



Universidad de Oviedo

ESCUELA SUPERIOR DE LA MARINA CIVIL DE GIJÓN

Trabajo Fin de Grado

Evolución en los propulsores de submarinos
para minimizar su firma acústica
Para acceder al Título de Grado en

NÁUTICA Y TRANSPORTE MARÍTIMO

Autor/a: Carlos Suárez Campoamor

Tutor/a: Julio Alfonso Fernández Fanjul

Enero - 2023

CONTENIDOS

1	RESUMEN.....	4
2	INTRODUCCION.....	5
3	HELICES	6
3.1	Definición.....	6
3.2	Orígenes.....	6
3.3	Elementos de una hélice.....	8
3.4	Funcionamiento	9
4	HELICES EN SUBMARINOS.....	10
4.1	Materiales de construcción	10
4.2	Diseño de la hélice	11
4.3	Cavitación.....	13
4.3.1	Tipos de cavitación.....	14
4.3.2	Efectos de la cavitación.....	15
4.3.3	Medidas para evitar la cavitación.....	16
4.3.4	Supercavitación y su aplicación en el ámbito militar.....	17
4.4	Hélice submarino Ruso Clase Kilo.....	17
4.5	Submarino alemán 212 U36 Difusor de Vórtice Propeller Boss (DVPB).....	18
4.6	Hélices contra rotativas	21
5	PROPULSORES ALTERNATIVOS.....	22
5.1	Hélice con estator a proa.....	22
5.2	Conducto propulsor (Pump-Jet).....	23
5.2.1	Configuración y funcionamiento.....	24
5.2.2	Ventajas e inconvenientes de la propulsión Pump-Jet.....	25
5.2.3	Submarinos chinos	26
6	SISTEMAS DE PROPULSION	27
6.1	Submarinos convencionales o diesel-eléctricos (SSK).....	27

6.1.1	Sistema AIP (Air Independent Propulsion).....	29
6.1.2	Firma acústica submarinos diesel (SSK) actuales.	32
6.1.3	Reducción del ruido de la maquinaria.	35
6.2	Submarinos nucleares (SSN).....	43
6.3	Ventajas y desventajas de submarinos convencionales y nucleares.	45
7	FUTURO.....	46
8	CONCLUSIONES.....	48
9	BIBLIOGRAFIA.....	50

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 . Tornillo de Arquímedes.	6
Figura 2. Submarino Turtle, David Bushnell 1775.	8
Figura 3. Partes de una hélice.	9
Figura 4. Hélice estándar submarino Kilo.	12
Figura 5. Generación de burbujas por el fenómeno de cavitación.	14
Figura 6. Tipos de cavitación.	15
Figura 7 Submarino Ruso Clase Kilo.	18
Figura 8 Submarino alemán 212 U36	19
Figura 9 Diferencia hélices con EPF y sin EPF	20
Figura 10 Sistema DVPB Submarino alemán 212 U36	21
Figura 11 Hélice contra-rotativa del USS Albacore	22
Figura 12 Hélice con estator a proa.	23
Figura 13 Diseños conducto acelerador (izquierda) y decelerador (derecha).....	23
Figura 14 Estructura sistema Pump-Jet.....	24
Figura 15 Pump-Jet del submarino Ruso Alrosa al descubierto.	25
Figura 16 Submarino de misiles balísticos clase Jin Tipo 094.....	27
Figura 17 Esquema simplificado de un submarino diesel-eléctrico.	28
Figura 18 Esquema básico funcionamiento MESMA	30
Figura 19 Generadores de ruido a bordo de un submarino.	35
Figura 20 Placas anecoicas del HMS Triumph.....	36
Figura 21 Sistema inercial.....	37
Figura 22 Sistema Paralelo.....	37
Figura 23 Sistema en serie	38
Figura 24 Esquema del neutralizador de vibraciones del sistema de aislamiento adaptativo-pasivo.	39
Figura 25 Esquema simplificado de silenciador de resonador pasivo-adaptado instalado en un conducto de escape.....	41
Figura 26 Esquema Resonador Helmholtz.....	41
Figura 27 Esquema simplificado de sistema de control de ruido activo.....	42
Figura 28 Tipo de silenciador de resonador.	43
Figura 29 Breve esquema de planta propulsora en un submarino nuclear (SSN)	44
Figura 30 Submarino nuclear Clase Virginia.	45

1 RESUMEN

El mundo de los submarinos se ha desarrollado en gran medida con el paso de los años, y con ellos, sus sistemas de propulsión, volviéndose cada vez más sofisticados e innovadores. El principal objetivo de todo submarino es tratar de ser lo más sigiloso posible y así evitar ser detectado por los sonares hostiles. Para ello, son numerosos los sistemas que se han ido empleando con el paso del tiempo para así tratar de reducir el ruido radiado tanto por el propio submarino como por sus sistemas de propulsión.

El presente trabajo estudia los distintos tipos de propulsores y las diferentes configuraciones que pueden adoptar, y así conseguir un mayor rendimiento y por tanto una mayor eficiencia. Se prestará especial atención a los diversos sistemas empleados con el fin de reducir su firma acústica.

PALABRAS CLAVE: Submarino, firma acústica, hélice, cavitación, ruido.

ABSTRACT

The world of submarine has largely developed over the years, and with them, their propulsion systems, becoming more innovative and sophisticated. The main goal of every submarine is to be as quite as posible to avoid being detected by hostile sonars. To achieve this, many systems have been developed over the years to attenuate the radiated noise by the submarine and his propulsion systems.

The present project studies the different types of propulsors and the different configurations that they can adopt to achieve their best performance and efficiency. Special attention will be given to the systems used in order to reduce their acoustic signature.

KEYWORDS: Submarine, acoustic signature, propeller, cavitation, noise.

2 INTRODUCCION

El mundo de los submarinos se ha desarrollado en gran medida con el paso de los años, y con ellos, sus sistemas de propulsión, volviéndose cada vez más sofisticados e innovadores. El principal objetivo de todo submarino es tratar de ser lo más sigiloso posible y así evitar ser detectado por los sonares hostiles. Para ello, son numerosos los sistemas que se han ido empleando con el paso del tiempo para así tratar de reducir la firma acústica producida por el propio submarino y por sus sistemas de propulsión.

En el presente trabajo nos centraremos en la evolución de los sistemas propulsores y de los pequeños ajustes que se han ido realizando sobre los mismos para reducir su firma acústica. Veremos los principales elementos de los propulsores convencionales como son las hélices y su respectivo funcionamiento, al igual que los distintos materiales empleados para su construcción y los diversos diseños adoptados por las mismas. También veremos algunos de los principales fenómenos que afectan al correcto funcionamiento de los propulsores como es la cavitación, fenómeno por el cual se puede llegar a generar una excesiva firma acústica.

Por otra parte, veremos las distintas configuraciones empleadas en una serie de submarinos así como las posibles alternativas a las hélices como método de propulsión como bien puede ser los innovadores sistemas Pump-Jet cada vez más utilizados por los submarinos actuales, pero con unos costes muy superiores. Y por último nos centraremos en las dos clases de submarinos que se han utilizado hasta el momento según su sistema de propulsión pudiendo diferenciarse los submarinos diesel-eléctricos (SSK) y los submarinos nucleares (SSN), analizando las distintas ventajas y desventajas que tiene el uno frente al otro, así como los diferentes sistemas que emplean para tratar de reducir su firma acústica al máximo.

3 HELICES

3.1 Definición.

Cuando hablamos de una hélice, estamos hablando de uno de los elementos más importantes en la estructura de un buque. Se trata del elemento propulsor del buque, el cual está formado por un conjunto de palas con forma helicoidal que unidas a un eje, giran en el mismo sentido que este. (Nautico, Diccionario 2022)

El movimiento de rotación que producen las palas se transforma en empuje y esto genera una diferencia de presiones entre las dos caras de la propia pala. Basándonos en la teoría de Bernoulli acerca de la diferencia de presiones, la acción de la hélice sobre el agua generará una mayor presión hacia proa y una menor presión hacia popa, lo que hará generarse un empuje que permitirá que el buque avance.

3.2 Orígenes.

Son varios los historiadores que asocian el origen de las hélices con el llamado tornillo de Arquímedes (Figura 1), un tornillo que permitía elevar líquidos, harina, cereales o restos de excavaciones, pero también se le asocia a diversos inventos que han surgido a lo largo de la historia como los dispositivos de rosca que los egipcios utilizaban para facilitar las labores de riego en el campo, o a los planos que elaboró Da Vinci partiendo de la idea principal de Arquímedes, a la cual, ya buscaba darle otro enfoque con una aplicación propulsora. (Laboluz 2019)

(Annaisebella 2022)

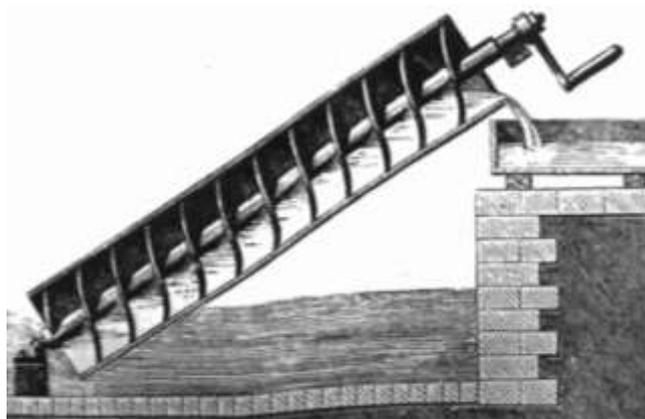


Figura 1 . Tornillo de Arquímedes.

Una vez visto el posible origen de las hélices, podríamos decir que determinar con exactitud quien ha sido el inventor de dicho elemento es algo muy complejo, por lo que ha sido más bien una serie de mejoras y perfeccionamiento a lo largo de la historia y todas ellas partiendo de una idea principal.

Uno de los primeros usos que se le dio a una hélice de forma práctica y que se llegó a aplicar, fue en el submarino *Turtle* (Figura 2), diseñado por David Bushnell en Connecticut (Roy R 2010). Este submarino es considerado el primero en participar en batalla en la guerra de la independencia de los Estados Unidos. El propio diseñador, Bushnell, describió la hélice como “Un remo formado según el principio del tornillo se fijaba en la parte delantera del barco, su eje entraba en el barco y, al girarlo en una dirección, hacía que el barco avanzara, pero giraba el de otra manera, se remaba hacia atrás. Estaba hecho para girar con la mano o el pie” (Nicholson 1801)

Con el paso de los años fueron surgiendo diferentes modelos, entre ellos el del inventor checo-austriaco Josef Ressel, el cual consistía en una hélice de tornillo a la que le añadió unas palas rodeando una estructura cónica. Esta hélice la probó y con éxito en un barco que se impulsaba de manera manual y en otro de vapor. Más tarde su barco el *Civetta*, fue el primer barco impulsado por una hélice del tipo Arquímedes, llegando a alcanzar una velocidad de unos 6 nudos. Un accidente en un barco de vapor supuso de la supresión de sus experimentos al ser considerados como peligrosos, retardando así su incorporación en nuevos diseños de embarcaciones (Normand 1962).

Esta invención supuso un gran avance en la construcción de embarcaciones y sería John Ericsson quien perfeccionaría la hélice apoyándose el modelo mencionado de Ressel y realizando la primera travesía transatlántica (Laboluz 2019).

(Lienhard 1988-1997)

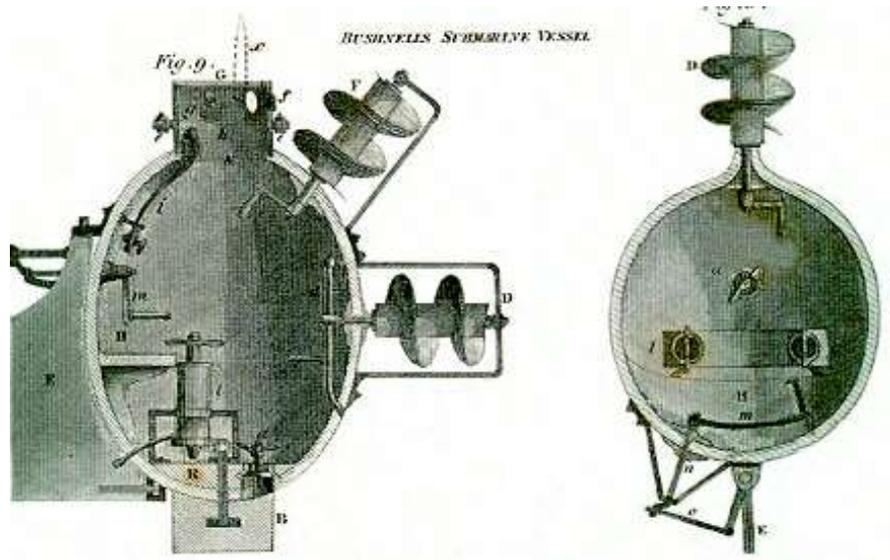


Figura 2. Submarino Turtle, David Bushnell 1775.

3.3 Elementos de una hélice

Antes de centrarnos en su funcionamiento y una vez visto que es una hélice y su posible origen, a continuación distinguiremos las distintas partes que la componen (Figura 3).

Cara de la pala: se trata del lado de la pala de la hélice que se encuentra mirando hacia popa. También se le conoce como cara activo o de presión y es la cual se encarga de empujar el agua cuando el buque de desplaza avante (Tigre 2014).

Cara pasiva: el otro lado de la pala recibe el nombre de cara pasiva o de succión y es el que se encuentra hacia proa del buque. Se trata de la parte de la hélice que primero se encuentra con el agua y la cual genera una diferencia de presión gracias a su forma de lámina en su sección transversal (Tigre 2014).

