de la inversión es casi un tercio del total), y se consideran mayores costos de seguros, mantenimiento, y terminales, estos últimos por la necesidad de manejar combustible nuclear. Asimismo, se ha considerado a una persona más en la dotación para la gestión del reactor, y personal de mayor calificación técnica. La tasa interna de retorno es de 9% antes de impuestos.

El principal inconveniente de la propulsión nuclear es el costo del reactor. El valor asumido de este buque es de casi US\$ 690 millones. Éste considera una planta GT-MHR-turbogás de US\$ 590 millones, equivalente a un costo específico de US\$ 2.800 por kW_e instalado, cuyo valor se obtuvo al escalar -muy conservativamente- el costo de una central nucleoelectrica convencional, que incluye todo el sistema (reactor, contenedor, planta térmica, generador, etc., y sus numerosos sistemas auxiliares y de emergencia). Este valor tiene potencial de reducción, si se tiene en cuenta que: a) los reactores de referencia (PWR avanzados) están logrando costos específicos cercanos a los US\$ 1.400 por kW_e instalado, aún en potencias de 600 MW_e. (hay fabricantes que anticipan costos de GT-MHR a US\$ 1.000 por kW_e) y b) el conjunto motor-generador es, en general, más caro que un propulsor. La mayor complejidad de los materiales, en su resistencia a la alta temperatura y otros desafíos tecnológicos, se compensa con la simplicidad debido a las menores presiones que deben tolerar las estructuras, a la condición gaseosa y monofásica del refrigerante.

2. Si la planta nuclear resultara lo suficientemente automatizada, y se controlara remotamente desde el puente, se podría reducir el espesor del blindaje radiológico, con lo cual la diferencia sería de unas 2.900 toneladas, equivalente a 400 TEU adicionales, o 28% de la capacidad nominal.

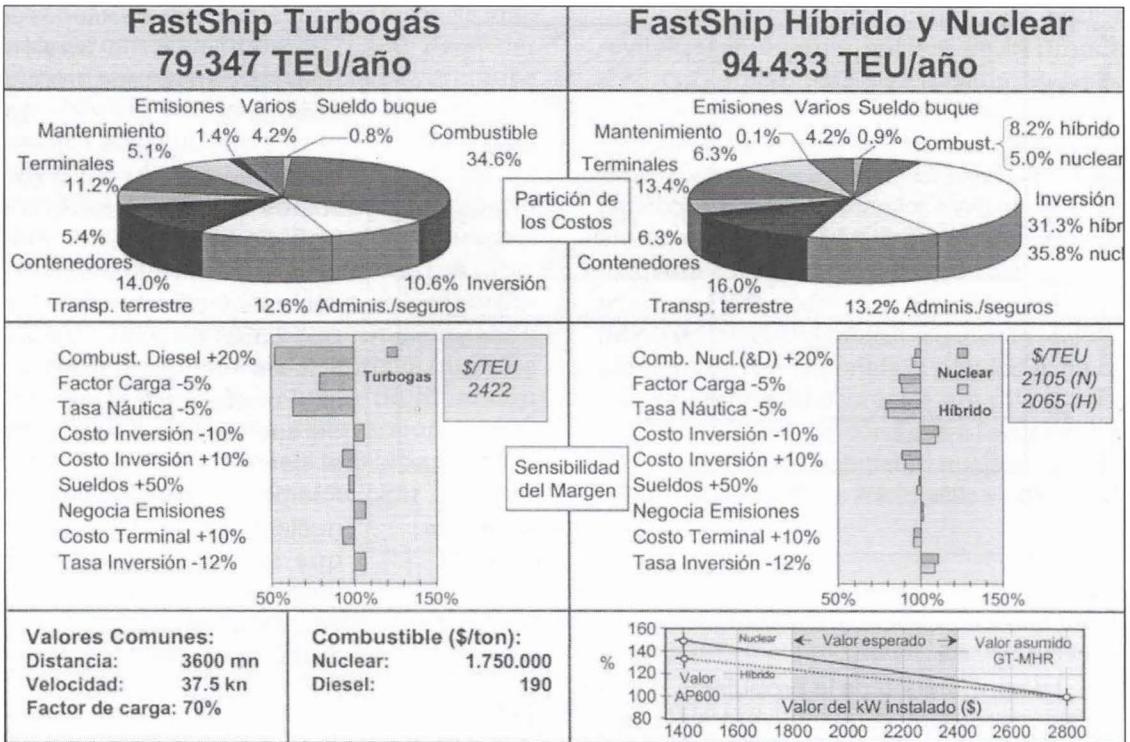


Fig. 9. Sensibilización de algunas variables en el margen del proyecto "FastShip".

rante, y la ausencia de los efectos de corrosión, entre otros.

