

# «ESTADO DEL ARTE» PARA UNA PROPULSIÓN TOTALMENTE ELÉCTRICA

Alonso RAMÍREZ BRAVO



ROBABLEMENTE muchos submarinistas pongan cara de extrañeza nada más leer el título de este artículo, porque ¿qué es un submarino sino un buque de propulsión totalmente eléctrica con un «estado del arte muy desarrollado»?

Es por ello que este trabajo deja fuera a estas unidades para centrarse sobre todo en los buques de superficie, en los que, en general, la propulsión eléctrica ha sido hasta épocas recientes poco más que una anécdota frente a métodos de propulsión tradicionales.

Sin embargo, tal vez al final y una vez leído, los submarinistas esta vez se sonrían pensando que «tantas palabras para concluir que como ellos han funcionado siempre a bordo es el camino a seguir». Pero empecemos por el principio.

## Introducción

Si bien la propulsión eléctrica en buques de superficie tiene ya una historia de más de 100 años (1), el rápido desarrollo de los dispositivos de conmutación mediante semiconductores de alta potencia ha hecho que, sobre todo desde los 80, se haya producido un rápido aumento en el número de barcos que la llevan. De hecho, en la última década, la flota con propulsión eléctrica ha crecido tres veces más que el resto de la flota mundial.

---

(1) Existen ejemplos de buques diésel-eléctricos en 1903 con plantas de 120 CV.



Motor propulsor síncrono. (Fuente: ABB).

Hace ya tiempo que se puede considerar una realidad el denominado *All Electric Ship* (AES) o buque totalmente eléctrico, que monta un sistema de potencia integrado (IPS).

El siguiente paso, en el que también estamos inmersos, es disponer de sistemas de potencia eléctrica avanzados (AEPS), que se conocen también como potencia integrada + sistemas de energía (IPES).

Este tipo de buques, muy extendidos en el mundo civil, ya es una realidad en el ámbito militar, aunque con necesidades y características diferentes a los de la flota civil. La

Armada española, a menor escala, no ha sido ajena a este cambio.

### **Por qué la propulsión eléctrica. Ventajas**

Lógicamente, como cualquier solución a un problema, esta no es la panacea ni quiere decir que sirva en cualquier situación. Pero hay casos, que mostraremos más adelante, donde las ventajas son notables.

#### *Capacidad de mayores rendimientos en casi todo el rango de operación*

El motor eléctrico con control de velocidad presenta un rendimiento cercano al 95 por 100 en casi todo su rango de potencia, prácticamente desde el 5 hasta el 100 por 100 de su potencia de diseño. Sin embargo, un motor de combustión tiene generalmente su rendimiento culminante cuando funciona cerca de su máxima potencia de diseño (85-100 por 100). Además, su rendimiento disminuye bastante a bajos regímenes de revoluciones. Si tenemos un buque cuya demanda de potencia propulsiva es variable, en vez de «propulsión clásica» (diésel propulsor + eje + hélice), podemos pensar en instalar un motor propulsor eléctrico (eficiente en casi todo su rango de su funcionamiento), alimentado mediante una planta generadora dividida en muchas «unidades productoras» (varios diésel-generadores). De este modo,

podemos conseguir, con un número determinado de generadores en marcha y a un régimen medio-alto de sus potencias, suministrar la energía eléctrica demandada por el motor eléctrico propulsor. Es decir, tener varios generadores diésel trabajando en puntos cercanos al óptimo, produciendo la potencia eléctrica necesaria para la propulsión en cada momento, en vez de un solo diésel-propulsor, que no siempre mantendremos en su punto de máximo rendimiento.



Disposición típica de propulsión diésel-eléctrica.

(Fuente: <https://www.nauticexpo.es/prod/stadt/product-32120-200622.html>).

Si además el buque, aparte de la propulsión, por su misión tiene grandes consumidores eléctricos entre sus sistemas, la ventaja de que todos los motores de combustión se dediquen a la producción eléctrica será todavía mayor.

### *Flexibilidad en el diseño y empacho de la planta propulsora*

Otra gran ventaja es la flexibilidad que permite a la hora de diseñar la ubicación de los equipos principales. El motor diésel ya no tiene por qué estar alineado con los ejes, sino que se puede colocar donde sea más conveniente (donde «menos moleste»). Esto permitirá reducir la longitud de la línea de ejes, cuando no su desaparición, como ocurre en el caso de propulsores eléctricos azimutales (POD).

Como se verá al hablar de las nuevas tendencias y alternativas, la combinación de propulsión eléctrica con las novedosas tecnologías de almacenamiento y gestión de la energía eléctrica nos llevan a replantearnos la utilidad de la electricidad a bordo, que redundará en un uso más eficiente.

## El origen del *boom*. La evolución técnica



Submarino S-70 navegando.  
(Foto: [www.flickr.com/photos/armadamde](http://www.flickr.com/photos/armadamde)).

La raíz de todo está en la posibilidad de controlar las rpm de los motores eléctricos de una manera eficiente, segura y económica. Esto solamente ha sido posible cuando el desarrollo de dispositivos semiconductores (tiristores rectificadores y, más tarde, de conmutación) han permitido variar el voltaje y la frecuencia de la corriente eléctrica de alimentación con pocas pérdidas y de forma eficaz.

