

Propulsión nuclear en submarinos

Tecnología Nuclear
4º GITI

Alberto Haldón Vallellano
Diego Jesús Benjumea Gayango

Junio de 2017

Resumen

En este documento se trata la propulsión nuclear en submarinos, desde sus primeros pasos hasta la actualidad. Se estudiarán las diferencias respecto a las centrales industriales en tierra, así como el desarrollo de la tecnología estadounidense para propulsión nuclear hasta la fecha. Por último se abordarán los temas de la protección radiológica, desmantelamiento y algunos accidentes de submarinos nucleares.

Índice

1. Introducción	2
1.1. Historia	2
2. El reactor nuclear	3
2.1. Combustible	4
2.2. Control	6
2.3. Potencia y tiempo de recarga	6
3. Sistemas de propulsión naval nuclear	6
3.1. Desarrollo de reactores para submarinos	6
4. Seguridad nuclear en submarinos	8
5. Desmantelamiento y vaciado de combustible	10
6. Algunos submarinos nucleares hundidos	11
6.1. Thresher (SSN 593)	11
6.2. Scorpion (SSN 589)	12
6.3. K-27	12
6.4. K-8	13

1. Introducción

Desde los años 50, el mayor desarrollo en tecnología nuclear ha sido en sistema de propulsión nuclear marina, particularmente portaaviones y submarinos. Todos los submarinos operacionales y, en general, el 40 % de las embarcaciones de la armada de los Estados Unidos están accionadas con energía nuclear.

El desarrollo de la tecnología nuclear en submarinos tuvo una gran importancia ya que los submarinos convencionales empleaban como método de propulsión motores de combustión interna y eléctricos. Éstos tenían un gran inconveniente, y es que debido al gran consumo de oxígeno de los motores diésel, tenían que emerger regularmente, por lo que durante ese período de tiempo eran vulnerables a ataques enemigos.

Con la utilización de reactores nucleares para la propulsión se solventó este problema, ya que de esta forma no era necesario tanto oxígeno, pudiendo estar sumergido durante semanas, incluso meses (hasta que la tripulación se quedara sin suministros).

1.1. Historia

Tras el éxito del proyecto Manhattan durante la Segunda Guerra Mundial, Inglaterra, Canadá y los Estados Unidos unieron sus fuerzas en proyectos de aplicación militar, y en concreto en el desarrollo de reactores nucleares para producir plutonio a partir del uranio natural.

En ese tiempo, el capitán de navío de los Estados Unidos, Hyman G. Rickover, tuvo la visión de reconocer las capacidades que daría los reactores nucleares para la propulsión naval, especialmente en submarinos (por lo mencionado anteriormente).

En el año 1948, se aprobó la idea de Rickover y se iniciaron dos líneas de estudio de reactor nuclear para propulsión.

Año	Submarino	Tecnología
1953	Primer prototipo (Idaho)	S1W
1954	SSN Nautilus	S2W
1957	SSN Seawolf	S2G
1959	SSN November	URSS
1960	SSN Skipjack	S5W
1961	SSBN Halibut	S4W
1963	SSN Dreadnought	Inglaterra
1969	SSBN le Redoutable	Francia

Cuadro 1: Algunos submarinos nucleares construidos hasta la fecha.

El primer submarino nuclear fue el *Nautilus*, construido en Groton en 1954. Debe su nombre a la novela de Julio Verne “*Veinte mil leguas de viaje submarino*”, que narra la historia de un submarino eléctrico. El *Nautilus* fue la primera embarcación en viajar al Polo Norte, y actualmente se encuentra en Groton como museo flotante.

Situación actual

En la Figura 1 se recopila en número de submarinos convencionales y nucleares por país. Se puede apreciar que los países con mayor número de submarinos nucleares son Estados Unidos, Rusia, Francia, Reino Unido y China respectivamente. Otros países tienen en total mayor número de submarinos como Corea del Norte, aunque en este caso la mayoría están basados en tecnología antigua.