Es decir, en las condiciones planteadas, el costo del buque sería 3 veces superior a uno en versión turbogás, con un costo de combustible 4 veces inferior, pero más estable frente a variaciones de precio de los recursos energéticos (si fuese totalmente nuclear, el buque sería 3.5 veces más caro, pero tendría más de un séxtuplo del costo de combustible). Este tipo de reactores podría estar disponible en menos de una década, si recupera la inercia para completar su investigación y construir el prototipo demostrativo en forma cooperativa. Durante la pasada década, el gobierno de EUA proporcionó fondos intermitentes para diseñar una central nucleoelectrónica GT-MHR compacta, muy segura y capaz de consumir diversos combustibles nucleares incluyendo el exceso de plutonio. El aporte para el desarrollo comercial de este concepto en

otros países, tales como Sudáfrica, Francia, Alemania, Japón, China y Rusia, ha sido más modesto pero continuado, y con mayor componente industrial.

La utilización de dos puertos terminales para *FastShip* presenta ventajas para el manejo del estigma nuclear y para construir una percepción más positiva. Una manera de contribuir a ello es usar la turbogás central y un conjunto de propulsores auxiliares de maniobra para entrar y salir de puerto con los reactores apagados.

Parámetros limitantes del proyecto y de la opción nuclear.

La figura 9 permite apreciar las diferencias más relevantes del *FastShip* bajo las opciones de propulsión turbogás, nuclear-turbogás y nuclear, con lo cual se puede contrastar las capacidades y contribución de costos de cada uno, y la respuesta de los parámetros más relevantes a una sensibilización.

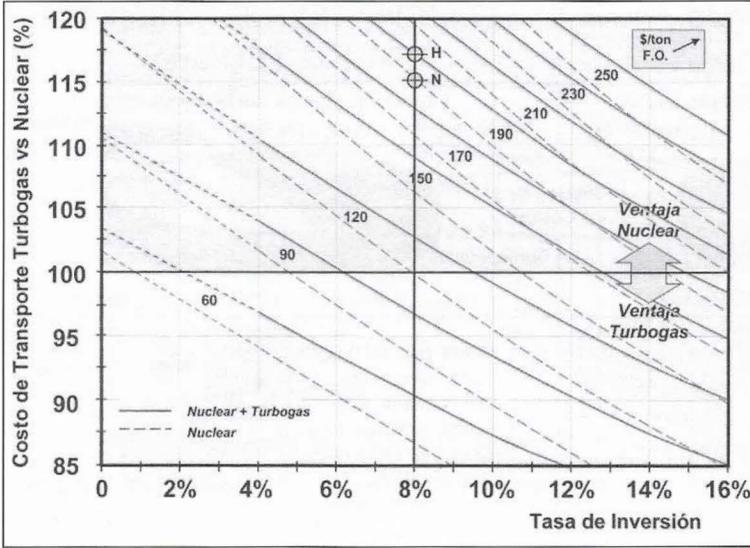


Fig. 10. Costo relativo de transporte con propulsión Nuclear y Nuclear-Turbogás.

La oportunidad de la propulsión nuclear se encuentra en la relación entre el costo de petróleo y el costo de inversión del reactor. El *FastShip* original no lograría utilidades si el combustible aumentara en 40%, mientras que con la versión híbrida deja de ser rentable con un 440% (700% si fuera sólo nuclear). Además, tendría una autonomía de crucero entre 400.000 y 500.000 mn, según el manejo de combustible, que no lo limita a la ruta Europa-América del Norte, como en el diseño original. Así, se podría explorar el transporte rápido entre Asia y América y entre Europa y América del Sur. Esto es importante si se contempla el enorme potencial comercial de China e India.

La figura 10 refleja la relación de costos de transporte para distintos precios en el combustible y tasa de inversión. Los cálculos consideran una capacidad mayor con propulsión nuclear de sólo 2.400 toneladas, a pesar de tener una ventaja en peso de 2.600 toneladas, respecto a la planta original. Si se utiliza todo este excedente, el margen aumentaría en 5%. Además, si la planta se controla remotamente y se reduce el espesor del blindaje radiológico, el margen aumenta en un 16%.

El costo del reactor es el factor crítico en la versión nuclear, pero posee amplio potencial de reducción ya que se han utilizado valores conservadores (ver gráfico de costos inserto en la figura 9). El *FastShip* híbrido igualaría la TIR original con un costo específico nuclear de US\$ 2.350/kW_s US\$ 2.100/kW_s si fuese íntegramente nuclear. Por otro lado, el impacto del sueldo de la dotación en el costo de operación del *FastShip*, sea turbogás o nuclear, es muy bajo por lo que se puede incorporar dotaciones de alta calificación, en particular si están operando reactores.