Una primera fase de uso y control fue en los motores de corriente continua (CC), controlados por tiristores rectificadores (SCR). Estos motores, con un control muy fino de par y velocidad, presentan un gran inconveniente —conocido por todos los que los hayan tenido a su cargo—, que no es otro que el colector de escobillas.

El contacto mecánico entre estátor y rotor siempre ha sido una fuente de problemas por mantenimiento y seguridad. Todavía siguen en uso en la Armada en la propulsión de los submarinos de la *Serie 70* y continúan dando algún que otro quebradero de cabeza a la Flotilla de Submarinos y a la Jefatura de Mantenimiento de ARCART.

El salto importante se dio cuando el desarrollo de los convertidores de frecuencia permitió regular la velocidad en los motores de corriente alterna (CA). Pero el empujón tecnológico no vino solo por la parte de la propulsión en sí —los motores—, sino que los sistemas de generación y distribución eléctrica también aportaron su cuota para optimizar el resultado final.

### *La generación eléctrica*

También desde los 80 la industria de los generadores ha evolucionado, mejorando notablemente el diseño de sus componentes, ya sean generadores, transformadores, cuadros, protecciones, etc. Pero tal vez el desarrollo más notable sea el de los sistemas de control, gracias sobre todo a la incorporación de la tecnología digital. Se han mejorado sustancialmente los reguladores (control de rpm y carga de los motores diésel), la distribución de la carga activa, los reguladores automáticos de voltaje... Tal vez han sido los sistemas de control de la potencia los que han ayudado más en el proceso, permitiendo optimizar el número de generadores en marcha y ajustando el reparto de cargas. Finalmente, y por encima de todo ello, tenemos los sistemas integrados de control de la generación que, formando parte de los sistemas integrados de control de la plataforma (SICP), gestionan todo el conjunto del modo más eficiente.

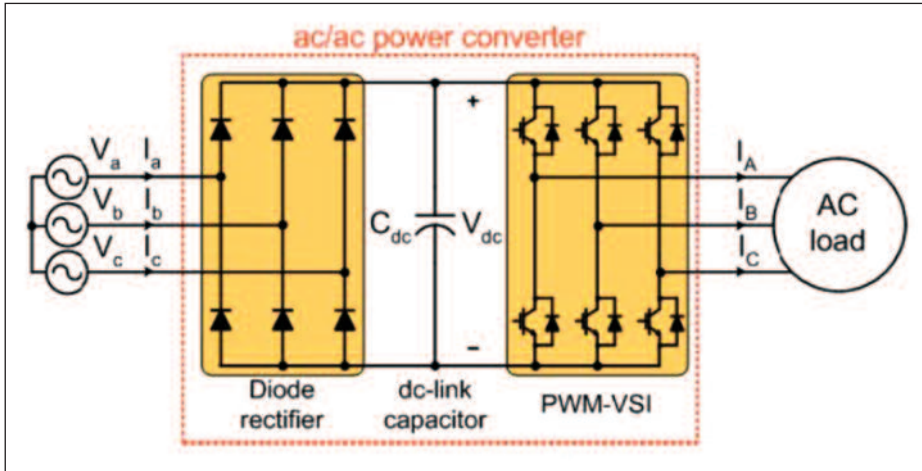
### *La planta motriz*

Las diversas tecnologías de la electrónica de potencia para control de la velocidad de los motores de corriente alterna se han ido desarrollando en paralelo: *voltage source inverter* (VSI), *current source inverter* (CSI), *cyclo-converter*. Unas se gestaron con los motores asíncronos y otras con los síncronos, en función de las potencias y revoluciones. Esto fue así desde los años 80 y durante aproximadamente 20 años. Para no entrar en detalles tediosos, adelantaremos el final de la historia diciendo que el VSI es en la actualidad, y de modo general, la solución estándar para los motores eléctricos marinos.

Aunque no es el fin de este artículo entrar en profundidades técnicas, simplemente comentaremos cómo se hace esa transformación de la corriente eléctrica generada en el alternador (a una frecuencia y tensión fijas) en otra que, previamente controlada, alimentará el motor eléctrico de CA para proporcionar la potencia deseada en cada momento:

- Etapa rectificadora. Convierte corriente alterna en continua. Hay diversas topologías usando distintos dispositivos. Conlleva también una fase de filtrado.
- Etapa de «alisado». Mediante filtros y condensadores suprime al máximo el «rizado» de la CC producida.
- Etapa inversora. Mediante los dispositivos de conmutación de alta potencia y con diversas topologías, convierte corriente continua en alterna de frecuencia y tensión variables y controlables.

En la siguiente figura se muestran estas etapas sobre una configuración «tradicional» y simple con fuente de voltaje modulada por ancho de pulso



(Fuente: <https://www.monografias.com>).



(Fuente: ABB).

(PWM-VSI) con rectificador a diodos en la entrada y capacitor para acople de CC. Asimismo, en la inferior se puede ver una unidad rectificadora-inversora de nueve megavoltiamperios.