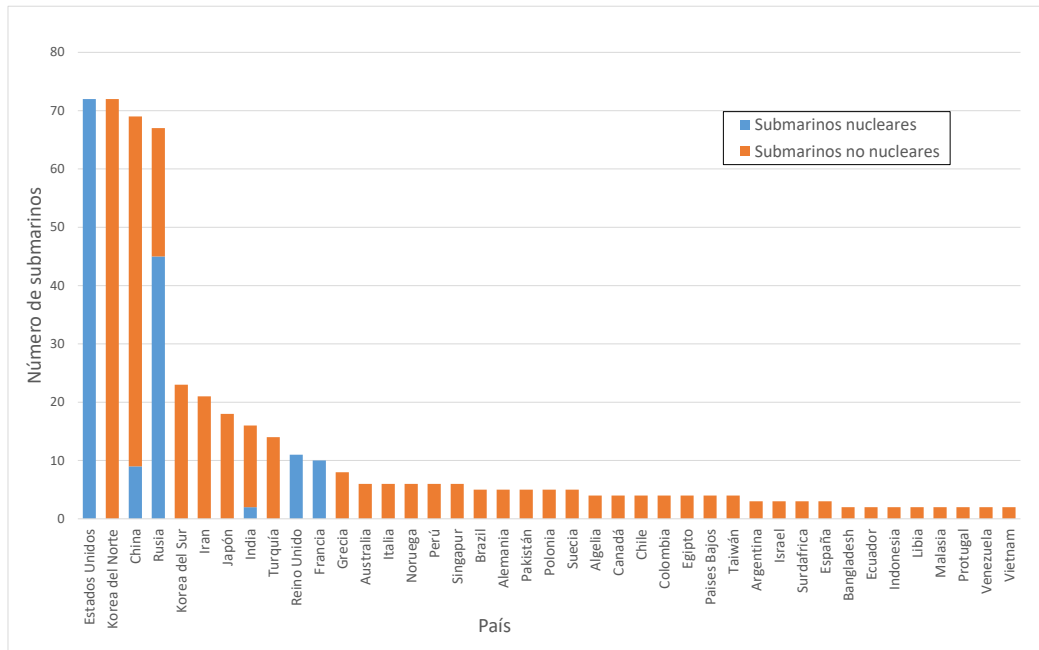


Figura 1: Submarinos convencionales y nucleares por país.

2. El reactor nuclear

La mayoría de reactores instalados en embarcaciones usan el sistema de agua a presión (excepto uno ruso de clase Alfa refrigerado por metal líquido). Constan de dos ciclos, como se muestra en la Figura 2. En el primero se encuentra el núcleo del reactor, el presionador, el generador de vapor y el circuito primario de refrigeración. En el segundo están las turbinas, los condensadores y el circuito secundario de refrigeración.

Normalmente tienen dos turbinas, una conectada a un generador eléctrico para producir electricidad y otra embragada al eje de la hélice de propulsión. El caudal de esta última turbina está controlado mediante una válvula, que a su vez está accionada por el *throttle* en el puente de mando para regular la velocidad de giro de la hélice. También es posible propulsar el submarino mediante un motor eléctrico usando la energía almacenada en las baterías en caso de parada del reactor.

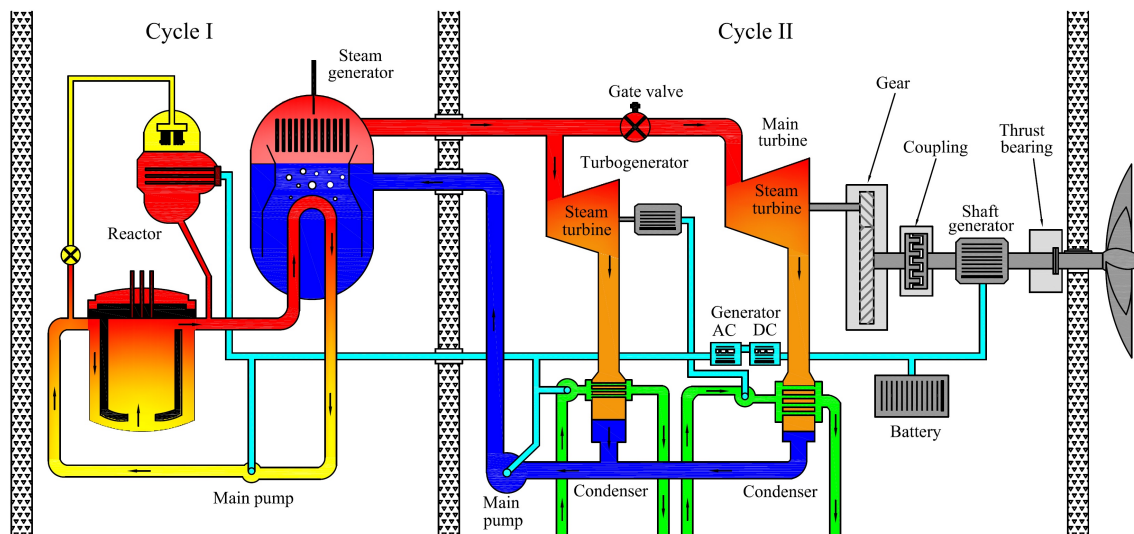


Figura 2: Esquema de una embarcación de propulsión nuclear.

2.1. Combustible

Al tener que ser reactores muy compactos, hay que usar un combustible muy enriquecido en U-235, en torno del 93 % para submarinos occidentales y del 20 % o 40 % para submarinos rusos.

