

7.4. HÉLICE Y DIAGRAMA DE FUNCIONAMIENTO

6.4.1. Modo de accionamiento

6.4.1.1. Cavitación y perturbación del empuje

La potencia (P_D) y la velocidad de la hélice (n) deben ajustarse a la potencia instalada para la propulsión (P_B). Solo las pruebas de mar demostrarán si las estimaciones realizadas con anterioridad son correctas o no.

En esta etapa de evaluación ya se ha seleccionado un motor diesel y un punto de funcionamiento dentro del diagrama de funcionamiento del motor diesel. Además, se deben tener en cuenta los aspectos hidrodinámicos (Figura 44 Curva de la Hélice), la fabricación, tolerancias, etc.

- La tolerancia de fabricación en el paso, la superficie y el perfil tienen influencia en la absorción de potencia por la hélice.
- La resistencia del casco puede variar debido a las inevitables diferencias en la carga y en las formas del casco.

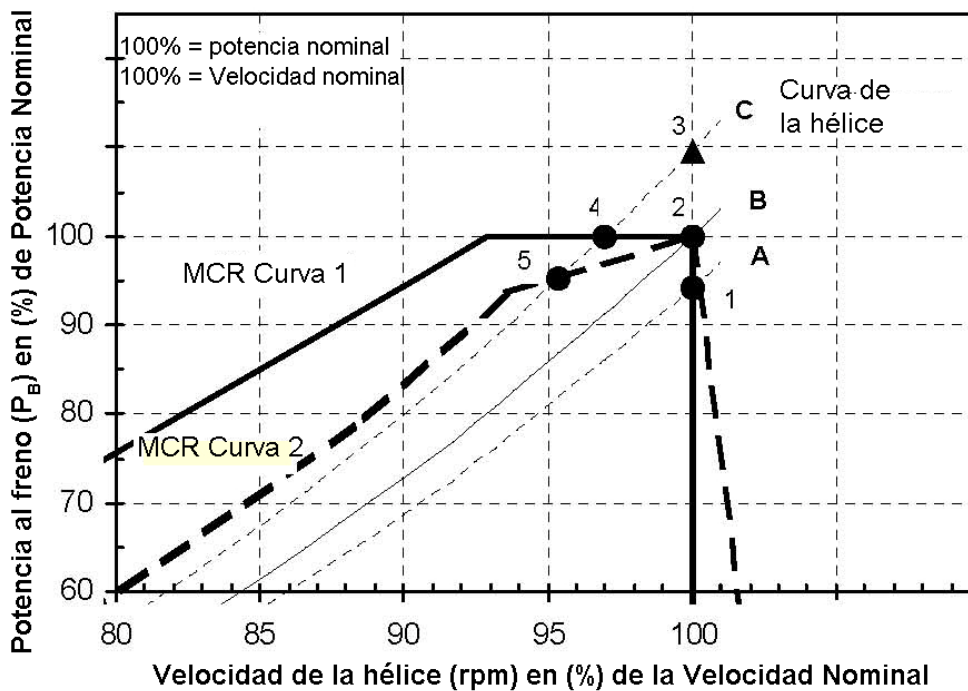


Fig. 46 Cambios en la curva de potencia entregada debidos al tiempo, calado y ensuciamiento

Los aspectos geométricos e hidrodinámicos (Figura 46) pueden desplazar la curva de la hélice (A) hacia el lado izquierdo del diagrama de funcionamiento, como se puede apreciar en la curva de la hélice (C). Ciertos modelos de motores diesel son más sensibles a este desplazamiento que otros. Consecuentemente, el buque puede no ser capaz de funcionar a toda velocidad cuando el casco está sucio, las condiciones ambientales se deterioran o el calado aumenta.