### *La propulsión eléctrica con POD*

El uso de la propulsión eléctrica mediante POD azimutales, que eliminan las líneas de ejes, ha sido otra tecnología revulsiva en el campo de la propulsión marina. Iniciada en los años 90, la instalación del motor eléctrico

directamente en el eje y en una unidad fuera del casco, que permite tener el empuje en los 360°, ha cambiado totalmente algunos sectores de la industria marítima. Tras comenzar a instalarse en buques rompehielos, ha copado casi totalmente las nuevas construcciones de este sector —sobre todo, la de los cruceros— y se abre camino en el mundo de los ferris, buques de salvamento, *off-shore* (OSV), etcétera.

## El «hoy» de la propulsión eléctrica. La aplicación a diversos tipos de buques

Vamos a ver brevemente algunos ejemplos de buques en los que la propulsión eléctrica es ya de uso frecuente y, en algunos casos, casi exclusivo. Nos centraremos en primer lugar en los civiles para mencionar después los que tiene la Armada con algún tipo de propulsión eléctrica.

### *Buques civiles*

#### *Rompehielos*

Deben dimensionarse para romper gruesas capas de hielo y avanzar sobre ellas. Esa es su principal misión, aunque también deben cumplir requisitos de navegación oceánica. La gran capacidad de los motores eléctricos para producir par de una manera rápida y precisa hace de ellos el modo de propulsión más efectiva. Fueron, como se ha comentado anteriormente, los primeros en equiparse con POD eléctricos. La combinación de las prestaciones del motor eléctrico, la capacidad de giro de 360° y la transmisión directa del motor al propulsor proporcionan superiores prestaciones que una línea de ejes.

#### *Cruceros de pasajeros*

A día de hoy, la práctica totalidad de estos buques poseen propulsión eléctrica con POD. Este sistema es sin duda el más eficiente, puesto que combina la gran necesidad de potencia eléctrica de hotel con un perfil de navegación variable. Los POD además proporcionan maniobrabilidad, flexibilidad en la ubicación de las cámaras de máquinas y bajo nivel de ruido y vibraciones.

Un diseño habitual puede ser: la planta de cuatro a seis diésel generadores a 11 kV. Distribución de corriente a los propulsores (habi-



*Azipods del Harmony of the Seas.*



*Harmony of the Seas.* (Foto: [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org)).

tualmente dos o tres) a unos 3,3 kV. Motor propulsor «típico» sobre los 20 MW con una generación total de unos 80 MW.

Uno de los mayores buques de pasajeros del mundo, el *Allure of the Seas* (100.000 t y 361 m de eslora), instala seis diésel generadores con una potencia total 97 MW y tres POD propulsores de 20 MW cada uno.

### *Plataformas off-shore (OSV/OCV)*

Son muy variadas, por lo que es difícil aportar características comunes. Más pequeñas que los cruceros, en estos buques la propulsión eléctrica la determina su necesidad de posicionamiento dinámico (DP), con cargas variables, y su complejidad con diversas instalaciones industriales a bordo demandantes de energía eléctrica (grúas, equipos para tender tuberías de construcción, etc.). Para el DP suelen usar empujadores de 690 V, que permiten gran variedad de diseños. Son los buques que empiezan a día de hoy a instalar la distribución mediante corriente continua (DC *Grid*), que es, como veremos, una de las tendencias para el futuro.

### *Transportes de gas natural licuado (GNL)*

Han sido los últimos en incorporarse al mercado de la propulsión eléctrica. Su perfil operativo, con largas travesías a regímenes constantes, no parece ser el más indicado para una propulsión eléctrica, basándonos en las ventajas mencionadas de esta. Originalmente su propulsión se realizaba mediante



turbinas de vapor, puesto que usan como combustible el propio gas de carga. Sin embargo, el desarrollo de motores de combustión que usan gas como combustible ha abierto el campo de la propulsión eléctrica, similar al que se usa con los motores diésel generadores.

Un factor añadido ha sido el cambio del mercado, que ha pasado de largas travesías a realizar fletes con menos singladuras y más flexibles.

La propulsión eléctrica de estos buques se caracteriza por hacerse con un solo propulsor acoplado al motor eléctrico mediante engranaje reductor. Con este sistema se pueden usar motores eléctricos de velocidades medias que tienen menor tamaño que los de bajas revoluciones.

### ***Buques de la Armada con propulsión eléctrica***

Sin contar los empujadores transversales de proa que montan muchas unidades, estos son los que en la Armada tienen o tendrán, de un modo u otro, propulsión eléctrica.

#### *Cazaminas clase Segura*

Aunque posee una planta CODELOD (combinado eléctrico o diésel), la propulsión eléctrica de los cazaminas no obedece a las explicaciones y razones dadas anteriormente. Este modo eléctrico de operar se produce a revoluciones constantes (1.200 rpm) y solo durante modo «caza de minas». El control de la potencia no se lleva a cabo por tanto mediante los dispositivos descritos anteriormente, sino que se aprovecha la versatilidad que proporciona el propulsor epicicloidial Voith Schneider. Este permite mecánicamente, aun manteniendo las rpm constantes, controlar no solo la potencia suministrada al buque, sino la dirección del empuje.