Otro factor determinante es el **tiempo muerto**, provocado por uno de los productos de fisión, el Xe-135. Este elemento es un *veneno* para la reacción en cadena, actuando como absorbente de neutrones provocando que tras una parada del reactor no sea posible ponerlo en marcha de nuevo instantáneamente. En los reactores industriales el tiempo muerto es de unas 24h. Para solucionar esto se usa uranio altamente enriquecido.

El combustible es una aleación metálica Uranio-Zirconio, envainado en Zircaloy, llegando al 85 % del Zr cuando el enriquecimiento de U-235 es del 93 % y con menos Zr si la concentración de U-235 es menor.

Geometría del combustible

El uso tradicional del combustible en barras supuso un gran problema en cuanto a ruido y turbulencia del refrigerante en los reactores de primera generación, así como el tamaño del mismo, por lo cual en las generaciones posteriores se empleó otros diseños menos ruidosos y más compactos. Actualmente los EE.UU. utiliza combustible tipo placa, como se muestra en la Figura 3. De Rusia se tiene muy poca información pero en las Figuras 4 y 5 se puede ver la configuración de los elementos combustibles de los submarinos de segunda generación.

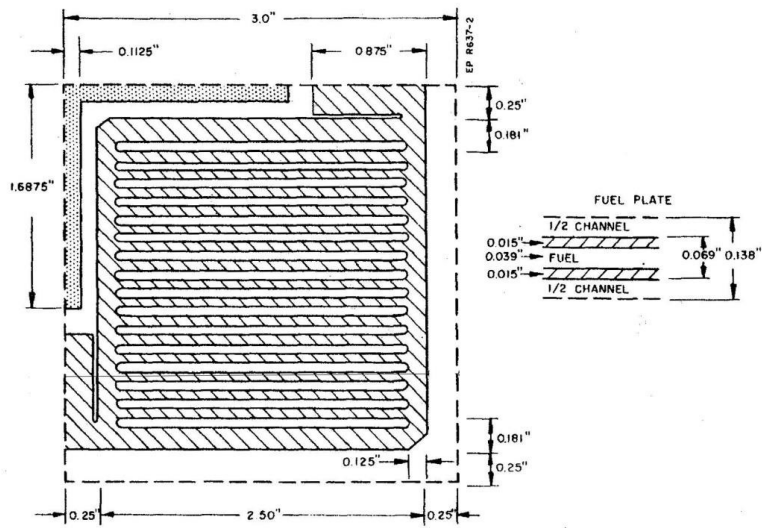


Figura 3: Configuración tipo placa en submarino estadounidense.

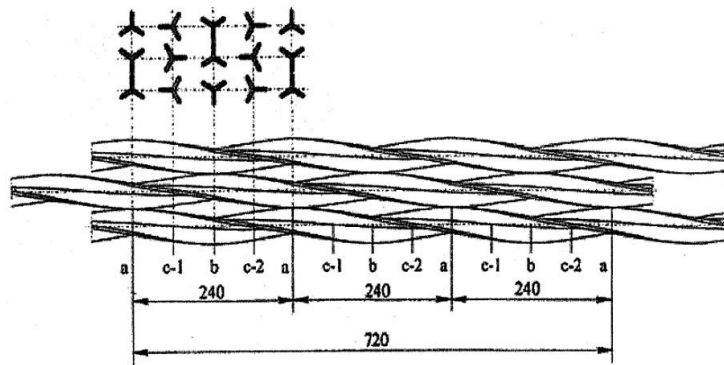


Figura 4: Configuración en espiral en submarino ruso.

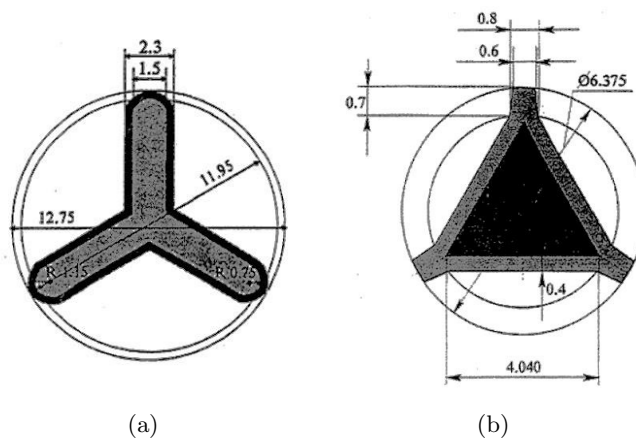


Figura 5: Geometría del elemento combustible en submarino ruso. (a) en estrella y (b) en triángulo.

