



UNIVERSIDADE DA CORUÑA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA Y MÁQUINAS

GRADO EN TECNOLOGÍAS MARINAS

ENERGÍA Y PROPULSIÓN

TFG / GTM / E-39-18

QUE LLEVA POR TÍTULO

PROPULSIÓN ELÉCTRICA Y SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO DINÁMICO DP (ELECTRIC PROPULSIÓN AND DYANIMC POSITIONING)

DICIEMBRE-2017

CARLOS E RAMOS MONCADA

DIRECTOR:

TRABAJO FIN DE GRADO

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA Y MÁQUINAS

GRADO EN TECNOLOGÍAS MARINAS

ENERGÍA Y PROPULSIÓN

631G02455 - TRABAJO FIN DE GRADO

D.Ramón Borrás F, en calidad de Director, doy el visto bueno al presente Trabajo de fin de grado del alumno D. Carlos E Ramos Moncada con DNI nº 49685137P a la presentación del presente Trabajo de Fin de Grado con el código titulado:

PROPULSIÓN ELÉCTRICA Y SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO DINÁMICO DP (ELECTRIC PROPULSIÓN AND DYANIMC POSITIONING) DICIEMBRE-2017

Fdo. El Director

Fdo. El Alumno

D.....

D.....

INDICE

Contenido

1. INTRODUCCIÓN	i
2. PROPULSIÓN ELÉCTRICA.....	1
3. GENERACIÓN DE ENERGIA ELÉCTRICA	4
4 Rectificadores de corriente.	9
4.1 Rectificador trifásico controlado	9
4.2 Cicloconvertidor	10
4.3 Sincroconvertidor	11
5 PRINCIPALES COMPONENTES UTILIZADOS HOY EN DÍA EN ELECTRÓNICA DE POTENCIA.	14
6 MOTORES PARA PROPULSION ELÉCTRICA	17
6.1 Motor de jaula de ardilla	17
6.2 Motor síncrono con rotor bobinado.	18
6.3 Motor síncrono de imán permanente.....	19
6.4 Motor de corriente continua.....	19
7 DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA A BORDO	20
8 SISTEMAS DE PROPULSIÓN.....	31
9. VENTAJAS DE LA PROPULSIÓN ELÉCTRICA	34
10. SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO DINÁMICO “DP”	36
10.1 Los 6 grados de libertad.	37
10.2 Funciones de un sistema de posicionamiento dinámico	39
10.3 Aplicaciones de los sistemas DP	39
10.4 Componentes de un sistema DP	40
10.5 Sistema de captación de información	41
10.6 Propulsion DP	42
10.7 Redundancia	44
10.8 Aplicación de la redundancia a bordo	45
10.8.1 Redundancia en sistemas de posicionamiento	46

10.8.2 Redundancia en los sensores ambientales	46
10.8.3 Redundancia en los sistemas de control	47
10.8.4 Redundancia en los sistemas de propulsión	47
10.8.5 Redundancia en los sistemas de generación y distribución de energía.....	47
11. CLASES DE SISTEMAS DP.....	48
12. SISTEMA DE REFERENCIA DE POSICIÓN	49
12.1 Sistemas de referencia de posición Hidroacústicos (HPR)	50
12.2 Sistema long BaseLine	51
12.3 Sistema Short Baseline	52
12.6 Sistemas Laser de posicionamiento	56
12.6.1 Sistema CysScan	56
12.6.2 Sistema Fan Beam	57
13. OPERACIONES DP	58
13.1. FPSO y operaciones con petroleros offshore	58
13.2 Operaciones con ROV (Remote Operated Vehicles) y de buceo.....	61
13.3 Operaciones de Anchor-Handling y de suministro a plataformas	62
13.4 Barcos destinados u dedicados a la construcción y gruas flotantes	62
13.5 Operaciones de perforación	63
13.6 Operaciones de dragado y vertido de escombros (Rocas).....	64
13.7 Operaciones de tendido de tubería y creación de Zanjas.....	64
13.8 Operaciones de reparación y tendido de cable.....	65
13.9 Flotels y barcos de servicio	66
13.10 Buques de pasaje.....	66
13.11 Otras aplicaciones.....	67
14 ELEMENTOS DE GOBIERNO Y PROPULSIÓN	67
14.1 Propulsores Hélice – Timón (Convencionales)	68
14.2 Propulsores Azimutales	69
14.3 Propulsores trasversales de túnel	69
14.4 Sistema de propulsión <i>podded</i> (AZIPOD)	70
14.5 La propulsión “ <i>Siemens Shottel Propulsion</i> ”	76

14.6 Propulsión CRP Azipod (Hélices contra-rotativas).....	79
BIBLIOGRAFIA Y RECURSOS WEB.....	83

1. INTRODUCCIÓN

Este trabajo tiene como finalidad, tocar los aspectos más relevantes de la propulsión eléctrica, partiendo un poco de su evolución histórica, destacando sus ventajas sobre la propulsión convencional (Motores, turbinas, etc)y sus aplicaciones dentro del ámbito marítimo como sistemas de propulsión, en particular, su aplicación directa en los sistemas de posicionamiento dinámico DP.

Podemos decir que desde el año 1839, cuando Moritz Herman von Jacobi, diseña y construye un motor eléctrico de alrededor de 1 HP (quizás verdaderamente el primer motor eléctrico práctico) y decide montarlo sobre una embarcación, existen las plantas de propulsión eléctricas en buques.

Jacobi, que había nacido en Potsdam, Prusia (hoy Alemania), y que en su juventud emigró a Rusia y cambió su nombre de Moritz Herman por el de Boris Semenov, construye un motor eléctrico, a partir de la máquina diseñada por William Ritchie en 1833. El motor, que era alimentado por corriente continua procedente de baterías, lo montó accionando dos ruedas de paletas, sobre una embarcación de 38 pies de eslora. La prueba se realiza en el río Neva y llevando a 14 personas a bordo consigue una velocidad de 2,25 nudos y supone un doble hito:

Primer motor eléctrico útil (motor de corriente continua).

Primer buque con propulsión eléctrica.

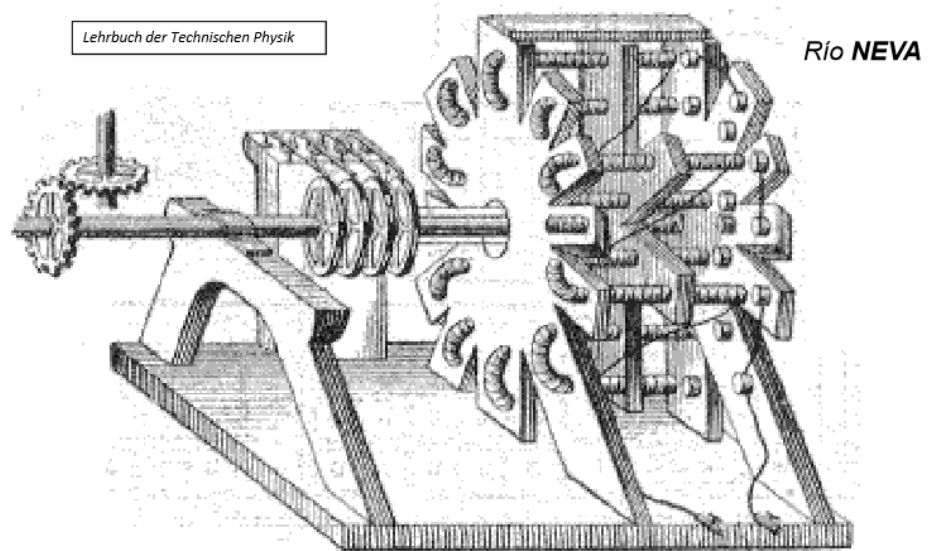


Fig. 1. — La machine du bateau électrique de Jacobi en 1838.

1838. 320 Pilas DANIELL (Placas:Zn-Cu, Electrolito:ácido sulfúrico y sulfato de cobre) 1 ¼ nudos. **1839.** 64 elementos GROVE, lancha de madera de 28', río Neva, 14 personas, 2 ¼ nudos

5

25 años después, en EE.UU, se aplica la propulsión mixta en el submarino "Alistitt" utilizando máquinas alternativas de vapor para la navegación en superficie y motores eléctricos alimentados por baterías en la navegación en inmersión.

Continuando con la historia, en el año 1880 Gustave Trouvé patenta un pequeño motor eléctrico y propone instalar dos de tales motores para propulsar una embarcación, cada uno accionando una rueda de paletas en cada costado.

Siguiendo con la idea de la propulsión en buques, construye un bloque conteniendo timón, hélice y motor que pueda ser montado y desmontado fácilmente en popa de la embarcación. Lo más parecido a los fuera de borda actuales.

En el año 1904 se produce un hito importante para la propulsión eléctrica. A partir de ese año, la Nobel de Sant Petesburgo optó por montar tres motores Diesel de 120 CV directamente acoplados a las dínamos que alimentaban tanto a los motores eléctricos como a la instalación de alumbrado en los buques petroleros "Vandal" y "Samaral" de 1100Tm, destinados a operar en el Mar Caspio y el Río Volga. Cualidades muy importantes para el diseño de estos buques eran la variación de velocidad y la inversión de marcha.

La regulación se realizaba según el principio Ward Leonard, con tensión variable hasta 500 volts, pudiendo variar la velocidad de giro de la hélice entre 30 y 300 RPM.

Este sistema no tuvo gran desarrollo por ser caro, sumando instalaciones eléctricas más los motores diesel, y salvo las ventajas de comandar las máquinas desde el puente no aumentaba las prestaciones de las máquinas alternativas de vapor que hicieron su aparición en el siglo XIX accionando primero ruedas de paletas y luego acopladas a las hélices

Aunque los sistemas de propulsión eléctrica siguieron desarrollándose, la necesidad de grandes velocidades y potencias en los buques fue cubierta por la turbina de vapor a través de una reductora/eje de la hélice o los grandes motores diesel directamente acoplados a la hélice o también a través de la reductora, innovación en los primeros años del siglo XX.

Las dos vertientes de plantas eléctricas, la que utiliza las turbinas a vapor o las que utilizan un motor diesel acoplado a un generador para generar la corriente han utilizado motores eléctricos de CA o de CC acoplados a las hélices. La de CA es básicamente un accionamiento reversible de relación de velocidad constante; le de CC es un accionamiento reversible de relación de velocidad variable.

Tuvo que llegar el final del siglo XX, para la siguiente gran innovación: el propulsor AZIPOD, (Nombre registrado como patente por ABB y significa Azimuthing Podded Drive) y en esencia consiste en una unidad de propulsión eléctrica, ubicada en una barquilla, capaz de girar azimutalmente 360°.

Las ventajas de aplicar este sistema: a) eliminar los ejes de transmisión, ya que el motor eléctrico va montado justo tras la hélice, b) eliminación de los timones pues el gobierno se mantiene gracias al giro de todo el conjunto, c) eliminación de los sistemas de maniobras, como hélices de popa y proa transversales, ya que la maniobrabilidad del conjunto es muy buena.

Con accionamiento eléctrico, se puede conseguir la plena potencia para la inversión de marcha mediante la inversión eléctrica del motor. La manipulación de controles de accionamiento eléctrico es muy sencilla y por su naturaleza puede adaptarse al control a distancia desde el puente cuando se desee.

Reacomodación de los espacios para la cámara de máquinas y espacios para la carga, reducción del ruido y de las vibraciones (dado que no existen engranajes reductores, líneas de ejes, ni hélices transversales).

La flexibilidad operativa da como resultado, menor consumo de combustible (los resultados fueron muy exitosos con ganancias de más de un 8% en capacidad de propulsión con el mismo consumo comparados frente a otros sistemas de propulsión eléctrica), reducción de costos de mantenimiento, control de las emisiones de gases de escape al medio ambiente, redundancia adecuada con menor potencia instalada.

Los principales sistemas azipoidales, según sus fabricantes son:

Azipod (ABB-MASA)

MERMAID (ALSTOM-KAMEWA)

DOLPHIN (JOHN CRANE LIPS-STN ATLAS)

SSP (SIEMES-SCHOTTEL)

Estos avances dieron como resultado la aplicación de sistemas de posicionamiento dinámico “DP” que, hoy en día es una herramienta altamente desarrollada y muy bien establecida en el mundo del negocio marítimo especializado y particularmente en el “offshore”.

2. PROPULSIÓN ELÉCTRICA

Típicamente todo buque lleva a popa, en su exterior, una hélice que al girar proporciona el empuje que le permite avanzar abriéndose paso a través del agua. La forma de obtener ese par torsor que ha de hacer girar el eje varía según sea el diseño de la planta propulsora y este tiene mucho que ver según sea el tipo de buque ya que cada uno tiene unas peculiaridades de operación para las que son más aptas unas soluciones constructivas frente a otras.

En todos los casos se parte de un combustible, comúnmente gas-oil ó fuel-oil, pero también es posible que sea petróleo, carbón, gas combustible, combustible nuclear. A partir de la energía disponible en el combustible en forma de energía química ha de transformarse en energía mecánica. La forma de conseguirlo puede ser con un motor Diesel (motor de combustión), con un motor de gasolina (motor de explosión, utilizado en embarcaciones de recreo como fuera borda), con una turbina de gas, con una máquina de vapor ó turbina de vapor y caldera convencional ó reactor nuclear. De todos ellos, y con gran diferencia en lo que a buques de hoy en día se refiere, el más usual es el motor Diesel. Turbinas de vapor y calderas se empleaban en algunos petroleros hasta hace muy pocos años, y también en torno a los años 50 en buques de pasaje, construcciones recientes con turbinas son los LNG en dónde la propia carga sirve de combustible. La máquina alternativa era el principal sistema propulsor a primeros de siglo XX, y que fue cediendo terreno progresivamente a favor del motor Diesel, por su muy bajo rendimiento energético (consumo de alrededor 600 g/CV·h frente a 150 g/CV·h de los Diesel)

La mayor parte de los grandes buques cargueros para navegaciones largas, dónde el mayor tamaño de la cámara de máquinas no supone ningún problema, se diseñan con motores propulsores Diesel de dos tiempos (Sulzer ó Burmeister) que por girar a baja velocidad no necesitan de reductora. La hélice suele ser de paso fijo (ó mejor dicho, de paso no ajustable) que presenta las ventajas de ser robustas, coste no elevado, y elevada eficiencia (rendimiento). Recientes diseños como las CLT ofrecen rendimientos todavía mayores.

El empuje sobre el buque se produce en la chumacera de empuje. Si el buque tiene dos hélices el diseño se hace con un motor (ó dos) para cada hélice, actuando sobre sendas reductoras. Para la inversión de la marcha es preciso parar el motor y, después de mover el eje de camones (girándolo ó desplazándolo según el tipo de motor), arrancarlo de nuevo con el sentido de giro invertido. Esto implica elevado consumo de aire en las maniobras. En ocasiones (maniobras prolongadas) puede no ser suficiente el aire producido por ambos compresores trabajando en continuo. Por otra parte se necesita un relativamente mucho tiempo para la inversión de la marcha. Con este diseño no suele ser una buena opción la maniobra directa desde el puente.

Una alternativa a lo anterior es montar hélices de paso controlable donde, manteniendo el sentido de giro del eje de cola, si se gira sobre su propio eje cada una de las palas se cambia la cara de presión, consiguiendo empuje avante, atrás ó bien, con paso cero, nulo empuje. El arranque del motor se hace con paso cero y de esta forma es casi un arranque en vacío.

En los buques de tamaño medio es muy usual montar motores de 4 tiempos de media velocidad por su elevada relación potencia/ volumen , relación que todavía puede mejorarse si lo cilindros son en V si bien, en este caso, se complican las labores de mantenimiento. Estos motores tienen una altura bastante reducida lo que los convierte en una buena alternativa para buques con rampa de garaje en popa (Rolones y Ferrys)

En **propulsión eléctrica**, los motores diésel en lugar de ir directamente acoplados al eje o ejes propulsores, accionan alternadores que producen la energía eléctrica necesaria para la propulsión y todos los demás servicios del buque. En concreto la propulsión se efectúa por medio de motores eléctricos situados en la proximidad de la hélice, se evitan los largos ejes de transmisión y se tiene una mayor flexibilidad de diseño.

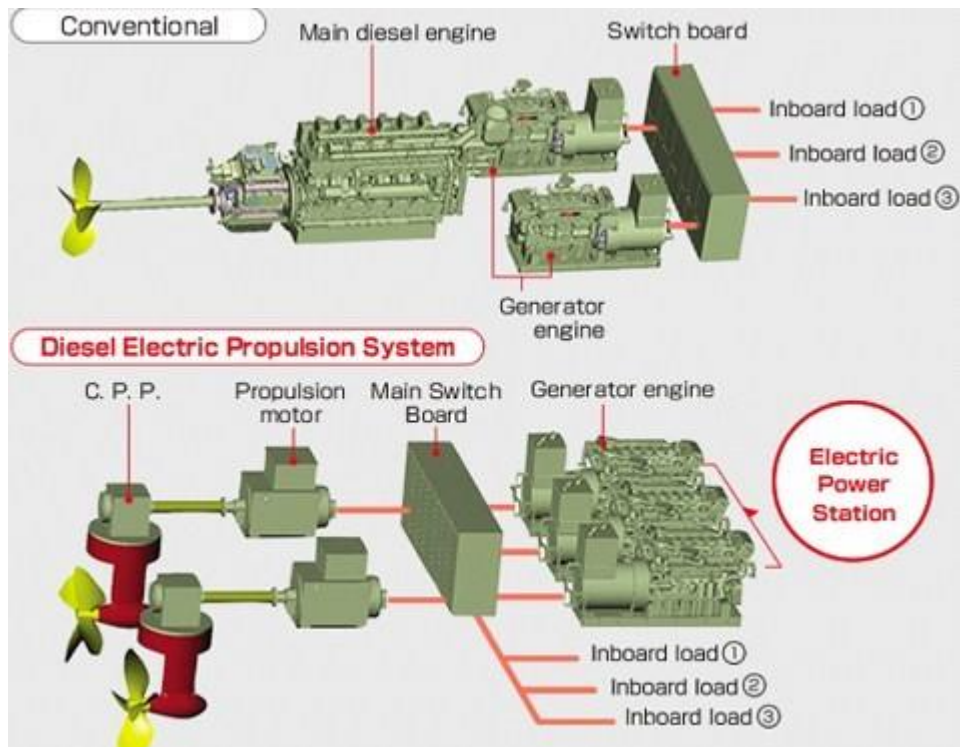


Imagen 1. Esquema de sistema de propulsión eléctrica vs un sistema convencional

Dentro de las principales ventajas de este sistema podemos nombrar las siguientes:

1. La más significativa es que tanto motores primarios como motores eléctricos de accionamiento pueden estar situados prácticamente en cualquier parte del barco y, por lo tanto, la flexibilidad de instalación y disposición a efectos de daños (importantísima en su aplicación a buques de guerra) está garantizada.
2. Los motores de propulsión pueden situarse muy a popa o en los llamados AZIPODS o postes azimutales dando lugar a líneas de ejes muy cortas o inexistentes.
3. Se pueden unificar los generadores que suministren las necesidades de potencia requeridas, tanto para la propulsión principal como para los restantes servicios.
4. Al ser la transmisión de la energía eléctrica por medio de cables, se pueden llevar prácticamente siempre por el recorrido más conveniente y su protección es mucho más simple que cuando, como ocurre en los sistemas actuales, los ejes propulsores son largos, llegando a veces a un tercio de la eslora o más.

-
5. Por otra parte se prescinde, por su propia esencia, de los engranajes reductores haciendo innecesaria la utilización de hélices de paso variable.

Sus principales desventajas son: sistemas muy caros y mantenimientos complejos en caso de averías.

3. GENERACIÓN DE ENERGIA ELÉCTRICA

La generación de energía eléctrica a bordo se produce, en la mayoría de casos, mediante alternadores accionados por motores (grupos generadores), que pueden estar formados por un alternador acoplado a un motor diesel o a una turbina que puede ser de gas o de vapor, ya sea vapor generado en calderas convencionales o en un reactor nuclear. Las diferentes modalidades de generación de energía eléctrica a menudo están relacionadas con el tipo de buque; por ejemplo, las turbinas de vapor que utilizan un combustible fósil (carbón o gas natural) son una modalidad presente en los buques de guerra. Las turbinas de gas se instalan en diferentes tipos de buques que se caracterizan principalmente por la necesidad de una elevada velocidad de navegación. En cuanto a los buques mercantes y cruceros, el método de generación más extendido es aquel que utiliza un motor diesel acoplado a un alternador. En líneas generales puede decirse que las turbinas se ajustan fácilmente, lo que permite una capacidad de sobrecarga mayor y desde el punto de vista mecánico ofrecen unas dimensiones menores y unas vibraciones más bajas; por contra, su respuesta es más lenta y el consumo de combustible es mayor si se las compara con los motores diesel.

A modo de ejemplo, se puede considerar la arquitectura de un buque hipotético, con unas determinadas características, descritas a continuación, y que puede representar un crucero estándar (véase imagen 2). Con el único propósito de dar una idea orientativa sobre las cantidades a considerar, se presentan algunos datos que ayudan a una mejor comprensión de la arquitectura de este tipo de buques, considerados entre los más espectaculares por sus dimensiones.



Imagen 2. Buque crucero.

Estos buques alcanzan un tonelaje bruto que varía desde unas decenas de miles de toneladas hasta cerca de 100.000 t, distribuidas a lo largo de esloras que pueden superar los 300 m y mangas de unos 50 m. El tonelaje bruto es un parámetro que define el índice de capacidad del buque y que comprende el volumen interno del buque, incluyendo el espacio que ocupa la sala de máquinas, los tanques de combustible y las zonas reservadas a la tripulación, empezando desde la superficie externa de la cabeza del casco. Un buque de estas características puede alojar a varios miles de pasajeros que son recibidos a bordo y distribuidos en miles de camarotes, en el gran vestíbulo con ascensores panorámicos, en diversos bares y restaurantes, piscinas, casinos, salas de baile y gimnasios, todos ellos situados en una docena de cubiertas.

Para asegurar la operación de todos los servicios durante la navegación de esta ciudad flotante, es necesario disponer a bordo de un suministro de energía eléctrica considerable. En primer lugar, hay que señalar que la energía eléctrica necesaria debe producirse en los equipos instalados a bordo; en otras palabras, debe disponerse de una planta de generación eléctrica independiente que sea capaz de generar toda la demanda de energía a plena carga. La fuente de suministro de energía consiste, normalmente, en varios equipos formados por un alternador (generador síncrono) acoplado a un motor diesel. Teniendo en cuenta la potencia total absorbida por todas las cargas del buque, se aplica un coeficiente suplementario que tiene en cuenta cualquier posible aumento de demanda futuro. Además, se aplica otro margen de seguridad de tal modo que la fuente de suministro sea capaz de responder a dicho aumento de demanda incluso en caso de avería de uno de los grupos generadores. Para el cálculo de la potencia total

instalada de los grupos generadores también hay que considerar el punto de máxima potencia de los alternadores, es decir, su máximo rendimiento, que corresponde al 75% de su potencia nominal máxima.