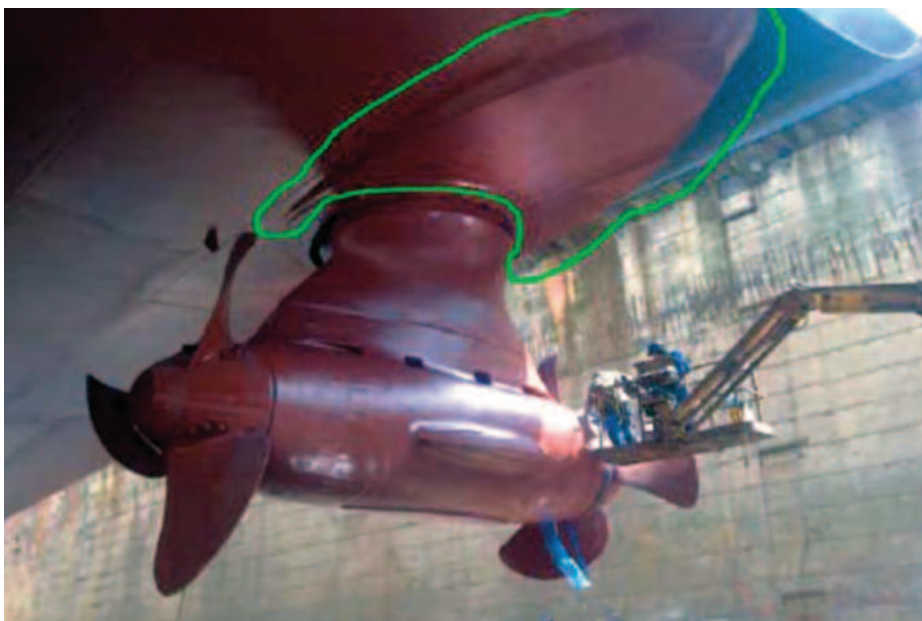
La propulsión eléctrica en este caso obedece únicamente a necesidades de navegación silenciosa (con los diésel principales parados) y no a la búsqueda de efectividad propulsiva. No hay necesidad de ningún control del motor eléctrico, más allá de la vigilancia de sus parámetros y de realizar correctamente el traspaso de la carga entre el modo eléctrico y el diésel, que se realiza también mecánicamente gracias a un embrague automático que obedece únicamente a las revoluciones.

#### *LHD Juan Carlos I*

Se trata del primer y, de momento, único buque de la Armada con una «verdadera» propulsión eléctrica y, por tanto, nuestro primer AES.

La planta de generación eléctrica se compone de dos diésel generadores de 7.680 kW cada uno y una turbina de gas de 19.750 MW, que mueve el turbogenerador. Los tres alternadores generan la corriente a una tensión de 6.600 V. Para la distribución de la energía, la planta está constituida por dos cuadros principales de 6.600 V interconectados, uno de ellos alimentado desde los grupos diésel generadores de 7.450 kW/6.600 V y el otro desde el turbogenerador de 19.160 kW/6.600 voltios.

Desde los cuadros principales se alimentan directamente los dos motores propulsores (POD azimutales) de 11 MW cada uno, dos empujadores de proa y ocho transformadores de 6.600/440 V que alimentan a seis centros de distribución de 440 voltios.



Innovadora propulsión del LHD *Juan Carlos I*. (Foto: archivo RGM).

### *Fragata F-110*

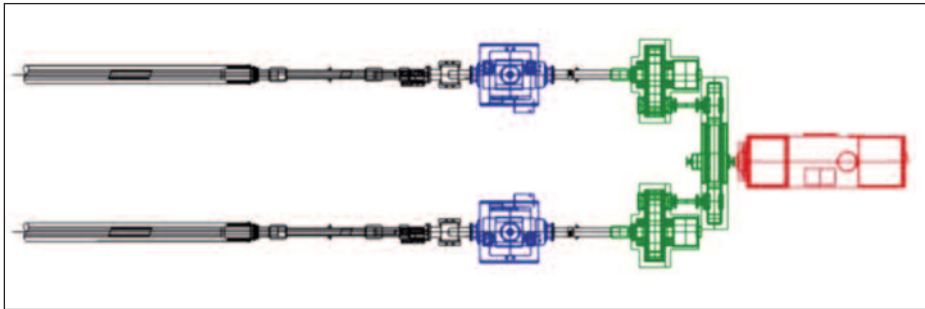
La propulsión prevista será de tipo CODELAG (diésel eléctrica + turbina de gas). Es en verdad una propulsión eléctrica «híbrida» ya que se podrá optar por varias opciones: solo eléctrica, solo turbina o combinadas las dos.

El tipo de propulsión que se ha seleccionado emplea como maquinaria propulsora dos motores eléctricos instalados como parte integral de sus líneas de ejes y una turbina de gas conectada a través de un reductor.

Este concepto de propulsión dota al buque de la capacidad de funcionamiento silencioso hasta una determinada velocidad, gracias a que los motores eléctricos se acoplan directamente a los ejes propulsores, lo que permite la navegación diésel-eléctrica sin utilización de reductor.

Las velocidades máximas requeridas se alcanzan a través de reductor, con los modos de propulsión solo de turbina de gas y combinación de turbina de gas más motor eléctrico.

El sistema de generación de electricidad para la propulsión eléctrica consiste en cuatro grupos diésel generadores con la potencia suficiente para dar servicio tanto a la propulsión como al consumo del buque.



En la figura puede verse un esquema de esta disposición de las líneas de ejes, donde los motores eléctricos vienen representados por el color azul.