Borde de ataque: se trata del borde de la pala que primero entra en contacto con el agua.

Borde de salida: el borde de salida es el borde opuesto al de ataque y su función es la de facilitar el deslizamiento del agua sobre la cara activa de forma limpia, para así poder conseguir la mayor eficiencia posible (Tigre 2014).

Nuez o tapa: se trata del núcleo de la hélice sobre el cual van colocadas las palas (Fernandez 2020).

Eje: el eje se encarga de hacer girar la hélice y donde esta va montada.

Capacete: se trata del elemento cónico que refuerza la parte de popa del núcleo evitando la entrada de agua en el eje y que gracias a dicha forma cónica ayuda a reducir la resistencia al avance una vez el buque está en movimiento (Fernandez 2020).

(Dominguez 2017)

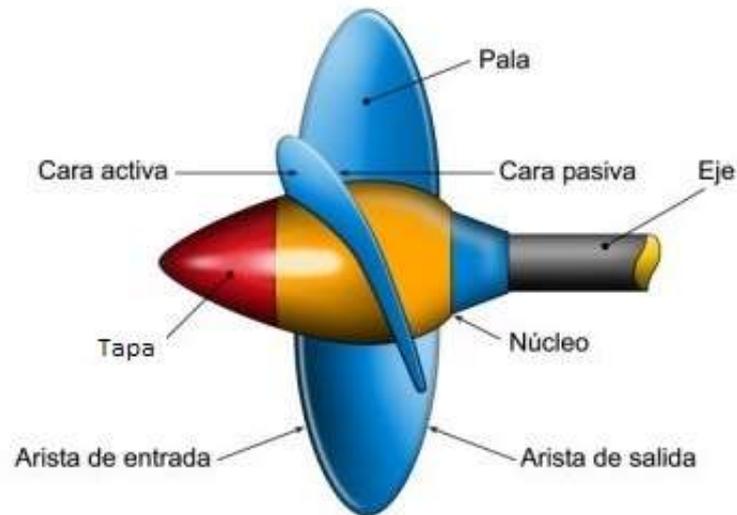


Figura 3. Partes de una hélice.

3.4 Funcionamiento

La energía de rotación producida por el motor, se transforma en empuje (y presión hacia atrás) gracias a la hélice y dicho empuje es el que permite el desplazamiento del buque. Sin entrar en el diseño específico de cada hélice, cuanto mayor sea esta mayor eficiencia obtendremos (Fondear 2012). En el caso de los submarinos este tamaño dependerá de si se trata de un submarino convencional (diesel-eléctrico) o un submarino nuclear.

Estos últimos, son submarinos que requieren una respuesta rápida en cuanto a velocidad, al igual que el nivel de ruido producido sea mínimo, pudiendo utilizar hélices de paso fijo o controlable y entre 5 y 7 palas de uno, dos o tres ejes. En cambio los convencionales no requieren navegar a altas velocidades por lo que sus hélices pueden ser más pequeñas, pero manteniendo la misma configuración de 5 a 7 palas. Una gran diferencia con respecto a la de un submarino nuclear es que normalmente son hélices de paso fijo y un solo eje (Siano, el snorkel 2004).

4 HELICES EN SUBMARINOS

Tras haber realizado una pequeña introducción al mundo de las hélices en cuanto a su posible origen, los elementos que la componen y su funcionamiento, ahora nos centraremos en las hélices de los propios submarinos, analizando que tipo de materiales se emplean para su fabricación y la configuración de las mismas para evitar la generación de ruidos.

4.1 Materiales de construcción

Uno de los principales objetivos de los materiales de construcción en hélices marinas es evitar la corrosión del agua del mar o tratar de reducirla al máximo posible.

Son varios los materiales que se emplean para la construcción de hélices, pero estos dependerán del uso que se le quiera dar a la misma. Aun así las propiedades fundamentales que deben incluir dichos materiales son resistencia, rigidez, durabilidad y resistencia al impacto y a la erosión. A parte, para aplicaciones militares, como es el caso de los submarinos, deben tener un rendimiento discreto para minimizar la firma acústica, es por ello que gran parte de las hélices están hechas de aleaciones de metal, empleándose el aluminio, acero inoxidable, bronce, bronce de aluminio de níquel e incluso el titanio cuyo uso ha ido a más con el paso de los años. (Koko 2012).

En el caso del acero inoxidable se trata de un material el cual su capacidad para ser fundido y moldeado a grandes escalas es bastante costoso y difícil de realizar con precisión, a parte es pesado y su coste de reparación es bastante elevado. Aun así es duro y tiene gran durabilidad.

El aluminio en cambio es un material más ligero, más fácil de reparar y no muy costoso, pero su uso está más bien enfocado al ámbito del recreo.

Otro de los materiales empleados sobre todo en los submarinos a lo largo de los años es el níquel aluminio bronce (NAB), se trata de un material pesado de gran durabilidad y fácil de reparar pero tiene un inconveniente y es que es muy susceptible a sufrir corrosión, es por ello que ya existen numerosos estudios para tratar de reemplazar el NAB con composites, los cuales están demostrando mayor resistencia que los metales a explosiones (Koko 2012)

Por último, otro de los materiales que se ha llegado a emplear, como se ha mencionado anteriormente, son las aleaciones titanio. Estas aleaciones poseen una mayor resistencia a la corrosión y a la fatiga por corrosión si lo comparamos con las aleaciones de cobre y acero, además se trata de una material no muy pesado debido a su baja densidad de forma

que permiten a la nave desplazarse de forma más eficiente. Otra de las ventajas de este material con respecto al resto es que su mantenimiento y reparación son fáciles lo que proporcionara una mayor durabilidad. A lo largo de los años han sido varios los países que han ido introduciendo este material en la construcción de sus hélices tales como Rusia, Gran Bretaña y EEUU. En el caso de Rusia, sus submarinos Alfa y Mike, poseen hélices fabricadas con aleaciones de titanio. Otro ejemplo de su uso está en el submarino de investigación 50T empleado por la marina de los EEUU, que utiliza una aleación de titanio de supercavitación (fenómeno que se explicara a posteriori) desmontable de tres palas. Además de su empleo en las hélices, otro de los usos del titanio está en los motores de los barcos, en los sistemas de propulsión de potencia y en los sistemas de propulsión a chorro de agua.

Son muchos los barcos que a lo largo de los años han empleado aleaciones de titanio y experimentado con ellas, y como resultado se ha podido comprobar que se trata de un material que tiene una fuerte resistencia a la corrosión y que tiene una mayor durabilidad que otras hélices construidas con las tradicionales aleaciones de cobre. (Industria de titanio Baoji Chengyun 2022)

4.2 Diseño de la hélice

La configuración de las hélices en los submarinos es uno de los aspectos más importantes para su construcción, ya que es uno de los principales generadores de ruido, y aunque reducir el mismo por completo es algo imposible, el diseñador de la misma hará todo lo posible por tratar de reducirlo. A parte, el diseño de las mismas es uno de los mayores secretos en el ámbito de su aplicación militar, ya que ser conocedor del tipo de hélice empleada y su configuración, facilitara la identificación del propio submarino.

En el diseño de la hélice son diversos los factores que se han de tener en cuenta para tratar de reducir el ruido y las vibraciones generadas por la misma, entre los cuales podemos distinguir:

- Hélice de paso fijo o paso variable: la elección del tipo de paso dependerá del submarino, distinguiendo dos tipos, submarinos nucleares y submarinos convencionales (diesel-eléctrico).
- Número de palas y sus perfiles.
- Diámetro.

La elección de una hélice de paso fijo o paso variable dependerá del tipo de función que vaya a desempeñar el sumergible y de la planta propulsora que vaya a utilizar. Los submarinos nucleares, necesitan eficiencia en cuanto a velocidad y sin producir un ruido excesivo llegando a utilizar hélices de paso fijo o paso variable de dos ejes. Por otra parte, los convencionales (diesel-eléctrico), no son submarinos que requieran una gran velocidad y emplean en gran parte de las ocasiones hélices de paso fijo. (Siano, El Snorkel 2004)

Por lo general , tanto los submarinos nucleares como los convencionales emplean una configuración de 5 a 7 palas, ya que a mayor número de palas obtendremos una menor vibración, debido a que la carga que soportan cada una de ellas es menor al estar más repartida, y por lo tanto se obtendrá un mejor rendimiento y menos ruido. En cuanto al diámetro cuanto mayor sea este, más cantidad de agua se desplazara, de forma que no serán necesarias muchas revoluciones, lo cual también favorecerá a la eficiencia de la hélice y a la no generación de ruidos.

(Papangelopoulos, NavalAnalyses 2018)



Figura 4. Hélice estándar submarino Kilo.

Otro aspecto que favorece al rendimiento de la hélice, y como podemos observar en la (Figura 4), es el lanzamiento circunferencial, el cual permite la entrada de flujo en las palas de forma progresiva, lo que supone un mayor rendimiento propulsivo, una menor vibración y menos ruido. (Fernandez 2020)

Una vez visto los materiales y los factores a tener en cuenta a la hora del diseño y construcción de la hélice, podríamos decir que, para que la hélice pueda llevar a cabo su función con el mayor rendimiento y eficiencia posible, deberemos adaptar el propio propulsor a las características del sumergible, dependiendo de su sistema de propulsión y de sus formas, pero todo esto será inútil si los materiales escogidos son deficientes o se emplean de forma errónea, lo que llevaría a nuestra hélice a producir niveles elevados de ruido, vibraciones y en su consecuencia, cavitación, fenómeno el cual se debe evitar a toda costa y más aún en este tipo de naves, donde el sigilo es el pilar fundamental.

4.3 Cavitación.

Como ya se ha mencionado anteriormente, la cavitación es uno de los fenómenos a evitar en el mundo naval, ya que su efecto genera una serie de vibraciones y de ruidos que entorpecen el correcto funcionamiento y rendimiento de la hélice, y en el caso de los submarinos se deberá suprimir en su totalidad para reducir las posibilidades de ser identificado.

Cuando hablamos de cavitación, hablamos de la generación, vaporización e implosión de burbujas que tienen lugar en el agua al producirse una variación de la presión. Las hélices marinas son propensas a sufrirla ya que dentro del agua se encuentran girando a altas velocidades y experimenta diversos cambios de presión en la superficie de las caras de sus palas, con lo cual, a medida que el buque se desplace a mayor velocidad, este efecto ira incrementándose.

Una vez las hélices comienzan a girar, el agua es expulsada hacia atrás, generándose en la cara de proa de la hélice un vacío, el cual es ocupado por unas nuevas moléculas de agua, pero a medida que se incrementa la velocidad, el agua expulsada genera una mayor fuerza, la cual evita que ese vacío sea ocupado por dichas moléculas, generándose de esta forma burbujas de vapor. Estas burbujas se desplazan hacia la otra cara de la pala, la cual se encuentra a una presión más elevada, lo que supone un nuevo cambio físico de las mismas implosionando contra las propias palas de la hélice. Esta implosión de las burbujas contra la pala, es la consecuente de la generación de ruidos y de vibraciones que afectan al rendimiento de la hélice, reduciendo en gran medida su durabilidad y aumentando sus costes de mantenimiento. (Miguel 2016)

(Bernassa 2016)

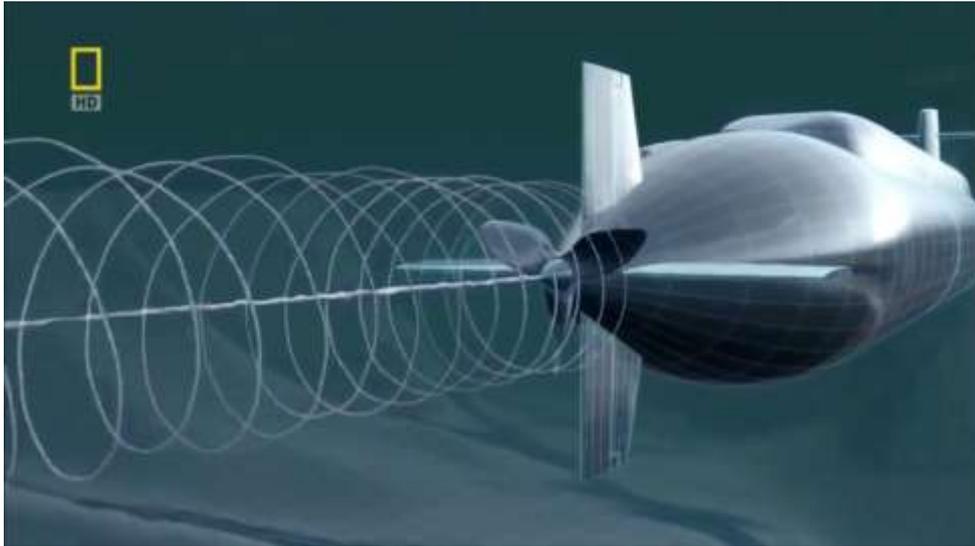


Figura 5. Generación de burbujas por el fenómeno de cavitación.

4.3.1 Tipos de cavitación.

Dentro del fenómeno de cavitación podemos distinguir varios tipos:

- Laminar: por lo general, se genera en los bordes de ataque de las palas. Suele ser bastante estable, pero si se descontrola, puede llegar a generar fuertes tensiones.
- Nube: suele formarse al final de la pala y tiene un gran carácter destructivo.
- Burbuja: como su nombre indica se trata de la generación de burbujas, que normalmente se desarrollan en la zona media de la pala.
- De vórtice: en este tipo de cavitación podemos encontrar, vórtice de cubo o de punta. Tienen forma de cordones en punta de las palas y en el centro de la hélice.
- Interacción propulsor-casco: genera una especie de vórtice de breve duración, pero que genera ruido.