Como ya se ha mencionado, los generadores instalados a bordo son dispositivos que consisten en un motor diesel que acciona una dinamo o un alternador trifásico acoplado de forma permanente al mismo formando una única máquina, también definida como grupo generador (véase imagen 3). El alternador se mueve gracias al motor diesel, normalmente formado por 8 o 12 cilindros en línea o en “V”, con potencias que van desde 1 hasta 10 MW y rendimientos con valores en torno al 95%; la tensión de salida puede ser tanto media como baja tensión. En algunas aplicaciones, el alternador puede estar acoplado, de forma alternativa, a una turbina de gas o a una combinación de ambos sistemas.

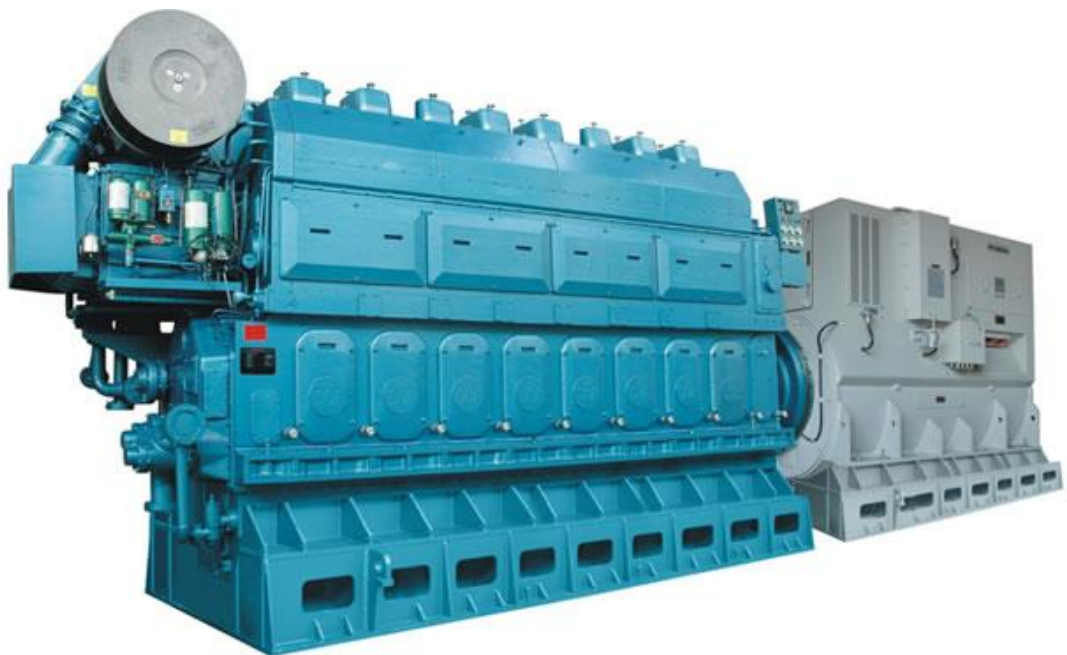


Imagen 3. Generador Diesel.

Como es sabido, para operar un alternador debe suministrarse al devanado inductor la corriente de excitación necesaria para crear un campo magnético; para ello es necesario disponer de una dinamo de excitación, situada en el mismo eje del alternador, o bien, según diseños más actuales, de un sistema de rectificadores estáticos que convierten la tensión alterna, producida en el mismo alternador, en

tensión continua. Ante variaciones de carga, es posible mantener constante tanto la tensión de suministro como la frecuencia generada. Para ello se utilizan dispositivos de control que tienen la función de regular la velocidad de rotación del motor diesel, variando la cantidad de combustible, así como los parámetros de la excitatriz. La planta generadora de un crucero con las características mencionadas anteriormente, está formada, normalmente, por seis generadores capaces de producir unos cincuenta megavatios (suficiente energía para abastecer una ciudad de 50.000 habitantes).

Los generadores, en general, están divididos en grupos y cada grupo alimenta a su propio embarrado. Estos grupos pueden colocarse en paralelo y su operación se lleva a cabo mediante un dispositivo de control paralelo. Su función es acoplar el generador al embarrado principal del cuadro de distribución correspondiente, cuando la fase y la tensión son prácticamente constantes comparadas con los parámetros de los alternadores que ya están en funcionamiento

Una vez que los grupos generadores están funcionando en paralelo, el distribuidor de carga asigna a cada generador la potencia de las diferentes cargas según la demanda y el porcentaje de carga asignado a cada grupo. Por lo tanto, la automatización tiene la misión de arrancar y parar los generadores en función de la carga. Los grupos generadores —con un grado de automatización importante—, los cuadros de distribución principales y los dispositivos de control constituyen la planta de producción de energía a bordo. El cuadro de distribución principal está normalmente dividido en dos o más secciones (ver imagen 4), cada una de las cuales tiene asignado un grupo generador, por lo que está garantizada la posibilidad de suministro redundante en función de las diferentes cargas. El valor de la tensión de distribución primaria depende de la potencia total instalada a bordo. Los sistemas de distribución y generación de MT instalados a bordo de los grandes buques por lo general suministran tanto tensión de 11kV (cuando la potencia total de los generadores supera los 20 MW y la de cada generador individual supera los 400 kW), como tensión de 6,6 kV cuando la potencia total de los generadores se sitúa entre los 10 y los 20 MW con una potencia máxima en torno a 300 kW cada uno. Para aplicaciones navales con una potencia total, de los

generadores, hasta potencias de 12 MW donde se incluyen, por ejemplo, los yates o buques de tamaño medio, la generación y la distribución suele realizarse en baja tensión con valores de 440 V o 690 V. En el diagrama de la imagen 5 se resumen los diferentes niveles de tensión en función de la potencia total.



Imagen 4. Cuadro eléctrico

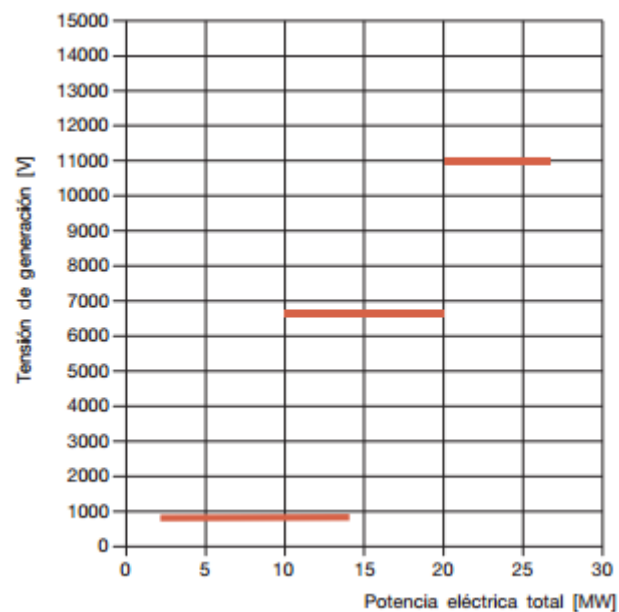


Imagen 5. Tensión nominal en función de la potencia total instalada a bordo.

4 Rectificadores de corriente.

Cuando el motor propulsor es un motor DC, frecuentemente de excitación independiente, dado que la generación se hace en alterna se precisa un rectificador trifásico controlado, para poder ajustar la tensión continua de alimentación del motor, V_A . Se acostumbra a emplear dos convertidores distintos: uno para la alimentación del inducido y otro para la corriente de campo para producir el flujo. El par que produce el motor es proporcional al flujo y a la corriente de inducido (EC – 1)

$$T = K \cdot \Phi \cdot I_A$$

EC – 1

La velocidad de giro es proporcional a V_A e inversamente proporcional al flujo. Si el flujo permanece constante la velocidad es proporcional a la tensión E_A . (EC – 2)

$$N = K' \frac{E_A}{\Phi} \cong K' \frac{V_A}{\Phi}$$

EC - 2

La inversión de marcha puede hacerse invirtiendo la corriente por el inducido ó por el inductor.

4.1 Rectificador trifásico controlado

Los tiristores son unos componentes electrónicos parecidos a los diodos, están compuestos por 4 capas de silicio, 2 de tipo N y otras 2 de tipo P. Su utilización está muy extendida porque se puede controlar la corriente que por el circula, además de poder rectificar la corriente alterna, resaltando, que el tiristor es un interruptor ultrarrápido.

Este tipo de circuito (ver imagen 6), tanto de media onda como el de onda completa, se aplica en motores de baja potencia para poder variar la velocidad, tienen una alimentación a la compuerta que es el control de los tiristores, así como, una salida directa que va directamente al motor, esto es así dado a que con estos circuitos no solamente rectificamos la señal alterna, sino que además, controlamos la velocidad de los motores.

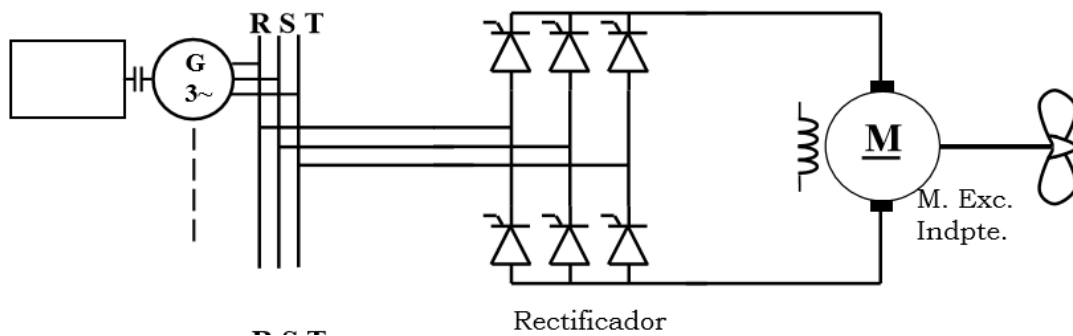


Imagen 6

4.2 Cicloconvertidor

Un Cicloconvertidor (imagen 7), es un convertidor que controla la tensión, la corriente y la potencia que entrega una fuente de alterna a una carga de alterna. Fundamentalmente se utilizan cicloconvertidores cuando los motores propulsores son grandes motores síncronos de baja velocidad, típicamente hasta 145 r.p.m. (muchos polos), pero también podría alimentar motores de inducción, también permite la recuperación de energía debido a su capacidad de flujo bidireccional de potencia, que, tratándose de motores más pequeños, cabría la posibilidad de que la energía fluya también en sentido contrario, es decir, en recuperación de energía proporcionando un par de frenado en caso de ser necesaria una parada de emergencia.

La frecuencia de salida, por la forma de funcionamiento, no puede superar más del $\frac{1}{3}$ de la frecuencia de la tensión de alimentación. La tensión de salida va cogiendo la forma de onda, por tramos, de la tensión de entrada para intentar aproximarse a una senoide de menor frecuencia, sufriendo un salto en cada cambio de tramo si bien la corriente, debido al carácter inductivo de los devanados, tiene una forma más alisada.

El cicloconvertidor de 6 pulsos dispone en cada fase de dos puentes rectificadores controlados montados en antiparalelo, en total por tanto 36 tiristores, lo que da idea de la complejidad del control de los impulsos de disparo.

Debido a la necesidad de aislamiento de los grupos de convertidores entre sí, por necesidades de conmutación de los tiristores (conmutación natural), obliga a que las tres fases del bobinado estático del motor estén aisladas entre sí. Es decir no pueden unirse en estrella ó cerrarse en triángulo.

Los cicloconvertidores, si bien pueden alimentarse directamente desde barras, suelen alimentarse a través de transformadores reductores (un transformador trifásico para cada puente doble) por las ventajas que supone en cuanto a:

- Reducción de tensiones y por tanto reducción del requerimiento de aislamiento del devanado del motor.
- Reducción de las corrientes de cortocircuito en caso de falla (por aumento de la impedancia). Reduce el contenido en armónicos en el resto del sistema.

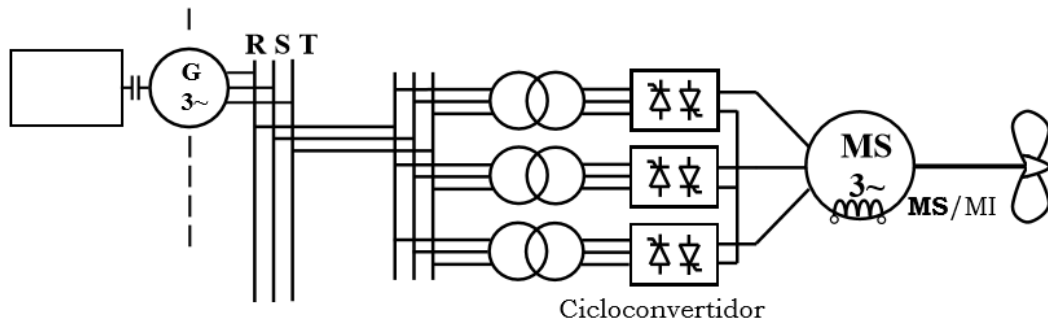


Imagen 7

4.3 Sincroconvertidor

El principio de operación del sincroconvertidor, sin profundizar en desarrollos teóricos, se resume en lo siguiente: en los terminales de salida del puente trifásico que actúa como rectificador y en los terminales de entrada del puente trifásico que actúa como convertidor hay dos tensiones, V_R y V_M (con $V_R > V_M$ ya que el equipo controlado es un motor y no un alternador). La tensión V_M es proporcional a la velocidad de rotación y a la excitación del motor síncrono. La diferencia de potencial permite controlar la corriente que pasa a través de la inductancia y, de forma periódica, a través de dos de los tres devanados del estátor, creando así un campo rotatorio con la dirección y frecuencia que requiere el sistema de control. El rotor, con la excitación adecuada, empieza a girar e intenta alcanzar la misma velocidad síncrona del campo magnético en rotación.

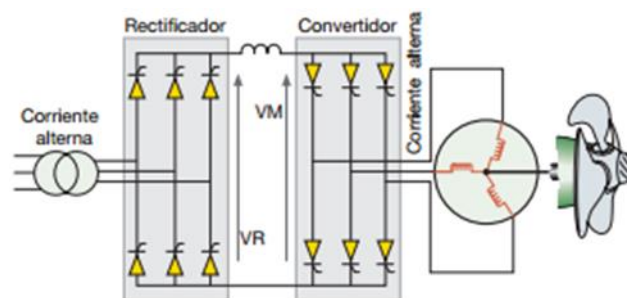


Imagen 8 Sincroconvertidor.

Cuando se requiere una elevada potencia propulsora se impone la utilización de motores síncronos. Para alimentar estos motores se utilizan los cicloconvertidores ó bien los sincroconvertidores.

En los sincroconvertidores, desde barras se alimenta directamente al convertidor que es un rectificador trifásico en puente controlado por tiristores, para controlar la corriente continua rectificada. El enlace de continua es a través de una autoinducción que actúa alisando la corriente. A continuación está el inversor: es un convertidor alimentado en corriente.

El conjunto de rectificador controlado y el enlace de continua de bobina actúan a modo de fuente de corriente para el inversor que dirige la corriente a las distintas fases del motor al ir dando impulsos de cebado, en el momento oportuno, a cada uno de los seis tiristores (cada 60°) dando lugar estas corrientes a un campo magnético giratorio, al que sigue el electroimán rotórico. La frecuencia de salida puede llegar a los 120 Hz.

En el eje del motor lleva un encoder ó transductor de posición del eje, que se utiliza para dar los instantes de encendido de los tiristores del inversor.

A grosso modo la fuente de corriente proporciona el par motor y la etapa inversora controla la frecuencia (velocidad). Para la conmutación natural de los tiristores se precisa una fem y esta la proporciona el propio motor gracias al flujo creado por los polos. El motor síncrono, al contrario que el asíncrono, es una carga activa. La f.e.m. en bornes del motor es apropiada para la conmutación del inversor por tanto, en lo que se refiere a los dispositivos de conmutación, los inversores son mucho más simples y pueden ser fabricados con tiristores.

La alimentación de la corriente del inductor procede de un conjunto independiente rectificador controlado. Actuando sobre la excitación se consigue hacer trabajar al motor con un factor de potencia de alrededor de 0,9 en adelanto (proporcionado energía reactiva). Su desventaja es que el sincroconvertidor no sirve para alimentar a motores de inducción.

En la siguiente imagen se muestra cómo funciona el sincroconvertidor (imagen 9).

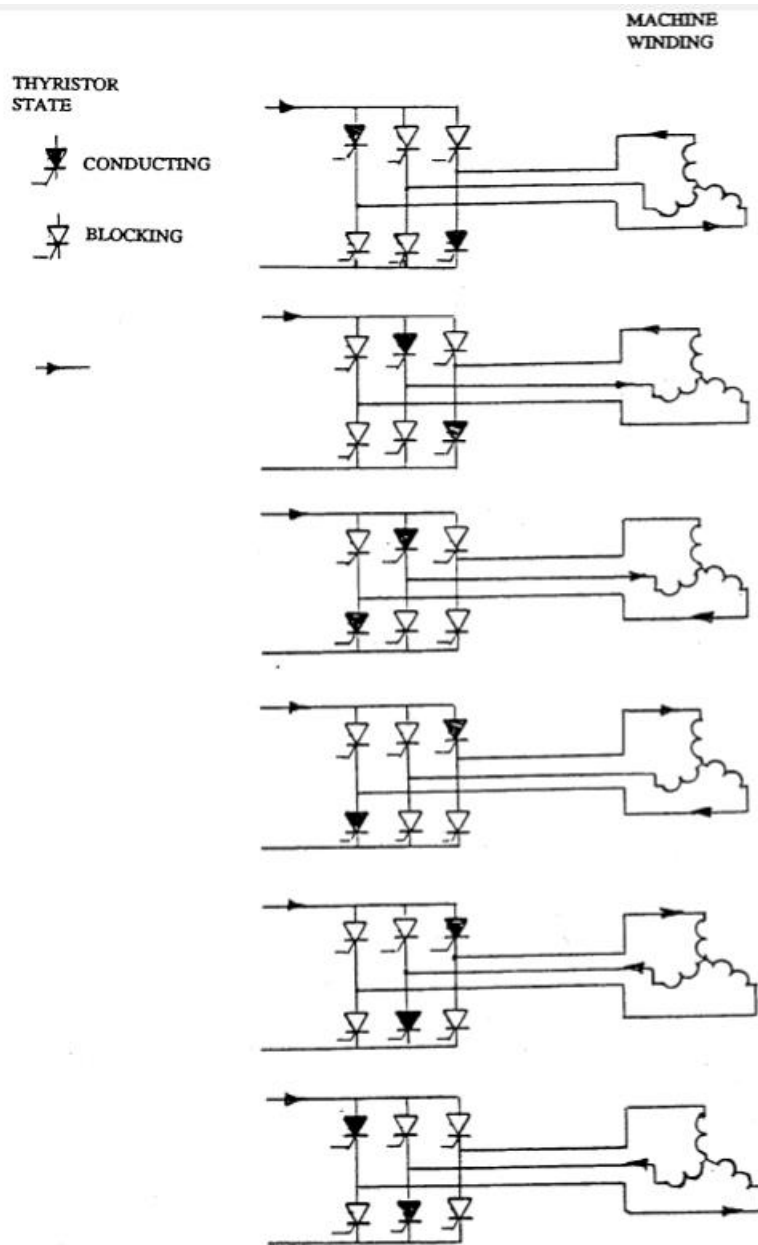


Imagen 9.

Para el accionamiento de la hélice la ventaja que tiene el motor síncrono frente al de inducción es que para la misma potencia, el peso y el empacho es menor y además el entrehierro puede ser mucho mayor, evitándose el riesgo de roce entre rotor y estator. Por otra parte cabe la posibilidad, cuando el rotor es de polos salientes, de reparar el devanado del inducido (estator) sin necesidad de desmontar el inductor

5 PRINCIPALES COMPONENTES UTILIZADOS HOY EN DÍA EN ELECTRÓNICA DE POTENCIA.

Los dispositivos semiconductores utilizados en Electrónica de Potencia se pueden clasificar en tres grandes grupos, de acuerdo con su grado de controlabilidad:

1. **Dispositivos no controlados:** en este grupo se encuentran los Diodos. Los estados de conducción o cierre (ON) y bloqueo o abertura (OFF) dependen del circuito de potencia. Por tanto, estos dispositivos no disponen de ningún terminal de control externo.
2. **Dispositivos semicontrolados:** en este grupo se encuentran, dentro de la familia de los Tiristores, los SCR (“Silicon Controlled Rectifier”) y los TRIAC (“Triode of Alternating Current”). En éste caso su puesta en conducción (paso de OFF a ON) se debe a una señal de control externa que se aplica en uno de los terminales del dispositivo, comúnmente denominado puerta. Por otro lado, su bloqueo (paso de ON a OFF) lo determina el propio circuito de potencia. Es decir, se tiene control externo de la puesta en conducción, pero no así del bloqueo del dispositivo.
3. **Dispositivos totalmente controlados:** en este grupo encontramos los transistores bipolares BJT (“Bipolar Junction Transistor”), los transistores de efecto de campo MOSFET (“Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor”), los transistores bipolares de puerta aislada IGBT (“Insulated Gate Bipolar Transistor”) y los tiristores GTO (“Gate Turn-Off Thyristor”), entre otros.

A continuación, en la imagen se muestran características y simbología utilizada en estos dispositivos, no se adentrará más en estos, dado a que no es la finalidad de este trabajo de fin de grado.