En modo de propulsión puramente eléctrica, las líneas de ejes se desacoplan de la reductora (en verde), de forma que cada motor eléctrico transmite su potencia a la hélice correspondiente. De esta forma, la propulsión se realiza de un modo intrínsecamente silencioso. Para este tipo «híbrido», se demandarán las siguientes potencias según los modos y equipos:

- Diésel-eléctrica: 6.800 kW. Turbina de gas: 22.028 kW. CODELAG: 28.828 kW.
- Propulsor (eléctrico): 2 x 3.400 kW. Turbina: 22.028 kW. Dieselgeneradores: 4 x 3.400 kW.

### *BAM-IS*

A falta de definir todavía los requisitos de contrato, este buque es un firme candidato a contar con una propulsión eléctrica, con la que la integración con los demás equipos consumidores sea total, y tal vez llegue a usar algunas de las innovaciones y tecnologías que veremos en el siguiente apartado.

Se debe tener en cuenta que va a ser un buque con una elevada demanda eléctrica: grúas, equipos remotos de rescate, compresores y, además, con posicionamiento dinámico.

Los anteproyectos iniciales contemplan la propulsión eléctrica mediante POD y cuatro generadores que proporcionarán la energía tanto para los propulsores como para el consumo del resto de equipos. No están todavía determinadas las potencias.

## Tendencias y nuevas tecnologías para el futuro

El futuro de la propulsión eléctrica no se basa ya tanto en el hecho de disponer de propulsores eléctricos frente a los tradicionales, sino en que el foco está en un diseño integral de la planta de generación, de distribución y de almacenaje (gran novedad). Este diseño, a la vez que satisface las demandas de los distintos servicios, sistemas y propulsión, permite un uso más racional, más eficiente, menos contaminante y se abre al uso de consumidores que actualmente no serían viables en una «planta tradicional».

Entre los diversos sistemas de propulsión eléctrica o mixta alternativos que se barajan actualmente y que ya empiezan a usarse, citaremos concretamente cuatro y desarrollaremos con un poco más de detalle dos de ellos.

### *Sistemas avanzados de potencia en corriente alterna*



(Fuente: ABB).

Es básicamente un sistema tradicional con generación de energía eléctrica y distribución en una red de alterna. De esa red de alterna se alimentan todas las necesidades del buque. Mediante dispositivos rectificadores-inversores se produce la corriente continua controlable para los motores

eléctricos. Introduce todas las mejoras tecnológicas de generación y rectificación y aumenta todavía más el rendimiento actual.

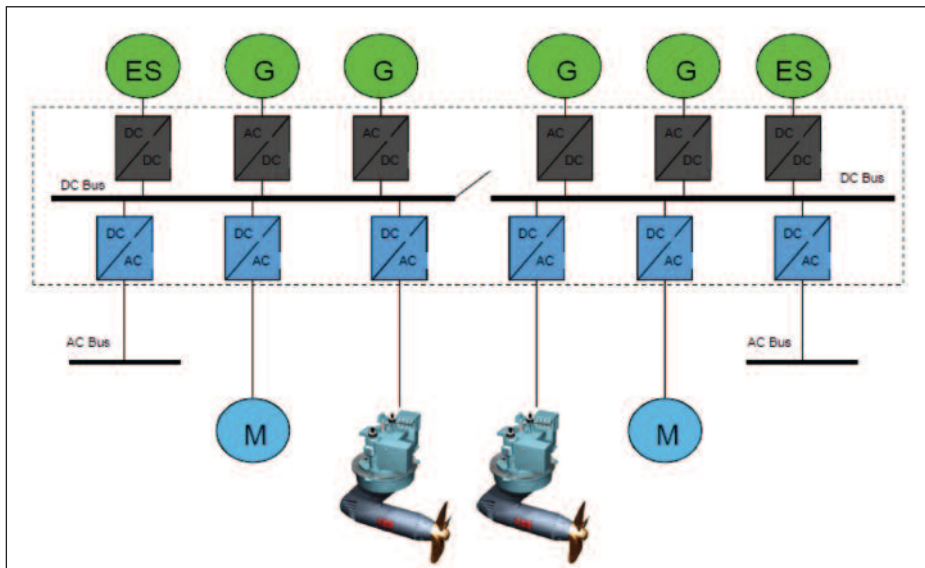
### *Generación y distribución en corriente continua*

Esta alternativa abre nuevas oportunidades de aumento de la eficiencia a bordo. Se basa en el hecho de que ya no estamos atados a la frecuencia habi-

tual de 50 o 60 Hz en la generación y en la distribución. Este sistema permitiría tener libertad absoluta para controlar de forma independiente cada consumidor como mejor parezca para optimizar el consumo. Requiere un nuevo diseño en el sistema de protección mediante una combinación de fusibles, interruptores de aislamiento y otros elementos semiconductores de potencia.