(Fernandez 2020)

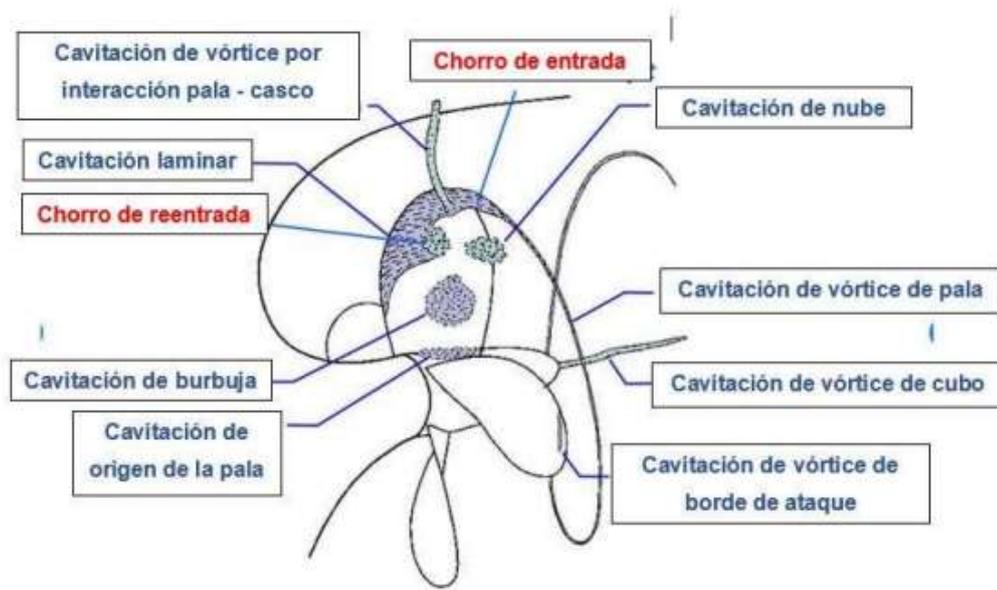


Figura 6. Tipos de cavitación.

4.3.2 Efectos de la cavitación.

Por lo tanto el efecto de la cavitación, supondrá un gran problema para un submarino, ya que, disminuirá el rendimiento de la hélice, las palas de la misma sufrirán erosión, se reducirá el empuje y se generaran ruidos y vibraciones perjudiciales para la supervivencia del propio submarino.

El rendimiento de la hélice se puede ver afectado a medida que la cavitación se extiende a lo largo de la pala con el aumento de la carga que soporta cada una de ellas. Llegará un punto a partir del cual se producirá una pérdida de empuje y con esto un aumento de las revoluciones para una potencia ya dada, lo que supondrá una notable pérdida de eficiencia.

Por otra parte, como bien se ha dicho antes, la erosión es otro de los principales de problemas de la cavitación. La burbujas que se generan por la diferencias de presiones y que se extienden a lo largo de la hélice, tienen un efecto evidentemente negativo sobre la superficie de las palas que pueden erosionarse rápidamente. Inicialmente, dejan unas pequeñas muescas circulares en la superficie y si la cavitación tiene una mayor persistencia se puede llegar a producir una grave corrosión por picadura de metal lo que suponen la aparición de una especie de cráter en la superficie de las palas. Las zonas más susceptibles a sufrir erosión son las puntas y los bordes de salida de la pala.

Por último, y el efecto más negativo en los submarinos, es la generación de ruido debido a la cavitación. Las cavidades que se derrumban dan lugar a efectos de ruido, los cuales son altamente perjudiciales para la identificación del sumergible. (Cultofsea 2020)

4.3.3 Medidas para evitar la cavitación.

Una vez visto en que consiste la cavitación y los tipos existentes, veremos alguna de las posibles soluciones para tratar de combatirla y así evitar uno de los principales fenómenos generadores de ruido.

Como ya se ha explicado en los anteriores apartados, a medida que aumenta la velocidad del agua por el efecto de rotación de las hélices, se produce una disminución de la presión local en la hélice, produciéndose la evaporación del agua y generándose las cavidades de vapor que afectan al rendimiento de la misma. Por lo tanto, el objetivo principal será tratar de reducir la velocidad del agua para evitar dicha evaporación, lo que supondrá una reducción de la velocidad de giro de las hélices. Perder velocidad de giro en las hélices supondrá pérdida en la velocidad de avance, por lo que otro de los objetivos será mantener dicha velocidad y tratar de alcanzar la máxima.

En cualquier elemento que se encuentre girando, la mayor velocidad se obtiene en la periferia, cuanto más lejos se este del centro de rotación mayor será la velocidad. En las hélices, la máxima velocidad se obtendrá en el extremo de sus palas, con lo cual, cuanto mayor sea el diámetro de la propia hélice, mayor será la distancia de los extremos al centro de rotación, obteniendo una mayor velocidad.

En conclusión, para evitar la cavitación se tendrán en cuenta entre otros parámetros, la velocidad de giro y el diámetro, entre los cuales deberemos obtener un equilibrio para tratar de reducir el efecto producido por la cavitación y tratar de sacar el mayor rendimiento posible a la hélice. Para un diseño óptimo en la hélice de un submarino, se calculara la velocidad máxima de giro cuando se encuentre operando y en consecuencia se establecerá el diámetro máximo que debe tener para evitar la cavitación. (Aprende en realidad 2021)

Otras de las posibles medidas para combatir la cavitación podrían ser:

- Variar el paso de la hélice para reducir la carga en las zonas críticas de la pala.
- Reducir el grosor de las palas empleando materiales resistentes a los efectos de la cavitación.
- Emplear un menor número de revoluciones por minuto, dicho aspecto estará ligado a los parámetros de la velocidad de giro y diámetro que anteriormente se ha explicado, ya que el reducir las revoluciones supone una pérdida de velocidad, pero si

aumentamos el diámetro conseguiremos llegar a un equilibrio que proporcionara la velocidad máxima.

- Y por último, otro de los factores a tener en cuenta es la profundidad a la que se encuentre el submarino ya que, a mayor profundidad, menores serán los efectos de la cavitación.

4.3.4 Supercavitación y su aplicación en el ámbito militar.

La supercavitación se trata de un fenómeno hidrodinámico ligado a la cavitación de aquellos objetos que se desplazan a gran velocidad dentro de un fluido, en este caso el agua de mar. En el ámbito naval es un fenómeno que ayuda a reducir la resistencia que ofrecen los objetos al desplazarse en el agua, como pueden ser los torpedos de un submarino militar.

La supercavitación se aprovecha de la cavitación del objeto, ya que si la velocidad de este es muy alta, las burbujas de vapor que se generan alrededor, pueden llegar a envolverlo, formándose una nube de gas la cual hace que el agua apenas este en contacto con la superficie del objeto, disminuyendo en gran medida la resistencia al avance que proporciona el agua.

Como ya se ha mencionado algunas de las aplicaciones de este fenómeno están en los torpedos de los submarinos, como el VA-111 Shkval, desarrollado por la Unión Soviética y luego por Rusia, o en balas de destrucción de minas empleadas por la armada estadounidense, haciendo posible que estas balas lleguen con la suficiente potencia a una profundidad de unos 15 metros, e incluso ya se están empezando a desarrollar modelos de submarinos aprovechándose de este fenómeno, para que puedan desplazarse a velocidades extremadamente elevadas.

4.4 Hélice submarino Ruso Clase Kilo

Los submarinos rusos de la clase Kilo, están enfocados a operar en zonas de costa de poca profundidad y a operaciones de guerra antisubmarina. Son uno de los submarinos más silenciosos y poseen algunas de las tecnologías rusas más avanzadas en el ámbito submarino. Su capacidad para ser tan silenciosos la logran gracias a las medidas que emplean para la reducción del mismo. Sus motores se encuentran sobre una base de goma en vez de ir directamente fijados al propio casco, consiguiendo de esta forma absorber las vibraciones generadas por la maquinaria y el funcionamiento del propio motor.

Por otra parte, el casco y las aletas del submarino están recubiertas por unas losetas de goma anecoica, un recubrimiento que se encarga de absorber y atenuar el sonido, lo que permite absorber las ondas producidas por los sonares de buques enemigos, reduciendo así las probabilidades de ser detectados.

Consta de una hélice de 7 palas que le permite alcanzar velocidades de 11 nudos en superficie y hasta 20 nudos en las profundidades. (Mizokami 2019)

(Model Ship Masters 2012)



Figura 7 Submarino Ruso Clase Kilo.

4.5 Submarino alemán 212 U36 Difusor de Vórtice Propeller Boss (DVPB).

Como ya se ha mencionado anteriormente, el mundo de la propulsión de los submarinos es un mundo lleno de secretismos, donde la producción de cualquier tipo de avance tecnológico que suponga la mejora en el rendimiento o la reducción de la firma acústica generada por el propio submarino, supondrá un avance totalmente revolucionario.

Son muchos los submarinos que han ido introduciendo diferentes elementos de propulsión sustituyendo a las tradicionales hélices de 7 palas, como pueden ser los sistemas de pump

jet o sistemas de tobera, pero en el caso de este 212 U36, introduce un sistema el cual ofrece un mejor rendimiento y al mismo tiempo una reducción de los niveles de ruido, se trata de un Difusor de Vórtice Propeller Boss (DVPB).

(Padró 2021)



Figura 8 Submarino alemán 212 U36

Como podemos observar en la (Figura 8) el sistema DVPB se encuentra sobre el eje de la hélice. La función de este sistema es reducir las turbulencias y la cavitación generada por el cubo rotatorio de la hélice, lo cual no solo produce una reducción de la firma acústica sino que también proporciona una mayor eficiencia en la propulsión y el empuje.

Este sistema se basa en el ya conocido Propeller Boss Cap Fins (PBCF) diseñado por Mitsui OSK, dispositivo el cual consta de una serie de palas cortas inclinadas que tienen el objetivo de convertir la energía de vórtice de cubo en par adicional y en empuje de vuelta al eje. A base de experimentar con este sistema se ha comprobado que se puede llegar a conseguir una mejora de la propulsión entre un 4% y un 5%. La eliminación de dicho vórtice de cubo supone una reducción de ruido y de vibraciones.

Uno de los productos que podemos encontrar basados en este sistema y capaz de reducir hasta un 5% el consumo de combustible es el EnergoProFin (EPF), que debilita el vórtice que se crea en el núcleo, el cual produce un empuje negativo en la propulsión. Como ya se

ha mencionado algunos de los beneficios de este producto es la reducción de vibraciones, la reducción del ruido subacuático y un ahorro de combustible entre el 2% y el 5%.

En la siguiente Figura 9 podemos observar las diferencias entre una hélice con una tapa normal y una hélice con el sistema EnergoProFin.

(wärtsilä ibérica S.A.U 2020)

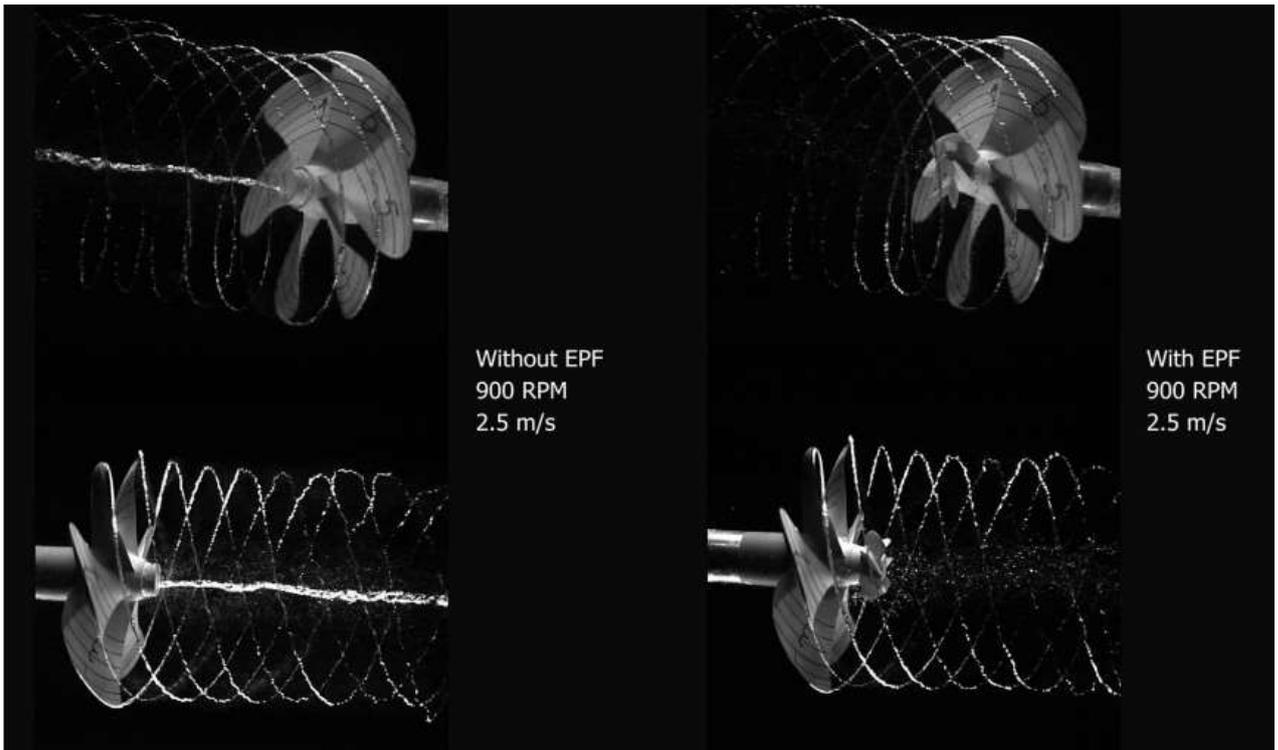


Figura 9 Diferencia hélices con EPF y sin EPF

Algunos submarinos rusos empleaban diseños más simples como en los submarinos de la clase Alfa o los últimos de la clase Kilo, no obstante el modelo que presenta este submarino alemán 212 U36, posee una forma más compleja, y esto puede que se deba a las altas RPM que ofrece la hélice o al tratar de reducir al máximo los efectos de la cavitación y vibraciones. (Rogoway 2019)

(Rogoway 2019)



Figura 10 Sistema DVPB Submarino alemán 212 U36

4.6 Hélices contra rotativas

Otra de las configuraciones que se han empleado a lo largo de los años en el mundo de los propulsores submarinos han sido las hélices contra rotantes, sin embargo, no han llegado a alcanzar el éxito esperado. Algunos submarinos de los EEUU, han probado esta configuración, como es el caso del USS Albacore o el USS Jack, utilizando este último un propulsor contra rotante el cual conseguía absorber la potencia que las turbinas de vapor generaban, de manera que se obtenía una gran eficiencia, aun así, no se logró reducir la firma acústica, el objetivo principal de todo submarino.