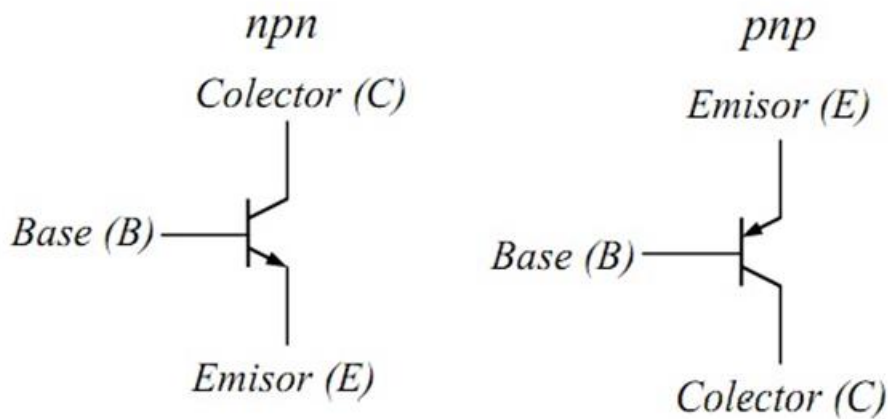
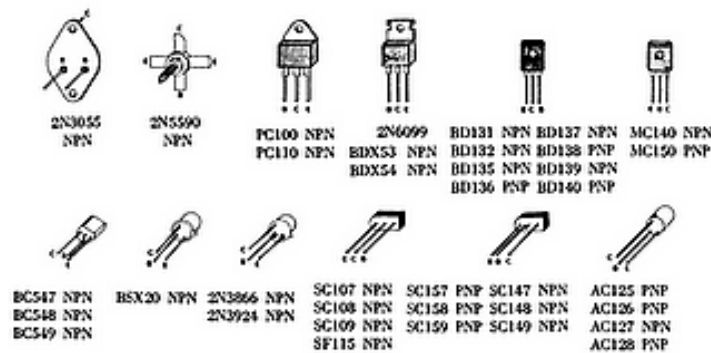
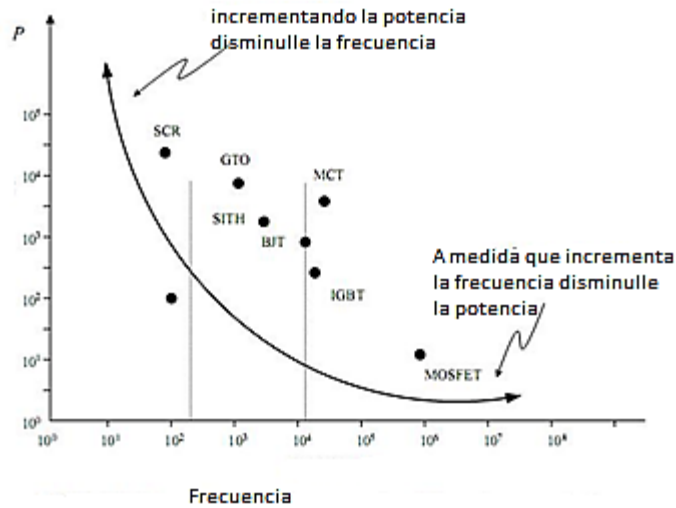
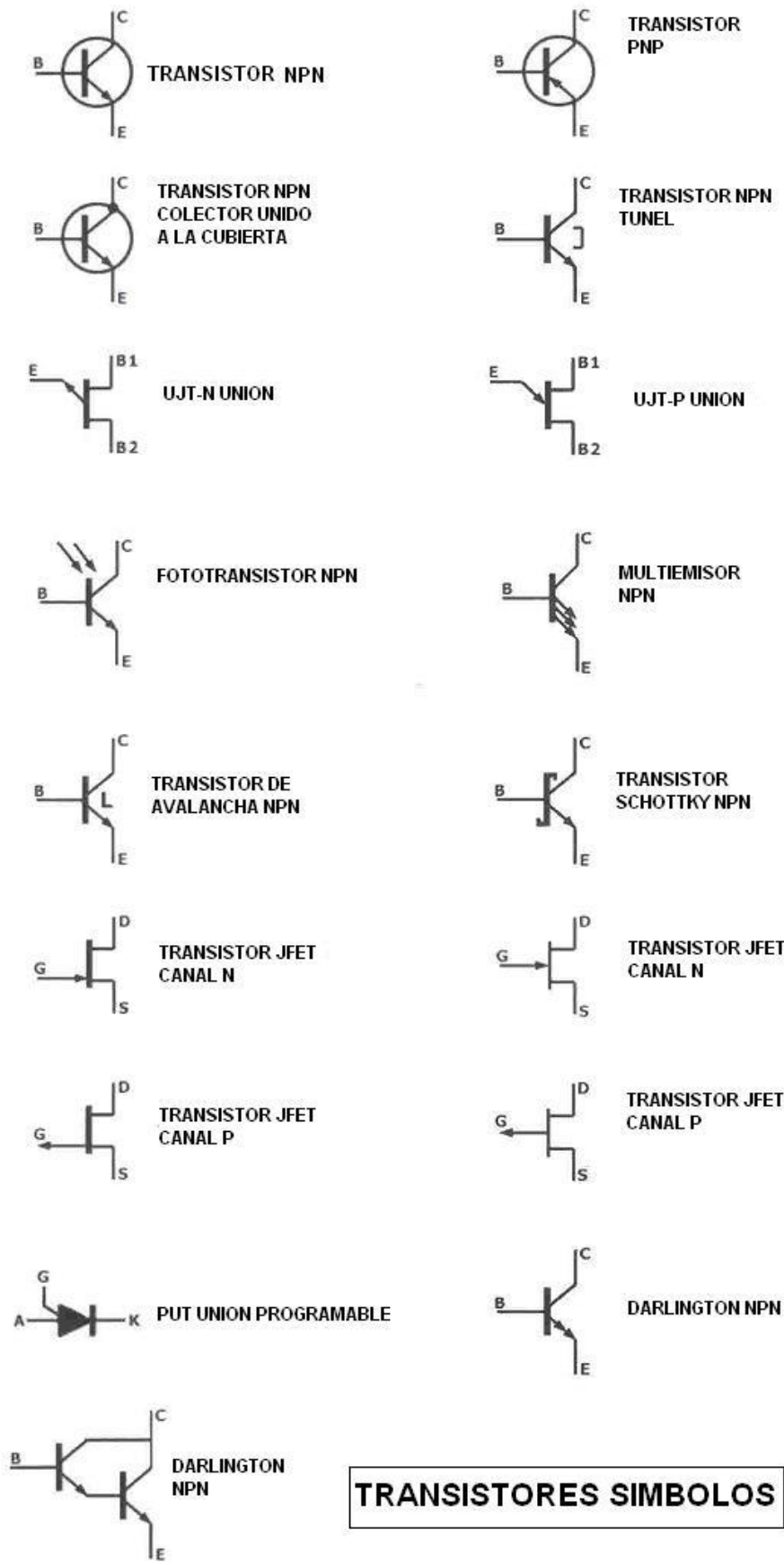


Imagen 10.



TRANSISTORES SIMBOLOS

Imagen 11.

6 MOTORES PARA PROPULSION ELÉCTRICA

6.1 Motor de jaula de ardilla

En su forma instalada, es un cilindro montado en un eje. Internamente contiene barras conductoras longitudinales de aluminio o de cobre con surcos y conectados juntos en ambos extremos poniendo en cortocircuito los anillos que forman la jaula. El nombre se deriva de la semejanza entre esta jaula de anillos, las barras y la rueda de un hámster (ruedas probablemente similares existen para las ardillas domésticas).

La base del rotor se construye con láminas de hierro apiladas. El dibujo muestra solamente tres capas de apilado pero se pueden utilizar muchas más.

Los devanados inductores en el estátor de un motor de inducción incitan al campo magnético a rotar alrededor del rotor. El movimiento relativo entre este campo y la rotación del rotor induce corriente eléctrica, un flujo en las barras conductoras. Alternadamente estas corrientes que fluyen longitudinalmente en los conductores reaccionan con el campo magnético del motor produciendo una fuerza que actúa tangente al rotor, dando por resultado un esfuerzo de torsión para dar vuelta al eje. En efecto, el rotor se lleva alrededor el campo magnético, pero en un índice levemente más lento de la rotación. La diferencia en velocidad se llama deslizamiento y aumenta con la carga.

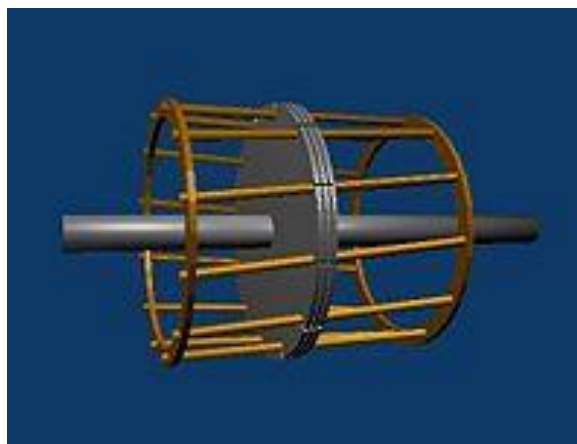


Imagen 12. Esquema del rotor de jaula de ardilla.

A menudo, los conductores se inclinan levemente a lo largo de la longitud del rotor para reducir ruido y para reducir las fluctuaciones del esfuerzo de torsión que pudieron resultar, a algunas velocidades, y debido a las interacciones con las barras del estátor. El número de barras en la jaula de la ardilla se determina según las corrientes inducidas en las bobinas del estátor y por lo tanto según la corriente a través de ellas. Las construcciones que ofrecen menos problemas de regeneración emplean números primos de barras.

El núcleo de hierro sirve para llevar el campo magnético a través del motor. En estructura y material se diseña para reducir al mínimo las pérdidas. Las láminas finas, separadas por el aislamiento de barniz, reducen las corrientes parásitas que circulan resultantes de las corrientes de Foucault (en inglés, 'eddy current').

El material, un acero bajo en carbono pero alto en silicio (llamado por ello acero al silicio), con varias veces la resistencia del hierro puro, en la reductora adicional. El contenido bajo de carbono le hace un material magnético suave con pérdida bajas por histéresis.

El mismo diseño básico se utiliza para los motores monofásicos y trifásicos sobre una amplia gama de tamaños. Los rotores para trifásica tienen variaciones en la profundidad y la forma de las barras para satisfacer los requerimientos del diseño. Este motor es de gran utilidad en variadores de velocidad.

Para la propulsión marina, estos motores son alimentado por cicloconvertidor ó por inversor PWM (modulación por ancho o de pulso, en inglés pulse width modulation PWM) con GTO (Gate Turn Off: Tiristor de bloqueo por puerta). Es un motor muy utilizado para este propósito debido a que suma robustez y ser el de precio más reducido. Normalmente son motores enfriados por aire (a su vez enfriado en un enfriador aire-agua) fluyendo en sentido axial por el rotor y entrehierro y en sentido radial, a través de ductos de ventilación, por el estator. Por ser motores de baja velocidad no es factible que sean autoventilados. Un inconveniente de estos motores es que no son apropiados cuando se requiere un elevado número de polos (a lo sumo 16) ó grandes entrehierros (valor típico 5 mm). Otro inconveniente es que no se puede disponer de pares elevados a bajas revoluciones, pero esto, salvo casos particulares, no suele ser un inconveniente en propulsión marina.

6.2 Motor síncrono con rotor bobinado.

Motor muy apropiado cuando se trata de muy elevadas potencias. Puede ser alimentado desde cualquier tipo de convertidor, particularmente desde el sincroconvertidor, inversor con tiristores conmutados por la carga, sin las limitaciones de frecuencia de los cicloconvertidores. El factor de potencia de un sincroconvertidor puede ser de 0,85 a plena carga y 0,65 a media potencia. La principal ventaja de este motor es que puede trabajar con el factor de potencia deseado, la unidad ó trabajar en adelanto de fase. Sus principales inconvenientes son: Mayor peso. Mayor precio (en lo que respecta al motor sobre un 15% más comparado con el de inducción) Rotor menos robusto. Necesidad de anillos de deslizamiento y de sistema de excitación. Comercialmente se cubren todas las potencias.

6.3 Motor síncrono de imán permanente.

Este tipo de motor presenta algunas ventajas sobre el motor síncrono de rotor bobinado y sobre el de inducción. No necesita de anillos de deslizamiento ni sistema de excitación. Se eliminan las pérdidas en el cobre del rotor. (Aumenta el rendimiento) El motor puede ser más pequeño y ligero que el de rotor bobinado ó el de inducción. Puede ser tan robusto como el de inducción. Si se desea, el rotor puede ser construido con un nº mucho mayor de polos (con la consiguiente reducción en los espesores de hierro, tanto en el yugo como en el núcleo) El principal inconveniente es que el moderno material magnético del rotor, para que proporcione un flujo elevado, ha de ser a base de tierras raras, de coste muy elevado

Otro inconveniente es que dado que el entrehierro es muy reducido se precisa un especial cuidado de la alineación y del estado de los cojinetes. Si hay 6 mm desde el punto de vista magnético, dado que unos 3 mm están ocupados por la banda de sujeción y apriete de los polos, desde el punto de vista mecánico es tan sólo de 3 mm.

6.4 Motor de corriente continua.

Los motores con alimentación de corriente continua son significativamente más silenciosos, más pequeños (debido a un menor número de componentes) y más eficiente que los sistemas de motor de corriente alterna, adaptándose además con facilidad lo que supone un menor costo en los diseños de la distribución eléctrica de los buques.

Su principal inconveniente para este campo son por problemas de conmutación no disponible para grandes potencias (Máximo 5MW para un motor convencional), a su vez, tienen una gran facilidad de regulación de la velocidad, simplicidad de operación, par elevado en todo el rango de velocidad, son de mayor mantenimiento. Equipo rectificador (controlado) robusto, sencillo y económico. Se necesitan polos de conmutación al tratarse de motores de elevada potencia.

Motores de DC con potencias desde los 400 kW hasta los 4.000 kW. Con una regulación de velocidad, basada en convertidores de última generación, extremadamente precisa. Utilizados para maquinaria de pesca, y en propulsiones con baja emisión de ruidos (especialmente diseñados para buques oceanográficos).

7 DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA A BORDO

Sin entrar en detalles sobre las modalidades de gestión de los sistemas eléctricos de distribución o sobre el diseño que puede tener una instalación eléctrica a bordo, conviene hacer una breve descripción que permita la comprensión de su estructura y complejidad. En las plantas eléctricas a bordo de los grandes buques o en los buques más modernos tales como los cruceros, la generación de energía eléctrica a bordo se realiza como se ha visto en la planta generadora, que en algunos casos puede estar dividida en dos partes, una situada en proa y otra en popa. El sistema de distribución de media tensión (véase imagen 13) parte del cuadro de distribución principal que está formado por dos secciones, cada una de las cuales conectada a su vez a un grupo generador

Estos embarrados normalmente se conectan a través de un interruptor de acoplamiento que permite la gestión de la energía en función de las necesidades concretas de consumo, siempre con el objetivo de mantener una eficiencia tal que garantice en todo momento un buen nivel de seguridad y estabilidad del buque.

El embarrado principal del sistema de media tensión o algunos cuadros secundarios de distribución entregan la energía directamente o a través de dispositivos de control (p. ej., convertidores electrónicos) a los siguientes puntos de consumo:

- 1) cargas esenciales de gran potencia (p. ej., los propulsores principales o las hélices de maniobra para el desplazamiento transversal del buque).
- 2) motores de gran potencia, por ejemplo para equipos de aire acondicionado o para equipos con funciones concretas relacionadas con el tipo de buque.
- 3) diversas subestaciones situadas en las zonas de servicio que alimentan con electricidad de BT a todas las cargas, ya sea para iluminación de la zona en concreto o para cargas de pequeña potencia.

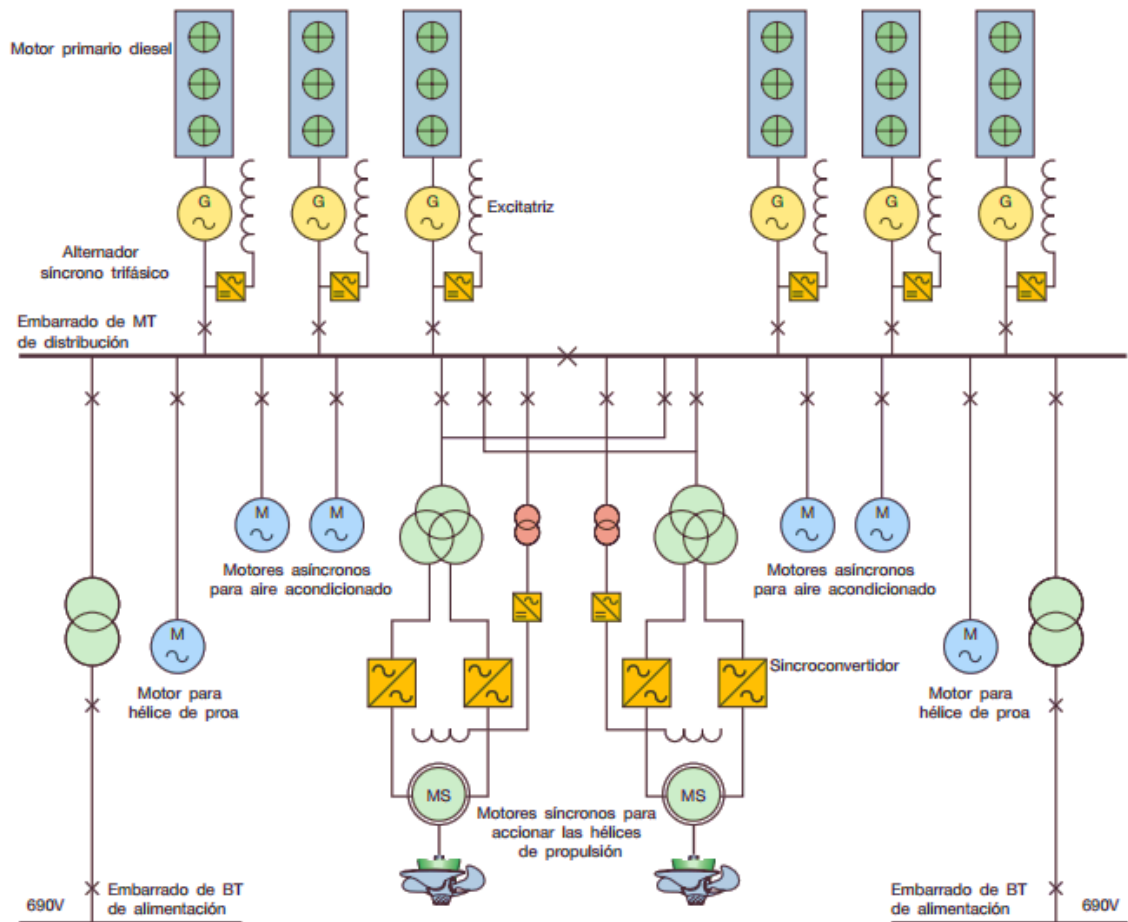


Imagen 13. Esquema general de las modalidades de generación y suministro de MT.

Por lo tanto, el suministro de energía secundaria a los cuadros de distribución de BT se inicia en las subestaciones, pasando por los transformadores de MT/BT. A menudo estos cuadros de distribución ofrecen la posibilidad de disponer de un suministro de energía redundante que proviene de otro cuadro de distribución de MT, alimentado a su vez por la otra mitad del embarbado del cuadro principal de MT. A partir de los cuadros de BT se extiende una compleja red (véase imagen 13) que alimenta diferentes tipos de cargas de BT a bordo, tales como el timón, las maquinillas de cubierta o los sistemas auxiliares del motor, además del sistema de iluminación, de las instalaciones de ocio y confort, así como de los servicios auxiliares de la habilitación (cocinas y lavanderías). La planta eléctrica debe garantizar en todo momento la continuidad del servicio, para lo cual se utilizan cuadros de distribución con dos entradas de alimentación que a su vez se alimentan de otros cuadros de distribución. En caso de avería es importante poner

cuanto antes fuera de servicio solo la carga implicada o la sección afectada por la avería. Por este motivo es fundamental aplicar criterios selectivos para todas las cargas.

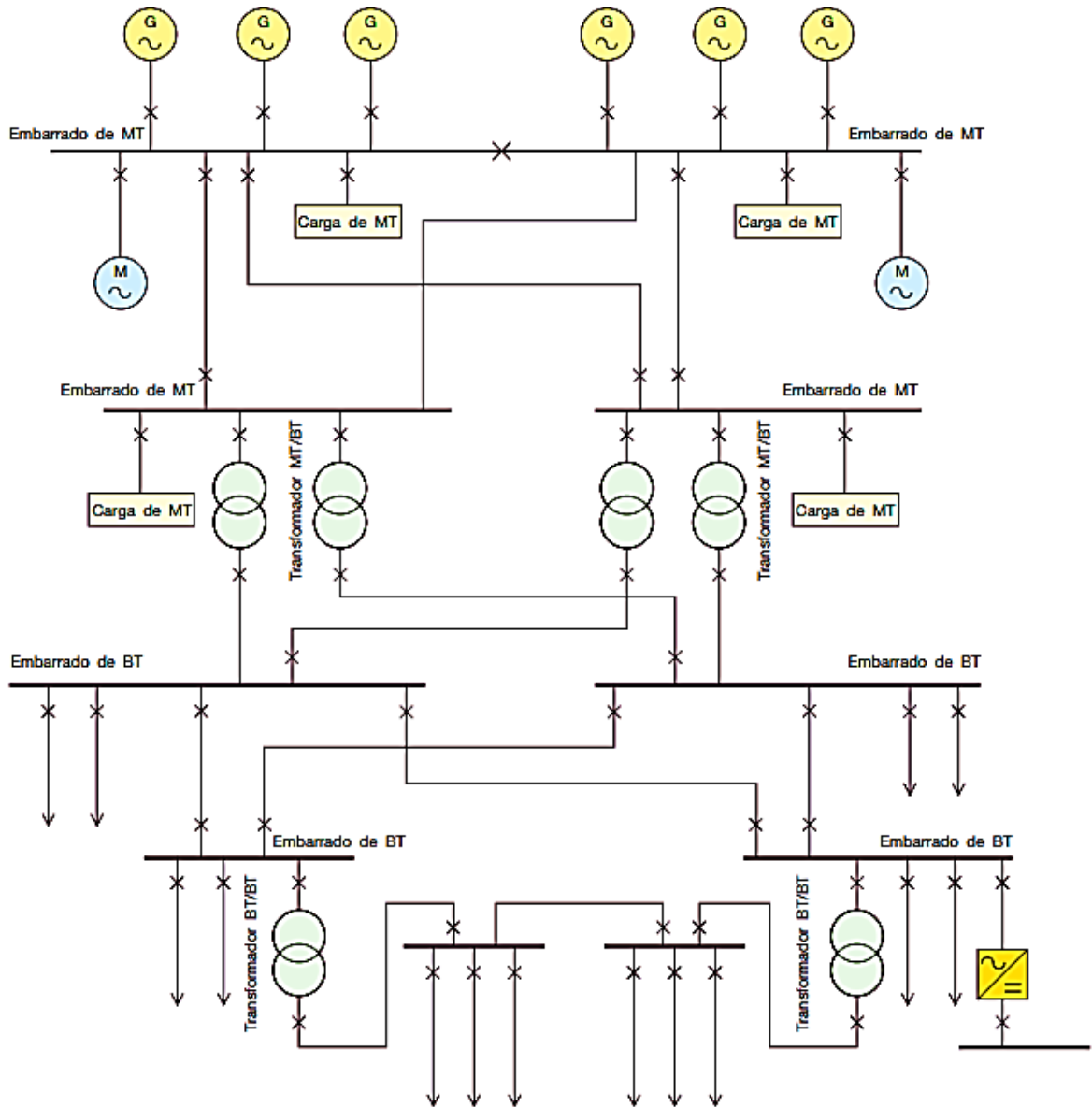


Imagen 14. Esquema general sobre la distribución de MT y BT a bordo.

En párrafos anteriores ya se han mencionado los valores de la tensión de generación de MT. En cuanto a la tensión de distribución de las instalaciones de BT, hay que destacar que el valor estándar era de 440 V hasta hace pocos años. Debido al continuo aumento del tonelaje y, en consecuencia, de la potencia requerida a bordo, la tensión de suministro se ha elevado hasta 690 V y, en algunos casos

particulares, hasta 1000 V debido a la dificultad de operar con valores de corriente nominal y de cortocircuito cada vez mayores.

Este cambio ha comportado algunas ventajas, tales como una reducción parcial de los valores de la corriente de falta, una reducción de la sección de los cables —y en consecuencia de los pesos y dimensiones totales—, una reducción de las caídas de tensión, un aumento de la longitud admisible de los cables así como de la potencia de los motores que pueden conectarse directamente a una red primaria y, en general, de todas las cargas del cuadro principal. La distribución final en baja tensión se lleva a cabo a tensiones más bajas (400 V/230 V) que se obtienen mediante transformadores BT/BT.

Las frecuencias que se utilizan son de 50 Hz o de 60 Hz, en función de aspectos diversos como pueden ser el tipo de construcción naval y el país de origen. En el caso de cargas especiales, comúnmente en el sector militar, son necesarios circuitos especiales en presencia de frecuencias de 400 Hz. El valor de la tensión en corriente continua es habitualmente de 48 V, mientras que se utilizan 110 V o 125 V para algunos circuitos concretos, como por ejemplo los dispositivos para cargar baterías o los circuitos auxiliares de automatización.