2.2. Control

El control se realiza con barras de aleación de Hafmio o Cadmio en forma de cruz¹ o cilíndricas, insertadas por la parte superior del núcleo. Las barras se introducen mediante un mecanismo de rotación deslizándose sobre una rosca, evitando que se extraigan accidentalmente ya que están sufriendo continuas aceleraciones de ascenso y descenso debido al movimiento del submarino.

También cabe destacar que en los reactores instalados en los submarinos, el refrigerante no contiene Boro, ya que si se produjese una inundación por agua del mar, la concentración de este disminuiría, provocando un brusco aumento en la reactividad. Es por esto por lo que se instalan barras absorbentes fijas.

2.3. Potencia y tiempo de recarga

La potencia de las centrales nucleares industriales ronda los 3000 MW o superior. En cambio en los submarinos esta potencia ronda los 50 MW, llegándose a alcanzar los 160 MW en los modelos mas grandes.

En cuanto al tiempo de recarga, está estimado en más de diez años, llegándose incluso a veces, a superar la vida útil de la nave, necesitando tan solo una recarga en todo su servicio. Esto es debido al alto nivel de enriquecimiento de uranio.

3. Sistemas de propulsión naval nuclear

El desarrollo de la propulsión nuclear, como en muchas otras innovaciones, empezó por el campo militar. Nosotros nos centraremos mayormente en los pasos seguidos por la Marina de los EE.UU en el desarrollo de reactores para submarinos, que fue por multitud de razones de capacidad y oportunidad, la que estaba en situación y condiciones de llevarlo a cabo.

3.1. Desarrollo de reactores para submarinos

La mayor parte de los conceptos desarrollados para propulsión naval han comenzado con la realización de un prototipo con base en tierra. En este apartado narraremos la evolución desde el primer prototipo de reactor hasta los nuevos desarrollos.

La denominación de los reactores es mediante una nomenclatura de tres caracteres. El primero hace referencia al tipo de embarcación, que en nuestro caso será siempre un "S" de submarino, el segundo es un número que hace referencia al orden en su desarrollo (1 para primera generación, 2 para segunda, etc.). El tercer carácter es la letra inicial del diseñador, "W" para Westinghouse, "G" para General Electric y "C" para Combustion Engineering.

¹Se usan barras de control en forma de cruz cuando el combustible es de tipo placa. En la Figura 3 puede observarse en la esquina superior izquierda parte de la sección de dicha barra.

Inicialmente hubo dos líneas de trabajo en el desarrollo de reactores nucleares para propulsión. Westinghouse se centró en el desarrollo de un reactor de agua a presión. El proyecto fue conocido como *Submarine Thermal Reactor* (STR). De este proyecto nació el prototipo S1W y más tarde se construyó el reactor S2W, que sería instalado en el primer submarino de propulsión nuclear, el *Nautilus*, en 1953. El combustible sería dióxido de uranio en vainas de zircaloy, capaz de alcanzar los 340°C y 288°C en la vasija, con un ciclo de 25 días sin necesidad de recarga. Tenía una potencia de 10 MW.

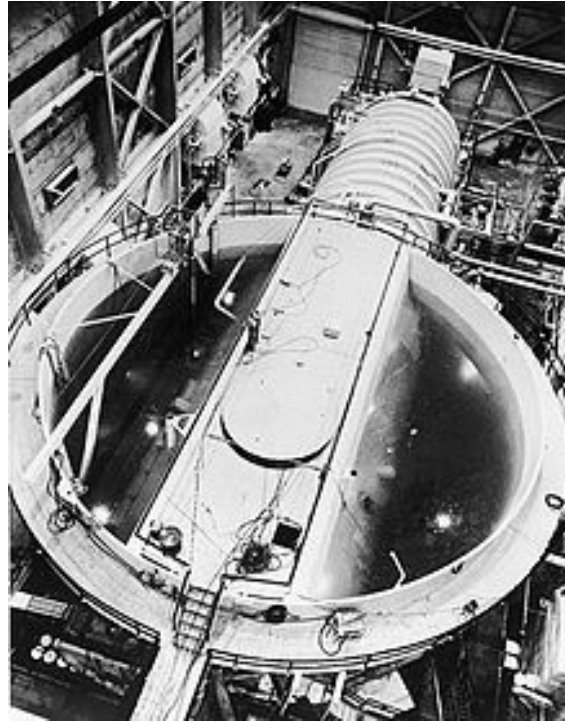


Figura 6: Reactor S1W.

Así, el S2W fue el primer reactor de una larga serie de reactores de propulsión naval para aplicación militar de la marina americana. Más tarde se desarrollarían los reactores S3W y S4W, de dimensiones más reducidas y con la mitad de potencia que el S2W, y el S5W, un reactor un 30 % mayor que utilizaba combustible en forma de placas.