(Doehring 2020)



Figura 11 Hélice contra-rotativa del USS Albacore

5 PROPULSORES ALTERNATIVOS

A continuación veremos distintas alternativas de propulsión que ayudan a mejorar la eficiencia de la hélice y tratan de reducir los fenómenos negativos como la cavitación, para evitar pérdidas de energía y la generación de ruidos.

5.1 Hélice con estator a proa

La acción de la hélice produce un movimiento de rotación o “remolino” sobre el agua que es expulsada, lo que supone una pérdida de energía. Una de las soluciones para tratar de evitar esa pérdida, es el empleo de un estator de palas en conjunto con la hélice o rotor. Dicho estator ira sobre el casco a proa de la hélice, con un ángulo determinado que producirá un remolino previo sobre la hélice, reduciendo o eliminando prácticamente el remolino producido a la salida de la hélice. (Rydill 2014)

(Rydill 2014)

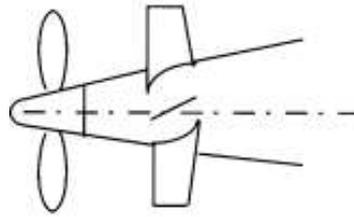


Figura 12 Hélice con estator a proa.

5.2 Conducto propulsor (Pump-Jet)

Otra de las posibles alternativas de propulsión son las hélices enductadas, lo que viene a ser un conducto que se encuentra rodeando la estructura de la hélice.

Los extremos de las palas de una hélice abierta, no son capaces de producir un gran empuje debido a la diferencia de presión entre las dos caras de la hélice, lo que lleva a producir el vórtice de punta, que como ya hemos visto anteriormente, supone una pérdida de eficiencia en la hélice y puede llevar a la cavitación, principal fenómeno generador de ruidos.

Con el empleo del conducto, podemos contener esa diferencia de presión entre las caras de la pala tratando de reducir el espacio entre el conducto y los extremos de las palas.

El conducto también está diseñado para tratar de controlar el flujo del agua en la hélice. Si este está diseñado con una sección transversal más grande en la zona de la hélice que en las zonas de entrada y salida, se reduce la velocidad del flujo y aumenta la presión en el rotor, lo que evita el inicio de la cavitación. A pesar de todo esto, el diseño de este tipo de conducto genera cierta resistencia, lo que obliga a la hélice a generar un mayor empuje. Otra opción puede ser diseñar el conducto para acelerar el flujo en el rotor.

(Rydill 2014)

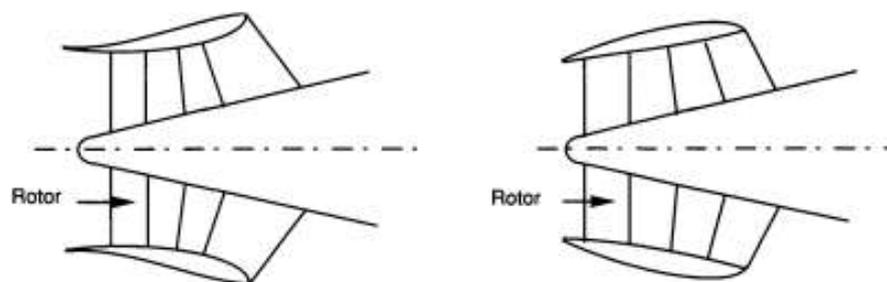


Figura 13 Diseños conducto acelerador (izquierda) y decelerado (derecha)

Como hemos visto, el empleo de un conducto alrededor de la hélice es capaz de generar un gran empuje por sí mismo, de forma que se reduce la carga sobre el rotor, por lo que el empleo del mismo es una gran opción si se quiere obtener una mayor eficiencia con unas elevadas condiciones de empuje. A parte este conducto permite la instalación de los estatores tanto a proa como a popa del rotor o en ambas posiciones. Estos estatores como ya hemos visto reducen el remolino producido y modifican el flujo a través del rotor para conseguir una mayor eficiencia. Esta configuración rotor, estator y conducto es un sistema conocido como sistema Pump-jet. (Rydill 2014)

5.2.1 Configuración y funcionamiento.

El sistema Pump-Jet ha ido incorporándose a un gran número de submarinos con el paso de los años. Puede adoptar distintas configuraciones pero por lo general consta de dos líneas de palas, un estator y un rotor o hélice, estando ambas recubiertas por un conducto. El estator puede encontrarse tanto delante como detrás del rotor, dependiendo del diseño que se le aplique y tiene la función de suavizar el fluido del agua que es expulsada.

(Qiu 2019)

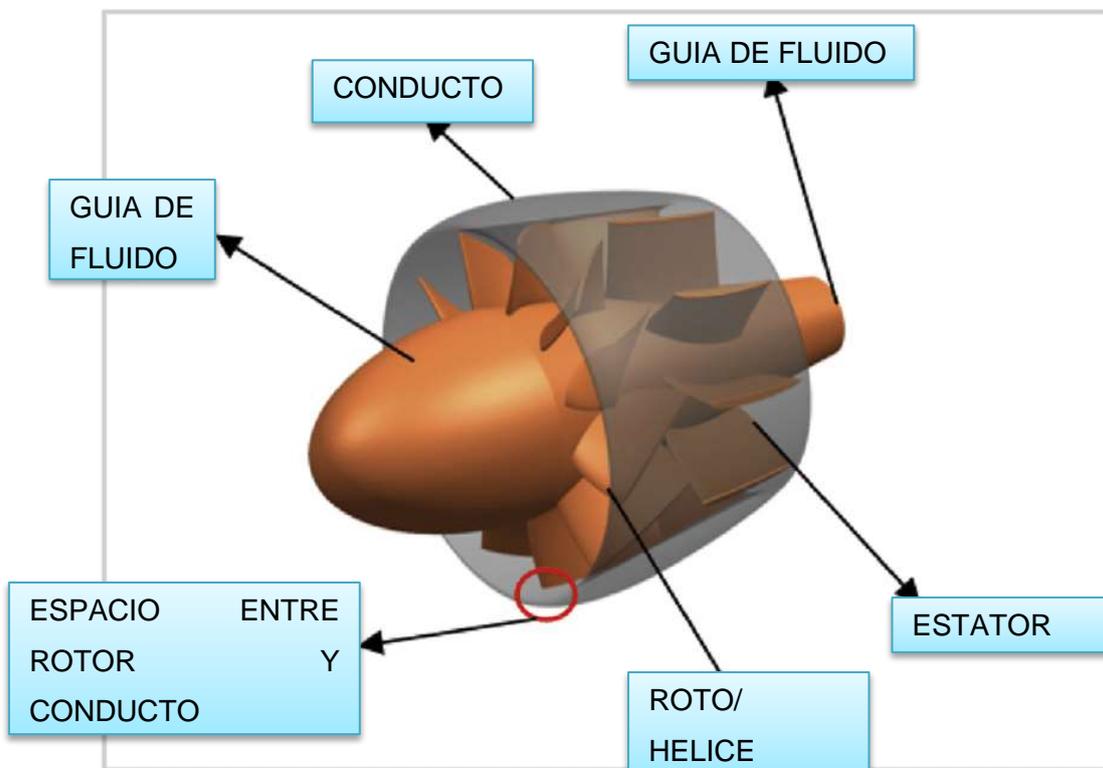


Figura 14 Estructura sistema Pump-Jet

El rotor suele tener un anillo alrededor que une todas las palas del mismo, como se puede observar en el submarino Ruso de la clase Kilo, Alrosa.

(Galber 2018)



Figura 15 Pump-Jet del submarino Ruso Alrosa al descubierto.

Todos estos componentes son muy sensibles y existen distintas configuraciones de los mismos. Normalmente el espacio entre las palas del rotor y el conducto debe ser mínimo, de forma que se obtiene una gran reducción del ruido y una mayor eficiencia en la propulsión. También otro de los aspectos a tener en cuenta a la hora de reducir el ruido radiado es el número de palas, que normalmente estará entre 11 y 17, y en caso de que se empleen dos rotores, tendrán un número diferente de las mismas.

5.2.2 Ventajas e inconvenientes de la propulsión Pump-Jet

- Permite alcanzar velocidades elevadas, evitando la aparición de una cavitación ruidosa, lo que la convierte en una propulsión más silenciosa que la de una hélice convencional.
- El conducto que cubre el rotor proporciona protección al mismo, evitando daños en su estructura.
- Ofrece la posibilidad al submarino de operar en aguas poco profundas.
- Uno de los grandes inconvenientes es que son sistemas pesados, y por lo tanto, más costosos que una hélice convencional y su aplicación se centrará únicamente en submarinos de mayores dimensiones.

- Otro de los inconvenientes es su reducida capacidad para maniobrar hacia atrás, debido a que la forma del conducto está diseñada para obtener una mayor eficiencia hacia delante.

5.2.3 Submarinos chinos

El ejército chino ha realizado grandes avances en cuanto a la aplicación de la tecnología Pump-Jet en sus submarinos actuales, los cuales han estado condicionados a lo largo de los últimos años por sus problemas acústicos. Un reciente estudio realizado por un equipo de investigación de Shangai, ha podido desarrollar un sistema Pump-Jet más sigiloso, con mayor capacidad de empuje y que reduce en casi un 90% las vibraciones producidas por el propulsor (Chen 2022).

Dicho estudio se ha centrado en el diseño del conducto el cual rodea tanto a l rotor como al estator. Como hemos visto en el apartado anterior, el espacio entre los extremos del rotor y el conducto ha de ser mínimo, para obtener una mayor eficiencia en la propulsión y para evitar la aparición de la cavitación de vórtice. Para ello, han propuesto un diseño en el cual las puntas del rotor se hunden en el conducto de forma que no están en contacto directo con el agua, reduciéndose la emisión de ruido y vibraciones. Para un correcto funcionamiento de esta estructura, también aseguran que es necesario el sellado de la misma con un material el cual su composición no han querido desvelar, simplemente que se trata de una estructura hecha de fibras finas que evitan la entrada de agua y un revestimiento alrededor de los extremos del rotor. (Chen 2022)

Por otra parte, otro equipo de investigación de la Universidad de Jiaoton de Xi'an, han conseguido desarrollar un revestimiento para el casco de submarino, el cual es capaz de absorber las ondas de sonido y evitar su posible detección. Se trata de un revestimiento formado por unas tiras de goma de unos 32 milímetros de espesor, las cuales algunas poseen una serie de plomos rectangulares que las atraviesan y otras una especie de cavidad con forma de pirámide, con el objetivo de obtener una máxima absorción de las ondas sonoras. (Kardoudi 2022)

Este material de revestimiento es capaz de absorber las ondas sonoras con una eficacia del 95%, de forma que la señal emitida podría pasar desapercibida para los sonares de otros submarinos.

(O'Rourke 2014)



Figura 16 Submarino de misiles balísticos clase Jin Tipo 094

6 SISTEMAS DE PROPULSION

Dentro de este apartado veremos los distintos sistemas de propulsión empleados por los submarinos, analizando su funcionamiento y las ventajas que posee cada uno con respecto al resto desde el punto de vista de la eficiencia para operar en condiciones de ruido acústico mínimo.

Desde el punto de vista de la propulsión, distinguiremos dos tipos de submarinos: submarinos convencionales o diesel-eléctricos (SSK) y submarinos nucleares (SSN).

