

Propulsión nuclear en submarinos

Tecnología Nuclear

4º GITI

Alberto Haldón Vallellano
Diego Jesús Benjumea Gayango

Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Junio de 2017



- 1 Introducción
- 2 Reactor nuclear
- 3 Sistemas de propulsión naval nuclear
- 4 Protección radiológica en submarinos
- 5 Desmantelamiento y vaciado de combustible



Índice

- 1 Introducción
- 2 Reactor nuclear
- 3 Sistemas de propulsión naval nuclear
- 4 Protección radiológica en submarinos
- 5 Desmantelamiento y vaciado de combustible



Introducción

- Submarinos convencionales → motores diesel y eléctricos: ↑ oxígeno

EMERGER REGULARMENTE

- Submarinos nucleares: ↓ oxígeno

MUCHO TIEMPO SUMERGIDO



Historia

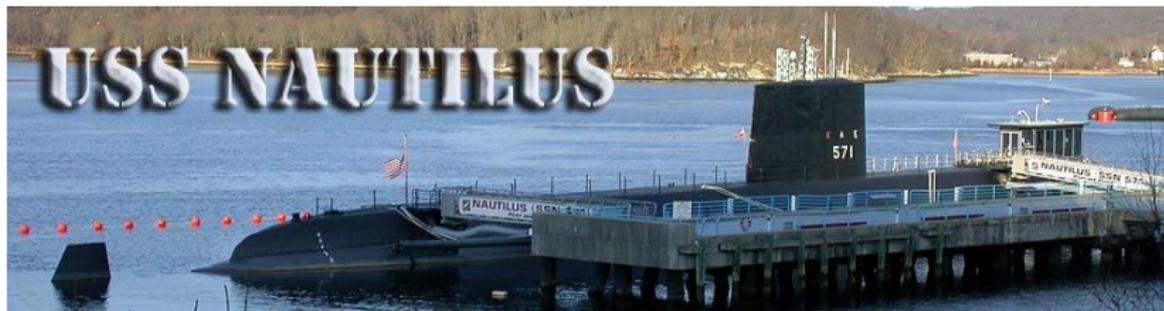
- Hyman G. Rickover → **idea** de usar reactores nucleares para propulsión
- Año 1948: se **aprobó** la idea de Rickover → comienzo de estudios para implementarla
- Año 1954: **primer** submarino nuclear → **NAUTILUS**
- Todos los submarinos de EE.UU. → **ENERGÍA NUCLEAR**



Historia

- Primera embarcación en viajar al **Polo Norte**
- En la **actualidad**:

MUSEO FLOTANTE

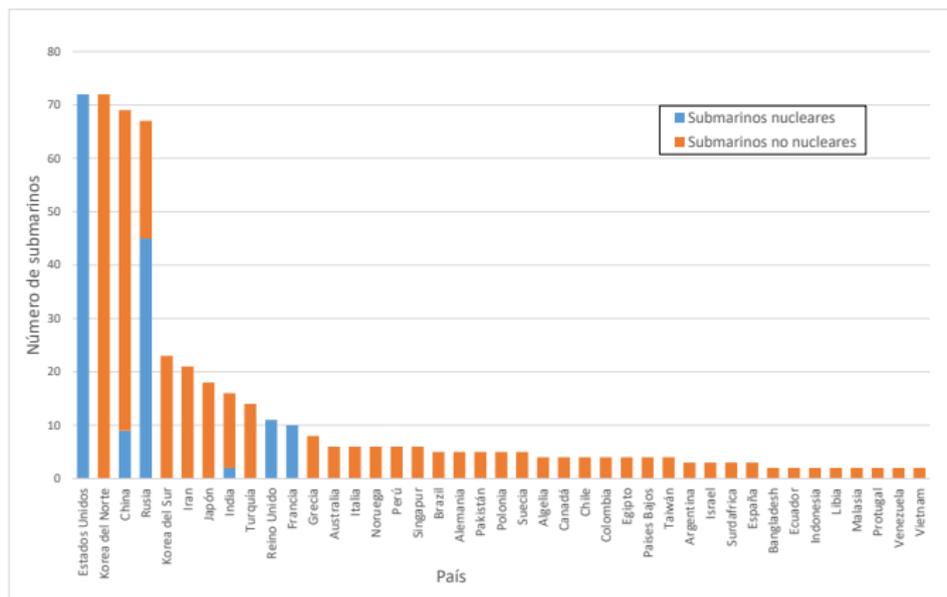


Algunos submarinos nucleares construidos hasta la fecha

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



Submarinos convencionales y nucleares por país

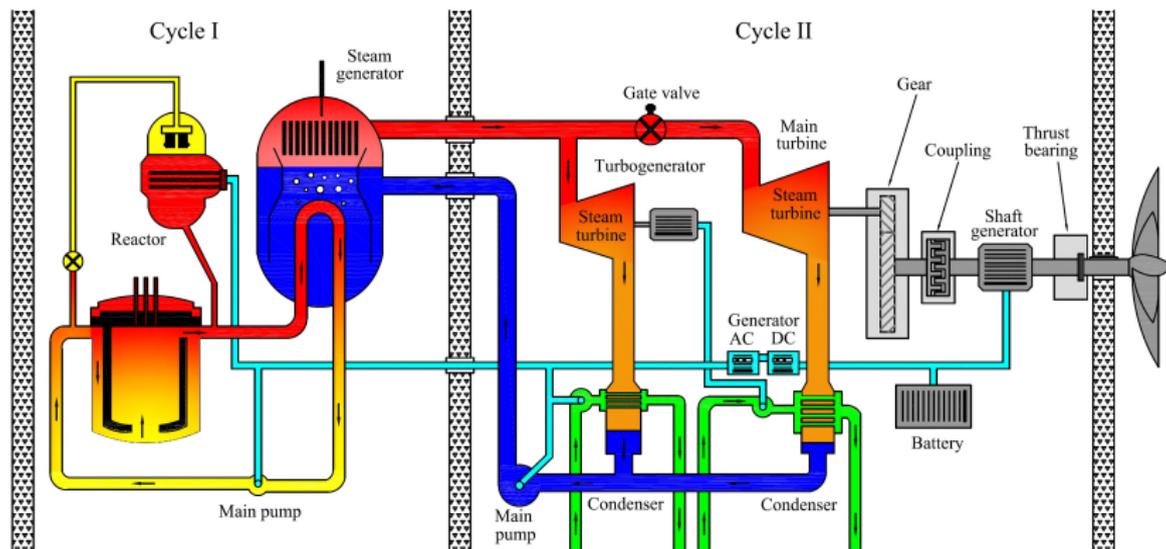


Índice

- 1 Introducción
- 2 Reactor nuclear**
- 3 Sistemas de propulsión naval nuclear
- 4 Protección radiológica en submarinos
- 5 Desmantelamiento y vaciado de combustible



Esquema PWR para propulsión



- Casi todos **PWR** (menos uno ruso de clase Alfa refrigerado por metal líquido)
- **Dos** turbinas: propulsión y generación de electricidad
- Motor eléctrico de emergencia → si reactor **parado**
- Caudal turbina principal controlado por el **Throttle**



Combustible

- Necesidad de usar reactores muy **compactos**
- Problema del envenenamiento por Xenón → **frena** la reacción en cadena
- Solución:

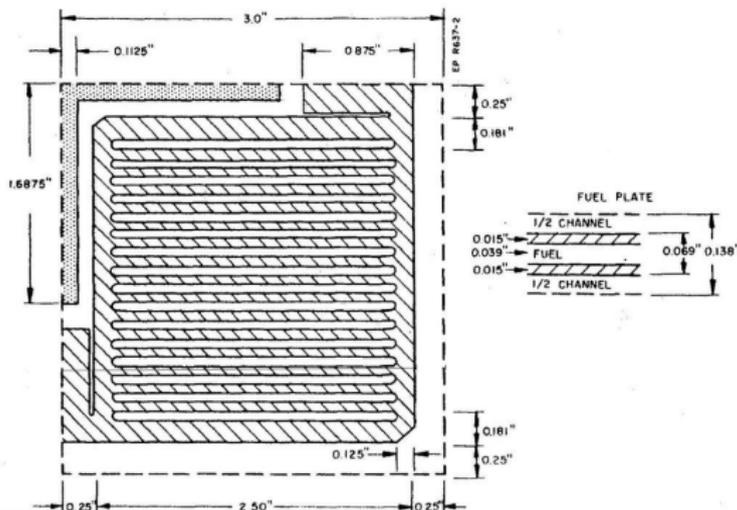
URANIO ALTAMENTE ENRIQUECIDO

- 93 % en submarinos **occidentales**
- 20-40 % en submarinos **rusos**



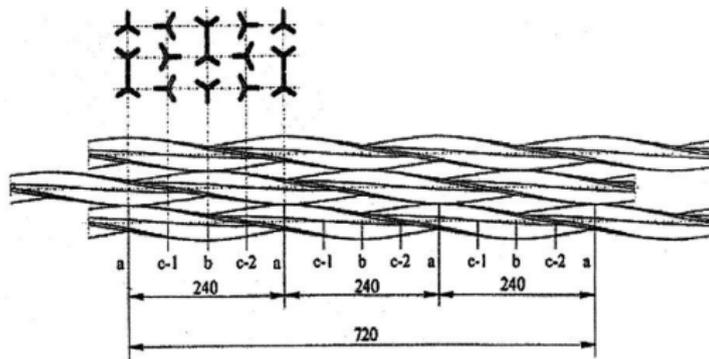
Combustible

- Combustible en barras tradicional → ruido y turbulencia en el refrigerante
- Empleo de otros diseños menos ruidosos y más compactos, que favorecen la transferencia de calor
- Configuración en placas en EE.UU. y en espiral en la URSS



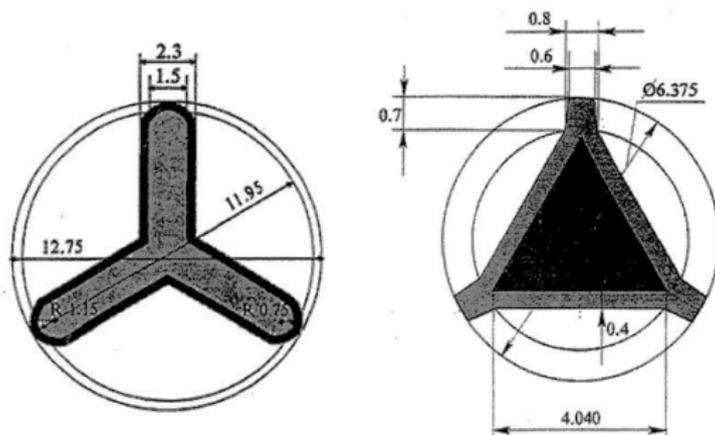
Combustible

- Combustible en barras tradicional → ruido y turbulencia en el refrigerante
- Empleo de otros diseños menos ruidosos y más compactos, que favorecen la transferencia de calor
- Configuración en placas en EE.UU. y en espiral en la URSS



Combustible

- Geometría de estrella y triángulo en la URSS (2ª generación)



Control

- Barras de control de Hafmio o Cadmio
 - Forma de cruz → combustible tipo **placa**
 - Cilíndricas → el resto
 - Mecanismo de **rotación** para evitar la extracción accidental
- El refrigerante **NO** tiene Boro para evitar que la concentración disminuya si se inunda con agua de mar.
- Puede tener barras absorbentes fijas



Potencia y tiempo de recarga

- Potencia desde 50 MWt en los modelos **pequeños**, hasta 160 MWt en los modelos más **grandes** (3000 MWt en las centrales industriales)
- Tiempo de recarga más de 10 años
- **Una** sola carga en toda la vida útil del submarino
- Debido al **alto enriquecimiento** de U-235