Por otro lado General Electric consiguió un contrato para desarrollar y construir un reactor refrigerado por sodio líquido. El prototipo de este proyecto fue el S1G, y más tarde se instalaría otro similar, el S2G, en el submarino *Seawolf* en 1953. Este reactor usaba óxido de uranio (UO_2) como combustible, con berilio como moderador y reflector. Podía aguantar 900 horas o de 37.5 días sin recarga de combustible, el combustible alcanzaba temperaturas de entorno a los 900°C y 480°C en la vasija. Las ventajas de este diseño eran que se podía producir vapor sobrecalentado a presiones y temperaturas más elevadas que en los PWR, mejorando el rendimiento y ahorrando peso. Además, la bomba de impulsión era mucho más silenciosa que la utilizada para la impulsión de agua. Sin embargo el usar sodio como refrigerante suponía varios problemas, entre ellos la necesidad de usar un blindaje muy pesado (que superaba el ahorro conseguido) o el hecho de que reacciona con el agua de manera explosiva y, por tanto, este concepto fue abandonado para la propulsión naval.

General Electric continuó desarrollando reactores tras el S2G, pero ahora también en la línea de los reactores refrigerados por agua a presión. Así, se desarrolló el prototipo S3G (*Submarine advanced reactor prototype*) y se construyó el submarino *Triton*, equipado con dos de estos reactores, en 1957. Al mismo tiempo, la empresa Combustion Engineering construyó el prototipo S1C (*Small Submarine Reactor Prototype*), el reactor más pequeño y de menor potencia de todos los reactores de propulsión naval construidos, utilizándose tan solo como submarino experimental.

Más tarde G.E. desarrollaría el prototipo S5G, con el objetivo de reducir el ruido de las bombas de circulación de refrigerante primario. De esta forma se estudió la posibilidad de que el agua de refrigeración circulara por el reactor de forma natural por diferencia de temperaturas, sin necesidad de bombas. El prototipo en tierra fue sometido a un estricto test de simulación para determinar si dicho diseño funcionaría incluso durante maniobras bruscas, dado que la circulación natural depende de la gravedad. Los test fueron un éxito y fue instalado en el submarino *Narwhal* en 1967, llegando a tener una potencia de 90 MWt, haciéndolo de los más silenciosos de toda la armada estadounidense. Sin embargo el concepto de circulación natural era relativamente nuevo y el diseño de reactor S5G no fue usado en otros submarinos. Se siguió investigando en esta línea de reactores de circulación natural y, más tarde, se desarrolló el reactor S8G, instalado en los submarinos clase *Ohio*, en 1981, y el S6W, instalado en la clase *Sea Wolf* en 1997. Este último reactor es el último tipo conocido desarrollado por Westinghouse.

El último reactor para submarinos desarrollado por General Electric es el S9G. Tiene una alta densidad de energía (cantidad de energía por unidad de volumen) y nuevos componentes, como un generador de vapor diseñado para mejorar la resistencia a la corrosión. Este reactor se encuentra instalado en los submarinos clase *Virginia* desde 2004, y está diseñado para operar durante 33 años sin necesidad de recarga de combustible, haciendo por tanto que nunca sea necesaria la recarga, puesto que la vida útil de estos submarinos se estima en 30 años. Tiene además una potencia de 30 MW. Otras ventajas destacables es que la alta densidad de energía no solo reduce el tamaño sino además hace su funcionamiento más silencioso.

Por último, podemos destacar otros conceptos de reactores para submarinos que nunca llegaron a estar operativos, como el reactor experimental de óxido de berilio, el reactor experimental moderado orgánicamente o el reactor supercrítico de agua. Estos reactores, por uno o varios motivos, no eran apropiados para su uso en la propulsión naval, por ejemplo el reactor supercrítico trabajaba a temperaturas y presiones muy altas, y los materiales del reactor podían dar problemas durante el funcionamiento.

En el Cuadro 2 se muestra la potencia eléctrica de los submarinos nucleares instalados con los reactores ya analizados.

4. Seguridad nuclear en submarinos

En los reactores navales así como en los reactores terrestres es necesario protegerse contra las radiaciones. Sin embargo, en el caso de los reactores navales, las implicaciones del peso son primordiales y es indispensable concebir y realizar protecciones de peso y volumen optimizado, mientras que este problema no se encuentra en los reactores con base en

Reactor	Submarino	Pot. (HP)	Pot. (MW)
S2W	SSN Nautilus	13400	10
S3W/S4W	SSN Skate, etc.	7300	5.4
S5W	SNN Skipjack, etc.	15000	11.2
S6W	SSN Seawolf	35000	26.1
S4G	SSRN Triton	34000	25.3
S5G	SSN Narwhal	17000	12.7
S8G	SSBN Ohio	35000	26.1
S9G	SSN Virginia	40000	29.8
S2C	SSN Tullibee	2500	1.9

Cuadro 2: Potencia eléctrica de algunos submarinos nucleares.

tierra. Se debe tener en cuenta además que un submarino es un sistema cerrado que opera continuamente, capaz de estar meses en el mar sin volver a base. La tripulación no puede por tanto abandonar el buque, sino que debe trabajar y convivir en las proximidades de un reactor nuclear operativo las 24 horas del día. Todo esto hace la protección radiológica un factor muy a tener en cuenta en el diseño de submarinos nucleares.