6.1 Submarinos convencionales o diesel-eléctricos (SSK).

Los submarinos diesel-eléctricos operan con motores eléctricos los cuales son alimentados por un motor diesel. Dicho motor diesel, también tiene la función de cargar una serie de baterías que se encuentran en el fondo del submarino, las cuales le permiten operar sin la necesidad de utilizar el generador diesel. Estos motores para poder funcionar, necesitan aire y combustible, por lo que salir a la superficie es una obligación para este tipo de submarinos. Para poder tomar ese aire necesario y expulsar los gases del motor, realizan snorkel, que

consiste en situarse justo debajo de la superficie del agua, de forma que puedan sacar fuera de la misma tanto el periscopio como la toma de aire y salida de gases del motor. Una vez se cargan las baterías, se sumergen de nuevo y comienzan a operar solo con la ayuda de las propias baterías y con el generador diesel apagado, lo cual permite operar con una mayor eficiencia en cuanto a sigilo, pero esto solo durante unos pocos días ya que las baterías se agotaran y será necesario volver a la superficie para recargarlas. El tener que emerger a la superficie con frecuencia supone un gran problema, ya que el tener que hacer snorkel supone ser detectados con facilidad. (N.P.R 2016)

(N.P.R 2016)

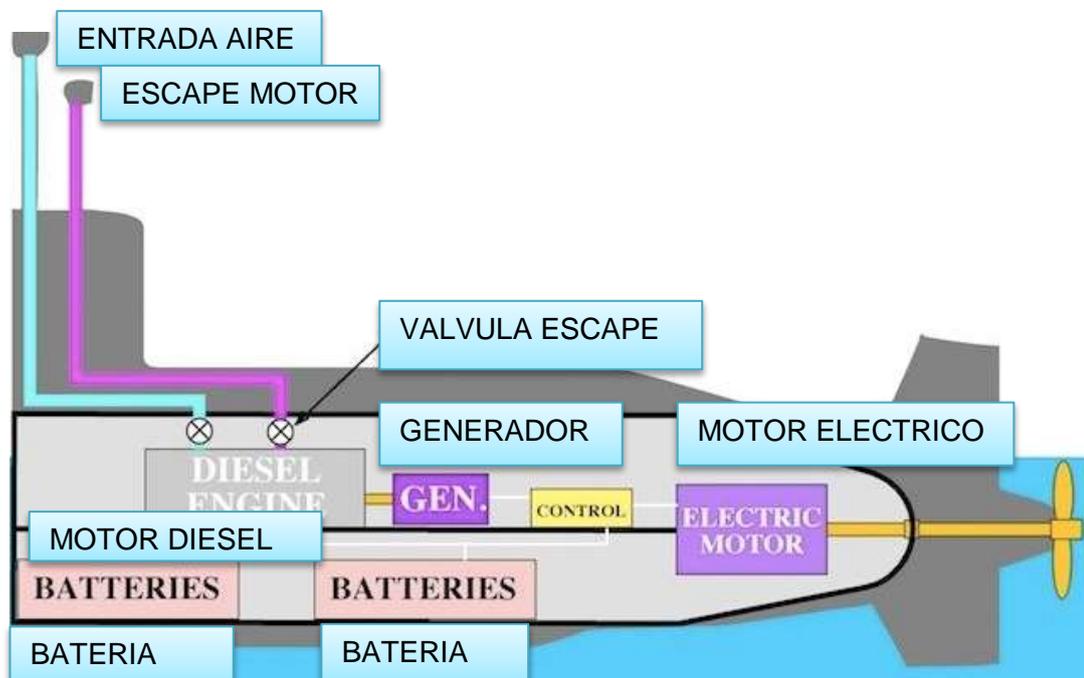


Figura 17 Esquema simplificado de un submarino diesel-eléctrico.

Una de las soluciones a este problema, es el novedoso sistema AIP (Air Independent Propulsion), el cual permite a estos submarinos diesel-eléctricos recargar sus baterías sin la necesidad del funcionamiento de los motores, mantener la firma acústica baja y pasar más desapercibidos, sin la necesidad de emerger a la superficie con tanta frecuencia.

6.1.1 Sistema AIP (Air Independent Propulsion)

Los sistemas AIP, son unos sistemas que permiten a los submarinos convencionales recargar sus baterías sin la necesidad de tener que emerger a la superficie en esos periodos de tiempo tan cortos mencionados anteriormente, lo que les permite permanecer más tiempo sumergidos y evitar ser tan fácilmente detectados.

Dentro de los sistemas AIP, podemos distinguir 4 tipos:

- Motores diesel de ciclo cerrado.
- Turbinas de vapor de ciclo cerrado.
- Motores de ciclo Stirling.
- Celdas de combustible.

Motores diesel de ciclo cerrado

Este tipo de sistema AIP consiste en almacenar a bordo del submarino y dentro de unos tanques, oxígeno líquido, el cual pasa de estos tanques directamente al motor diesel. Para conseguir que dicho oxígeno este al mismo nivel de concentración que el oxígeno atmosférico, se mezcla con argón normalmente u otro gas inerte, de esta forma se evita que los motores del submarino trabajen de forma adecuada sin sufrir daños.

De los gases de escape producidos, se extrae el oxígeno y el argón sobrantes y se redirigen de nuevo al generador diesel, mientras que el resto de gases son expulsados al exterior una vez se han mezclado con agua de mar.

Se trata de un sistema antiguo, el cual los submarinos actuales no emplean puesto que presenta ciertos riesgos de incendio, aparte de que hay que prestar especial atención a la estiba del propio oxígeno líquido a bordo. (N.P.R 2016)

Turbinas de vapor de ciclo cerrado

Este otro sistema emplea una fuente de energía la cual calienta el agua hasta producir su evaporación, consiguiendo de esta forma el funcionamiento de la propia turbina. La fuente de energía empleada por el Modulo Autónomo de Energía Submarina francés (MESMA), el cual es el principal y único sistema AIP de este tipo, es la combinación de oxígeno y etanol, ya que la combustión de estos a una presión elevada produce vapor. Este vapor generado es el encargado de hacer funcionar a la turbina, actuando de fluido de trabajo,

entendiéndose por esto cualquier tipo de gas o fluido que se emplea para transmitir energía o absorberla dentro de un ciclo termodinámico.

A pesar de que este sistema proporciona una gran potencia de salida, para su funcionamiento se requiere un gran consumo de oxígeno y la instalación del mismo es realmente compleja. (N.P.R 2016)

(Española 2019)

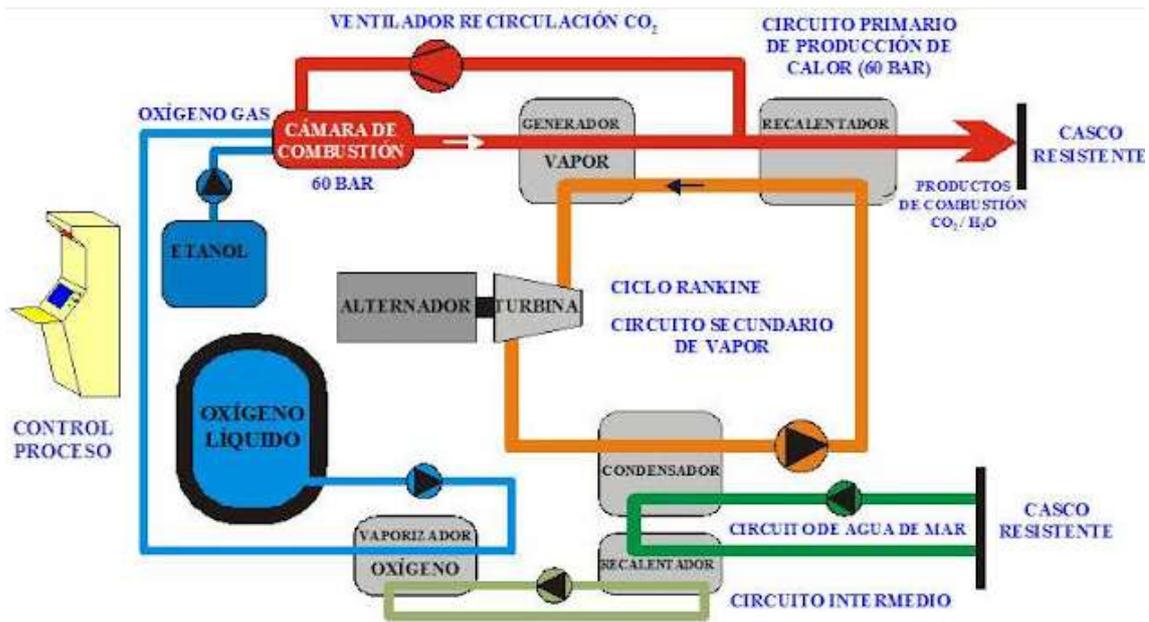


Figura 18 Esquema básico funcionamiento MESMA

Como podemos observar en la (Figura 18) el circuito secundario de vapor es el encargado de hacer funcionar a la turbina, la cual está conectada a un alternador, produciendo de esta forma la energía eléctrica necesaria para poder cargar las baterías. Una vez el vapor pasa por la turbina, pasa por un condensador que calienta un circuito de agua salada, que a su vez calienta el circuito intermedio que ayuda a evaporizar el oxígeno líquido, de esta forma se aprovecha la energía al máximo. Los gases de escape de la combustión van directos al mar sin necesidad de ningún sistema de disolución de los mismos, todo ello gracias a la elevada presión a la que trabaja la cámara de combustión. (Española 2019)

Motor de ciclo cerrado Stirling

El motor Stirling, es un motor de ciclo cerrado capaz de convertir energía térmica en trabajo mecánico, aprovechándose de la diferencias de temperaturas que hay entre una fuente de calor a lo que se denomina foco caliente y un foco frío. El sistema contiene un fluido de trabajo de forma permanente, el cual se calienta a través de una fuente de energía, y que a su vez es el encargado de hacer moverse los pistones que proporcionan el funcionamiento del motor. Se trata de un motor de combustión externa, lo que significa que el motor puede funcionar con cualquier fuente de calor externa.

Por lo general, la fuente de energía suele ser Oxígeno Líquido (LOX) como comburente y combustible diesel, que se emplea para generar el calor necesario para calentar el fluido de trabajo. Por otra parte, el motor está conectado a un generador que proporciona la electricidad necesaria para poder cargar las baterías.

Las principales ventajas de este motor son su funcionamiento silencioso y la escasez de vibraciones, ya que no contiene muchas partes móviles y la combustión se produce de forma continua, sin explosiones periódicas. Sin embargo, algunos de sus inconvenientes son la eliminación de CO₂, que limita la profundidad máxima a 200 metros y el sellado del motor ya que debe ser totalmente estanco. (N.P.R 2016)

Celdas de combustible

Una de las tecnologías más modernas dentro del mundo de la propulsión en submarinos son las celdas de combustible. Estos dispositivos son capaces de transformar energía química en electricidad. Para lograr esta conversión, hacen uso de un combustible, que normalmente es hidrógeno, y de un oxidante como el oxígeno, obteniendo la electricidad deseada. De todo esto se encarga una celda electrolítica que tiene dos electrodos, uno positivo (ánodo) al cual se le suministra el hidrógeno y otro positivo (cátodo) al cual se le suministra oxígeno, ambos separados por una barrera electrolítica. La reacción que se produce entre estos dos electrodos, genera la corriente eléctrica necesaria para cargar las baterías del sistema AIP y aparte desprende agua y calor. (N.P.R 2016)

En el mundo de los submarinos actuales, las celdas de combustible que más se emplean son las de ácido fosfórico (PAFC) y las de membrana de intercambio de protones (PEMFC). Uno de los mayores impulsores de esta tecnología AIP son los alemanes, los cuales ya están exportándola a otros países. También, otros países como Francia e India, están desarrollando nuevos sistemas AIP de celdas de combustible para sus futuros submarinos.

Por todo esto, las celdas de combustible son uno de los sistemas AIP mas empleados y demandados por los submarinos actuales, ya que ofrecen una gran capacidad de sigilo al nos dispones de muchas partes móviles, lo que reduce considerablemente la firma acústica del propio submarino. También se trata de una tecnología cuyo tamaño se adapta perfectamente a las dimensiones de cada submarino y no precisa de maquina añadida para la eliminación de gases de escape ya que carece de los mismos. El mayor inconveniente de estos sistemas es su complejidad y su precio, muy por encima del resto. (N.P.R 2016)

En conclusión, podríamos decir que la principal ventaja que ofrecen estos sistemas AIP, es la capacidad para mantener al submarino convencional más tiempo sumergido, sin la pronta necesidad de tener que salir a la superficie para recargar las baterías del mismo. A parte, algunos de estos sistemas, como hemos visto, ofrecen unas mejores prestaciones en cuanto a la firma acústica y las vibraciones con respecto a un submarino convencional (SSK) que no esté equipado con esta tecnología

6.1.2 Firma acústica submarinos diesel (SSK) actuales.

Antes de ver los distintos ruidos generados por estos submarinos convencionales explicaremos una serie de conceptos.

Sonar: consiste en un sensor que basa su capacidad de detección según las propiedades de propagación del sonido en el agua. Podremos distinguir dos tipos de sonares: activo y pasivo. (Muñoz 1988)

Sonar pasivo: estos sonares tienen la capacidad de detectar 4 fuentes de sonido distintas que son: la cavitación producida por las hélices, el golpeteo de la máquina, la emisión producida por sonares activos y el ruido de la tripulación. Estos sonares detectan el sonido directamente sin la necesidad de emitir una onda a través de un transmisor. (Muñoz 1988)

Sonar activo: los sonares activos utilizan para detectar otros objetos, los ecos que son devueltos por una onda acústica emitida a través de un transmisor. Estos sonares sufren una mayor pérdida de propagación ya que la onda emitida recorre el doble de la distancia entre el emisor y el objeto, siendo de esta forma su alcance de detección menor que el de un sonar pasivo. (Muñoz 1988)

Ruido de Banda ancha: se trata de un ruido con un espectro de banda amplio, siendo la energía acústica una función continua de la frecuencia. Dicha energía acústica se extiende a lo largo de diversas frecuencias. Dentro de estos ruidos podemos distinguir los generados por las hélices o los ruidos hidrodinámicos que produce el casco al atravesar el agua. (J.Urick 1983)

Ruido de banda estrecha: a diferencia del ruido de banda ancha, este ruido posee un espectro de banda más pequeño, centrándose en una frecuencia. Dentro de este tipo de ruidos podemos destacar los generados por la maquinaria, como son los motores diesel, o por otro tipo de máquinas auxiliares. El ruido radiado suele pronunciarse como un espectro continuo y sobre el mismo, aparecen diferentes tonos superpuestos, y a medida que se aumenta la frecuencia van disminuyendo. (J.Urick 1983)

Una vez visto esta serie de conceptos, nos centraremos en el ruido radiado por parte del submarino, una de las firmas clave del mismo.