Las instalaciones eléctricas navales están sujetas a especificaciones de proyecto concretas, que se distinguen de las instalaciones terrestres por algunos detalles debidos a todos los aspectos y necesidades relacionados con las características del entorno a considerar, y que pueden hallarse en cada tipo de buque. De hecho, la red eléctrica instalada a bordo constituye un sistema en isla caracterizado por distancias cortas entre la planta de generación de energía y los puntos de consumo. La potencia total instalada puede ser muy elevada, con valores de cortocircuito altos y fuerzas electrodinámicas que requieren poner especial atención en la seguridad y el diseño de dichos sistemas.

En general, un sistema de distribución de puesta a tierra se divide en dos subsistemas diferentes, mientras que para una instalación eléctrica a bordo existen menos posibilidades de integración y gestión. La potencia total de los generadores es comparable con la potencia total instalada teniendo en cuenta el margen de

seguridad, y la potencia nominal de algunas cargas es comparable con la de los generadores de forma individual.

Por lo tanto, a bordo no existen embarrados con potencia infinita, es decir, que la potencia disponible supera con creces a la potencia demandada por las cargas, tal y como ocurre con las plantas de generación eléctrica instaladas en tierra. Como consecuencia, la división entre el suministro y el uso de la energía debe permitir el arranque de los motores asíncronos más grandes con el mínimo número posible de generadores en marcha y sin causar una caída de tensión tal que produzca una perturbación en el sistema de distribución. Los posibles tipos de fallo, que van desde la sobrecarga hasta el cortocircuito, están relacionados con los sistemas en isla.

El entorno particular y las condiciones de operación a bordo, con vías de evacuación limitadas y zonas con acceso restringido, pueden hacer que sea más grave y complicado hacer frente a las diferentes modalidades de operación y consecuencias de una avería. Para obtener unas elevadas prestaciones en relación a la seguridad de las instalaciones eléctricas a bordo, los cables utilizados deben evitar la propagación del fuego. Por lo tanto deben poseer propiedades de retardo de llama, al objeto de mantener la situación bajo control, y las emisiones de humo y vapores tóxicos deben tener un grado de toxicidad mínimo para los pasajeros.

Deben instalarse diversos sistemas de seguridad, como sistemas de detección de incendios sofisticados. Como se ha mencionado anteriormente, por motivos de seguridad debe evitarse la falta de suministro a los servicios esenciales a bordo. En consecuencia, el sistema de distribución debe disponer de la posibilidad de suministro redundante, que normalmente se logra mediante un sistema en anillo abierto. Por ejemplo, la división del embarrado principal de MT, con la posibilidad de unir ambas partes en caso necesario, hace que el suministro de energía a los motores eléctricos del sistema de propulsión esté garantizado, con lo que no peligra el gobierno del buque; o bien que los cuadros de BT dispongan de suministro redundante que provenga de otros cuadros de distribución; o por último mediante un adecuado diseño de la planta de generación de emergencia. Las instalaciones eléctricas a bordo funcionan con corriente alterna debido a que

ofrecen mejores garantías en cuanto a su gestión, en términos de fiabilidad y costes, que aquellas que funcionan con corriente continua.

La red de distribución primaria de MT está formada en general por un sistema trifásico con tres conductores sin neutro. Este sistema normalmente se gestiona con el neutro del sistema en estrella aislado de tierra o puesto a tierra a través de una resistencia o de una bobina Petersen, por lo que permite una reducción en los valores de las corrientes de fuga y cortocircuito. En este sentido, un primer defecto con pérdida de aislamiento no representa un peligro y permite una intervención de mantenimiento en servicio sin que las protecciones actúen. A pesar de esto, el defecto debe ser localizado y el servicio debe volver a la normalidad de forma inmediata con el fin de evitar que el primer defecto se convierta en un doble defecto a tierra, lo que resulta extremadamente peligroso en los sistemas informáticos y de comunicaciones.

En el pasado, las instalaciones eléctricas a bordo se caracterizaban por su extensión limitada y por la baja potencia instalada, con un sistema de distribución secundario formado por una red monofásica de dos conductores aislados, o bien tres conductores con el punto medio del transformador conectado a tierra. En la actualidad, la potencia instalada a bordo ha aumentado de forma considerable, por lo que la distribución se realiza mediante un sistema trifásico de cuatro conductores —tres fases más neutro, que en la mayoría de casos no está conectado a tierra—, de tal forma que es posible disponer de tensión bifásica de forma sencilla.

La red de distribución secundaria generalmente se distribuye de forma **radial**, con la posibilidad de suministro redundante a los cuadros de distribución mediante dos líneas diferentes, disponiendo así de una conexión de reserva para las cargas. La selección de un sistema u otro se realiza en función del tipo de planta y su ejecución se lleva a cabo mediante un interruptor o con interruptores automáticos enclavados. Las diversas redes de distribución principal de MT poseen una estructura diferente dependiendo del tipo de buque y la potencia instalada, y pueden ser del tipo radial con subestaciones o cuadros secundarios de distribución. El esquema radial simple (véase imagen 14) incluye un cuadro de distribución

principal con un único embarrado desde donde se alimenta a todos los puntos de consumo de BT. Esta configuración resulta ser crítica, en particular si se produce un fallo en el cuadro de distribución principal que puede poner en peligro la fiabilidad del suministro a bordo.

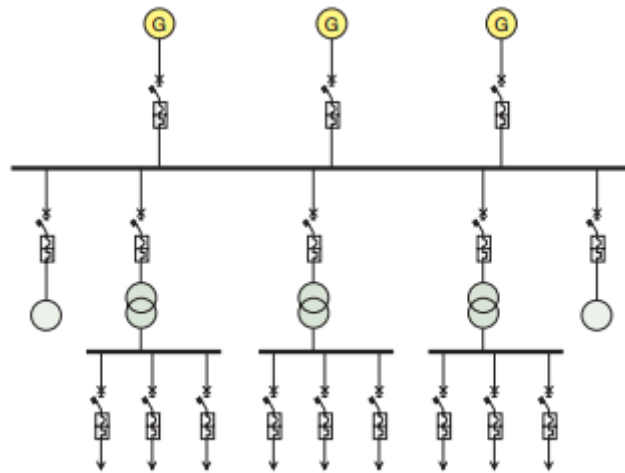


Imagen 15. Esquema del principio de funcionamiento del sistema de distribución radial.

El sistema de distribución **radial compuesto** (véase imagen 15) es más adecuado que el anterior para plantas de media potencia compuestas por un cuadro de distribución principal, con uno o más embarrados, y algunos cuadros de distribución secundarios, cuya función exclusiva es suministrar energía desde el cuadro principal a los de distribución secundarios situados en distintos puntos de la instalación.

Con esta configuración es posible una reducción notable en el número de circuitos con origen en el cuadro de distribución principal y, por lo tanto, en los dispositivos instalados en el mismo. En cambio, si tenemos en cuenta la continuidad del servicio para aquellos puntos de consumo derivados de los diferentes cuadros secundarios de distribución, es de gran importancia realizar un diseño adecuado de la cadena de interruptores automáticos situados en los diferentes niveles del sistema de distribución.

De este modo, si se produce un fallo, solo provocará el disparo del interruptor automático afectado, quedando garantizado el suministro de energía al resto de

cargas y cuadros secundarios. La continuidad del suministro de energía en los sistemas radiales viene a menudo garantizada mediante un diseño que incluye un anillo de reserva (véase imagen 16), cuyo objetivo es el suministro de energía a aquellas subestaciones cuya alimentación a través de la línea principal se ha visto interrumpida, o incluso a todo un grupo de subestaciones en caso de un fallo grave de una de las mitades del embarrado del cuadro principal. En este caso, considerado como muy grave, la disponibilidad de los grupos generadores se reduce a la mitad, con lo cual solo se dispone de la mitad de la potencia instalada. El anillo de reserva debe ser diseñado de tal forma que pueda hacer frente a las necesidades de operación en dicha situación, caracterizada por su extrema emergencia.

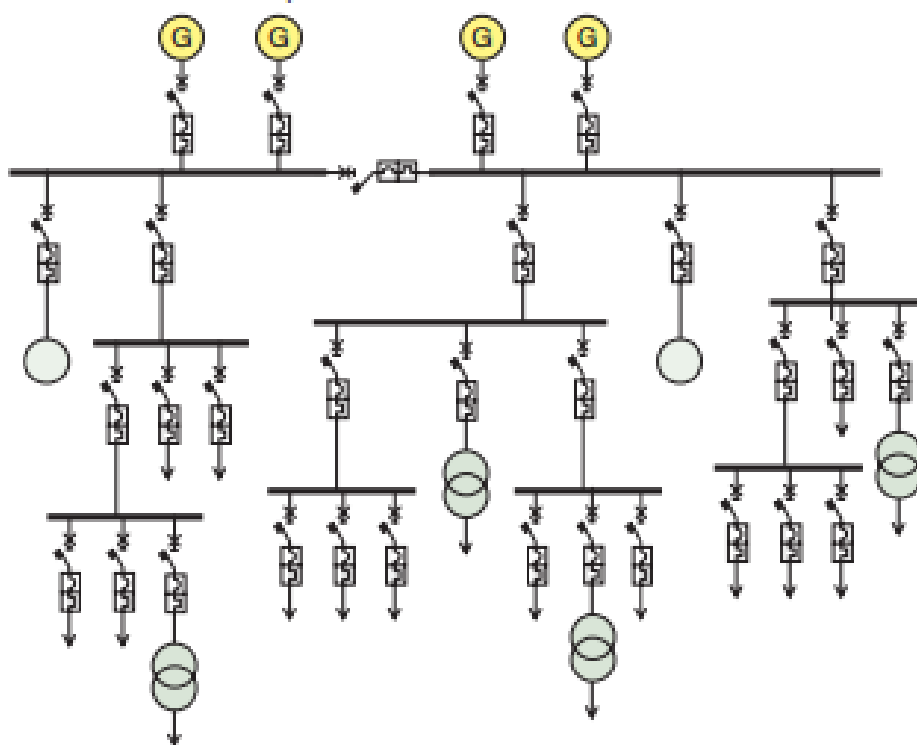


Imagen 16. Esquema del principio de funcionamiento del sistema de distribución radial compuesto.

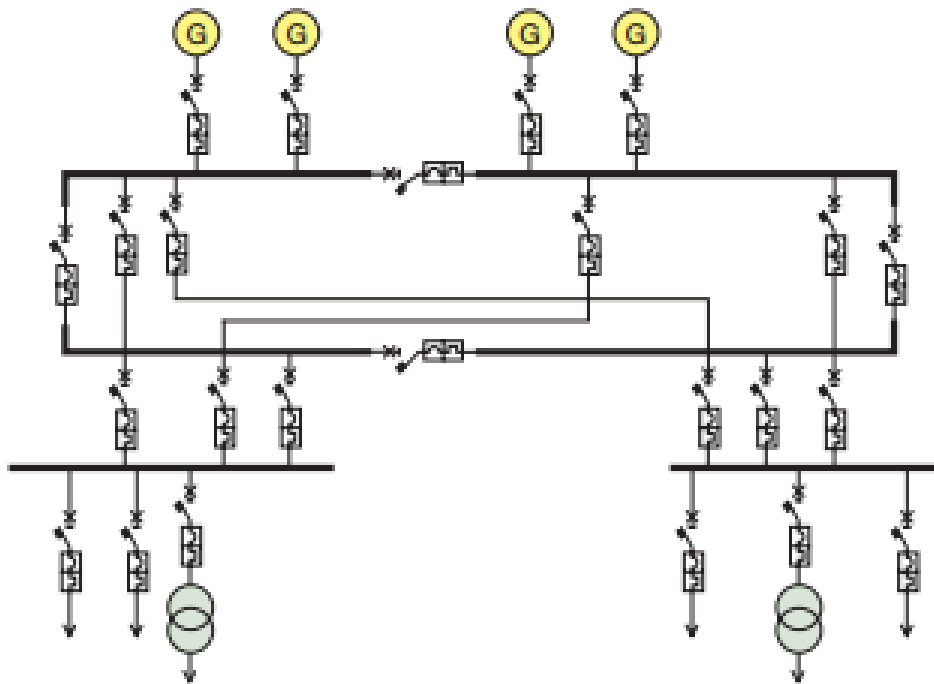


Imagen 17. Esquema del principio de funcionamiento del sistema de distribución con anillo de reserva.

En cuanto a la planta eléctrica a bordo, se divide en tres partes:

1. La planta principal, formada por los servicios esenciales del buque, tales como el sistema de propulsión o los circuitos con funciones prioritarias a bordo, cuyas características dependen del tipo de buque (p. ej., los circuitos que alimentan a las bombas o los compresores en un buque tanque para el transporte de gas; o aquellos circuitos que alimentan a los equipos de carga/descarga en buques portacontenedores);
2. Los circuitos auxiliares, entre los que se incluyen los sistemas de producción y distribución de energía para iluminación y fuerza motriz auxiliar;
3. Las instalaciones especiales para las que se ha desarrollado una tecnología concreta (instalaciones telefónicas, dispositivos electrónicos para diferentes aplicaciones, telégrafos, torsiómetros, sistemas de navegación integrados, dispositivos de detección de incendios, etc.).

Otra diferencia fundamental es la distinción que se puede hacer entre cargas esenciales y no esenciales, lo que influye en el sistema de distribución que las alimenta. Las cargas esenciales son aquellas para las que debe garantizarse el suministro y su buen funcionamiento, incluso en situaciones de emergencia, ya que

llevan a cabo funciones imprescindibles para la seguridad del buque. Dentro de ellas destacan por encima de todas, el sistema de propulsión, el sistema de control de motores, timones y estabilizadores, los sistemas de protección contra incendios, los sistemas de alarma, los sistemas auxiliares y de comunicación para la navegación y el sistema de iluminación de emergencia. También se consideran esenciales aquellas cargas que contribuyen a crear un mejor confort o una mayor seguridad para la vida de los pasajeros a bordo, tales como el sistema de climatización o la planta de agua.

El sistema eléctrico, en cumplimiento de las reglas de las Sociedades de Clasificación, cuenta también con una planta de generación de emergencia situada en una zona diferente a la de la planta de generación, normalmente en una de las cubiertas más elevadas, quedando por encima de la línea de flotación. La planta de generación de emergencia consta de un grupo autónomo diesel, con una potencia del orden de varios MW, que produce energía en BT (440 V o 690 V). El motor diesel en cuestión debe ser capaz de arrancar incluso cuando la red principal no puede entregar energía, que normalmente se obtiene mediante la conexión a un SAI.

Un conjunto de baterías garantiza la disponibilidad de energía también durante el arranque del grupo de emergencia. En condiciones de operación normales, es decir, en presencia de tensión de red, las baterías son alimentadas continuamente con una tensión constante mediante un rectificador, de tal forma que se mantienen totalmente cargadas. En caso de fallo en el cuadro principal, un dispositivo de control inicia el proceso de conmutación de las cargas esenciales (aquellas que también deben ser alimentadas en situaciones de emergencia) al cuadro de distribución de emergencia (p. ej., el sistema de iluminación de emergencia, el sistema de bombas contra incendio, los equipos de gobierno y los sistemas auxiliares imprescindibles para el funcionamiento de la sala de máquinas, los sistemas de comunicaciones y señalización, etc.).

En algunos puertos, debido a la normativa ambiental sobre emisiones, los buques deben parar sus motores diésel, interrumpiéndose la producción de energía eléctrica a bordo y conectarse a la red local. En general la red local suministra

energía en BT, aunque algunas instalaciones más modernas pueden hacerlo en MT. Este procedimiento, conocido como conexión de alta tensión en puerto (HVSC – High Voltage Shore Connection–), está teniendo una buena acogida entre las autoridades portuarias de muchos países, al permitir la reducción de las emisiones contaminantes producidas por los buques atracados, con la consecuente mejora de la calidad del aire en las zonas portuarias y su entorno. La tecnología HVSC (véase imagen 18) permite el suministro de energía de forma directa desde el muelle al buque de tal forma que, al quedar garantizada la operatividad de la sala de máquinas y de las instalaciones a bordo (cámaras frigoríficas, iluminación, calefacción y aire acondicionado), es posible parar los grupos generadores diesel. La operación en paralelo de ambos sistemas, necesaria para el suministro de energía eléctrica a bordo, no debe causar problemas en la calidad del suministro de la red de distribución local. A modo ilustrativo sobre la mejora en el impacto ambiental, un gran crucero atracado durante 10 horas y conectado a la red eléctrica local reduce su consumo en casi 20 toneladas de combustible, el equivalente a 60 toneladas de CO₂ que deja de emitir a la atmósfera (el consumo anual de 25 automóviles).

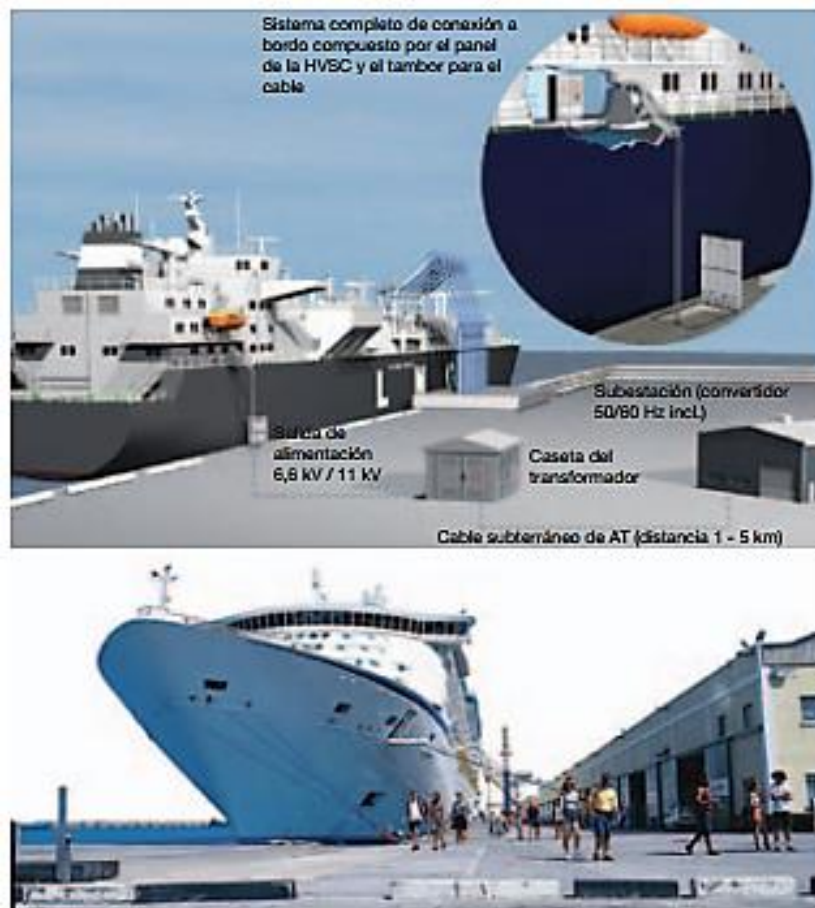


Imagen 18. Conexión de alta tensión en puerto (HVSC).

8 SISTEMAS DE PROPULSIÓN

La potencia propulsora instalada a bordo varía de forma considerable en función del tipo de buque y de las necesidades particulares del servicio. En los buques estándar construidos durante la década de los 70, los sistemas de propulsión consistían en turbinas de vapor o motores diesel, tanto de dos tiempos (para aplicaciones navales exclusivamente) como de cuatro tiempos, cuyo eje accionaba la hélice. Con el aumento de la capacidad de carga de los buques —en particular de los grandes buques de pasajeros de línea regular que en los últimos años han alcanzado dimensiones y tonelajes más allá de lo imaginable— se ha creado un campo de aplicación para la propulsión eléctrica de especial interés: el uso de un motor eléctrico como propulsor de las hélices del buque. Al principio se utilizaron motores asíncronos debido a su robustez y a sus características constructivas sencillas. El siguiente paso fue el motor síncrono que, aunque tiene unas

dimensiones globales mayores y un peso más elevado para una misma potencia dada, y pese a comportar más complicaciones en su control durante las operaciones de arranque e inversión de giro, permite su control actuando sobre la excitatriz con factores de potencia próximos a la unidad, lo que se traduce en una reducción del tamaño de la planta. Además, es posible alcanzar una velocidad constante ya que el deslizamiento es nulo. También se caracterizan por la presencia de una fuerza electromotriz en el estátor cuando opera sin carga, lo que permite el uso de convertidores con maniobra natural para su control. La propulsión eléctrica, por lo tanto, ha acabado imponiéndose; consiste en utilizar el motor principal del buque para accionar un alternador eléctrico que suministra corriente eléctrica a un motor síncrono y que, a su vez, acciona la hélice. Un buque, con las características inicialmente descritas, dispone normalmente de dos motores principales, cada uno de los cuales con una potencia de unos 10 MW, capaces de asegurar una velocidad de navegación media en torno a 20 nudos. Así pues, es posible alcanzar potencias de propulsión que van desde 15 hasta 30 MW, necesarias para una navegación óptima en mar abierto (véase imagen 21). Para poder hacer una comparación con el valor total de potencia, el coeficiente KP/T resulta más adecuado; se define como el cociente entre la potencia eléctrica total a bordo y el tonelaje del buque, y puede tomar valores que, en general, se sitúan entre 0,15 y 0,25 kW/T. La energía necesaria que debe suministrarse a los motores eléctricos tiene su origen en la planta eléctrica de MT, que también suministra energía al resto del buque. Los grandes cruceros están equipados, en general, con dos motores síncronos, alimentados normalmente con una tensión de 6,6 kV, que accionan una hélice de paso fijo o variable en función del convertidor estático utilizado. Cada motor eléctrico puede estar formado por dos devanados trifásicos diferentes con una potencia igual a la mitad de la potencia total del motor, en lugar de un único devanado trifásico. De este modo se garantiza cierta capacidad propulsora en caso de avería parcial de uno de los devanados. El accionamiento de un motor eléctrico a través de la tensión y la frecuencia se realiza mediante convertidores de frecuencia estáticos, también denominados sincroconvertidores o "Inversores de Carga Conmutada LCI". Estos dispositivos convierten la corriente alterna de una red con una determinada frecuencia en una corriente eléctrica con

una frecuencia variable, que puede ir desde cero hasta el valor nominal, y también verifican que la relación tensión/frecuencia se mantiene constante. El convertidor que se utiliza en el sistema mostrado en la imagen 8 (ver punto 4) es de tipo indirecto, llevando a cabo en un primer paso la conversión de la corriente alterna a corriente continua a través de un puente de rectificadores que actúa durante las seis fases del ciclo y que está controlado por completo por tiristores.

La sección de CC garantiza que el motor propulsor disponga de la excitatriz necesaria para la operación del motor síncrono. En el paso intermedio de la sección de CC hay una inductancia "L" en serie, cuya función es estabilizar la corriente a la entrada del convertidor. En el paso siguiente, denominado convertidor de fuente continua (CSI), se lleva a cabo la conversión de corriente continua a corriente alterna multifásica con frecuencia variable, mediante otro puente de rectificadores trifásico controlado que opera como convertidor en maniobra natural, donde la maniobra depende de la carga, es decir, del motor síncrono. En el diagrama de la imagen 20, se muestran dos convertidores ca/ca (cada uno de ellos formado por un inversor alterna/continua y un inversor continua/alterna) debido a que el estátor del motor síncrono está formado por dos devanados trifásicos diferentes, cada uno de los cuales está equipado con su propio convertidor ca/ca. El sistema permite la conversión ca/ca en 12 impulsos con la consiguiente ventaja de una reducción en los armónicos y en las pulsaciones del par entregado. Además, la tendencia actual de utilizar filtros hace innecesario el uso de rectificadores con un gran número de impulsos, por lo que se reduce la contribución de los armónicos



Imagen 19.