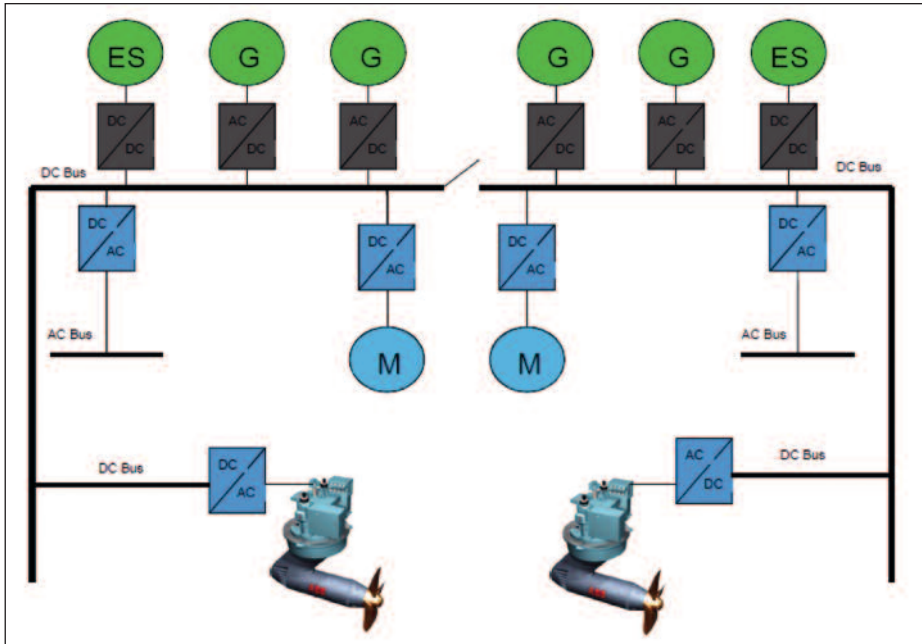
En las figuras siguientes se ven posibles distribuciones de la red. Así, los generadores (G), aunque en un estadio inicial producen corriente alterna, la convierten en continua en el mismo equipo mediante los correspondientes convertidores de electrónica de potencia, corriente continua que se inyecta a la red general del buque. Cualquier consumidor hará uso de ella, y los más grandes, como los motores eléctricos de corriente alterna (propulsores o de otro tipo), se alimentarán de esta red a través de sus respectivos dispositivos de inversión, que producirán una corriente alterna totalmente controlada en frecuencia y tensión.

El resto de consumidores pueden usar diversas topologías. Una sería mediante módulos convertidores ubicados en una o varias líneas en un espacio común, similar a un cuadro actual de CA (*multidrive approach*). En otra (*fully distributed system*), cada convertidor se puede ubicar libremente en cualquier punto del barco donde se necesite, generalmente cerca del consumidor.



(Fuente: ABB).

La novedad todavía es mayor, puesto que se puede hacer que los motores diésel generadores produzcan la corriente eléctrica a distintos regímenes de



(Fuente: ABB).

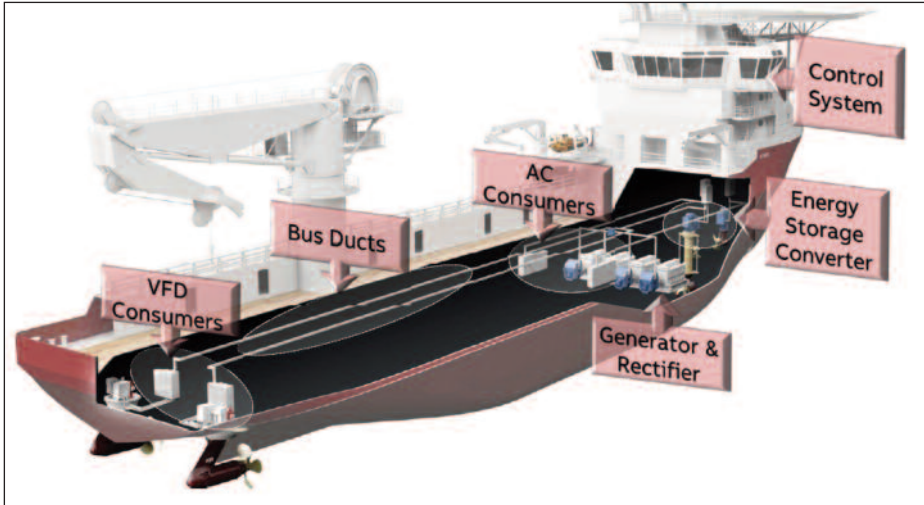
velocidad. Recordemos que gracias a los dispositivos de electrónica de potencia se consigue convertir sin problema y de una manera eficiente una corriente alterna en continua, aunque esta no venga siempre a la misma frecuencia.

Es decir, mediante los correspondientes reguladores del motor diésel y gracias a los modernos sistemas de control, podemos lograr que el motor trabaje a las rpm en las que el sistema integrado de la planta en cada momento calcule que es más eficiente (menor consumo específico de combustible). Y a pesar de todas esas variaciones, lo que seguimos teniendo a la salida hacia la red es una corriente continua a una tensión determinada.

Este sistema tiene varias ventajas adicionales al menor consumo:

- Reducción de ruido.
- Temperaturas óptimas de gases de escape (mejor funcionamiento de catalizadores antiemisiones).
- Obtener fiabilidades de velocidades medias con las prestaciones de una alta velocidad.

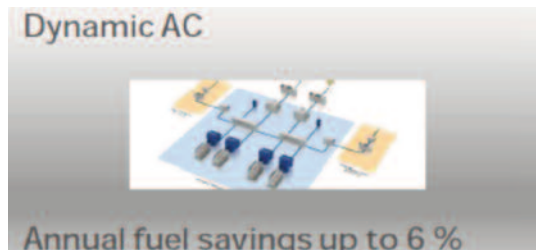
A continuación vemos un ejemplo de disposición a bordo de esta nueva alternativa.