El ruido radiado, es el ruido producido por el submarino, el cual puede ser detectado por los sonares pasivos. Este ruido no tiene nada que ver con el ruido producido por el propio sonar del submarino, a pesar de que ambos están producidos por las mismas fuentes.

Depende de una serie de factores como la velocidad, frecuencia, profundidad, maniobras y modo de operación que se esté realizando y el estado de mantenimiento. Hay una serie de fuentes las producen este ruido y son las siguientes:

- Ruido de las hélices.
- Ruido hidrodinámico.
- Ruido de la maquinaria.

Ruido de las hélices.

Como ya hemos analizado en apartados anteriores, la hélice es uno de los principales generadores de ruido, debido a las vibraciones mecánicas generadas por las palas. Las turbulencias del flujo que entran hacia la hélice causan ruidos de banda ancha, al igual que el movimiento de rotación producido por la misma, que causa el fenómeno de cavitación, que como ya hemos visto, es uno de los principales fenómenos generadores de ruido y vibraciones sobre el que todo submarino trabaja para tratar de evitarlo en la mayor medida de lo posible.

Las hélices de los submarinos modernos han conseguido reducir en gran medida dicho fenómeno de cavitación, a través de diseños como los anteriormente vistos; el submarino

alemán tipo 212 A con su hélice de 7 palas, con los extremos de las palas curvados (Skewback), con una forma y una geometría diseñada para tratar de tener un firma acústica lo más baja posible y con el innovador sistema DVPB que reduce la cavitación de vórtice de cubo y aumenta la eficacia de la hélice, o los sistema pump-jet actuales, que proporcionan un mayor sigilo a pesar de no tener la misma eficiencia que una hélice a velocidades bajas de 4 a 6 nudos. (Papangelopoulos, Naval Analyses 2018)

Ruido hidrodinámico

El ruido hidrodinámico es el ruido generado por el flujo de agua que se desliza por el casco del submarino a medida que este se desplaza. Se trata de un ruido de menor importancia con respecto al ruido de las hélices, pero aun así, tiene un gran impacto sobre el sonar activo y pasivo, ya que resulta muy difícil de aislar y controlar.

Este ruido de flujo está plenamente ligado a la velocidad del submarino, ya que a velocidades bajas es incluso más débil que el ruido de la maquinaria, pero a medida que va aumentando la velocidad el ruido es tal, que puede llegar a tapar otras componentes del mismo. (Collada 2017)

Ruido de la maquinaria.

El ruido de la maquinaria en submarinos convencionales puede clasificarse de la siguiente manera:

- Ruidos generados por la propia operación del submarino, ya sea por el movimiento del timón, apertura de sistemas de defensa, los cambios de profundidad, etc. Son ruidos que a pesar de ser transitorios y de baja frecuencia, pueden ser fácilmente detectados y puede llegar a permitir la identificación del submarino.
- Ruido producido por los motores diesel y sus equipos auxiliares cuando se lleva a cabo la recarga de las baterías. La recarga de las baterías supone el empleo de los motores diesel a su máxima potencia para tratar de realizarla en el menor tiempo posible, lo que conlleva a la generación de una serie de ruidos significativos. Por esta razón, los motores diesel son uno de los principales generadores de ruido a bordo. Existen aislantes y silenciadores de escape del propio motor que tratan de reducir el ruido irradiado, pero no consiguen eliminarlo por completo.
- Otro de los ruidos generados por la maquinaria es el de los motores eléctricos, los sistemas auxiliares, equipos de refrigeración y los sistemas de propulsión AIP vistos,

los cuales no consiguen reducir el ruido de la maquinaria, siendo un submarino que emplea únicamente sus baterías más silencioso que otro equipado con AIP, aunque la diferencia es mínima. (Papangelopoulos, Naval Analyses 2018)

6.1.3 Reducción del ruido de la maquinaria.

Uno de los principales desafíos de la ingeniería en submarinos es, tratar de reducir al máximo la firma acústica producida por los motores diesel, ya que durante la recarga de sus baterías, estos motores se encuentran trabajando a unos niveles de carga muy elevados, lo cual supone una generación de ruido y una serie de vibraciones, siendo primordial tratar de evitar que estas se transmitan al casco del submarino.

(Q.Howard 2010)

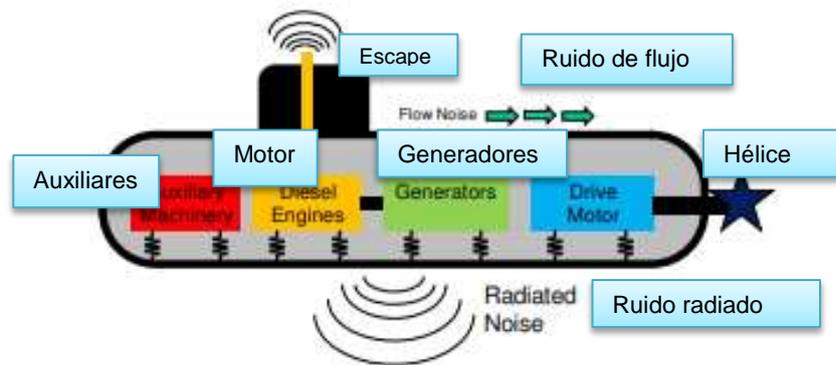


Figura 19 Generadores de ruido a bordo de un submarino.

En la (Figura 19) podemos observar los distintos generadores de ruido a bordo de un submarino, siendo el principal, la planta propulsora de motor diesel empleada para recargar las baterías, además del ruido producido por el flujo de agua sobre el casco (ruido hidrodinámico), el ruido de la hélice, ruido producido por los equipos auxiliares que se encuentran operando, etc. Para cada uno de estos ruidos, existen una serie de tecnologías capaces de reducirlos en la mayor medida de lo posible.

Una de las tecnologías más avanzadas para tratar de reducir la firma acústica producida por un submarino, son las placas anecoicas que cubren el casco del submarino y tienen la doble función de absorber las ondas producidas por los sonares activos hostiles y atenuar el sonido originado por el propio submarino.

(NetMarine 2002)



Figura 20 Placas anecoicas del HMS Triumph

Tanto los motores diesel como el resto de equipos auxiliares capaces de generar algún tipo de vibración, deben ser correctamente aislados para evitar que esa vibración sea transmitida al casco del submarino y sea una fuente de ruido. A continuación se describirán tres tipos de sistemas empleados para el aislamiento de las vibraciones producidas por la maquinaria. (Q.Howard 2010)

Sistema de aislamiento de vibraciones pasivo.

Por lo general, se emplean una serie de aisladores de vibraciones para reducir la vibración de la fuente que la produce, que en este caso es el motor diesel, y aislar un receptor, que en este caso es el casco del submarino. Existen varios tipos de aislante, pero los más comunes son resortes elásticos como bloques de goma o resortes de metal.

El término “pasivo” se emplea únicamente para indicar que el sistema de aislamiento no requiere de una energía extra para reducir las vibraciones. Estos sistemas pasivos son robustos y proporcionan un gran rendimiento de aislamiento durante varios años. Una de las razones más comunes por las que estos materiales se degradan con el paso de los años, es que se vuelven rígidos, produciendo una mayor resonancia y disminuyendo su capacidad de atenuación. (Q.Howard 2010)

Sistema de aislamiento de vibraciones activo.

Estos sistemas a diferencia de los pasivos, requieren la inyección de una energía vibratoria en el propio sistema para poder llevar a cabo la reducción o incluso la eliminación de las vibraciones. Es habitual, que estos sistemas se combinen con los pasivos, de forma que si el sistema activo falla, el pasivo seguirá proporcionando la atenuación necesaria.

Todos los sistemas de aislamiento de vibración activa emplean un actuador de control que contrarresta la vibración perturbadora. Este actuador puede ir situado en el sistema de las 3 siguientes maneras:

- **Inercial:** este tipo de sistema usa una masa inercial y un agitador para crear una fuerza de reacción.

(Q.Howard 2010)

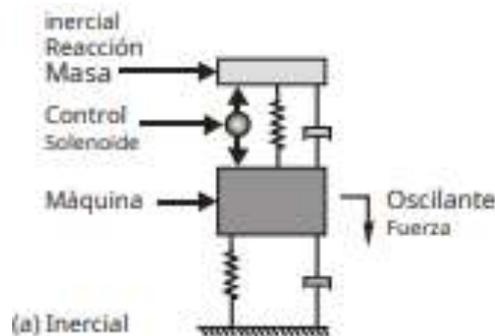


Figura 21 Sistema inercial

- **Paralelo:** el tipo paralelo emplea un agitador de control, que se encuentra entre la fuente productora de la vibración y el elemento receptor de la misma.

(Q.Howard 2010)

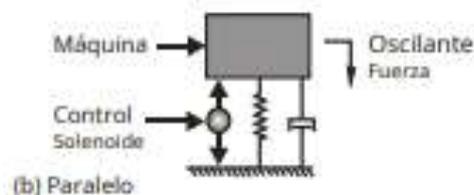


Figura 22 Sistema Paralelo

- **Serie:** el agitador de control se sitúa entre la fuente de vibración y la masa intermedia.

(Q.Howard 2010)

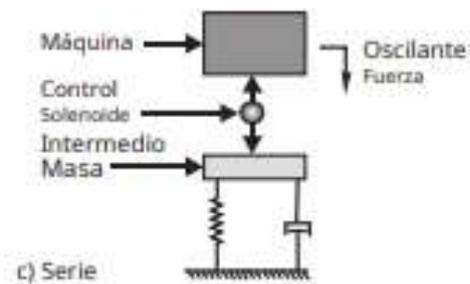


Figura 23 Sistema en serie

Esta masa intermedia y su soporte de aislamiento pasivo se emplean para aislar al actuador y a la fuente de vibración de la dinámica del soporte de la estructura flexible, lo que produce un mejorado rendimiento.

Por su parte, el sistema de aislamiento de tipo paralelo, es capaz de ejercer una gran fuerza contra la fuente de vibración y la estructura receptora, lo que supone una mayor atenuación de la vibración a bajas frecuencias que por ejemplo empleando el sistema de tipo inercial.

Una de las alternativas a este sistema de aislamiento de vibraciones activo es el llamado sistema adaptativo-pasivo, el cual emplea tecnología pasiva de aislamiento de vibraciones, pero que puede ser ajustado.

Sistema de aislamiento de vibraciones pasivo-adaptado.

Uno de los submarinos que aplica este sistema es el Clase Collins construido en Australia, que aparte de un sistema de aislamiento de vibración de dos etapas, este es complementado con unos neutralizadores fijo de vibración sintonizados que proporcionan una atenuación extra a una frecuencia fija. Como podemos observar en la figura, las masas al final del voladizo producen resonancia y causan la reducción de la vibración en la masa intermedia y con ello se reduce la vibración transmitida al casco del submarino. Cuando estos dispositivos están sintonizados a la frecuencia de la vibración perturbadora puede ofrecer altos niveles de atenuación de la vibración.

(Q.Howard 2010)

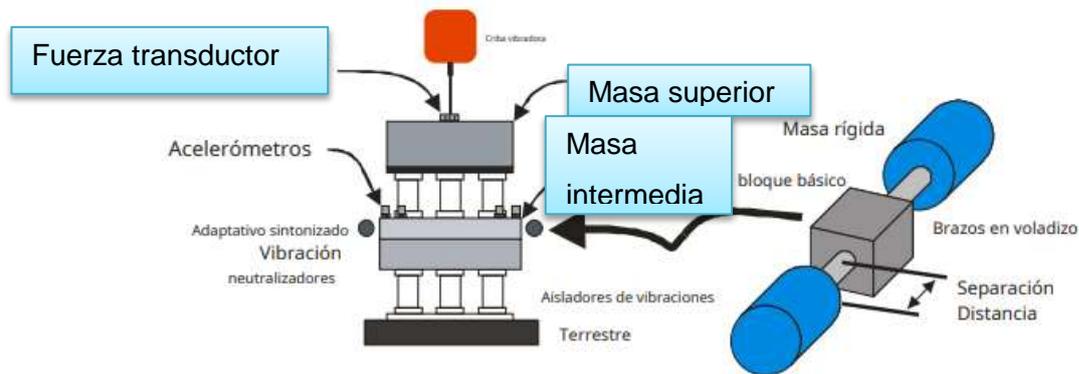


Figura 24 Esquema del neutralizador de vibraciones del sistema de aislamiento adaptativo-pasivo.

El principal inconveniente de emplear estos neutralizadores de vibración de sintonización fija es que, si la fuente de vibración cambia de frecuencia, ya bien sea por un cambio de velocidad en la máquina, estos neutralizadores dejan de ser efectivos.

El sistema adaptativo-pasivo emplea el mismo principio que el de estos neutralizadores, solo puede ajustarse a la frecuencia de la vibración perturbadora. Esto se consigue ajustando la longitud del voladizo que altera la rigidez y por lo tanto la frecuencia de resonancia del dispositivo.

Los actuales neutralizadores de vibración adaptativos-pasivos automáticamente se ajustan a la frecuencia de vibración del motor diesel y proporcionan una reducción de la vibración que llega al caso del submarino. Este sistema requiere poca potencia para operar un micro controlador y un actuador, el cual solo opera cuando el dispositivo requiere reajustarse de forma automática a la frecuencia del motor diesel.