Conclusiones.

Anteriormente, se expuso la posible reactivación del transporte marítimo rápido, mediante diseños hidrodinámicos alternativos (por ej. Multicasco o SMPH) propulsores más eficientes (ej. waterjets), y mayor potencia para poder traspasar la barrera de resistencia que caracteriza a ciertos buques rápidos. Esta es una oportunidad que parece estar dispuesta a rendir frutos comerciales, destacándose el proyecto *FastShip* el cual, según las estimaciones del autor, puede ser rentable si el precio del petróleo se mantiene estable.

Se demuestra la viabilidad económica de la propulsión híbrida nuclear-Turbogás como opción de poder para altas demandas de potencia y utilización, ejemplificado en el *FastShip*, con reactores GT-MHR. También se demuestra que una planta íntegramente nuclear sería viable, pero se prefiere una híbrida, por la gran diferencia entre la potencia máxima y la de crucero, con beneficios adicionales en el balance de costo de inversión y operación, además de proveer una fuente alternativa para maniobra, ventaja que

se hace más notoria a mayores tasas de interés. Se concluye que esta fuente de poder daría una ventaja competitiva a la empresa operadora, y que en general su costo de operación sería más estable a la volatilidad de precio de los combustibles, al factor de carga y a variaciones en el precio del servicio de transporte. Además, podría abrir mercados distintos a los previstos con turbogás y con mayor capacidad de carga, incorporando en particular el enorme mercado asiático. No obstante, se aprecia que esta planta es sensible al costo de inversión del reactor, y a la tasa de inversión, ventajosamente si es más baja que la asumida, y a otros factores intangibles.

Este sistema propulsivo, que podría revitalizar la energía nuclear en la propulsión comercial, esta vez basada en helio como refrigerante, también podría influir en el rediseño de futuras plantas nucleares navales de submarinos y portaaviones, al considerar beneficios que no aportan los PWR ni LMR. En efecto, el uso de GT-MHR tiene ventajas en la furtividad térmica y acústica respecto de reactores PWR, aparte de la simplicidad de operación y mantenimiento. Si esta planta se complementara con waterjets en unidades navales, se crearía una brecha notable en los factores relativos de combate a favor de una fuerza naval con propulsión nuclear, en particular en su capacidad defensiva y movilidad.

BIBLIOGRAFÍA

- Babcock&Wilcox Co., "CNSG (Consolidated Nuclear Steam Generator)- Development and Status 1969-1977, Competitive Nuclear Merchant Ship Program", Maritime Administration Office of Advanced Ship Development, 1979.
- Baxter A.M. y Alberstein D., Combining an Accelerator and a Gas Turbine Modular Helium Reactor for Near Total Destruction of Weapons Grade Plutonium, IAEA Tecdoc-840, Obninsk, 1995.
- Brooks R.M., Light-Weight Nuclear Propulsion Applications to High Performance Naval Ships, Tesis O.E. MIT, 1976.
- Giles, D.L., Faster Ships for the Future, American Scientific, octubre 1997.
- Harrington K.L., Nuclear Marine Propulsion, Chapter VII, en Marine Engineering, The Society of Naval Architects and Marine Engineers, 1992.
- IAEA, Design and Development of Gas Cooled Reactors with Closed Cycle Gas Turbines, TECDOC-899, Agosto, 1996.
- Lanning D., Modularized High-Temperature Gas-Cooled Reactor Systems, Nuclear Technology, Vol 88, noviembre 1989.
- Levine Z., Dickinson R.W. y Winall A.O., Nuclear Energy - A Viable Alternative", Ship Technology and Research Symposium Proceedings, 1977.
- Mahoney D.P., An Evaluation of a Nuclear Power Plant for a Surface Effect Ship, Tesis M.Sc. MIT, 1977.
- Silverstein A.J., The Gas Turbine Modular Helium Reactor. An International Project to Develop a Safe, Efficient, Flexible Product, IAEA Technical Committee Meeting on HTGR, Petten, Holanda, 1997.
- Vergara J., Nuclear Power in High-Speed Cargo Vessels, paper N° 13 Conferencia "High-Speed Vessels 2000&Beyond", Victoria, Canadá, junio 2000.
- Vergara J., Energía Nuclear en el Transporte Marítimo de Alta Velocidad, Revista de Marina N° 1/2002.

* * *