(Fuente: ABB Seaplace).

### *Planta con «concepto dinámico de corriente alterna»*

Utiliza la técnica comentada en el punto anterior de optimizar el consumo total de combustible ajustando la velocidad de giro de los diésel generadores. Se produce así CA a una frecuencia variable dentro de un rango determinado, que después es modificada a demanda en cada consumidor. Este sistema lo usa ABB



(Fuente: ABB).

desde 2016 para buques grandes con sistemas de potencia que necesitan altos voltajes. La ventaja, como se ha comentado, consiste en llevar a los motores generadores, continuamente y en función de la demanda, a los puntos de menores consumos específicos (SFOC).

### *Sistemas con almacenamiento de energía*

Al mencionar las tendencias hablábamos del «almacenaje» como gran novedad de las futuras tendencias, y de él vamos a hablar. Si se fijan en los esquemas de distribución del segundo apartado, además de unos generadores

identificados con la letra G, aparecen otros elementos conectados a la red identificados como ES, que no son más que esos sistemas de almacenamiento (*energy storage*). Estos dispositivos, usados en general como complemento a los motores de combustión, aunque ya en algunos casos como fuente principal, contribuyen a una mejora de la eficiencia y, sobre todo, a poder optar a capacidades hasta ahora imposibles.

Los más corrientes serían baterías, actualmente con tecnología de iones de litio, y los ultracondensadores. Presentan desventajas respecto a los ultracondensadores en su volumen, en su necesidad de refrigeración y en su tiempo de recarga. No obstante, siguen en continua evolución tecnológica, de modo que cada vez permiten mayores capacidades con menos empacho y mayor rapidez de carga. Tal vez sea esta su ventaja, su rápida evolución, junto con la gran experiencia que se va adquiriendo de su uso en muy diversos campos. Los ultracondensadores permiten trabajar de forma repetitiva, aportando gran cantidad de energía en cortos períodos de tiempo.

### *¿Qué funciones aportan los almacenadores de energía?*

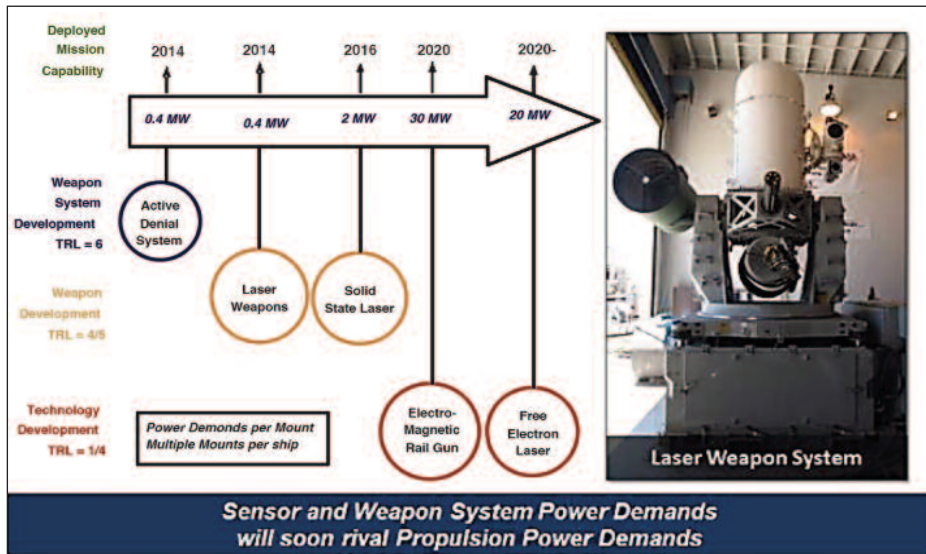
- Reserva de energía para los generadores. Los beneficios que obtenemos son una mejora en la seguridad, menor necesidad de generadores en marcha, reducción de consumos de combustible y ahorro en mantenimientos.
- «Recorte de picos». La unidad absorbe las variaciones de carga de la red, de modo que los generadores solamente «ven» una potencia promedio.
- Mejora en las prestaciones dinámicas de los generadores. La unidad absorbe sobrecargas repentinas, de manera que permite que los generadores absorban esas cargas mediante una rampa suave. Actúa en conjunción con la funcionalidad anterior.
- Ejercen de UPS. Es similar al punto primero, solo que a nivel local en algunos subsistemas (empujadores...).
- Carga estratégica. Los ciclos de carga/descarga de los dispositivos permiten optimizar el punto de funcionamiento de los generadores. Se pueden incluso prever procedimientos de uso en función de las operaciones a desarrollar.
- Operaciones con emisiones cero. Este caso sería extremo si dispusiéramos de un buque en el que toda su fuente de energía fuera mediante baterías. Sí, estamos hablando de uno única y totalmente eléctrico. No es una utopía, ya existen, aunque para aplicaciones específicas. Estos cargan sus baterías en puerto, y en la mar utilizan únicamente la electricidad como fuente energética. Ejemplos de este tipo de barcos son los ferris que realizan trayectos relativamente cortos y regulares, como



el *Tycho Brahe* y el *Aurora*, con capacidad de almacenamiento en baterías de 4 x 1.040 kWh y equipados con cuatro propulsores azimutales de 1,5 MW.