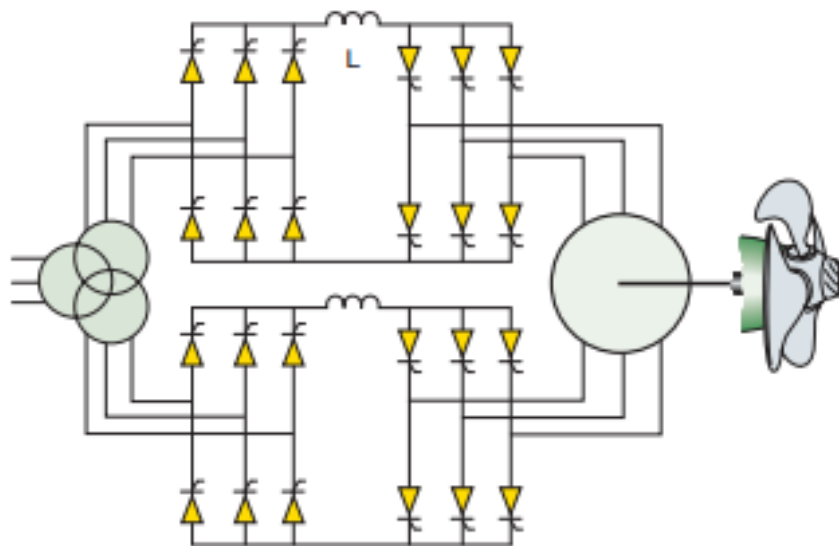


Imagen 20. Sincroconvertidor para un motor de doble devanado.

9. VENTAJAS DE LA PROPULSIÓN ELÉCTRICA

A partir de la descripción de los dos tipos de propulsión, es evidente que la propulsión eléctrica es más compleja que la mecánica, pues requiere de dos equipos para su aplicación (convertidor y motor eléctrico) además de una planta generadora sobredimensionada que por otra parte es necesaria en ambos casos para suministrar la energía eléctrica a bordo. Como resultado, si se considera el

peso, el volumen y el coste, puede parecer que este sistema es menos conveniente, pero otros elementos, señalados a continuación, han logrado que la propulsión eléctrica salga vencedora. A pesar de un mayor volumen total aparente, la propulsión diesel eléctrica permite optimizar los espacios gracias a que los generadores pueden ubicarse más cerca de la hélice. Por lo tanto, es posible reducir las limitaciones mecánicas debidas a la alineación y el dimensionado del eje, que constituye el componente que une el motor propulsor principal con la hélice. Además, la propulsión diesel eléctrica garantiza una gran flexibilidad en el control de los motores. El empleo de la tecnología electrónica aporta ventajas incuestionables en cuanto a rendimiento y mantenimiento, comparado con los dispositivos mecánicos necesarios para adecuar la velocidad de rotación de los motores diesel al bajo número de revoluciones propio del funcionamiento de las hélices.

La presencia de un control automático que permite la adaptación a las diferentes condiciones de operación, haciendo que sea más sencilla y mejorando la maniobrabilidad, la regulación de la velocidad y el gobierno, optimiza el rendimiento total con una reducción del consumo de combustible y de las emisiones contaminantes. Además, también se reducen el ruido y las vibraciones.

Están surgiendo otras modalidades de propulsión; en concreto se está considerando con gran interés el uso de motores síncronos de imanes permanentes gracias a sus características peculiares: por ejemplo la elevada densidad de potencia que pueden alcanzar, la reducción de las pérdidas en el cobre con el consecuente aumento de rendimiento, el aumento de la fiabilidad (al no necesitar de un devanado de excitación, con lo cual se eliminan todos los problemas mecánicos y eléctricos derivados del uso de escobillas) o el aumento del confort acústico gracias a su reducido nivel de ruido. Con respecto a la maniobra en puerto o, en general, en aguas restringidas, los buques utilizan un sistema con hélices de maniobra, situadas en las zonas de proa y de popa, que producen un empuje lateral. Dicho sistema habitualmente se conoce como "hélice de proa" o "hélice de popa", según la ubicación, y no debe confundirse o asociarse con el sistema de propulsión principal. La hélice de maniobra puede rotar tanto en

sentido horario como en sentido antihorario, en un plano paralelo al eje longitudinal del buque, lo cual produce un empuje lateral hacia la derecha (estribor) o hacia la izquierda (babor). La solución más extendida, que se muestra en la imagen 21, es aquella en la cual el motor eléctrico está ubicado en el interior de un túnel, abierto en sus extremos y construido en el casco del buque.

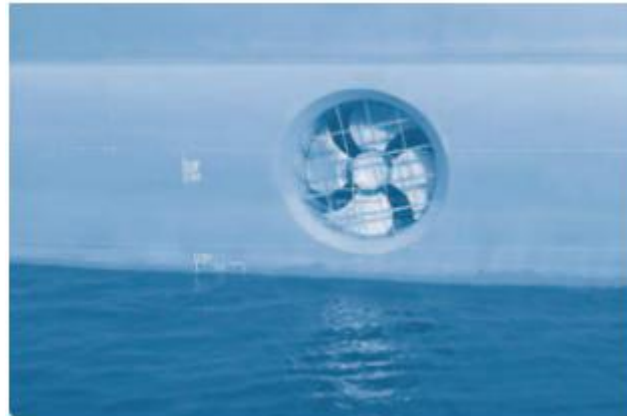


Imagen 21. Hélice de maniobra en el casco de un buque.

Todos estos avances han dado paso a una evolución en paralelo, pero en menor medida de uso, con respecto a la propulsión convencional de motores de combustión interna acoplados al eje de propulsión, a lo que se conoce como Sistema de posicionamiento dinámico (Dynamic Positioning), es donde la propulsión eléctrica tiene su mayor aplicación.

10. SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO DINÁMICO “DP”

Dynamic Positioning (DP), Posicionamiento Dinámico en Español es hoy en día una herramienta altamente desarrollada y muy bien establecida en el mundo del negocio marítimo especializado y particularmente en el “offshore”.

Los primeros y muy rudimentarios sistemas DP fueron puestos en funcionamiento en los años 60 en barcos perforadores. Sin embargo, no fue hasta finales de los 70 principios de los 80 cuando el uso del DP se hizo más extenso y un mayor número de buques fueron equipados con este sistema. Hoy en día existen del orden de unos 3000 barcos DP altamente especializados y una cartera de pedidos que hace aumentar la flota día a día.

Un sistema DP puede definirse rápidamente como un sistema controlado por medio de un ordenador, que automáticamente mantiene la posición y rumbo mediante el uso de los sistemas propios de propulsión del barco. Sensores de referencia de posición combinados con sensores de viento, corriente y girocompases alimentan de información al ordenador acerca de la posición del buque y la magnitud y dirección de las fuerzas medioambientales que afectan a su posición. El programa informático contiene un modelo matemático del buque en cuestión, que incluye información sobre el efecto del viento y la corriente sobre el barco y la situación de los propulsores. Este modelo, combinado con los sensores abastecedores de información arriba descritos, permite al ordenador calcular la potencia y dirección que es necesaria aplicar en cada propulsor. Esto permite realizar y facilita en gran medida las operaciones a flote donde no es posible amarrar o fondear debido a la gran profundidad del lecho marino, congestión del fondo por tuberías o cables submarinos... u otros problemas.

Sin embargo una definición más técnica y concisa de DP puede ser: "Sistema de a bordo cuya función es controlar automáticamente la posición y el rumbo del barco, exclusivamente con el uso de propulsión activa, recibiendo para ello la información de los sistemas que analizan las circunstancias externas en las que el buque está actuando".

El DP es un sistema que tiene la ventaja de no tener que usar sistemas de fondeo o anclas para mantener la posición; suprimiendo por lo tanto los inconvenientes de los sistemas de posicionamiento por anclaje:

Tiempo de tendido y levaje de anclas.

- Coste del equipo de fondeo en profundidades superiores a los 300 metros.
- Tanto las anclas como las catenarias de las cadenas pueden causar graves daños al tendido de instalaciones sobre el lecho marino del campo de explotación.

10.1 Los 6 grados de libertad.

Todo buque, o estructura flotante puede ser considerado como un sólido; el cual, está sometido a 6 grados de movimiento (3 movimientos de rotación, y 3 movimientos de traslación):

Movimientos de rotación:

- Balance = Roll
- Cabeceo = Pitch
- Guiñada = Yaw

Movimiento de traslación:

- Deriva longitudinal (Avance-retroceso) = Surge
- Deriva lateral (Babor-Estribor) = Sway
- Elevación-Descenso = Heave

El Posicionamiento Dinámico, principalmente, se enfoca en el control de los movimientos del buque en el plano horizontal avance-retroceso:

- Avance-retroceso = Surge
- Guiñada = Yaw
- Desplazamiento lateral = Sway

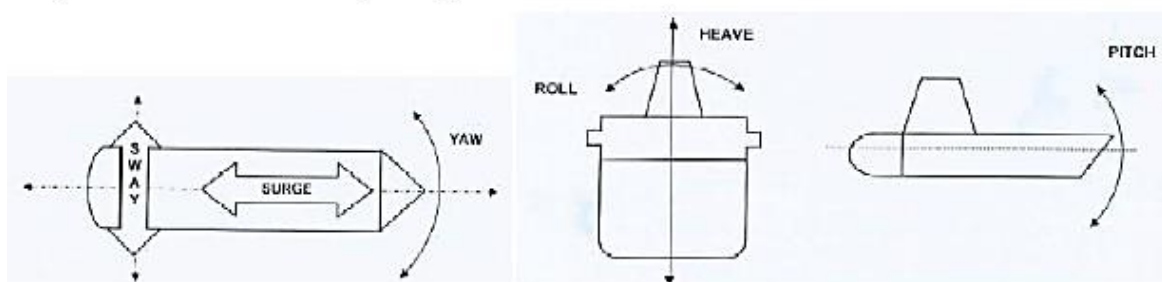


Imagen 22.

Conociendo esto y siendo el objetivo el mantener al buque en una posición fija se dotará al buque de un sistema de propulsores, hélices y timones, que mediante componentes y sensores de movimiento, viento y corriente, transmitirán la señal de las fuerzas externas al buque a un sistema informático que traducirá estos datos en fuerzas de empuje individuales para cada uno de los propulsores y, así, contrarrestarlas, pudiendo mantener el buque en la posición deseada.

El balance, el cabeceo, y la elevación son movimientos que no pueden ser controlados por el DP; sin embargo, el DP debe estar informado de estos valores para corregir las lecturas de los sensores de posición respecto al centro de gravedad

de un buque. La unidad encargada de medir estos valores es la MRU "*Motion Reference Unit*", aunque hoy en día están empezando a equipar a dichos buques con quillas de balance inteligentes y sistemas de lastre "intering" similares a los existentes en los buques ro-ro.

10.2 Funciones de un sistema de posicionamiento dinámico

Básicamente, las funciones del DP pueden resumirse en:

- Medir los desvíos del buque tanto en posición, como en rumbo, respecto de los seleccionados
- Calcular los desvíos según los ejes X, Y así como respecto al Rumbo Norte.
- Calcular las fuerzas y momentos necesarios para compensar esos desvíos y para vencer la resistencia de las fuerzas extremas.
- Transformar esas fuerzas y momentos en órdenes a cada una de las hélices.

10.3 Aplicaciones de los sistemas DP

Cada aplicación del sistema DP demanda una configuración física determinada y un algoritmo de control capaz de satisfacer las especificaciones de diseño.

La condición necesaria y suficiente para que un vehículo marino esté dotado de capacidad y posicionamiento a flote en el plano horizontal es que:

"desarrolle simultáneamente un conjunto de fuerzas tales que sus componentes en sentido longitudinal y transversal, así como el par, sean controladas con independencia entre sí".

La condición de posicionamiento consta de dos propiedades de maniobrabilidad:

- La capacidad de seguimiento de ruta (trackkeeping)
- La capacidad de mantenimiento de posición (station keeping)

Dependiendo de la aplicación se tiene la configuración más adecuada para satisfacer las especificaciones de maniobra. Las características fundamentales de una configuración son la propulsión, y la forma y tamaño del casco.

Dentro de las aplicaciones más destacadas podemos nombrar:

- ❖ Suministro de mercancías

-
- ❖ Tendido y reparación de cables submarinos
 - ❖ Lucha contra el fuego
 - ❖ Dragado de minas
 - ❖ Alije de lastre y cargas
 - ❖ Inspecciones y reparación a flote
 - ❖ Rescate
 - ❖ Operaciones militares
 - ❖ Perforaciones subacuáticas
 - ❖ Tendido y reparación de tubos para gas y petróleo
 - ❖ Lucha contra la contaminación
 - ❖ Apoyo a sumergibles
 - ❖ Ayuda al buceo
 - ❖ Carga de petróleo subacuática

10.4 Componentes de un sistema DP

Los componentes fundamentales de un sistema de control instalados en un vehículo marino son:

- El sistema propulsivo.
- El sistema de captación de información que comprende tanto variables controladas como variables físicas del proceso.
- El algoritmo de control.

Estos sistemas están integrados por una multitud de procesos diferentes. El sistema es controlado y operado mediante la consola que contiene los controles operacionales, botones, pantallas y joystick manual; y la cual se encuentra en una zona de buena visibilidad en las inmediaciones del buque.

Hoy en día, los sistemas utilizados funcionan bajo el interfaz Windows; facilitando así el trabajo al DPO.

El núcleo del sistema es el ordenador central, que se comunica con las distintas partes periféricas a través de la red de cableado interna del barco.

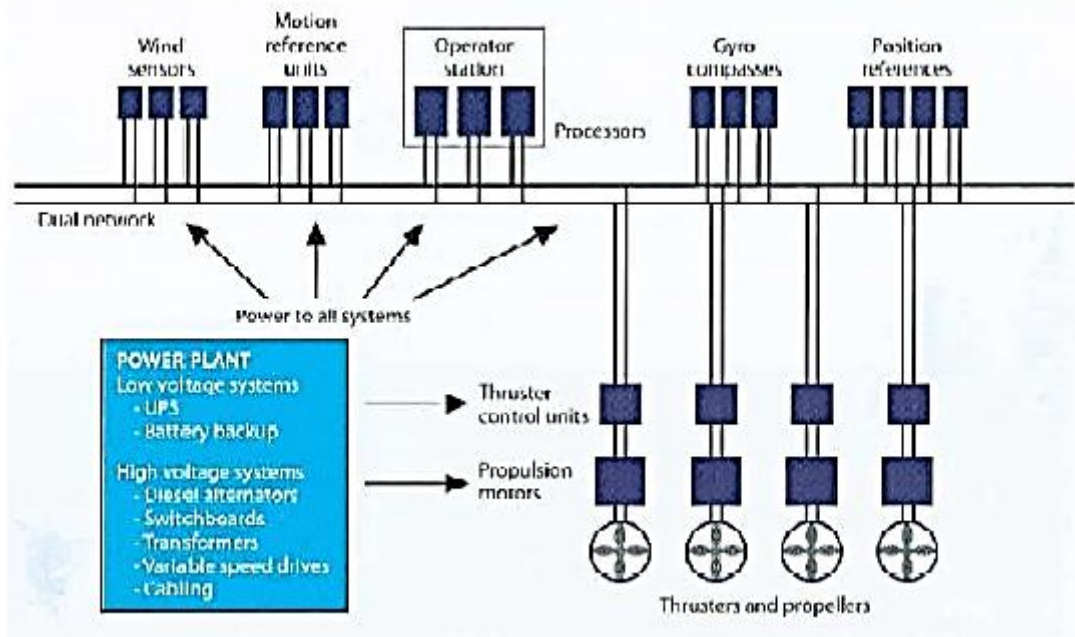


Imagen 23. Esquema general de la estructura de un sistema DP.

10.5 Sistema de captación de información

De los elementos que constituyen un sistema de DP, el único que es relevante en la determinación del cumplimiento de la condición de posicionamiento es el sistema de propulsión ya que el algoritmo de control es diseñado a partir de la configuración del mismo.

El ordenador controlador se encuentra conectado a diferentes sistemas suministradores de posición y rumbo. Se trata de los PRS (Position Reference Systems) y los giróscopos.

Los PRS suministran información acerca de la posición del buque. A nivel DP, se requiere que las precisiones sean mayores que en una navegación convencional. Para el sistema DP, la precisión se encuentra en el rango de 1 metro o menos.

Los PRS son independientes unos de otros, y a su vez están independientemente conectados al ordenador controlador. Sus principios de operación pueden ser completamente diferentes; pueden estar basados en satélite (GPS, DGPS, GLONASS...), en láser (Fambeam, Cyscan), en microondas (Artemis, RADIUS, RadaScan...), en sistemas hidroacústicos o incluso mecánicos (TautWire).

Cuanto mayor sea el número de sistemas suministradores de la posición, mayor será la precisión de ésta y menor el impacto de la pérdida de un sistema.

Con respecto al rumbo, hoy en día el giróscopo es un equipamiento básico a bordo de cualquier buque. A bordo de un buque con sistema de Posicionamiento Dinámico, este se encuentra duplicado, o incluso triplicado, dependiendo del nivel de redundancia requerido.

Existen elementos externos que son importantes conocer tales como es viento o la corriente:

- Para medir el viento, se instalan una serie de anemómetros (al menos por duplicado) que suelen ser de distintos tipos (tradicionales de cazoletas o ultrasónicos).

Sus registros aplicados al modelo numérico del barco estiman las cargas generadas por el viento en el casco y envían esta información a los propulsores para su corrección; sin embargo esto puede ser un problema, puesto que las condiciones del viento pueden cambiar repentinamente tanto en dirección como en intensidad.

La corriente es otro factor cuya medición es importante, sin embargo, su medición no es posible con ningún sistema montado a bordo por lo que su valor es estimado. La continua discrepancia entre la “posición predicha” por el modelo matemático y la posición obtenida por los diferentes PRS indican la existencia de una corriente.

Para aplicaciones más especializadas, se montan y utilizan más sensores específicos que aportan información sobre datos críticos para la operación, tales como “angle riser” para perforar, tensión en tubería para operaciones de tendido.

10.6 Propulsion DP

El buque está bajo el control de sus propulsores, hélices, timones... Por ello es necesario que estos estén también ligados al sistema DP. Comandos de paso, rpm, azimut o ángulo de timón son enviados a los elementos propulsores continuamente y su valor es medio igualmente.

Todo buque necesita generación de energía eléctrica. En el caso de los buques con sistema DP, la generación, y la estabilidad de la energía eléctrica es de una importancia extrema; cualquier fallo en el sistema de generación de energía tiene un efecto inmediato en el sistema DP y en las capacidades del buque. Los buques dotados con el sistema DP, incluso están equipados con un sistema autónomo de generación de energía por medio de baterías (UPS) para mantener las funciones básicas del sistema durante un posible “blackout”, y así minimizar las consecuencias de este.

La mayoría de los buques DP son diésel eléctricos; por lo que los motores diésel, los alternadores, los paneles de tensión, el cableado, los motores y el sistema de gestión de energía forman parte del sistema DP.

El sistema propulsor actúa bajo la demanda de empuje y par necesarios para mantener el buque en la posición y rumbo de referencia, en respuesta a las señales o variables de control procedentes del procesamiento numérico del algoritmo correspondiente, de tal manera que dadas las demandas de posición longitudinal, posición transversal y rumbo, en coordenadas ortogonales fijas al propio buque, ha de tenerse como respuesta una fuerza longitudinal, una transversal y el par.

Un sistema propulsivo cumple la condición de posicionamiento si puede ser definido mediante un sistema de ecuaciones que relacione las demandas de empuje longitudinal, transversal y demanda de par con las demandas de empuje de los propulsores que constituyen el sistema propulsivo.

Existen dos tipos básicos de propulsión en lo que respecta a la dirección de la aplicación de fuerzas; los propulsores unidireccionales (dos sentidos), y propulsores multidireccionales o azimutales. Los propulsores unidireccionales generan empuje de magnitud variable en cada uno de los sentidos de la misma dirección. Los propulsores azimutales, desarrollan fuerzas de empuje de magnitud y ángulo de actuación variables.

El mundo de los propulsores en sí mismo es un campo muy amplio, en el que los avances tecnológicos están a la orden del día, y todos con el mismo objetivo final de optimización de recursos y la eficiencia energética. Junto con el hecho que el el

DP es un sistema que evoluciona a un ritmo vertiginoso, estamos ante un conjunto en el que es difícil de mantenerse completamente al día.

Se requieren de al menos tres propulsores para poder hablar de una correcta propulsión para un sistema DP. A estos tres propulsores hay que añadir más si se quiere cumplir con los diferentes niveles existentes de DP (DP1, DP2, DP3) y sus requisitos de redundancia.

10.7 Redundancia

El objetivo de la redundancia es asegurar que el sistema en su conjunto funciona correctamente a pesar de perder un elemento individual o subsistema y así evitar los denominados “errores catastróficos”. En términos DP, “redundancia”, puede clasificarse como la habilidad del buque para soportar la pérdida de cualquier componente individual sin perder la posición o el rumbo.

Dicho de otra manera, la redundancia es la capacidad del sistema DP de seguir realizando una función tras un *Single fault* (hecho que determina la incapacidad del sistema para realizar una determinada tarea).

La redundancia expresada como la repetición en un buque DP de un mismo sistema es la principal característica de la distinción de las Clases DP. La IMO en la “*IMOGuidelines for Vessels With DP Systems*” indica tres Clases de sistemas DP, a saber, DP1, DP2 y DP3, cada uno con un nivel de redundancia mayor que el anterior.

Las recomendaciones de la OMI introducen el concepto de “fallo aislado” (*single point failure*). La redundancia como se ha explicado previamente permite continuar llevando a cabo las operaciones manteniendo posición y rumbo después de cualquier fallo aislado. Sin embargo, el equipamiento de clase se establece no en términos de “fallo aislado”, si no en términos de “peor caso de fallo aislado” (*worst-case single failure*).

- Para equipamiento **clase 1**, en caso de fallo aislado puede perderse posición y rumbo.

- Para equipamiento **clase 2**, en caso de fallo aislado en cualquier sistema o componente activo no se pierde posición y rumbo. Normalmente se considera que los componentes estáticos no fallan, cuando se puede demostrar suficiente protección estando esta bajo los parámetros y a satisfacción de la administración de la bandera.

- Para equipamiento **clase 3**, un fallo aislado engloba los ítems incluidos en la clase 2 además considerándose que cualquier sistema estático puede fallar, debiendo de estar todos los componentes por duplicado en un compartimento estanco e ignífugo.

Por lo tanto, un buque **DP1** no serán completamente redundantes en todas las áreas.

Los buques **DP2** tienen completa redundancia en equipamientos y sistemas, mientras que buques **DP3** son capaces de mantener la posición y el rumbo tras la pérdida de todos los componentes en un compartimento estanco e ignífugo.

En buques **DP3**, un fallo aislado puede ser la pérdida de un compartimento completo. La elección del equipamiento de clase determina que barco es fletado para una determinada operación o contrato. Cuanto mayor sea el riesgo asociado con la operación, mayor será el equipamiento de clase requerido.