El proceso de fisión es la principal fuente de radiación de un reactor. Las radiaciones más significantes desde el punto de vista del blindaje son los rayos gammas y los neutrones emitidos por el reactor, siendo otras partículas rápidamente atenuadas por los blindajes. Los neutrones pueden causar la activación del agua refrigerante durante su paso por el reactor, convirtiéndolo en otra fuente de radiación. La tercera fuente de radiación a tener en cuenta son los materiales fuera del núcleo del reactor, que también pueden capturar neutrones.

Los materiales usados para el blindaje en los reactores navales no difieren mucho de los de tierra. Para atenuar la radiación gamma se utilizan blindajes de materiales con un alto número atómico, como el acero o plomo, mientras que para los neutrones se utilizan materiales con alta proporción de hidrógeno, como el agua o el polietileno.

El blindaje puede dividirse en primario y secundario, de acuerdo con la localización de la fuente de radiación. El primario, formado por agua (o materiales similares con alto contenido de hidrógeno) y plomo, está directamente alrededor del núcleo del reactor, que permite debilitar el flujo de neutrones rápidos para impedir la activación del circuito secundario de agua de refrigeración y reducir al mínimo la radiación gamma. Sin embargo este blindaje no es suficiente para frenar los neutrones, por lo que se añade un blindaje secundario para la captura de neutrones situado en las paredes del compartimento. Este blindaje secundario estaría formado por hormigón, plomo y polietileno. Con este blindaje secundario se asegura además que no haya radiación fuera del reactor debido a las fuentes secundarias ya nombradas como el agua de refrigeración u otros materiales fuera del núcleo.

Debido al peso del sistema de producción de potencia y el blindaje, el reactor y todos los equipos asociados para generar vapor son instalados en el centro del submarino, rodeados por mamparos estancos. Otra opción en caso de que el equilibrado del submarino no fuese un problema es colocar el compartimento del reactor lo más alejado posible de los camarinos de la tripulación y zonas frecuentes, por ejemplo en la popa del submarino.

Para controlar la dosis de radiación de la tripulación, se utiliza el principio de ALARP,

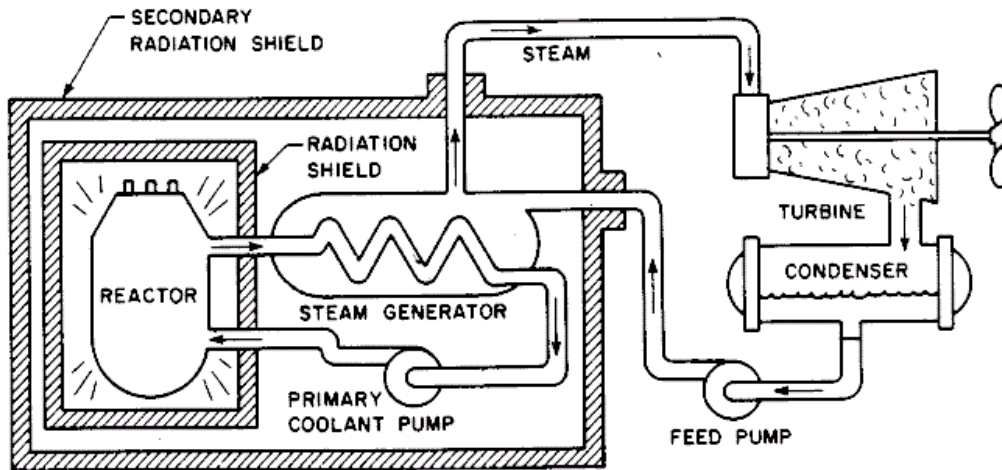


Figura 7: Blindajes primario y secundario en submarinos nucleares.