En la Figura 46 se muestran las curvas de dos motores diesel diferentes, procedentes de distintos fabricantes (Curvas MCR 1 y MCR 2). Un cambio en la curva de la hélice de (A) a través de (B) hasta (C) nos indica el siguiente comportamiento:

- A. El motor diesel puede funcionar a la velocidad nominal (n). No existe limitación alguna (Punto 1)
- B. Los motores diesel pueden funcionar a la velocidad nominal (n) y alcanzar su plena potencia. No existe limitación alguna (Punto 2)
- C. Debido a los límites de carga (Para MTU: Fuel Stop Power), ambos motores diesel no son capaces de suministrar la potencia necesaria a plena velocidad (n) en el Punto 3. En este caso el controlador del motor diesel reduce la velocidad (n) para encontrar un punto de funcionamiento a plena potencia dentro de los límites de funcionamiento. Para el motor diesel con la curva MCR 1, este es el punto (4) y para el otro motor diesel, el punto es el (5). Las diferencias entre los dos puntos de funcionamiento (4) y (5) indican el orden de magnitud de reducción en la velocidad del buque (v), que puede llegar a ser muy elevado.

Un comportamiento similar se experimenta con una disposición con dos líneas de ejes, que ha sido reducida al modo de un solo eje. La Figura 47 muestra la disposición con dos motores diesel del mismo tipo, uno por cada línea de ejes. La potencia de salida ha sido incrementada en el rango de velocidad (Curva MCR 1) y la curva de la hélice funcionando a través del punto 1. Cada motor diesel toma la mitad de la carga de la potencia total necesaria al freno (P_B)

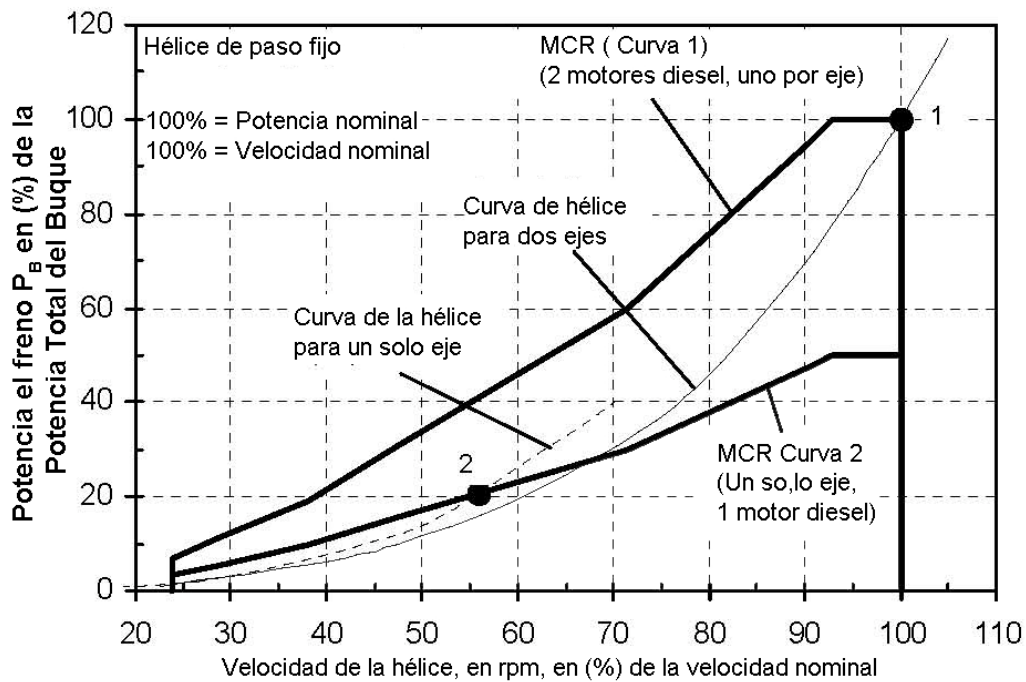


Fig. 47 Fallo de un motor diesel en una disposición de dos líneas de ejes

La curva MCR 2 muestra la potencia al freno disponible (P_B) de un solo motor. Si un motor se para, la potencia efectiva del buque se reduce a una sola hélice en lugar de las dos originales, con la consecuencia de que ahora existe una sola curva de la hélice (curva de la hélice para un solo eje)

El motor diesel que permanece en funcionamiento debe encontrar un nuevo punto de funcionamiento en la curva de la hélice para un solo eje dentro de los límites de funcionamiento. En este ejemplo, el punto 2 es el nuevo punto de funcionamiento para el motor diesel. Los puntos también indican la máxima potencia disponible al freno (P_B) y la velocidad (n) en el modo de funcionamiento de una sola línea de ejes para este buque.