Índice

- 1 Introducción
- 2 Reactor nuclear
- 3 Sistemas de propulsión naval nuclear**
- 4 Protección radiológica en submarinos
- 5 Desmantelamiento y vaciado de combustible



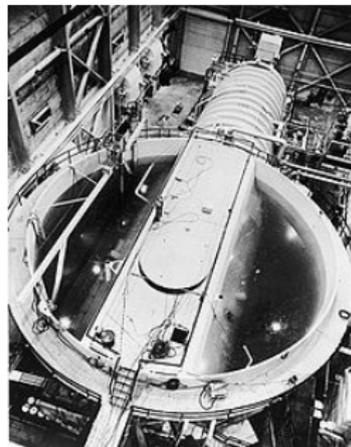
Desarrollo de reactores para submarinos

- Los reactores de propulsión comenzaron a desarrollarse en el campo **militar**
- Para dar una idea general, nos centraremos en el desarrollo de reactores de propulsión de la **U.S. Navy**
- Denominación de reactores nucleares estadounidenses mediante 3 caracteres:
 - ① Tipo de embarcación. En nuestro caso siempre "S"
 - ② Orden de desarrollo. "1" para 1ª gen., "2" para 2ª gen., etc.
 - ③ Diseñador del reactor. "W" para Westinghouse, "G" para General Electric.



Desarrollo - Westinghouse

- Dos líneas de desarrollo iniciales, Westinghouse y General Electric.
- Westinghouse: Proyecto *Submarine Thermal Reactor* (STR) → Desarrollo de un reactor PWR.
 - 1 S1W: Prototipo construido en tierra
 - 2 S2W: Instalado en el *Nautilus* (1953), el primer submarino nuclear
- Características:
 - Combustible: UO_2 en vainas de zircaloy
 - El combustible alcanzaba 340 °C, y 288 °C en la vasija
 - Ciclo de 25 días sin necesidad de recarga
 - Potencia de propulsión de 10 MWe
- Otros reactores: S3W y S4W, más pequeños y S5W, un 30 % más potente



Desarrollo - General Electric

- Proyecto *Submarine Intermediate Reactor* (SIR) → Desarrollo de un reactor refrigerado por sodio
 - S1G: Prototipo construido en tierra
 - S2G: Instalado en los submarinos clase Seawolf (1953)
- Características:
 - UO_2 como combustible y berilio como moderador y reflector
 - El combustible alcanzaba 900 °C, y 480 °C en la vasija
 - Ciclo de 37.5 días sin necesidad de recarga
- Ventaja → Vapor sobrecalentado a alta presión y temperatura
- Desventaja → Blindaje pesado. El sodio reacciona de manera explosiva con el agua

SE ABANDONÓ EL CONCEPTO DE REFRIGERACIÓN
POR SODIO LÍQUIDO



Desarrollo - General Electric

- General Electric pasó a desarrollar reactores de propulsión PWR:
 - **S3G**: Prototipo construido en tierra
 - **S4G**: Instalado en el submarino *Triton* –con 2 reactores, bastante potente– (1957)
- Nuevo objetivo → submarinos más silenciosos → Prototipo **S5G**
 - Basado en la circulación natural del agua de refrigeración
 - Bombas de agua más pequeñas, como elementos auxiliares
 - Estrictas evaluaciones previas
 - Reactor con una potencia de 90 MWt, instalado en el el *USS-Narwhal* (1967)
- Reactores de circulación natural que sí fueron instalados en submarinos
 - **S8G**: Submarinos clase *Ohio* (1981)
 - **S6W**: Submarinos clase *Seawolf* (1997)



Desarrollo - General Electric

- Último reactor nuclear para propulsión desarrollado por G.E. → **S9G**
 - Instalado en los submarinos clase Virginia (2004)
 - Pueden operar durante 33 años
 - Potencia de 30 MWe
 - Alta densidad de energía → Más silenciosos y compactos



Índice

- 1 Introducción
- 2 Reactor nuclear
- 3 Sistemas de propulsión naval nuclear
- 4 Protección radiológica en submarinos**
- 5 Desmantelamiento y vaciado de combustible



Protección radiológica en submarinos

La protección radiológica es un factor fundamental en el diseño de submarinos nucleares.