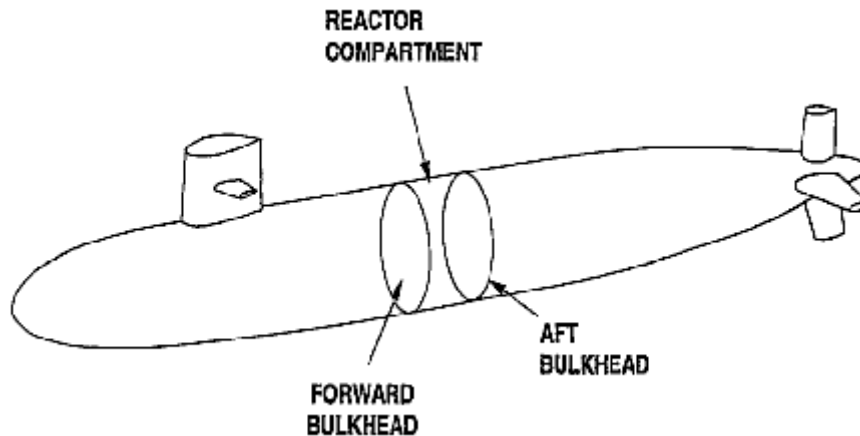


Figura 8: Ubicación típica del reactor nuclear.

o *As Low AS Reasonably Practicable* (tan bajo como sea razonablemente posible). Hay que hacer hincapié en “razonablemente” dado que hay factores a tener en cuenta como el coste, la complejidad o el ya mencionado peso. Para ello se analiza la dosis de radiación recibida anual tanto por cada miembro individual como de la tripulación en su conjunto, habiendo límites en ambos casos.

5. Desmantelamiento y vaciado de combustible

Los submarinos nucleares son desmantelados y vaciados al final de su vida útil, cuando el coste de operación es relativamente alto a su capacidad militar o cuando el submarino ya no es necesario. Fue a partir de la Guerra Fría cuando las potencias mundiales vieron la necesidad de reducir el tamaño de sus flotas. Hay que tener en cuenta que el proceso de desmantelamiento y vaciado es complicado, ya que un submarino nuclear es altamente radiactivo al final de su vida útil. Tras varias décadas de funcionamiento hasta

los alrededores del reactor se encuentran radiactivamente contaminados.

El submarino es enviado a un astillero donde comenzará el proceso de desmantelamiento, aunque antes de esto se extraen en la base del submarino todos los misiles, explosivos y partes útiles o clasificadas. Tras esto ya es llevado al astillero donde se producirá el desmantelamiento. En primer lugar se apaga el reactor se deja pasar un tiempo de reposo para que decaiga la radiación provocada por isótopos con tiempo de vida corto. El siguiente paso es el vaciado de combustible, cuyo proceso en si no varía mucho de un vaciado en condiciones normales de recarga (aunque los últimos submarinos nucleares ya no necesitan recargar combustible durante su vida útil).

El vaciado de combustible supone la eliminación del 99 % de la radiactividad asociada al reactor. Una vez sacado del reactor, el combustible puede ser enviado a una planta de reprocesamiento o es considerado desecho radiactivo y es enviado a una planta acorde. Hay que tener en cuenta que el combustible tiene una alta concentración de uranio 235, luego su reutilización en centrales terrestres es altamente considerado. Una vez que el combustible ha sido removido, el compartimento del reactor es sellado a ambos lados y enviado a lugares especiales de reciclado o almacenamiento definitivo. Otra alternativa es enterrar el compartimento en la superficie o a gran profundidad. Hasta 1993 incluso se tiraban los desechos radiactivos al mar, aunque al final fue prohibido. Algunos de los elementos radiactivos removidos permanecerán tóxicos durante cientos o miles de años.

Por último, una vez extraído el compartimento del reactor, el submarino ya no supone un peligro radiactivo. Las partes del submarino restantes son recicladas, y los materiales reutilizables son enviados de nuevo a producción. Todo el proceso de desmantelamiento puede costar en torno a 25-50 millones de dólares por submarino.

6. Algunos submarinos nucleares hundidos

6.1. Thresher (SSN 593)

El submarino norteamericano Thresher fue botado el 9 de julio de 1960. Tras realizar las pruebas de mar correspondientes, se sometió a una reparación y a finales de 1963 zarpó con la misión de que sus prestaciones fuesen verificadas. Tenía una eslora de 85 metros, una manga de 9,8 metros y un desplazamiento de 3.420 toneladas inmerso. Constaba de un reactor nuclear S5W y dos turbinas de vapor.

Acompañado del buque de rescate Skylark, el submarino comunicó que se sumergía hasta la profundidad de pruebas. Esta era de 400 metros, dato que sabemos en la actualidad pero que en su momento era secreto.

Durante los próximos minutos, el submarino fue comunicando las profundidades que iba alcanzando hasta que, tras unas escuchas por radio que parecían comunicar que las cosas no iban bien, dejó de transmitir. La última supuesta escucha que se recibió fue minutos después donde el oficial encargado dijo haber oído “inmersión de prueba”, luego el silbido y el desgarró del metal.