Este tipo de sistema de aislamiento es capaz de ofrecer la robustez propia de los sistemas pasivos y requiere de una baja potencia para ajustar sus características de vibración. Por otra parte, uno de sus inconvenientes es que solo pueden atenuar una frecuencia de vibración por cada resonador, mientras que los sistemas activos son capaces de reducir frecuencias de banda ancha y armónicas. (Q.Howard 2010)

Silenciadores de escape.

Por lo general, en los diseños de los submarinos convencionales, los motores diesel suelen ir instalados cerca de la parte posterior del mismo, y su tubería de escape pasa a través del casco presurizado por la aleta o por la torre de control y por un mástil el cual es retráctil y se puede extender durante las operaciones de snorkel.

Normalmente cerca de la maquina se instala un silenciador de escape a lo largo de la tubería. Este dispositivo tiene la función de atenuar el ruido que se transmite por la tubería de escape, y este tendrá una mayor efectividad cuanto más cerca este de la máquina. Podemos distinguir tres categorías de silenciadores de escape: pasivo, activo y adaptativo-pasivo.

Silenciador pasivo.

Este tipo de silenciadores son los más comunes. El término “pasivo” se usa para indicar que estos silenciadores están diseñados para absorber y reflejar la energía acústica, de forma que no requieren de otra fuente de energía para poder operar. Estos sistemas son robustos y ofrecen una gran durabilidad, aunque uno de los problemas que pueden tener es que en ocasiones el escape contiene unas partículas que pueden obstruir el material poroso que se emplea para absorber el la energía del sonido. Una posible solución a este problema es el uso de unos volúmenes acústicos de pared dura que se utilizan para reflejar el sonido contra la fuente que lo produce. En concreto, lo que hace, es cambiar la impedancia acústica del conducto de forma que el sonido no se propague más allá del silenciador. Estos silenciadores resonadores son capaces de ofrecer altos niveles de atenuación acústica a una frecuencia determinada o a frecuencias armónicas, si requerir de ningún tipo de energía extra.

Algunos de los diseños más comunes de estos silenciadores de resonador son los llamados Quarter-Wave tubes y los resonadores Helmholtz. Estos dispositivos ofrecen una gran reducción del ruido cuando están sintonizados a la frecuencia del ruido perturbador. De todas formas, cuando la frecuencia del ruido producido por una fuente cambia, el empleo de un solo dispositivo es inútil, por lo que se ha de emplear varios dispositivos sintonizados a distintas frecuencias para tratar de atenuar el ruido sobre un amplio rango de frecuencias. (Q.Howard 2010)

Quarter-Wave tube:

Este tipo de resonador puede ir unido a través de una brida a un sistema de escape de la máquina y este no tiene por qué ser instalado por obligación en perpendicular al conducto principal, sino que también puede ir instalado en paralelo, tal y como vemos en la figura. La orientación que se muestra hacia atrás ayuda a reducir el ruido del flujo inducido, lo que evita que esta rama lateral produzca cualquier tipo de sonido.

(Q.Howard 2010)

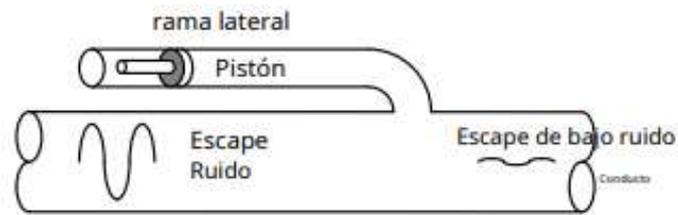


Figura 25 Esquema simplificado de silenciador de resonador pasivo-adaptado instalado en un conducto de escape.

Este tipo de resonador ofrece una gran atenuación del ruido a las frecuencias fundamentales y sus armónicos, lo cual es algo muy deseable para tratar de reducir el ruido de un motor diesel. (Q.Howard 2010)

Resonador Helmholtz:

El resonador Helmholtz es una tecnología de control del ruido pasiva, la cual comprime una cavidad que está unida al conducto principal del escape a través de una tubería más estrecha. Este dispositivo se puede sintonizar a la frecuencia del ruido tonal variando la geometría del propio volumen o, de la zona más estrecha de la tubería o cuello. En la figura que se muestra, el volumen puede variar a través de un cambio de posición del pistón. Con ello se consigue cambiar la frecuencia resonante del dispositivo, y esto puede ser integrado en un sistema control para reducir el ruido del conducto de escape.

(Q.Howard 2010)

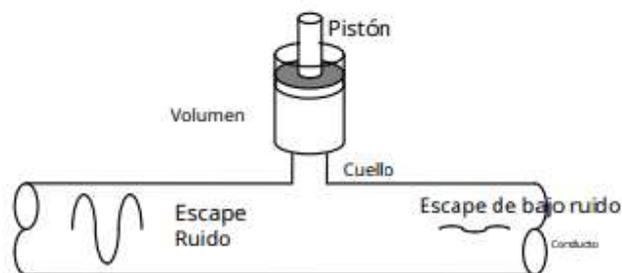


Figura 26 Esquema Resonador Helmholtz.

Silenciador de control de ruido activo.

Para conseguir la reducción del ruido utilizando el método activo, se introduce un anti-ruido o una cancelación del mismo, dentro del escape. Como hemos visto en los sistemas de

aislamiento de vibraciones, el término activo se usa para indicar que se está introduciendo una energía de forma intencionada dentro del sistema, que tiene la función de anular el ruido producido por el escape. En la siguiente figura podemos observar un esquema muy reducido del sistema.

(Q.Howard 2010)

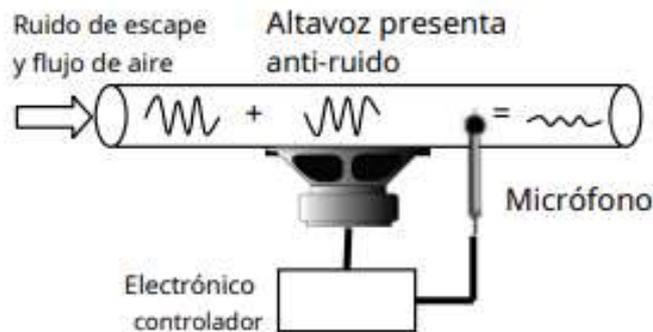


Figura 27 Esquema simplificado de sistema de control de ruido activo.

De forma muy simplificada pero con los conceptos clave, en este sistema, el ruido de escape se propaga a lo largo del conducto hasta toparse con un altavoz que introduce en el mismo, un ruido de igual magnitud, pero con 180° fuera de fase con respecto al ruido del escape, lo que quiere decir que, cuando estos dos ruidos se sumen, se cancelaran el uno al otro. El ruido resultante se mide a través de un micrófono y la señal recibida se utiliza por un controlador electrónico, el cual determina la cantidad de señal anti-ruido necesaria para el sistema.

Silenciador de escape pasivo-adaptado.

El término “adaptado” indica que el silenciador es capaz de re-sintonizarse por sí mismo a la frecuencia del ruido perturbador, de esta forma se mantiene la atenuación acústica para cualquiera de las frecuencias a las que actúe el ruido originado. Una forma de conseguir esto es a través de un diseño que nos permita cambiar la longitud (L) del silenciador, lo que supone una alteración de la frecuencia de resonancia en el resonador.

(Q.Howard 2010)

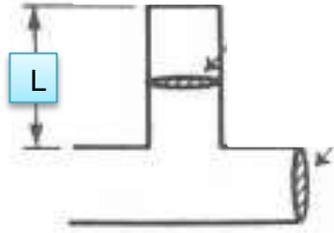


Figura 28 Tipo de silenciador de resonador.

En este sistema, no es necesaria una energía extra para tratar de reducir el ruido. La única fuente de energía necesaria es una de bajo voltaje, la cual se emplea para dar energía a un micro procesador y unos sensores acústicos, a la par que a un actuador, para poder alterar la longitud (L) del resonador en el silenciador.

6.2 Submarinos nucleares (SSN).

En cuanto a propulsión nos referimos, la propulsión nuclear es otra de las opciones más empleadas por los submarinos. A continuación veremos una breve explicación de cómo obtiene la energía de propulsión necesaria este tipo de submarinos.

Los submarinos nucleares, son submarinos que utilizan un reactor nuclear para obtener energía a bordo. Esta energía la consiguen alimentando un reactor nuclear con uranio como combustible. Las barras de combustible contienen una infinidad de bolas de uranio y los átomos de uranio se separan produciendo una reacción en cadena que proporciona energía en forma de calor, el cual se transmite a un generador de vapor que será el encargado de proporcionar el movimiento de las turbinas que propulsan el submarino, lo que supone un suministro energético casi ilimitado que puede perdurar durante años. Estas turbinas, en algunos casos, pueden complementarse con un motor eléctrico encargado de propulsar la hélice del submarino con el fin de obtener una firma acústica más reducida. (Galante 2021)

En la siguiente (Figura 29) podemos observar un breve esquema de lo que podría ser una planta propulsora en un submarino nuclear.

(Galante 2021)

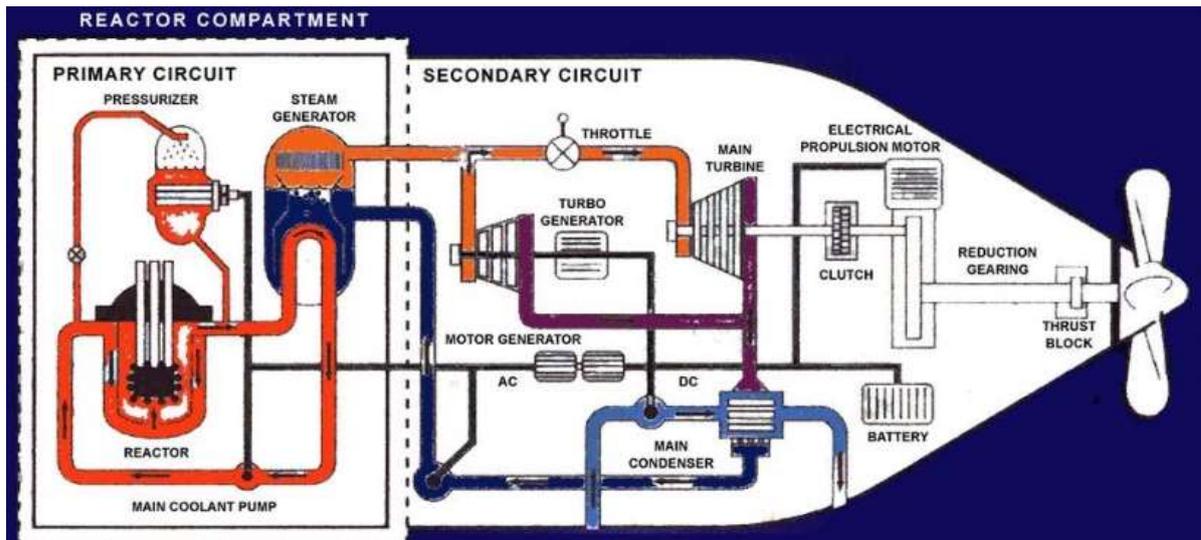


Figura 29 Breve esquema de planta propulsora en un submarino nuclear (SSN)

Como podemos ver, tenemos un circuito primario con agua a presión el cual se calienta y produce la evaporación del agua del circuito secundario que se encarga de mover las turbinas principales.

Al contrario que los motores diesel, estos reactores nucleares no precisan de aire externo y realizan suministro de combustible de forma anual. Esto supone una gran ventaja frente a los submarinos convencionales ya que pueden permanecer sumergidos durante grandes periodos de tiempo sin la necesidad de emerger para tomar aire, únicamente dependerán de los víveres de los que dispongan a bordo y de la disposición de la tripulación, puesto que también disponen de un generador de oxígeno capaz de renovar el aire en el interior del submarino.

Los submarinos nucleares de la clase Virginia son unos de los submarinos más sofisticados en cuanto a propulsión nuclear. Esta clase, emplea un reactor nuclear que perdura toda la vida útil del propio submarino sin necesidad de repostar y capaz de generar toda la energía necesaria a bordo.

(Galaxia Militar 2017)



Figura 30 Submarino nuclear Clase Virginia.

6.3 Ventajas y desventajas de submarinos convencionales y nucleares.

En este apartado veremos las ventajas y desventajas que presentan los submarinos convencionales (SSK) frente a los nucleares (SSN) y viceversa.

- La principal ventaja de los submarinos nucleares frente a los convencionales es su capacidad para mantenerse sumergidos sin tener la necesidad de emerger a la superficie durante grandes periodos de tiempo, ya que su planta propulsora, el reactor nuclear, no requiere de oxígeno para poder funcionar. En cambio, los convencionales y sus motores diesel si requieren del aire exterior y están obligados a subir a la superficie en periodos de tiempo más cortos para llevar a cabo la recarga de sus baterías realizando snorkel, acción que los hace más susceptibles a ser fácilmente detectados.
- A pesar de no poder permanecer sumergidos el mismo periodo de tiempo que los nucleares, los submarinos convencionales son más silenciosos, sobre todo cuando emplean sus sistemas AIP y en aguas poco profundas. Los submarinos nucleares poseen elementos que producen una gran cantidad de ruido como es el caso de las bombas de refrigeración del reactor o la turbinas de propulsión de alta velocidad. Por el contrario, lo submarinos diesel-eléctricos no disponen de estos elementos tan

ruidosos cuando se encuentran operando en modo eléctrico empleando únicamente sus baterías perfectamente cargadas.