- Capacidad de usar armas de energía controlada, tanto láseres en general como cañones electromagnéticos (*rail gun*). La demanda de energía de este tipo de armas en un brevísimo período de tiempo y de forma repetitiva no es compatible con una «planta eléctrica clásica». Solamente disponiendo de unidades con gran capacidad de almacenamiento y rapidez de descarga conectadas a la red general del buque, sobre todo ultracondensadores, es posible montar a bordo de los buques de guerra estas «armas del futuro». En cualquier caso, en un momento de alta demanda de las armas, se puede derivar la generación de potencia a estas en detrimento de la propulsión. Dependerá de la situación operativa.
- Otras. Dejamos para el final esta funcionalidad porque es exclusiva de las marinas de guerra y, a medio plazo, empezará a verse como requisito.

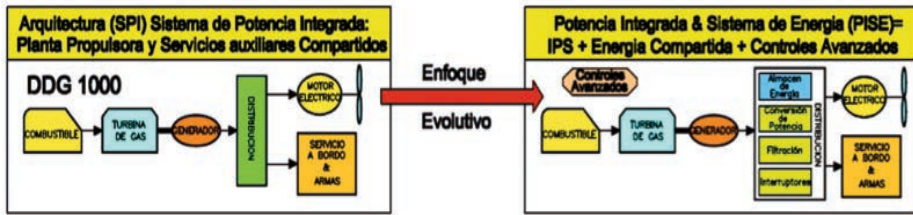
En la figura siguiente se puede observar el incremento en demanda de potencia de las nuevas tecnologías de los láseres de alta potencia.



(Fuente: [laserfocusworld.com](http://laserfocusworld.com)).

En los buques militares, la evolución inmediata que veremos es la que se presenta en la siguiente figura. Se trata de pasar de un buque ya plenamente

IPS — como por el ejemplo el DDG-1000 *Zumwalt* de la Marina de los Estados Unidos— a uno IPES.



A la propulsión totalmente eléctrica se le añadirán los avances ya mencionados: almacenamiento de energía, conversión de potencia, filtrado y conmutación. Todos esto será previo a la posterior distribución y gestión por los todos los consumidores.

Las ventajas tácticas del IPES serán entonces:

- Flexibilidad. Se podrán añadir otras armas o equipos consumidores.
- Adaptabilidad. Se podrá adecuar para apoyar a las misiones y al entorno.
- Supervivencia. Limitación de daños, todo el buque es un *back-up*, maniobra con baterías.
- Prestaciones y autonomía. Zonas de acción más lejanas y mayor tiempo de permanencia.

La futura *F-110*, si bien como hemos indicado es un buque «híbrido» y sin ese nuevo paso tecnológico, tiene entre sus requisitos la posibilidad de incluir sistemas de almacenamiento de energía. Estos, con sus limitaciones, podrán aportar de manera puntual algunas de esas ventajas técnicas y tal vez permitir la instalación futura de alguna de las nuevas armas de energía concentrada. El paso definitivo al IPES queda ya para la *F-120*.

Es aquí donde vuelvo al principio de este artículo para recordar a mis admirados submarinistas, esperando una sonrisa algo escéptica y el comentario siguiente: ¿pero la distribución en continua, los dispositivos de almacenamiento y tener un buque única y totalmente eléctrico no es lo que llevamos haciendo bajo el agua más de 100 años?

Pues sí. En cierto modo tenéis razón. No obstante, hay diferencias: el submarino no ha tenido más remedio que hacerlo desde el primer momento usando la tecnología existente, con poca eficiencia y muchas penurias. Los dispositivos de almacenamiento clásicos, baterías de plomo-ácido, eran de muy poca capacidad, de mucho empacho y muy engorrosas. Finalmente, aquí no se plantea (de momento) que sea la fuente de almacenamiento el centro de toda la distribución.

Sin embargo, a pesar de esas diferencias, es al menos curioso pensar que al final los buques submarinos y «sus blancos de superficie» convergen en cuanto a la propulsión se refiere, cuando siempre ha sido tan distinta, marcando los usos operativos en unos y otros.

## Conclusiones

Al margen del pequeño chascarrillo que me he tomado la libertad de contar al final y que espero sepan disculpar, se puede decir que tras unos comienzos titubeantes o anecdóticos, y gracias a una evolución tecnológica en muy diversos campos (electrónica, tecnologías de la información, química, etc.), la propulsión eléctrica es una realidad consolidada en muchos de los sectores navales.

Puede que la propulsión como tal no deba verse aislada de algo que ya la engloba, como es todo el sistema eléctrico o, mejor dicho, «energético» de un buque. Tal vez ya tenga menos sentido hablar de los binomios clásicos «energía y propulsión», «máquinas y electricidad», puesto que la frontera entre estos es difusa en algunos campos.

Estas mejoras en la propulsión o en el uso de la energía a bordo van a permitir —ya lo están haciendo— ahorrar dinero y medios, mejorar prestaciones y, en el caso de las marinas militares, disponer y usar armas y sistemas hasta ahora inalcanzables.

Dedicado a la gran familia submarinista.





La antigua puerta del derruido Cuartel de Marinería del Arsenal de Ferrol reinstalada en su lugar original en abril de 1985. (Foto: José Luis Blanco Lorenzo).