En caso de no encontrar modo de funcionamiento alguno para el motor, este se calará y parará. Esto también indicará que con los motores elegidos, el buque no puede funcionar en el modo de una sola línea de ejes. En este caso, se deberá seleccionar una hélice del tipo CPP, de palas orientables.

He aquí algunas razones de porque el punto de proyecto o diseño del motor diesel debe ser cuidadosamente elegido en función de los límites de carga y el tipo de hélice (FPP, CPP) que se vaya a utilizar.

7.4.1.2. Tiro

Para un remolcador el objetivo del proyecto es el tiro requerido (o empuje; la hélice no parece que sea una fuente de resistencia). Eso implica que para la selección del motor diesel, el parámetro más importante es el empuje o tiro, y no la potencia efectiva y la velocidad del buque (v). El punto de diseño en el diagrama de funcionamiento del motor diesel debe ser elegido en relación con este parámetro.

Para el tiro o empuje, existen, generalmente, varias definiciones.

3. Máximo tiro que es el promedio máximo de la tensión medida en el cabo de remolque durante un periodo de un minuto en la situación de prueba correspondiente. El máximo tiro generalmente corresponde a la potencia máxima del motor diesel.
4. Tiro sostenido que es la tensión continuamente mantenida en el cabo de remolque que se puede lograr durante un periodo de 5 minutos en la situación de pruebas conveniente.
5. Tiro efectivo que es el tiro que un buque puede lograr en aguas abiertas pero que no es comprobable en una situación del ensayo normal. Generalmente se caracteriza como un cierto porcentaje del tiro sostenido (por ejemplo 75–80%).

Después de haber seleccionado la hélice (Diámetro (D), P/D , relación de área de la pala, etc.) para el tiro también puede estimarse que se comporta como una curva cúbica en base a los parámetros de la hélice (Figura 48). Esta curva también puede interpretarse como el resultado de la curva límite de potencia efectiva, que no puede ser desplazada hacia la izquierda porque la velocidad del buque ya está cercana a cero.

Las pruebas de tiro deben efectuarse en una zona que tenga la profundidad suficiente y aguas no estancadas. Los efectos de recirculación en la hélice requieren una extensión suficiente de agua porque en la condición de tiro la velocidad del avance del agua entrante sería cero. La recirculación del agua causa pérdidas o reducciones en el empuje de la hélice.

Para condición de tiro se debe elegir un punto de diseño o proyecto a la potencia nominal ($100\% P_B$) del motor diesel y a la velocidad nominal del motor (n) en la zona media del rango de potencias máximas, por ejemplo, debería elegirse el Punto 1 en la Figura 48. Es preciso reservar un margen de velocidad del motor (n) a la izquierda para posibles tolerancias de proyecto. El margen de velocidad de reserva a la derecha permite una velocidad superior del buque.