- Los submarinos nucleares son capaces de operar a mayores velocidades que los convencionales, pero esto supone a su vez una generación de ruido, lo cual es un gran inconveniente.
- La gran desventaja de los submarinos nucleares es su alto coste de fabricación, de ahí a que muchos países no se decanten por la adquisición de este tipo de submarinos.

7 FUTURO

El mundo de los submarinos en términos de propulsión y sigilo aún tiene un gran futuro y desarrollo por delante. Una de las principales innovaciones que se están tratando para futuros submarinos es el empleo único y exclusivo de baterías de litio para la operación del mismo. Si a un submarino convencional le retiramos los motores diesel y le proporcionamos más baterías esto supondrá un menor mantenimiento, un diseño más simple, menos personal, mayor sigilo y menores costes tanto en su compra como en sus respectivas operaciones.

Como ya hemos visto la forma más sigilosa que tienen los submarinos convencionales para hacer la recarga de sus baterías es a través del snorkel, acción que como ya sabemos supone una fácil detección del propio submarino. Está claro que un submarino que puede permanecer durante grandes periodos de tiempo sumergido sin la necesidad de subir a la superficie tiene una inmensa ventaja frente al resto como es el caso de los submarinos nucleares, con lo cual, un submarino que únicamente operase de forma eléctrica a través de sus baterías, podría disponer de una gran capacidad de sigilo ya que no sería necesario combustible a bordo y por ello tampoco serían necesarias válvulas y bombas, elementos generados de ruido. (Karremann 2019)

Estas baterías de litio ofrecen un gran rendimiento y proporcionan al submarino una mayor duración de la navegación. Una de las principales ventajas de estas baterías frente a otras como pueden ser las de plomo-acido es que disponen de una mayor capacidad, lo que les proporciona una mayor durabilidad. A parte estas baterías son pequeñas por lo que no requieren de un gran espacio a bordo. Quizás uno de sus mayores inconvenientes que presentan estas baterías es su riesgo de incendio y explosión y debido a su pequeño tamaño y a que van instaladas en paquetes, el incendio de una batería supondría una

reacción en cadena. No obstante, gran parte de los accidentes con estas baterías han sido debidos a diseños deficientes y baratos y actualmente grandes empresas dedicadas al desarrollo de estas baterías están trabajando en diseños específicos de las mismas adaptadas a los submarinos haciendo hincapié en la seguridad. (Garcia 2021)

En cuanto a la recarga de las baterías está claro que un submarino eléctrico no puede realizar la carga de sus propias baterías. La recarga se debe hacer en puerto pero no requiere de mucho tiempo ya que estas baterías poseen una velocidad de carga a las de plomo-acido. (Karremann 2019)

Está claro que se trata de un concepto revolucionario y el cual tiene un gran desarrollo por delante, pero son muchos los submarinos que están empezando a introducir esta tecnología a bordo debido a sus grandes prestaciones en cuanto a sigilo nos referimos, por lo que se trata de algo que realmente estará muy presente en los submarinos del futuro.

8 CONCLUSIONES

Una vez visto el estudio realizado acerca de la evolución de los propulsores en submarinos y como se ha minimizado la firma acústica de los mismos con el paso de los años, podemos decir que, son diversos los factores a tener en cuenta para conseguir un propulsor con unas características que permitan operar al submarino en unas condiciones de ruido mínimo y que se trata de algo realmente complejo y mantenido en secreto por las distintas armadas del mundo, lo cual ha supuesto un gran desafío a la hora de llevar a cabo este trabajo ya que gran parte de la información relacionada con este tema se encuentra altamente clasificada.

A lo largo del presente trabajo hemos podido ver los diferentes propulsores empleados, desde las tradicionales hélices de 7 palas, a los modernos e innovadores sistemas Pump-Jet, y hemos podido analizar tanto sus principales características como sus ventajas y desventajas. En mi opinión son estos sistemas Pump-Jet una de las opciones que más puede ayudar al submarino a reducir su firma acústica, ya que a pesar de que se trata de un sistema que aun esta por desarrollar y que tiene un elevado coste de producción, evita en gran medida el fenómeno de la cavitación que como ya hemos visto es uno de los principales generadores de ruido y creo que cada vez serán más submarinos los que hagan uso de este sistema. Otro de los diseños vistos y que también ayuda a reducir la cavitación es el diseño alemán que, con ayuda del difusor que adapta a la hélice, no solo reduce el ruido de la hélice si no que proporciona un mayor rendimiento y una mayor eficacia en la propulsión, lo que lo convierte en otra gran opción.

No obstante, creo que conseguir la supresión total del ruido radiado por un propulsor submarino es algo realmente complejo y difícil de llevar a cabo, por lo que considero que seguirá suponiendo un gran desafío en la actualidad y en el futuro.

Por otra parte, hemos podido realizar un estudio de los distintos sistemas propulsión que hay, pudiendo diferenciar los submarinos diesel-eléctricos y los submarinos nucleares. Quizás la principal ventaja que ofrece el uno frente al otro es la capacidad de permanecer sumergido durante un mayor periodo de tiempo sin la necesidad de emerger al exterior para la toma de aire, ni la necesidad de reabastecerse de combustible, como es el caso de los submarinos nucleares. No obstante considero que con el perfeccionamiento y mejora de los sistemas AIP y con la implantación de otro tipo de baterías que permitan una mayor capacidad de carga, los submarinos diesel-eléctricos pueden llegar a proporcionar un rendimiento superior al de los nucleares, sobretodo, en cuanto a la atenuación del ruido, siempre y cuando, se encuentre operando de forma eléctrica a través de sus baterías.

A pesar de ser un trabajo enfocado a un ámbito del mundo marítimo donde los objetivos son totalmente dispares de los del transporte marítimo en sí, me ha servido de gran ayuda tanto para ampliar mis conocimientos acerca de los propulsores y de los distintos tipos y configuraciones que pueden adoptar para sacar su máximo rendimiento como para aprender nuevos sobre su aplicación a un mundo totalmente desconocido para mi hasta el momento como es el mundo de los submarinos. Me ha parecido realmente interesante las distintas tecnologías y sistemas que emplean los mismos para reducir su firma acústica y así evitar ser detectados y creo que muchas de ellas podrían tener una gran aplicación en el resto de buques, pero con otros fines, como puede ser reducir el impacto del ruido radiado por los propulsores de los propios buques sobre el fondo marino.

9 BIBLIOGRAFIA

- Annaisebella, Cuesta. *TimeToast*. 2022. <https://www.timetoast.com/timelines/los-inventos-29ca8c29-c193-4488-8707-3a52f18a3aa9>.
- Aprende en realidad. *Youtube*. 2021. <https://www.youtube.com/watch?v=QonCENWDPKQ>.
- Bernassa, Joaquin. *Youtube*. 2016. <https://www.youtube.com/watch?v=-wZL3ECp8sw>.
- Chen, Esteban. «Los submarinos de China pueden ser más silenciosos y potentes con un nuevo motor a reacción: científicos.» *South China Morning Post*, 14 de Octubre de 2022.
- Collada, Juan Manuel de Santiago. «Acustica Submarina.» Apuntes, 2017.
- Cultofsea. *Cultofsea*. 2020. <https://cultofsea.com/ship-construction/propeller-cavitation-explained-cause-types-effects-avoidance/>.
- Doehring, Thoralf. *Navy Site*. 2020. <https://www.navysite.de/ss/agss569tour69.htm>.
- Dominguez, Miguel Juan. *El Maquinante*. 2017. <https://elmaquinante.blogspot.com/2017/08/transmisiones-lineas-de-eje-y-helices.html>.
- Española, NICOLAS AGUIRRE FONTENLA y PABLO ALVAREZ LLANEZA Armada. *Ministerio de defensa*. 2019. <https://armada.defensa.gob.es/archivo/personalescuelas/escano/trabajos/ECOM-OF-CP-FUNCIONAMIENTO-AIP-S-80.pdf>.
- Fernandez, Julio Alfonso. «Sistemas de propulsion y gobierno.» 166. 2020.
- Fondear. *Fondear*. 2012. http://www.fondear.org/infonautic/Equipo_y_Usos/Equipamiento/Helices/Helices_marinan.htm.
- Galante, Alexandre. *ElSnorkel*. Septiembre de 2021. <https://www.elsnorkel.com/2021/09/Submarinos-de-Ataque-Convencionales-y-Nucleares.html>.
- Galaxia Militar. *GalaxiaMilitar*. Mayo de 2017. <http://galaxiamilitar.es/asi-es-el-submarino-mas-rapido-y-silencioso-de-la-armada-de-ee-uu/>.

- Galber, Ulrich. *Naval Analyses*. 2018. <https://www.elsnorkel.com/2018/04/firma-acustica-submarinos-diesel-modernos.html>.
- Garcia, Nicolas. *infodefensa.com*. 9 de Junio de 2021. <https://www.infodefensa.com/texto-diario/mostrar/2964232/naval-group-apuesta-baterias-litio-mejorar-capacidades-submarinos>.
- Industria de titanio Baoji Chengyun. *CY Titanium*. 2022. <http://es.cy-titanium.com/news/titanium-alloy-in-the-ship-application-57003538.html>.
- J.Urick, Robert. *Principles of Underwater Sound*. Mc Graw Hill, 1983.
- Kardoudi, Omar. «China quiere superar a los EEUU con nuevos submarinos 'invisibles'.» *El Confidencial*, 18 de Octubre de 2022.
- Karremann, Jaime. *elsnorkel*. 22 de Enero de 2019. <https://www.elsnorkel.com/2019/01/nuevo-concepto-submarinos-ni-diesel-aip-baterias.html>.
- Koko, Tamunoiyala S. *Defence Research and Development Canada*. Septiembre de 2012. https://cradpdf.drdc-rddc.gc.ca/PDFS/unc312/p806873_A1b.pdf.
- Laboluz. *impresiones intangibles*. 2019. <https://laboluz.webs.upv.es/www.lcpi.cc/lcpi.pluton.cc/index5442.html?p=434>.
- Lienhard, John H. *The Engines of Our Ingenuity*. 1988-1997. <https://www.uh.edu/engines/epi638.htm>.
- Miguel, Raúl. *Con B de barco*. 2016. <https://conbdebarco.wordpress.com/2016/05/31/cavitacion-en-helices/>.
- Mizokami, Kyle. *Galaxia Militar*. 2019. <http://galaxiamilitar.es/conozca-el-submarino-clase-kilo-de-rusia-la-otan-lo-odia/>.
- Model Ship Masters. *Model Ship Masters*. 2012. <https://www.modelshipmaster.com/products/submarines/KILO-class-submarine.htm>.
- Muñoz, Patricio Ponze. «Sonares de guerra submarina.» *Revista Marina*, 1988.
- N.P.R, Anónimo, Analista de defensa. *Defenciclopedia*. 6 de Julio de 2016. <https://defencyclopedia.com/2016/07/06/explained-how-air-independent-propulsion-aip-works/>.
- Nautico, Diccionario. *Diccionario nautico*. 2022. <https://diccionario-nautico.com.ar/helice/>.
- NetMarine. *NetMarine*. 2002. <http://www.netmarine.net/boutique/cd04/sample03.htm>.

- Nicholson, William. «volumen 4.» *Una revista de filosofía natural, química y las artes*, 1801: 221.
- Normand, Paul Augustin. «La genesis del propulsor de tornillo.» 1962: 31-50.
- O'Rourke, CSR Report RL33153 China Naval Modernization: Implications for U.S. Navy Capabilities—Background and Issues for Congress by Ronald. *Wikimedia*. 28 de Febrero de 2014. [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Jin_\(Type_094\)_Class_Ballistic_Missile_Submarine.JPG](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Jin_(Type_094)_Class_Ballistic_Missile_Submarine.JPG).
- Padró, Nacho. *Nacho Blogspot*. 2021. <http://subnacho.blogspot.com/2021/01/el-submarino-tipo-212-de-alemania-tiene.html>.
- Papangelopoulos, George. *Naval Analyses*. Abril de 2018. <https://www.navalanalyses.com/2018/04/radiated-noise-signature-of-modern.html>.
- . *NavalAnalyses*. 2018. <https://www.navalanalyses.com/>.
- Q.Howard, Carl. *Academia*. Noviembre de 2010. https://www.academia.edu/21906050/Technologies_for_the_Management_of_the_Acoustic_Signature_of_a_Submarine.
- Qiu, Chengcheng & Pan, Guang & Shi, Yao & Qiaogao, Huang. «Numerical analysis of unsteady hydrodynamic performance of pump-jet propulsor in oblique flow.» *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 2019.
- Rogoway, Tyler. *The War Zone*. 2019. <https://www.thedrive.com/the-war-zone/26281/german-type-212-sub-has-this-propeller-boss-vortex-diffuser-to-reduce-its-acoustic-signature>.
- Roy R, Manstan. «Tortuga: Barco revolucionario de David Bushnell.» 2010: 52-53.
- Rydill, R.K Burcher y L.J. *Concepts in submarine design*. Londres: Prensa Universidad de Cambridge, 2014.
- Siano, Oscar Daniel. *el snorkel*. 2004. <https://www.elsnorkel.com/2004/01/helices-navales.html>.
- . *El Snorkel*. 2004. <https://www.elsnorkel.com/2004/01/helices-navales.html>.
- Tigre, Juan. *Boating*. 2014. <https://www.boatingmag.com/parts-boat-propeller/>.
- wärtsilä ibérica S.A.U. *Basque Eco Design Meeting*. 2020. <https://www.basqueecodesignmeeting2020.eus/wp-content/uploads/2019/08/WARTSILA.pdf>.