La OMI, en sus recomendaciones estipula que para una operación en particular, el equipamiento de clase debe de ser acordado entre el armador y el fletador en función del análisis de riesgos de la operativa basado en las consecuencias potenciales de una pérdida de posición.

Cuanto más altas sean estas consecuencias (muerte, daño, contaminación), más alto será el equipamiento de clase necesario.

La IMCA (*International Maritime Contractors Association*), también tiene sus recomendaciones acerca de la provisión de redundancia a bordo de los buques

10.8 Aplicación de la redundancia a bordo

A continuación se explicará de forma breve, la aplicación de la redundancia en los equipos de un sistema DP.

10.8.1 Redundancia en sistemas de posicionamiento

Puesto que la función básica del sistema DP es mantener la posición, las fuentes de posicionamiento a disposición del sistema deben ser suficientes. Las exigencias de redundancia en cuanto a los PRS (Position Reference Systems) debe cumplirse de manera que los equipos de posicionamiento estén basados en distintos principios de medida.

En cuanto a las exigencias en el equipamiento de Clase; en los buques DP1, son necesarios dos PRS, mientras que en los buques DP2 y DP3 son necesarios tres.

Es normal encontrarse con redundancia por encima del nivel obligatorio. Esto es debido a que, por ejemplo, en el caso de un buque DP2 que cuente con 3 PRS; si uno falla, el buque quedaría fuera de Clase. Por ello, lo más normal sería encontrarse con 4 PRS instalados; de manera que si uno falla, el buque sigue cumpliendo con los requisitos de su Clase.

Las señales de todos los PRS que se encuentren a bordo serán suministradas al ordenador DP, el cual las comparará y asignará un peso a cada una de ellas en función de la estabilidad y de la continuidad de las mediciones; esto quiere decir que, en un buque DP2 con 3 PRS, no todos influirán de la misma manera en el cálculo de la posición final, puesto que el ordenador DP se “fiará” más de aquel PRS que le suministre mediciones más estables y continuas.

10.8.2 Redundancia en los sensores ambientales

Para optimizar el funcionamiento de los sistemas DP, es necesario conocer variables ambientales tales como la velocidad y la dirección del viento, de la corriente y del oleaje.

Los sensores responsables de dichas medidas también son objeto de regulaciones en cuanto a redundancia en los buques con sistemas DP2 y DP3, debiendo contar con dos sensores por cada variable medida. En el caso de los buques con DP1 no es necesaria la aplicación de la redundancia en este tipo de sistemas.

10.8.3 Redundancia en los sistemas de control

Los ordenadores son los elementos centrales de los sistemas DP y por lo tanto deben cumplir con los niveles de redundancia exigidos según las Clases.

En los sistemas **DP1** no debe existir redundancia en los ordenadores de procesamiento y de control, pero en las Clases superiores esta redundancia si existe.

En los sistemas **DP2**, encontramos los denominados “duplex”, es decir, los sistemas formados por dos ordenadores iguales que realizarán las mismas tareas de manera simultánea. En estos sistemas, encontramos que uno de los ordenadores trabaja en modo on-line o como ordenador principal mientras que el otro actúa de soporte.

Los resultados del control obtenidos de ambos ordenadores son comparados y en el caso de que no concordaran saltará una alarma indicativa de que se ha perdido la redundancia en el sistema.

En los sistemas **DP3**, los equipos más comunes son los denominados “triplex”, los cuales trabajan con tres ordenadores de manera simultánea, uno de ellos trabajando en modo on-line y los otros dos trabajando como soporte. Además, en los sistemas DP3, uno de los ordenadores debe estar situado en un compartimento remoto para que en el caso de pérdida del compartimento donde se encuentre el sistema de control central, pueda utilizarse este segundo sistema con seguridad.

10.8.4 Redundancia en los sistemas de propulsión

La redundancia en los sistemas de propulsión toma importancia en los buques DP2 y DP3. El diseño y la distribución tanto de las hélices, como de los timones y *thusters* deben realizarse de manera que un *Single Fault* no deje al buque sin la capacidad de mantener la posición.

10.8.5 Redundancia en los sistemas de generación y distribución de energía

En la mayoría de los buques DP encontraremos plantas diésel eléctricas, en las cuales la redundancia se consigue mediante la instalación de varios generadores

que alimentan a diferentes cuadros eléctricos, por lo que el fallo de un generador no supone una situación de emergencia. En cuanto a los buques DP3, es necesario que uno de los generadores se encuentre separado en un compartimento remoto, para cumplir con el requisito de poder continuar su función tras la pérdida completa de un compartimento.

En cuanto a la distribución de energía, dependiendo de la Clase del buque, existen distintos criterios aplicables al diseño de los sistemas. Los buques DP3, que son los que cuentan con las exigencias más altas, deben tener un cuadro eléctrico para cada sistema, el cual debe funcionar de manera independiente.

11. CLASES DE SISTEMAS DP

La IMO, en su circular MSC/Cir.645 "*Guidelines for Vessels with Dynamic Positioning Systems*" define cuatro niveles o Clases de equipos DP, a saber, DP0, DP1, DP2 y DP3. La principal diferencia existente entre las Clases son los niveles de redundancia y de *Station Keeping Capability* exigibles a cada una de ellas.

Las cuatro Clases de equipos DP son:

- **DP0:** Está en el límite para poder considerarse un sistema DP. Un buque equipado con este sistema debe ser capaz de mantener de manera automática el rumbo y permitir un control manual de la posición.
- **DP1:** Es el sistema de posicionamiento dinámico más básico. Un buque equipado con este sistema debe ser capaz de mantener de manera automática la posición y el rumbo bajo unas determinadas condiciones ambientales máximas, además de estar equipado con un control de posición manual.
- **DP2:** Este sistema de posicionamiento dinámico debe permitir al buque mantener de manera automática la posición y el rumbo bajo unas determinadas condiciones ambientales máximas durante, y tras un *Single Fault* que no incluya la pérdida total de un compartimento por inundación o incendio.
- **DP3:** Este sistema de posicionamiento es el de mayor nivel de fiabilidad. Un buque equipado con este sistema debe ser capaz de mantener de manera automática la posición y el rumbo bajo unas determinadas condiciones ambientales

máximas durante y tras un *Single Fault*; incluyendo la pérdida total de un compartimento por inundación o incendio.

12. SISTEMA DE REFERENCIA DE POSICIÓN

Una de las necesidades primordiales de cualquier sistema DP es disponer de una fuente fiable de la cual se pueda tomar la posición del buque.

La fiabilidad y precisión de un sistema de posicionamiento dinámico vienen marcadas por la fiabilidad y la precisión de sus sensores de posición. Desde un punto de vista científico, es imposible controlar cualquier variable, si no se es capaz de medirla correctamente y de la manera más precisa posible. Por lo tanto, es necesario equipar al buque con algún sistema fiable de referencia de posición (PRS).

No hay ningún PRS que sea completamente exacto, estable o infalible; todos tienen fallos y limitaciones, por lo que uno de los factores más importantes a controlar por un DPO durante las operaciones es precisamente el correcto funcionamiento de los PRS en funcionamiento. Cabe decir que existen dos tipos de posicionamiento:– Posicionamiento absoluto; y– Posicionamiento relativo.

El posicionamiento absoluto nos sitúa geográficamente, es decir, da valores de latitud y longitud.

Los sistemas relativos nos sitúan con respecto a otro punto del cual podemos o no conocer su posición.

La característica más importante y valorada de un Sistema de referencia de posición (PRS) es la precisión, pues el posicionamiento del buque nunca puede ser más exacto que el PRS utilizado. La fiabilidad es otra característica esencial, pues de nada sirve disponer de un PRS ultra preciso, si falla sin previo aviso o de repente suministra valores erróneos.

Para limitar el impacto del fallo de un PRS sobre la posición del buque, los sistemas DP actuales disponen de la opción para recibir información sobre la posición de diferentes PRS simultáneamente.

Si diversos sistemas PRS se encuentran en funcionamiento a la vez, la comparación de sus lecturas individuales dará un peso específico de ese PRS en el sistema (sistema de votación). El sistema de votación funciona aplicando un principio basado en el peso específico para el sistema de cada uno de los PRS utilizados. El peso específico de cada PRS para el sistema es calculado mediante variaciones en las lecturas de cada PRS independientemente.

Cuanta más pequeña sea la variación de un PRS respecto a los demás, mayor será el peso de este PRS y por lo tanto su influencia a la hora del cálculo de la posición es mayor. Con el fin de facilitar al DPO la monitorización constante de los PRS y su rendimiento a la hora del cálculo de la posición, el sistema ofrece gráficos históricos, así como expresa el peso específico de cada PRS en %. La estabilidad, la capacidad de que un PRS pueda suministrar información de manera continuada, es otra característica también muy importante de cualquier PRS. Los sistemas DP requieren actualizar la posición cada segundo, por lo tanto, el PRS debe ser capaz de actualizarse cada segundo o más rápido.

12.1 Sistemas de referencia de posición Hidroacústicos (HPR)

El principio de medición implica la comunicación mediante frecuencias acústicas de los equipos montados en el casco (transductores) y los equipos situados en el fondo marino (transpondedores).

El procedimiento consiste en interrogar al transpondedor mediante una señal transmitida por el transductor, activándose este para responder.

El tiempo de transmisión/recepción es proporcional a la distancia que debe recorrer la señal (del transductor, al transpondedor). Por lo tanto, midiendo el tiempo de retardo entre la emisión y la recepción se puede definir la posición del buque en relación con la del transpondedor.

El uso de los HPR (*Hydroacoustic Position Reference*), ha sido propiciado por los avances técnicos en la construcción y en el diseño de equipos capaces de operar a grandes profundidades a través del agua y proporcionar una gran fiabilidad en los datos obtenidos para poder fijar la posición de las estaciones de superficie.

Ventajas y limitaciones de los sistemas acústicos

El rendimiento de un sistema acústico es a menudo limitado, por las condiciones acústicas de las capas del agua y la composición de las mismas, afectando, la salinidad, temperatura y los diferentes componentes químicos presentes en el agua.

El ruido de los propulsores del buque y de otras fuentes, crean turbulencias que son especialmente perjudiciales para dicho rendimiento; degradan las señales y disminuyen la eficiencia de los sistemas acústicos de posicionamiento.

12.2 Sistema long BaseLine

El término "*Long-Base-Line*" se utiliza, porque en general las distancias son mayores que las usadas en SBL (*Short Base-Line*) y para USBL (*Ultra ShortBase-Line*). El sistema LBL está formado por una serie de transpondedores situados en el fondo marino, que abarcan, una extensión de forma permanente, entre 500 y 1000 m. Las distancias entre ellos forman la "base" utilizada por el sistema.

La interrogación individual de tres o más de los transpondedores proporciona una serie de distancias fijando la posición de la estación. No es necesaria la medición de los ángulos ya que no se necesita obtener la demora, pudiendo eliminar con este sistema, una de las fuentes de error debido a la curvatura de las señales causadas por la refracción.

En resumen, estos sistemas cuentan con un campo de transpondedores situados en el fondo marino, que son interrogados desde un transductor situado en el fondo del casco del buque. Las distancias entre los transpondedores son mayores que en los otros dos sistemas, y por lo tanto la precisión de las medidas es mayor.

La disposición más común de los transpondedores es formando un pentágono, estando situado cada transpondedor en uno de los vértices del mismo, y el buque o plataforma en el centro. Debido a la gran precisión que suministran, estos sistemas son ampliamente utilizados en plataformas de perforación (ver imagen 27).

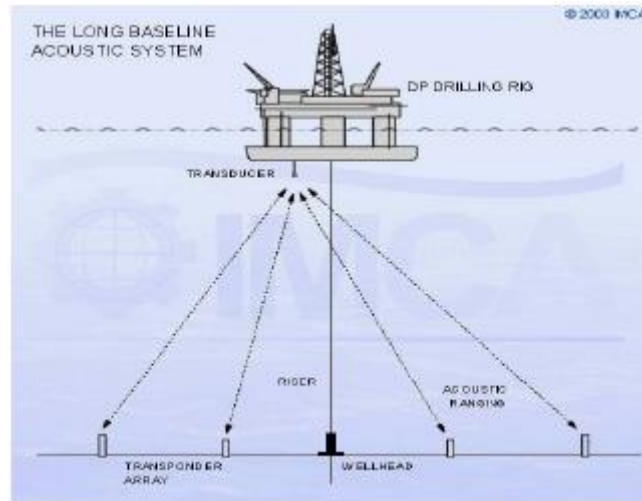


Imagen 24. Sistema de referencia acústico LBL

12.3 Sistema Short Baseline

Además de las características generales de los HPR, podemos destacar como particularidades de este sistema, que su instalación se efectúa en diferentes puntos del buque. Para determinar el número de estaciones que puede ser colocado en el casco, se tiene en cuenta la eslora del buque.

Un modelo sencillo consiste en una baliza situada en el fondo del mar, que actúa de transmisora, enviando las señales a los distintos receptores situados a bordo, al menos tres por motivos de redundancia. La señal recibida a bordo, pasa a los ordenadores, donde es procesada teniendo en cuenta el tiempo transcurrido desde la emisión a la recepción y la ubicación de los receptores. El cálculo final proporciona la posición relativa del buque respecto a la baliza, situada en el fondo del mar.

Este sistema permite operar a profundidades de hasta 4000 metros, manteniendo un grado de precisión mayor, que si se utiliza un sistema USBL a la misma profundidad.

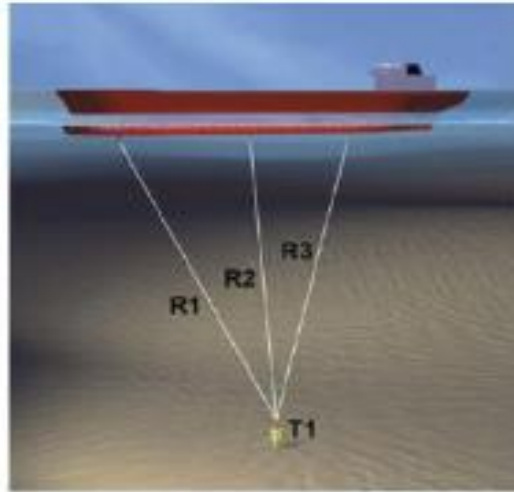


Imagen25. Sistema SBL.

El GPS funciona mediante una red de 29 satélites en órbita sobre el planeta Tierra, a 20 200 km de altura, con trayectorias sincronizadas para cubrir toda la superficie de la Tierra. Cuando se desea determinar la posición, el receptor que se utiliza para ello localiza automáticamente como mínimo tres satélites de la red, de los que recibe unas señales indicando la identificación y la hora del reloj de cada uno de ellos. Con base en estas señales, el aparato sincroniza el reloj del GPS y calcula el tiempo que tardan en llegar las señales al equipo, y de tal modo mide la distancia al satélite mediante el método de trilateración inversa, el cual se basa en determinar la distancia de cada satélite al punto de medición. Conocidas las distancias, se determina fácilmente la propia posición relativa respecto a los satélites. Conociendo además las coordenadas o posición de cada uno de ellos por la señal que emiten, se obtiene la posición absoluta o coordenadas reales del punto de medición.

También existe el sistema **El DARP-GPS**, siglas de “Differential, absolute and relative positioning GPS” es un sistema derivado del GPS que ofrece posiciones con respecto a un punto en movimiento. Esta aplicación es ampliamente utilizada en las operaciones que requieren de buques que operan con el sistema DP.

También existe una versión de este sistema denominado sistema GLONASS, acrónimo derivado de “Globalnaya NavigatsionnayaSputnikovaya Sistema” es un sistema de navegación por satélite desarrollado por la Unión Soviética, y

actualmente a cargo del Ministerio de Defensa de la Federación Rusa. Su funcionamiento se basa en los mismos principios que el GPS, contando e IGLONASS con una constelación de 31 satélites (24 en activo), en una órbita inclinada unos 65 grados con respecto al ecuador (55 grados en el caso del GPS) y a una altura de 19.000 kilómetros (20.180 kilómetros en el caso del GPS).

Los Sistemas GPS y GLONASS son sistemas autónomos; cada uno tiene su propio sistema de referencia y su propio sistema o escala de tiempo. Usan diferentes sistemas de referencia para expresar las posiciones de sus satélites, y por lo tanto, para determinar las posiciones de los usuarios.

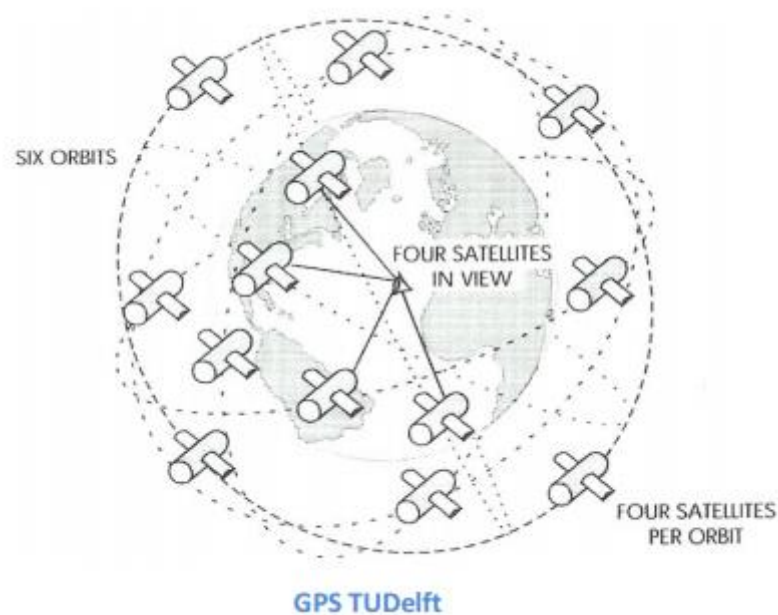


Imagen 26. Sistema GPS

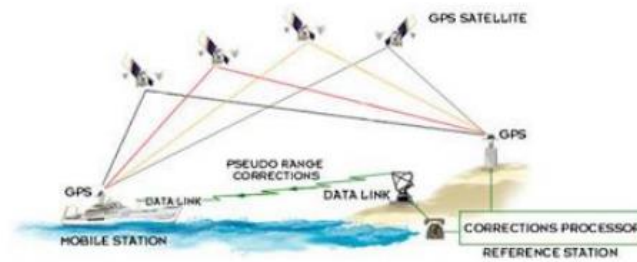
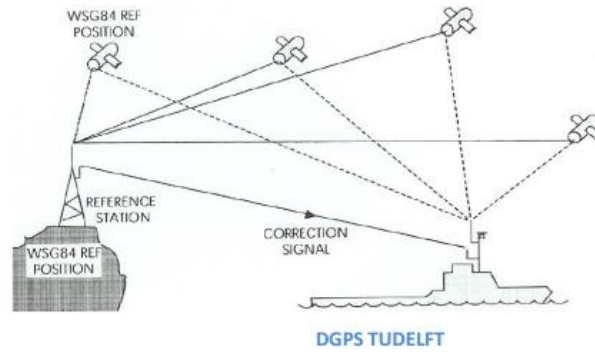
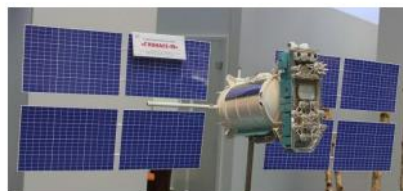


Imagen 27. Sistema GPS Diferencial.



Glonass-M small. CeBIT 2011 Samstag PD 110

Imagen 28. Sistema GLONASS

12.6 Sistemas Laser de posicionamiento

Los sistemas de posicionamiento por láser se basan en la medición de la distancia y la demora entre el escáner de uno o más objetivos fijos. En la actualidad los dos sistemas o equipos para el posicionamiento por láser más importantes son el CyScan y el FanBeam.

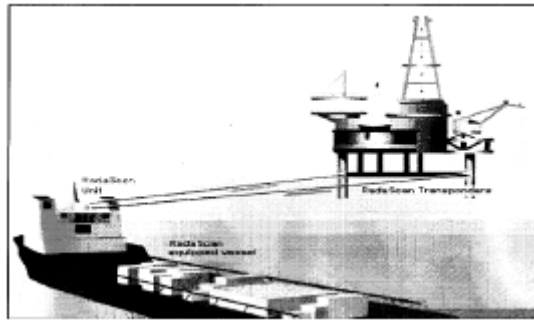


Imagen 29. Esquema de funcionamiento del sistema Laser

12.6.1 Sistema CysScan

Sistema laser de gran precisión pero de corto alcance para el posicionamiento y seguimiento. Su alcance es de tan solo 250 metros con una precisión de 20 cm en la distancia y una precisión en el ángulo de demora de 0.01° . La distancia y la demora se calculan según las medidas del tiempo que emplea la emisión láser en su viaje del escáner a los reflectores y vuelta, y el tiempo de giro del mismo entre la emisión de un pulso y el siguiente.

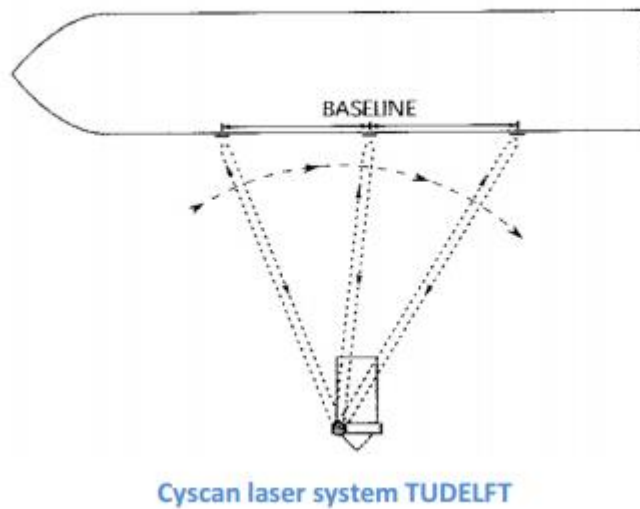


Imagen 30. Sistema CysScan

12.6.2 Sistema Fan Beam

Fan Beam. Es otro sistema de posicionamiento y seguimiento por láser. Al igual que el Cy Scan, es de corto alcance ya que su radio de acción es de entre 200 y 500 metros, aunque su máximo son 2 Km. Su precisión es de 20 cm con una precisión en el ángulo de la demora de 0.02° .



Imagen 31. Sistema Fan Beam

13. OPERACIONES DP

En los comienzos del DP, éste únicamente se utilizaba en limitadas operaciones, pero ese hecho cambió rápidamente, y su uso se convirtió en algo común en otro tipo de operaciones y en otros sectores tanto civiles como militares.

Probablemente una de las razones, sea la tendencia de los barcos modernos a equiparse con sistemas de control completamente integrados y que combinen todas las funciones del buque. El DP, es un sistema que integra todas estas funciones (control deposición y rumbo, control de propulsión...). Todos los buques offshore de diseño actual incorporan durante el diseño la opción de incorporar DP. Lo que es prohibitivo, aunque en ocasiones se lleva a cabo, es convertir un buque no DP en un buque DP. A continuación se describen algunas de las operaciones en las que un buque DP puede involucrarse:

13.1. FPSO y operaciones con petroleros offshore

Las operaciones con shuttle tankers pueden dividirse en 3 grupos:

- Sistemas con amarras.
- Sistemas sin amarras
- Sistemas con torreta sumergida (STL).