En informe de la comisión se dijo que es posible que existiese un defecto en una con-

ducción de agua de mar del Thresher en la sala de máquinas, que en esas profundidades y debido a la presión, originó una violenta entrada de agua que puso fuera de servicio los circuitos eléctricos y provocó que el submarino detuviese su marcha y empezase a hundirse. En el accidente perdieron la vida **129 hombres**.

6.2. Scorpion (SSN 589)

El submarino nuclear Scorpion de la clase Skipjack perteneció a la Marina de Estados Unidos. Fue botado en 1959 y se declaró perdido el 22 de mayo de 1968 tras su hundimiento. Tenía una eslora de 76,8 metros, una manga de 9,7 metros y un desplazamiento en inmersión de 3.600 toneladas. Como sistema de propulsión tenía un reactor nuclear S5W, 2 turbinas Westinghouse y una hélice.

A finales de 1967, el Scorpion partió de Virginia en un despliegue por el Mediterráneo. Durante la travesía sufrió varias averías mecánicas en los sistemas de refrigeración y un incendio de origen eléctrico.

En una de sus emersiones, dos de los tripulantes dejaron el submarino en la base naval de Rota por diversos problemas y éste siguió su camino para observar las actividades navales soviéticas antes de volver a Virginia. Por causas inusuales, el submarino intentó comunicarse con Rota por radio aunque sólo pudo ponerse en contacto con Grecia, que recibió mensajes del Scorpion. Seis días más tarde, desde Virginia se informó que el submarino nunca regresó.

Las consecuencias del hundimiento aun son desconocidas, pero en el suceso perecieron **99 personas**. Algunas personalidades sugirieron que la acción hostil por parte de un submarino soviético causó la pérdida del Scorpion.

El submarino permanece a 740 km al suroeste de las Islas Azores, en el Océano Atlántico.

6.3. K-27

El submarino nuclear K-27 de la clase Noviembre pertenecía a la armada de la Unión Soviética y fue botado en 1962. Tenía una eslora de 109,8 metros, una manga de 8,3 metros y un desplazamiento en inmersión de 4.380 toneladas. Estaba alimentado por dos reactores nucleares y podía alcanzar una velocidad de 14,7 nudos.

En 1968, el submarino clase Noviembre tuvo una inexplicable y repentina pérdida de potencia en su reactor. La tripulación no pudo restaurar los niveles de potencia y los gases radioactivos comenzaron a fugarse en el compartimiento del reactor. La tripulación pudo cerrar el reactor, pero los conjuntos de barras de combustible ya habían sufrido importantes daños. Nueve tripulantes perecieron por efecto de la radiación y el K-27 nunca volvió a entrar en servicio.

No se supo como repararlo y se decidió hundirlo en aguas prohibidas en el archipiélago de Novaya Zembla en la costa Este en el Mar de Kara esperando que en el futuro, la tecnología hubiese llegado a una solución para su reflotamiento.

6.4. K-8

Submarino de la clase Noviembre que se hundió en el Golfo de Vizcaya con todo su armamento nuclear a causa de un incendio.

El submarino sufrió varios altercados. En 1960 se produjo la ruptura de un tubo del generador de vapor, causando la pérdida de refrigerante. La tripulación intentó por todos los medios evitar el colapso y fusión del núcleo del reactor debido al fuerte incremento de la temperatura, pero grandes cantidades de gas radiactivo se filtraron contaminando todo el submarino.

En 1970 sufrió un incendio que provocó el hundimiento del mismo. A 120 metros de profundidad, un cortocircuito inundó de llamas el submarino y se ordenó a la tripulación el desalojo total. Finalmente la tripulación se quedó en el buque ya que llegó otro que lo remolcaría, pero en la travesía el submarino soviético se hundió con 52 personas a bordo y un total de 24 torpedos nucleares.

Referencias

- [1] BLANCO-TRABA, J., AHNERT, C., SAINZ DE BUSTAMANTE, A., y FERRERO, J. (2001). *Aspectos Actuales de la Propulsión Naval Nuclear*. Madrid.
- [2] KOPTE, S. (1997). General Overview of Dismantlement and Disposal Technologies for Nuclear Submarines. En S. Kopte, *Nuclear Submarine Decommissioning and Related Problems* (págs. 11-20). Bonn.
- [3] PIWOWARSKI, M. (2013). The Analysis of Turbine Propulsion Systems in Nuclear Submarines. *Key Engineering Materials*, (págs. 99-105).
- [4] RAGHEB, M. (2017). Nuclear Marine Propulsion.
- [5] VANN, H., WEISS, M., y WOLFE, B. (1958). *Shielding Aspects of Nuclear Power Plants for Marine Propulsion*.
- [6] WorldNuclear Association. (2017). Nuclear-PoweredShips. Recuperado el 22 de mayo de 2017, de <http://www.world-nuclear.org/information-library/non-power-nuclear-applications/transport/nuclear-powered-ships.aspx>