Consideraciones:

- Limitaciones en el peso del submarino. Influye en la cantidad de blindaje
- Es necesaria una buena distribución del peso para garantizar la estabilidad.
- Un submarino es un sistema cerrado en continua operación.
- La tripulación habita en el submarino durante meses.



Principio ALARP → *As low as reasonably practicable*



Protección radiológica en submarinos

Principal fuente de radiación → Proceso de **fisión**

Otras fuentes → Agua refrigerante y materiales fuera del núcleo.

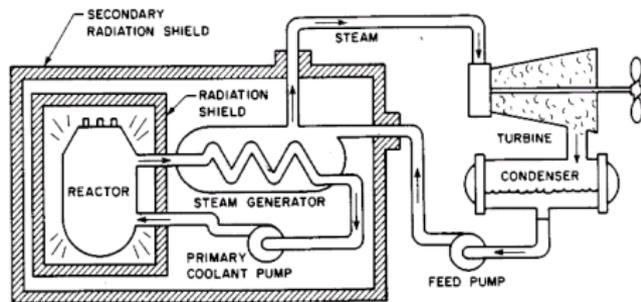
La protección radiológica se realiza mediante dos blindajes en el compartimento del reactor, llamados blindaje primario y blindaje secundario.

- **Primario:** Alrededor del núcleo. Protege de la radiación gamma del núcleo y frena los neutrones.

Materiales → Agua y plomo

- **Secundario:** Paredes del compartimento del reactor. Absorben los neutrones rápidos del núcleo y la radiación de fuentes secundarias.

Materiales → Hormigón, plomo y polietileno



Índice

- 1 Introducción
- 2 Reactor nuclear
- 3 Sistemas de propulsión naval nuclear
- 4 Protección radiológica en submarinos
- 5 Desmantelamiento y vaciado de combustible**



Desmantelamiento y vaciado de combustible

Motivos

Fin de la vida útil del submarino, coste de operación relativamente alto o cuando el submarino ya no es necesario. Proceso complicado debido a la alta radiactividad del reactor tras varias décadas de funcionamiento

- 1 Recuperación de equipamiento útil en la base naval. Misiles, explosivos, documentos clasificados, etc.
- 2 Viaje final al astillero. Se apaga el reactor y se deja en reposo unos días. Decae la radiación por isotopos de baja semivida.
- 3 Se corta el submarino en tres o cuatro piezas → Se extrae el compartimento del reactor
- 4 Una vez extraído el reactor, el submarino ya no supone un peligro radiactivo. Se reciclan las partes útiles.



Desmantelamiento y vaciado de combustible



Desmantelamiento y vaciado de combustible

- El compartimento del reactor es extraído. Se procede al vaciado de combustible → Eliminación del 99 % de la radiactividad.
- El combustible puede ser considerado desecho radiactivo o reutilizado de nuevo como combustible (Alta concentración de U-235)
- El compartimento sigue teniendo algo de radiactividad → Se sella y almacena indefinidamente. Puede enterrarse a baja o alta profundidad
- Todo el proceso de desmantelamiento y vaciado de combustible cuesta en torno a **25-50 millones de dólares** por submarino.



Referencias



BLANCO-TRABA, J., AHNERT, C., SAINZ DE BUSTAMANTE, A., y FERRERO, J. (2001). *Aspectos Actuales de la Propulsión Naval Nuclear*. Madrid.



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.



PIWOWARSKI, M. (2013). The Analysis of Turbine Propulsion Systems in Nuclear Submarines. *Key Engineering Materials*, (págs. 99-105).



RAGHEB, M. (2017). Nuclear Marine Propulsion.



VANN, H., WEISS, M., y WOLFE, B. (1958). *Shielding Aspects of Nuclear Power Plants for Marine Propulsion*.



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>



Propulsión nuclear en submarinos

Tecnología Nuclear

4º GITI

Alberto Haldón Vallellano
Diego Jesús Benjumea Gayango

Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Junio de 2017