Los 3 tipos de operaciones tienen por objetivo la carga directa desde el FPSO (Floating Production Storage and Offtake) a petroleros lanzadera de transporte.

Otro método de carga es amarrar el buque a una terminal offshore de descarga, (del mismo modo que el amarre a una monoboya), pero hay ocasiones donde esto no es posible debido a las condiciones meteorológicas. Además, para el aproximarse a la terminal, normalmente es necesario utilizar buques de apoyo, que añaden un coste adicional a la operación. Las lanzaderas DP presentan ventajas respecto a otros sistemas.



Imagen 32. Terminal offshore de descarga.

Los **shuttle tankers** DP operan bajo el principio de posicionamiento “*circleweathervaning*”. El barco posiciona su proa tocando un “circulo” imaginario con centro en la estación de descarga. El barco está continuamente “weathervaning”; está continuamente buscando el rumbo para mantener la posición, (y mantenerla constantemente con la terminal por la proa), ejerciendo la menor propulsión posible para ello.

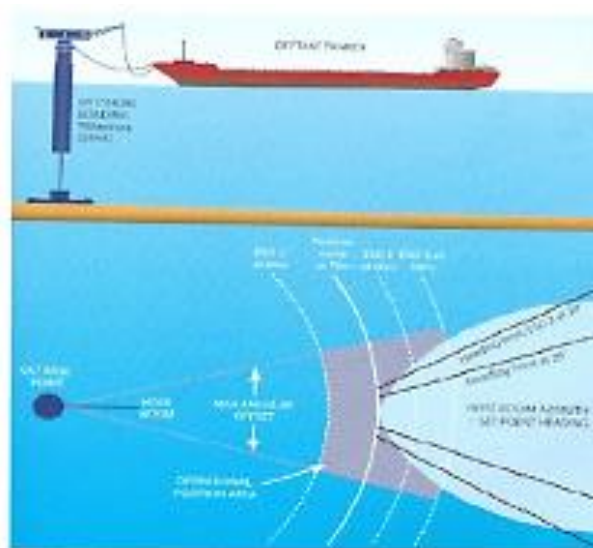


Imagen 33. Los *shuttle tankers* DP operan bajo el principio de posicionamiento “*circleweathervaning*”

En el caso de la **torreta de carga sumergida (STL)**. La carga se realiza a través de una torreta submarina cónica, la cual se encuentra anclada al fondo por debajo de la quilla e incorpora la manguera de descarga.

El petrolero dispone, en el casco, a proa, de un espacio donde encajar esa torreta. El petrolero se posiciona sobre la torreta recuperando una línea mensajera. Virando el mensajero se hace firme la torreta en el espacio del casco. Una vez encajada la boya en el barco, se revira sobre la posición de la torreta hasta alcanzar la posición de weathervane y se mantiene la posición usando el sistema DP. Para la localización de la torreta submarina se utilizan balizas submarinas hidroacústicas.

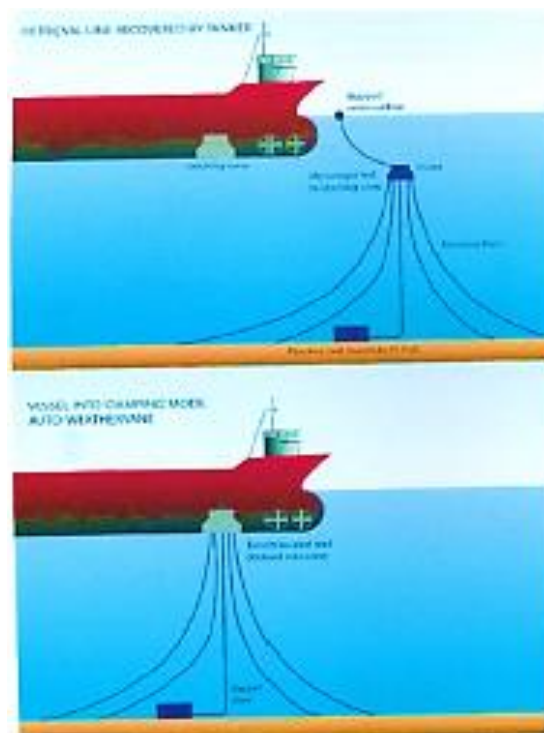


Imagen 34. Torreta de carga sumergida (STL)

La tercera variación es la carga en tándem desde un **FPSO** (Floating Production Storage and Offtake), el cual es un barco amarrado a una boya submarina. Este barco (FPSO) refina crudo y lo almacena en sus tanques. En intervalos regulares debe descargar su producción en una lanzadera. La lanzadera se posiciona a popa del FPSO y carga a través de un manifold en proa. La estrategia para posicionarse es similar a la empleada en los sistemas anteriores con la implicación añadida que el punto de referencia de posición es móvil.

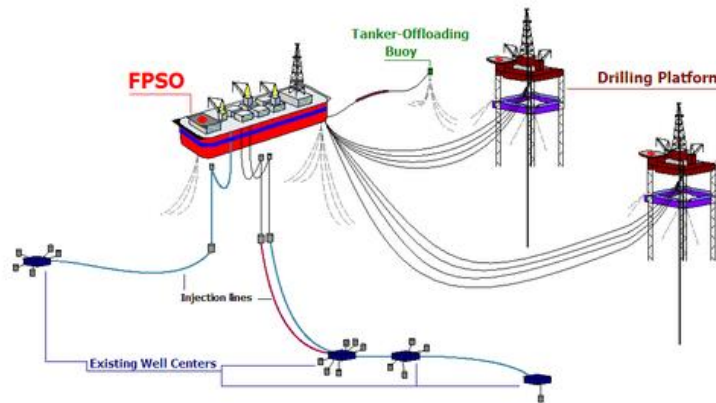


Imagen 35. FPSO

13.2 Operaciones con ROV (Remote Operated Vehicles) y de buceo.

Una gran cantidad de trabajos submarinos son llevados a cabo utilizando buques DP como plataforma de trabajo. Estos pueden variar desde simples operaciones de rutina e inspección utilizando ROV's, hasta complejas operaciones que involucren buceadores en saturación.

Sin embargo, hay ciertos trabajos que únicamente pueden ser realizados por buceadores. Durante el trabajo a estas profundidades, los buzos e incluso los ROVs se ven expuestos a un gran número de potenciales peligros. Entre ellos destaca la proximidad de hélices y propulsores a los umbilicales que suministran al buceador, los efectos indirectos tales como la creación de turbulencias, ruido o merma de la visibilidad pueden afectar negativamente a las operaciones e incluso llegar a representar un problema.

Los buceadores son particularmente vulnerables a los problemas de a bordo, especialmente a los generados por una pérdida de la posición durante la operación. La única manera posible de retorno a la superficie para un buceador es vía campana o cesta; por lo tanto, si el barco tiene una pérdida de la posición, el buceador será arrastrado por el umbilical, lo que puede ocasionar lesiones o incluso la muerte.

13.3 Operaciones de Anchor-Handling y de suministro a plataformas

Para el manejo de anclas, el DP puede ser utilizado para facilitar la maniobra de traslado del ancla hasta la posición relativa a la plataforma deseada, y depositarla en el fondo de manera exacta.

Durante las maniobras de suministro a una plataforma, el DP ayuda al mantenimiento de la posición exacta respecto a la plataforma, especialmente cuando la operación se alarga mucho tiempo.



Imagen 36. Operación de suministro a una plataforma

13.4 Barcos destinados u dedicados a la construcción y gruas flotantes

Un gran número de barcos grúa utilizan el sistema DP en el día a día de sus actividades. La capacidad de realizar los trabajos sin necesidad de desplegar un patrón de fondeo normalmente de 8 anclas (incluso, en ocasiones, puede llegar a ser necesario arriar 14 anclas), reduce considerablemente el tiempo requerido para la realización de las operaciones, así como el coste global de ésta.

Estas super grúas flotantes están equipadas con un sistema DP de clase 3, lo que elimina la necesidad de disponer de anclas de apoyo para el mantenimiento de la posición así como la necesidad de remolcadores asistentes.



Imagen 37. Grúa flotante.

13.5 Operaciones de perforación

Las operaciones de perforación y extracción de petróleo se han extendido a áreas de mayor profundidad; razón por la que el número de plataformas perforadoras, cuyo posicionamiento es basado en DP, se ha incrementado, ante la imposibilidad de arriar las anclas.

En aguas profundas, no es suficiente el mantener la posición de la plataforma justo encima del punto de extracción; también se debe compensar el ángulo entre la tubería que asciende del pozo a la plataforma y la vertical. Es vital que este ángulo permanezca lo más cerca de cero como sea posible.

Una corriente marina puede generar, en la tubería de extracción, un arco que obliga al operador DP a compensar y minimizar el ángulo de la tubería vertical. Una complicación añadida en los últimos buques perforadores, es la capacidad de perforar 2 pozos simultáneamente.

En el método “**S-Lay**”, la tubería es construida en una larga “factoría” situada en la cubierta principal del barco. La tubería es ensamblada, soldada, recubierta e inspeccionada a intervalos de unos 12 metros, alineada con la línea de lanzamiento. La tubería es controlada por unos rodillos que moderan la tensión de la tubería y alimentan la lanzadera.

Un sistema DP, aplicado al tendido de tubería “**S-Lay**”, debe permitir al buque mantener un rumbo preciso en todo momento, mantener constante la tensión en la tubería entre ciertos parámetros (información suministrada al DP), así como mover el buque a intervalos avante de, exactamente, 12 metros (longitud de cada sección de tubería estándar). Normalmente este movimiento ocurre cada 4 minutos, aunque obviamente esto depende de la longitud de las secciones de tubería trabajada.

En las operaciones “**reel**”, la tubería es prefabricada y cargada en un carretel vertical a bordo del barco. La tubería es tendida pasándola del carretel de estiba a la rampa de tendido.

En aguas profundas, el único método que es posible utilizar es el “**J-Lay**”. La rampa de lanzamiento está montada cerca de la vertical. La tubería es alineada con la rampa de lanzamiento, lo que induce grandes fuerzas en la lanzadera debido al gran peso involucrado en la operativa, cuyos efectos deben de ser contrarrestados por el DP del barco.

Los barcos destinados a este tipo de operaciones llevan a cabo normalmente complicadas maniobras evolucionadas utilizando DP, pues el comienzo de un tendido, su empalme o el finalizado son operaciones que precisan un alto nivel de precisión y maniobra.

13.8 Operaciones de reparación y tendido de cable

La implantación de fibra óptica en los cables de comunicación internacionales requiere una gran precisión en la instalación de dichos cables; el sistema DP es el idóneo para estas operaciones.

Los cables de fibra óptica tienen unas especificaciones muy precisas de flexión así como de tracción; si estas especificaciones son superadas, el cable puede resultar dañado, y como consecuencia, puede resultar inservible.

13.9 Flotels y barcos de servicio

Durante períodos de construcción, reconstrucción, reparación o desmantelamiento de instalaciones offshore, se necesitan una gran cantidad de infraestructuras. A veces estas infraestructuras pueden consistir simplemente en hoteles flotantes para trabajadores.

Un simple “flotel” (hotel flotante) puede ser posicionado cerca de la instalación donde se llevan a cabo los trabajos, y puede estar conectado a ésta por medio de una pasarela. Estos flotels normalmente son plataformas DP semi-sumergibles. Si la pasarela se encuentra conectada, puede ser utilizada como un sistema de referencia (actúa como un taut-wire horizontal).



Imagen 39. Flotel acoplado a plataforma.

13.10 Buques de pasaje

Los grandes cruceros también han comenzado a utilizar de manera corriente el sistema DP. Dado que su tamaño ha sido aumentado considerablemente y la maniobra es muy delicada en muchos puertos debido al poco espacio disponible, el sistema DP es una herramienta cada vez más utilizada por muchos armadores, como asistencia al atraque. El sistema DP elimina el uso de remolcadores en los puertos, a la vez que acelera las maniobras; lo que hace más económica la escala del buque en puerto.

13.11 Otras aplicaciones

Cada día son más las aplicaciones marítimas para las que se utiliza el DP. Una aplicación inusual para la que ha sido utilizado el sistema DP, es para un sistema de lanzamiento de misiles offshore.



Imagen 40. Plataforma de lanzamiento de misiles offshore con sistema DP

14 ELEMENTOS DE GOBIERNO Y PROPULSIÓN

Es necesario incluir todos los sistemas de propulsión como parte del sistema DP. Los sistemas de propulsión incluyen las hélices, los timones principales del barco, y todos los propulsores auxiliares instalados a bordo. La mayoría de los buques DP, aunque no todos, son diseñados con una configuración diesel-eléctrica, por lo que la mayoría de las hélices y propulsores son accionados mediante motores eléctricos.

Antes esto involucraba que las hélices y propulsores instalados fuesen de paso variable (CPP). Sin embargo, hoy en día, esto no tiene porqué ser así; pueden instalarse hélices de paso fijo junto con motores eléctricos de velocidad variable (VSDs).

Este tipo de instalación permite en todo momento regular la velocidad y el sentido de giro del eje. Un buque equipado con un equipo DP, debe poseer la adecuada

capacidad de propulsión y maniobra para controlar los principales movimientos del barco en el plano horizontal; guiñada, avance/retroceso y desplazamiento lateral.

Se requieren al menos 3 propulsores para poder hablar de una correcta propulsión para un sistema DP. A estos 3, hay que añadir más, para cumplir con los diferentes niveles de clase existentes (DP1, DP2, y DP3, y sus requisitos de redundancia). Como norma general los 3 tipos de propulsores más convencionales que podemos encontrar a bordo de buques DP son:

-Hélice/timón convencional.

-Propulsores de túnel.

-Propulsores azimutales

Sin embargo, hay ciertos buques que pueden montar sistemas Voith Schneider, o incluso, waterjets.

14.1 Propulsores Hélice – Timón (Convencionales)

Un buque puede estar propulsado por una combinación de hélice-timón convencional. Este puede ser de hélice simple (single screw), o doble hélice (twin screw).

Un buque DP equipado con estos sistemas principales de propulsión, usará estos en conjunción con otros sistemas auxiliares para combatir las fuerzas que puedan causar una guiñada, avance/retroceso o un desplazamiento lateral. Las hélices, pueden ser de paso fijo y de paso variable. Normalmente, los timones también se encuentran integrados en el sistema DP.



Imagen 41. Hélice de paso variable con timón acoplado a popa.

14.2 Propulsores Azimutales

Gran parte de los buques DP son equipados con propulsores azimutales. La instalación y mantenimiento de los propulsores azimutales, es más compleja que el sistema de propulsión convencional hélice-timón; y en algunos casos puede llegar a ser problemática.

Un propulsor azimutal convencional, normalmente consiste en un eje horizontal acoplado y propulsado por un generador diésel, o un motor eléctrico. La hélice, puede ser de paso fijo, o de paso variable. En caso de ser de paso variable, la dirección y el nivel de empuje es controlado por el servomotor, que normalmente es hidráulico. Este tipo de propulsión es muy versátil, es capaz de entregar en cualquier dirección, la potencia de cero a máxima. Existen distintos tipos de propulsores azimutales, y configuraciones, dependiendo del suministrador del equipo; aunque el principio de operación de todos ellos es el mismo.

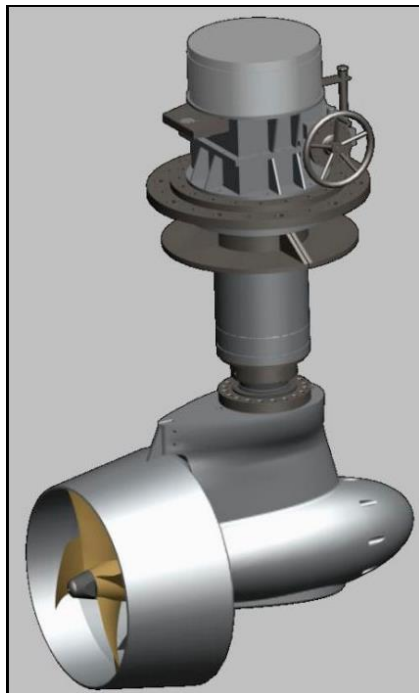


Imagen 42. Sistema Azimutal para motor eléctrico en L.

14.3 Propulsores transversales de túnel

Generalmente los buques DP, están equipados con hélices transversales de túnel, tanto a proa, como a popa. Como todo tipo de hélices, estas pueden ser de paso

fijo, o de paso variable; pero siempre se encuentran alineadas babor estribor. La eficacia de la hélice, se ve afectada por diferentes factores. Uno de ellos, es la inmersión en el agua, especialmente en situaciones en las que el buque se encuentra en lastre y en condiciones meteorológicas adversas. El cabeceo del buque puede producir cavitación, lo cual reduce la eficacia considerablemente.



Imagen 43. Propulsores de túnel.

14.4 Sistema de propulsión *podded* (AZIPOD)

Fueron introducidos en la industria naval hace 20 años a principios de la década de los años 90, luego ya no podemos decir que es una tecnología de última generación. Su gran expansión se produjo a lo largo de la segunda mitad de esa década, y ha continuado durante todo el primer decenio del presente siglo. Se puede decir que el sistema de propulsión *podded* se ha consolidado dentro de la industria naval y ha venido para quedarse.

Este concepto de propulsión nació en Finlandia en el año 1990, fruto de la colaboración de *ABB Industry of Finniand* y *Kvaerner Masa Yard*, como resultado de la transformación del buque de servicio "*Sefli*"(1). En un principio esta propulsión fue diseñada para los buques rompehielos, pero rápidamente se expandió y amplió el campo de aplicación a otros tipos de buques como cruceros(2), ferrys, tanques(3), buques de gas, buques auxiliares, buques militares etc.

El motivo de esta rápida expansión fue debido, por un lado, al aumento de la potencia de los *pod*, pasando de unos pocos megavatios a tamaños de *pod* considerables, capaces de desarrollar más de 20 megavatios de potencia.

Y por otro lado, a la necesidad que tenía la industria naval de encontrar un sistema de propulsión eficaz, que proporcionase más maniobrabilidad a los buques, cualidades que ha demostrado el sistema de propulsión *pod* ampliamente.

1. Buque "Seili" (Buoy Tender), dedicado a servicios fluviales y perteneciente a la administración Finlandesa; se convirtió en el primer buque en el mundo en instalar un Azipod. Se le transformo toda la planta propulsora; originalmente tenia instalada una máquina de 1.600 Kw., conectada mediante una línea de ejes a una hélice de paso variable, y como sistema de gobierno utilizaba un timón convencional que lo capacitaba para navegar en hielos de hasta 45 cm. de espesor. Se le incorporó un pod con un motor eléctrico síncrono de 1.500 Kw, se le suprimieron las líneas de ejes y el timón. Después de la modificación y a pesar de haber reducido la potencia propulsora 100 Kw, debido al mayor rendimiento del nuevo conjunto propulsor, podía navegar entre hielos de hasta 55 cm., y también navegar hacia popa rompiendo hielo, navegación que antes de la transformación no podía realizar debido a la disposición del timón.

2. En 1998 se constató la eficacia de los pod's al comparar este sistema y la propulsión tradicional entre buques gemelos.

Ese año, los pod's se instalaron por primera vez en dos barcos de crucero; "Elation" y "Paradise" de la clase Fantasy de la Compañía Carnival Cruises Lines (CCL). La propulsión clásica de dos ejes con timones, fue remplazada por una propulsión con azipod de 14 MW. Con los dos tipos de buque en servicio y efectuando su operativa normal, se reunieron los suficientes datos para comprobar que el sistema azipod ahorra un 20% en combustible y aumentaba la velocidad del buque en medio nudo. Carnival comprobó que en los cruceros de una semana, el sistema azipod permitía un ahorro de 40 toneladas de combustible.

3. En el buque cisterna Ulikku se instaló la primera unidad azipod de alta potencia de 11,4 MW, para navegación en las aguas árticas, demostró la mayor capacidad de maniobra y de eficacia del sistema en general.

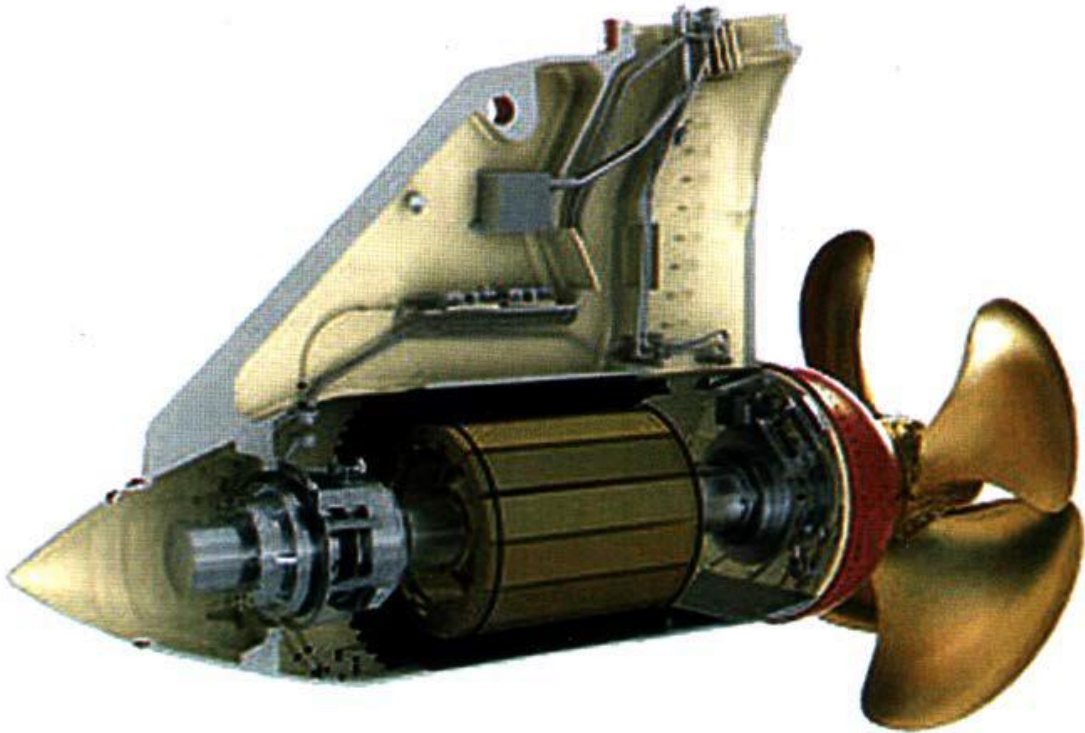


Imagen 44. Interior de un Pod Mermaid, fabricado por Rolls-Royce / Alstom's.El Queen Mary 2 esta equipado con cuatro Pod Mermaid, dos fijos situados a proa de los dos pod azimutales que le dan gobierno al buque.

Como pasa muy a menudo, una marca acabó dando el nombre a todo un sistema, este es el caso de la marca registrada "Azípod *propulsión*" del grupo ABB, líder mundial en este tipo de propulsión, cuya denominación "Azípod" acaba abarcando a todos los sistemas de *pod's*. Incluso otras marcas, como "Mermaid" de Kamegua/Alstom, y "Delfín" de Atlas/Lips/STN, reciben el nombre genérico de azipod.

A lo largo de los años, el sistema de propulsión Azipod ha ido demostrando su eficacia en el sector naval.

En la actualidad es conocido entre los profesionales del mar por su maniobrabilidad, respuesta inmediata, alta velocidad de crucero y operaciones en general suaves y silenciosas. No cabe duda que el sistema ha ido evolucionando

hasta convertirse en la principal propulsión, de los modernos buques de cruceros y rompehielos.

El azipod es una cápsula sumergida que contiene en su interior una unidad de propulsión eléctrica, que consiste en un motor eléctrico de velocidad variable, que a través de su eje interior acciona una hélice de paso fijo.

La capsula o barquilla puede girar libremente alrededor de su eje vertical para proporcionar empuje en cualquier dirección. Es decir, un solo sistema nos proporciona empuje y dirección, de este modo, el buque no precisa timones, hélices transversales a popa o largas líneas de eje en el interior del buque.

Los Azipod se pueden diseñar de tiro o empuje, esto dependerá de la colocación de la hélice con respecto a la barquilla. Si la hélice esta colocada delante de la barquilla tendremos un Azipod "tractor" de tiro, si por el contrario, va instalada a popa de la barquilla el azipod será de empuje.

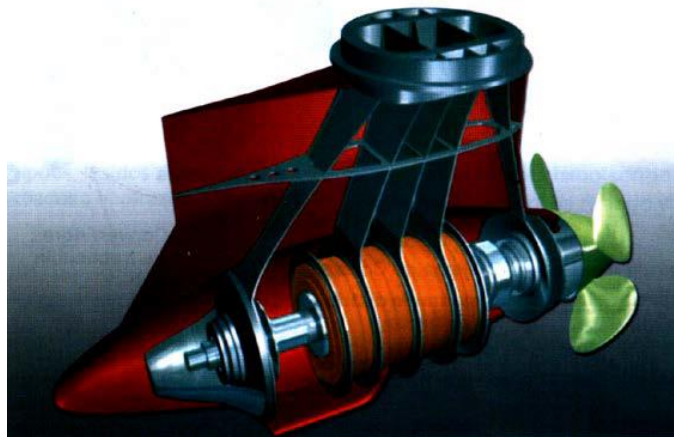


Imagen 45. Interior del pod de empuje (tractor), donde se puede ver el motor eléctrico que da movimiento al eje de la hélice de cuatro palas y paso fijo. El eje se encuentra apoyado sobre dos cojinetes, el situado a popa de apoyo y el de proa junto al motor de excitación de empuje.

La capsula o barquilla puede girar libremente alrededor de su eje vertical para proporcionar empuje en cualquier dirección. Es decir, un solo sistema nos proporciona empuje y dirección, de este modo, el buque no precisa timones, hélices transversales a popa o largas líneas de eje en el interior del buque.

Los Azipod se pueden diseñar de tiro o empuje, esto dependerá de la colocación de la hélice con respecto a la barquilla. Si la hélice esta colocada delante de la barquilla tendremos un Azipod "tractor" de tiro, si por el contrario, va instalada a popa de la barquilla el azipod será de empuje.

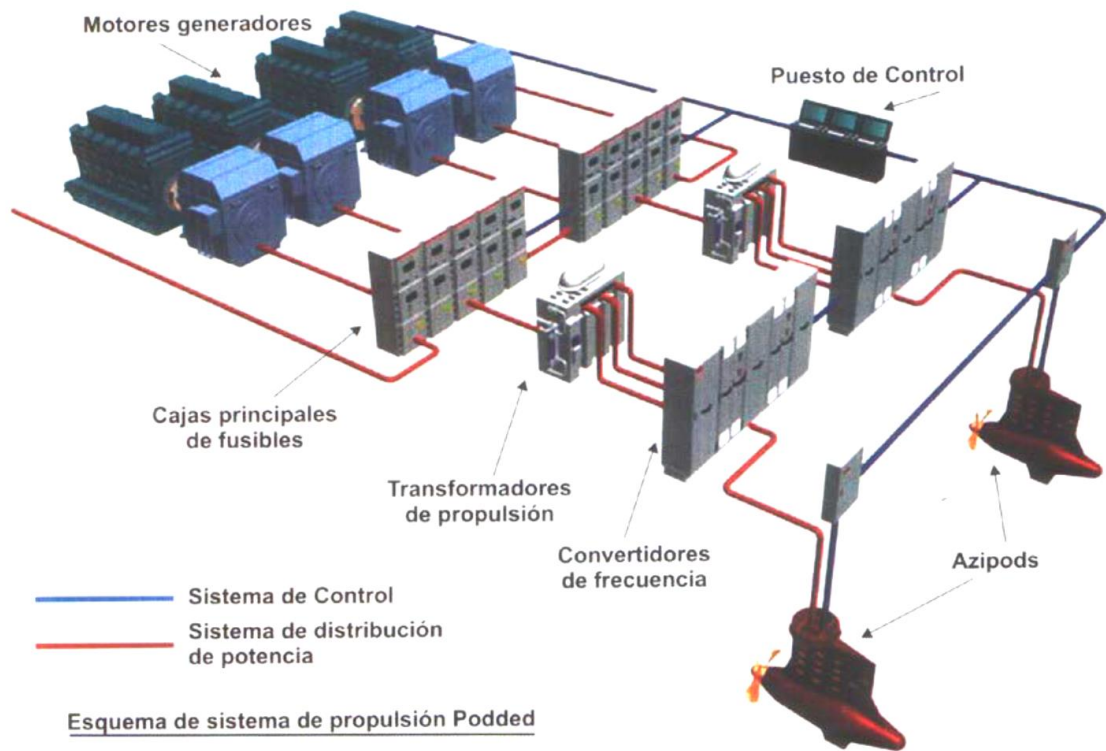


Imagen 46. Esquema de sistema Podded

Un buen diseño de la barquilla; (forma, posición y ángulo en relación al casco del buque), puede llegar a reducir la resistencia al movimiento entre un 5 y un 10%, además, de aumentar la eficacia de la propulsión hasta un 15% en comparación con los sistemas de propulsión convencional en el casco.

Un sistema completo de azipod consta de las siguientes partes: uno o varios generadores movidos por motores diesel o turbinas, transformadores de la corriente eléctrica, convertidores de frecuencia y un control de propulsión.

El convertidor de frecuencia es una pieza importante en este conjunto, ya que tiene por misión convertir la frecuencia constante de la red suministrada por los generadores del buque, en una salida de corriente eléctrica con frecuencia variable para alimentar el motor del azipod.

Esta corriente rectificada la utilizaremos para variar la velocidad y el par del motor eléctrico colocado en la barquilla del azipod y que mueve la hélice del mismo.

Las ventajas de este tipo de sistema de control son evidentes; se obtiene un control suave y preciso de la velocidad del motor eléctrico, y de la hélice que propulsa al buque. El funcionamiento suave y regular del motor, origina menos averías, con lo que conseguiremos menores costes de mantenimiento.

Uno de los factores que más influyen hidrodinámicamente para proporcionar menor resistencia al movimiento y mayor eficiencia de la propulsión, es conseguir que el diámetro de la barquilla sea lo más reducido posible, e inferior al diámetro de la hélice.

Esto se está consiguiendo mediante el empleo de motores eléctricos cada vez más pequeños y compactos.

Un buen ejemplo son los motores síncrono, con superconductores de alta temperatura HTS.

Estos motores son ligeros y compactos, con un par motor tres veces mayor que los motores de similar tamaño, a la vez que son compatibles con el estándar de velocidad variable (VSD).

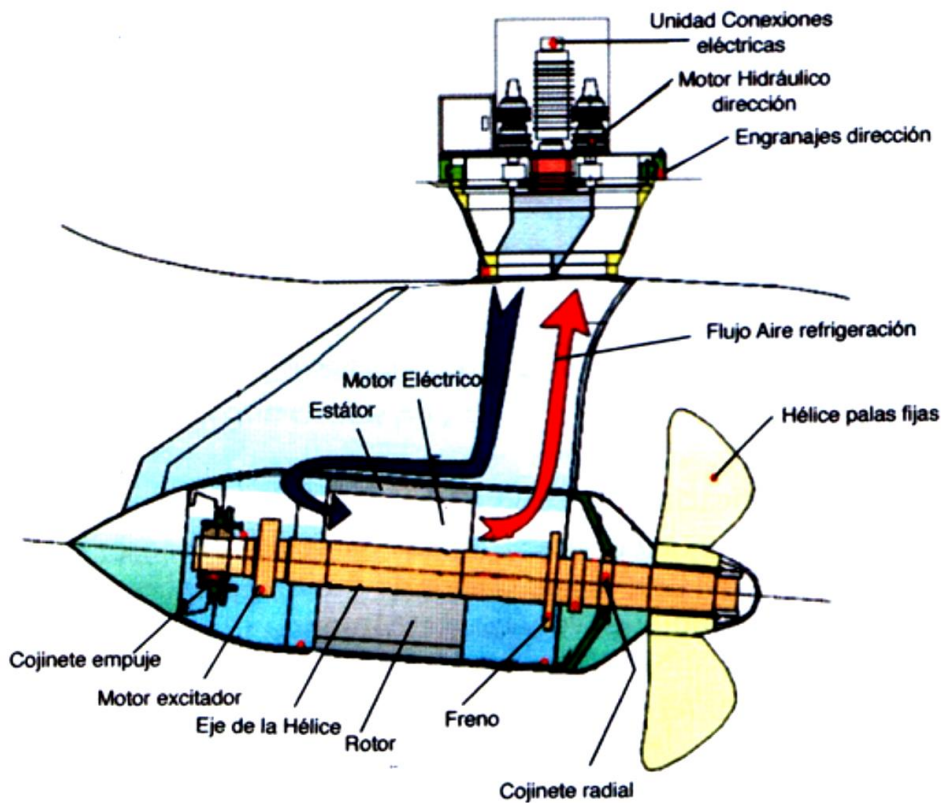


Imagen 47. Esquema de partes de un sistema Podded

14.5 La propulsión “Siemens Shottel Propulsion

Así como, los *pod's* fabricados por ABB "Azipod", Rolls Royce "Mermaid" y Atlas/Lips/STN "Delfin", a grandes rasgos son muy similares por su forma y diseño, el consorcio Siemens-Shottel ha desarrollado un sistema pod de diferentes características.

La SSP propulsión consiste en una barquilla sumergida fuera del casco, en cuyo interior contiene un motor eléctrico a cuyo eje están unidas dos hélices que giran en el mismo sentido, actuando la de proa tirando y la de popa empujando.

Con este sistema la potencia del motor se reparte entre las dos hélices, por lo que es posible utilizar motores con mayor potencia y hélices con menores diámetros.

La góndola lleva incorporadas unas aletas laterales horizontales, que junto con la parte vertical que sustenta el *pod* al casco, desvía el flujo de la corriente de agua procedente de la hélice de proa, y la dirige de forma axial a la hélice de popa,

permitiendo reutilizar y aprovechar la energía de los remolinos generados por la hélice de proa.

Los motores eléctricos que se instalan en la "*SSP propulsion*" pueden ser asíncronos o síncronos, excitados o de imanes permanentes.

Cuando se trata de obtener una potencia elevada a velocidades relativamente bajas, los más utilizados son los motores síncronos de imanes permanentes y flujo longitudinal.

También se pueden utilizar los motores síncronos con excitación, o motores de inducción pero estos motores son más pesados y voluminosos, por lo tanto menos eficientes.

Quedó demostrado, en las pruebas realizadas en canales de experiencias y en la explotación de los ferries *Ro-Pax*, que la "*SSP propulsión*" es aproximadamente un 10% más eficiente hidrodinámicamente que los sistemas de una sola hélice, lo que garantiza al armador un mejor rendimiento en la explotación del buque, proporcionando un ahorro del 10% o mayor en los gastos de explotación.

Otra de las ventajas del sistema "*SSP propulsión*" es el poco ruido que genera, son motores extremadamente silenciosos; esto se debe a que la potencia del motor esta dividida entre las dos hélices, por lo tanto, la carga en cada pala de estas y la velocidad de rotación es menor que la producida en las palas de los *pod* de una sola hélice.

Por estas características de bajo nivel de ruido y vibraciones, se considera un tipo ideal de propulsión para los ferries *Ro-Pax* de mediano tamaño.

Otra característica importante para el armador del buque es el ahorro de espacio disponible para la propulsión que proporciona el sistema, puesto que todos los servicios que necesita el *pod* para su funcionamiento, están situados sobre la barquilla del propulsor ocupando un espacio muy reducido, lo que permite al buque disponer de mayor espacio para la carga.

En la actualidad cada vez son más los diferentes de tipos de buques que las instalan debido al alto rendimiento que ofrecen las hélices de menor tamaño.

Otra de las ventajas del sistema "*SSP propulsión*" es el poco ruido que genera, son motores extremadamente silenciosos; esto se debe a que la potencia del motor esta dividida entre las dos hélices, por lo tanto, la carga en cada pala de estas y la velocidad de rotación es menor que la producida en las palas de los *pod* de una sola hélice.

Entre las ventajas más destacables de este sistema de propulsión podemos numerar:

1. Las excelentes características dinámicas y de maniobrabilidad, derivadas de poder disponer del máximo empuje, en cualquier dirección y sin apenas retraso. De disponer durante la navegación de cambios de rumbo con mayor rapidez y de radios de giro del buque mucho menores. En caso de emergencia poder realizar maniobra de parada de emergencia en distancias manifiestamente menores a la conseguida con la propulsión convencional.
2. La posibilidad de maniobrar el buque a muy bajas revoluciones. Derivado del hecho de trabajar con motores eléctricos alimentados a través de convertidores de frecuencia, los cuales son capaces de proporcionar el par máximo de trabajo a cualquier velocidad del motor. Todas estas características aumentan la seguridad del propio buque y de la navegación.
3. Otras ventajas que ofrece este sistema son las eliminaciones de los timones, largas líneas de ejes, reductoras, servomotores, hélices transversales a popa y hélices de paso variable.
4. Al basarse en un sistema diesel - eléctrico permite gran flexibilidad para la localización de la sala de máquinas, consiguiendo con ello menores ruidos y vibraciones, así como, un aumento de la seguridad instalando sistemas redundantes.
5. Esta flexibilidad operativa da como resultado un menor consumo de combustible y a la vez una menor contaminación ambiental al poder trabajar los motores diesel a un régimen constante entorno a su carga óptima.

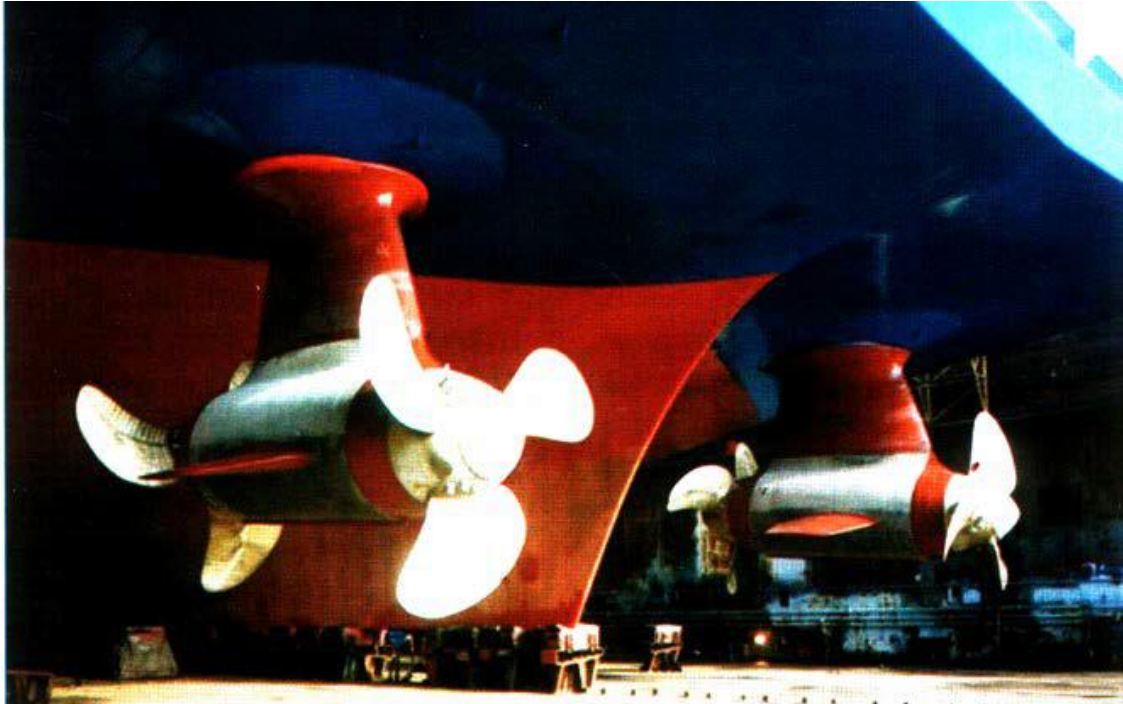


Imagen 48. Sistema de propulsión Siemens Shottel Propulsion

14.6 Propulsión CRP Azipod (Hélices contra-rotativas)

Este tipo de propulsión combina dos sistemas diferentes de propulsión: una hélice principal accionada convencionalmente y otra hélice por detrás de esta y alineada con respecto al eje de la principal y que gira en sentido contrario, actuando como tractora tirando.

La hélice principal de paso variable está acoplada al motor o motores principales mediante los correspondientes ejes y cajas de engranajes, mientras que la segunda hélice de paso fijo y de giro contrario a la principal, está accionada por el motor eléctrico que está alojado dentro del azipod que puede girar 360 grados sobre su eje vertical.

En este caso la unidad azipod se instala sustituyendo al timón convencional del barco, manteniendo las líneas de agua de la corriente de un casco mono hélice, consiguiendo un bajo nivel de resistencia al avance y un gran rendimiento del conjunto.

Además la propulsión *CRP* aporta otro tipo de ventajas como son: la redundancia en la propulsión; al ser totalmente independiente el sistema principal del sistema del azipod, y el menor espacio dedicado a la sala de máquinas.

Para conseguir una hidrodinámica óptima, ABB recomienda que el reparto de la potencia entre la propulsión principal y la producida por el azipod sea, como mucho, de una relación 70-30.

La hélice del azipod ha de trabajar dentro de la estela de la hélice principal, luego para evitar cavitaciones y vibraciones la hélice del azipod ha de ser ligeramente menor que la hélice principal, aproximadamente entre el 70 y el 80% del diámetro de ésta.

En el año 2004 se pusieron en servicio el “Akashia” y el “Hamanasu”, los primeros ferrys *Ro-Pax* de gran tamaño y alta velocidad, construidos en Japón y propulsados por las hélices contrarrotativas *CRP* Azipod de *ABB*. Estos ferrys *Ro-pax* que pueden alcanzar los 31,5 nudos de velocidad gracias a una potencia total de 42,8 MW, de los cuales 17,6 MW se los proporciona el *CPR* Azipod y 25,2 MW la hélice principal.

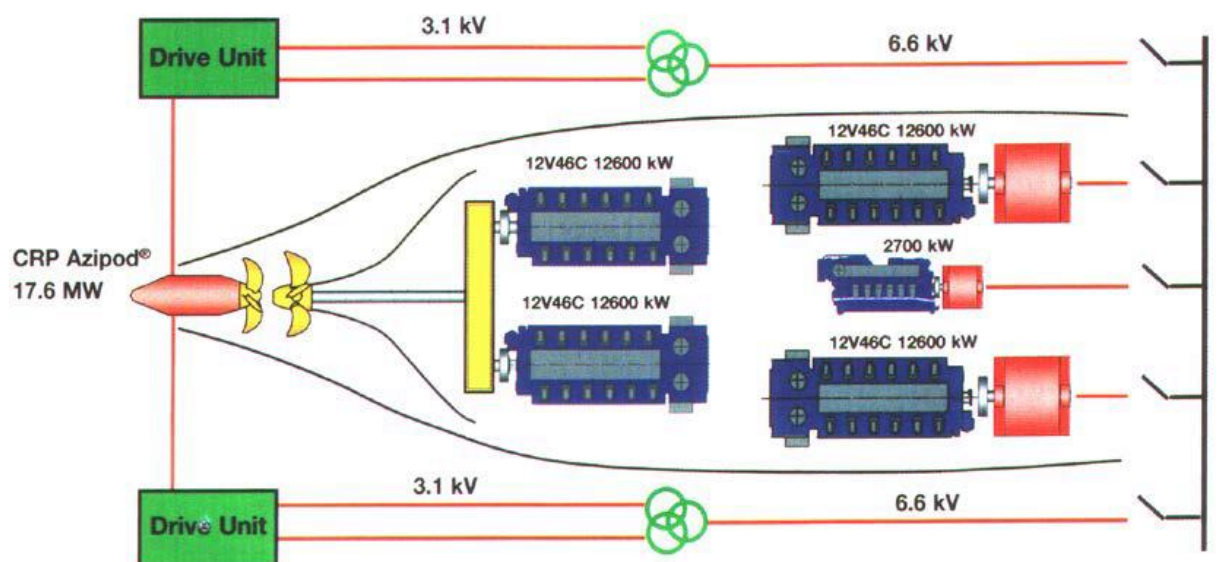


Imagen 50. El diseño de la planta de propulsión incluye dos motores Wáertsila 12V46 que impulsan una hélice CP a través de una caja de engranajes de doble entrada y salida única. Otro par de motores 12V46 mueven los alternadores que suministran energía eléctrica a la unidad Azipod. La distribución de potencia es de

25,2 MW en la hélice CP y 17,6 MW en la unidad Azipod, lo que hace un total de 42,8 MW.



Imagen 51. RoPax “Akashia” construido en los astilleros Japoneses de Mitsubishi en Nagasaki, tienen una eslora de 224,5 metros y desarrollan una velocidad de crucero de 31,5 nudos. Ha sido el primer barco en el mundo en estar equipado con ABB's contra-rotating CRP Azipod propulsión system

BIBLIOGRAFIA Y RECURSOS WEB

Tesis an evaluation of electric motors for ship propulsion by Bobby A. Bassham, NAVAL POSTGRADUATE SCHOOL, Monterey, California.

Essential Characteristics of Electrical Propulsion and Thruster Drives in DP Vessels by Thomas Hackman, Asgeir J. Sørensen, Alf Kåre Ådnanes

Tesis sobre sistemas de propulsión Azipod.

Autor: Rafael Cabal Álvarez, practico del puerto de Barcelona.

Introducción a los sistemas e instalaciones navales a bordo por ABB Cuaderno 11.
https://library.e.abb.com/public/25fd3f99ba5d9b8ec1257983003239ff/CT11_Sistemas%20navales.pdf

Trabajo de fin de Master en Ingenieria Náutica y Transporte Marítimo de Posicionamiento Dinámico (Dyanimc Positioning (DP).

Autor: Natalia Cochón Carramal.

Tesis Doctoral: “Diseño de sistemas de control para posicionamiento dinámico de buques”.

Autor : C.S. Chas, and R. Ferreiro

Journal Of Maritime Research. Spanish Society of Maritime Research. Vol.V, Nº1. April 2008.

Artículo: “Introduction To Ship Dynamic Positioning Systems”

Autor : C.S. Chas, and R. Ferreiro

Trabajo Fin de Grado: Integración de los Sistemas de Navegación Inercial a Bordo de Buques con Posicionamiento Dinámico.

Autor: Alejandro Miguez Algaba

Trabajo Fin de Grado : “Posicionamiento Dinámico: Principios, Características Y Operaciones”.

Autor: José Manuel Villar Arenal.