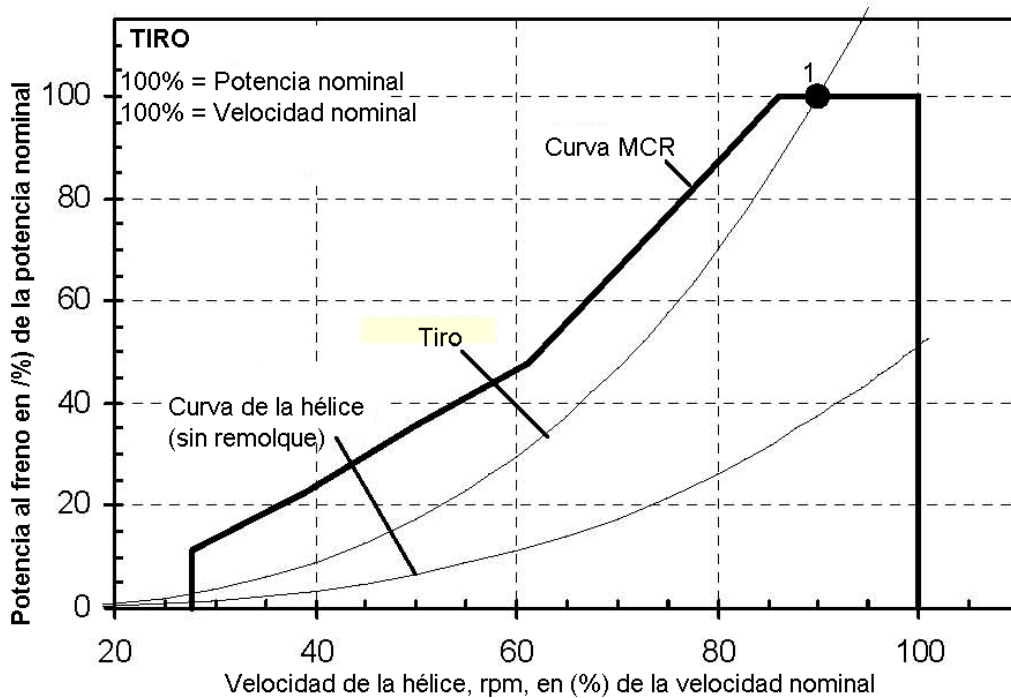


Fig. 48 Tiro

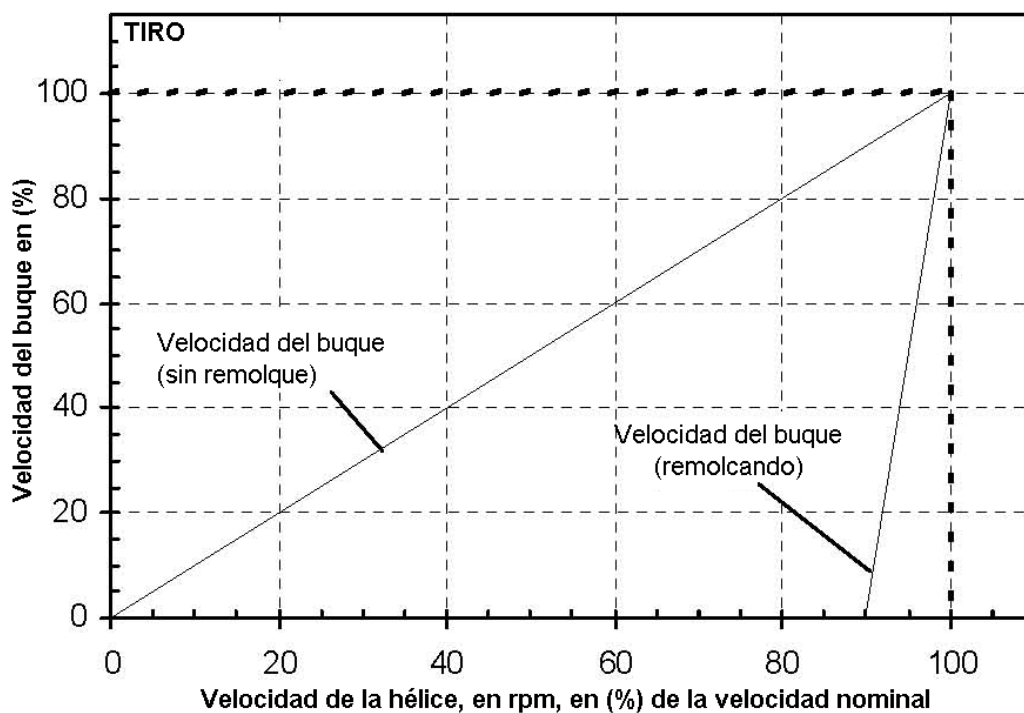


Fig. 49 Tiro: Efecto sobre la velocidad del buque

7.4.2. Hélice de paso fijo (FPP)

El proyecto de un sistema propulsivo con una hélice de paso fijo es absolutamente crítico para las características del buque.

La potencia al freno (P_B) curva (B) debería pasar a través de la potencia nominal a la velocidad nominal (Punto 2) del motor diesel. Pero debido a las tolerancias geométricas y a los deterioros hidrodinámicos, la curva de la hélice (C) puede tener más altura que la estimada inicialmente en las predicciones.

Esta situación es factible de superar proyectando la curva de la hélice (A) a una velocidad ligeramente superior para el buque. En función del tipo de motor diesel se pueden realizar dos aproximaciones diferentes.

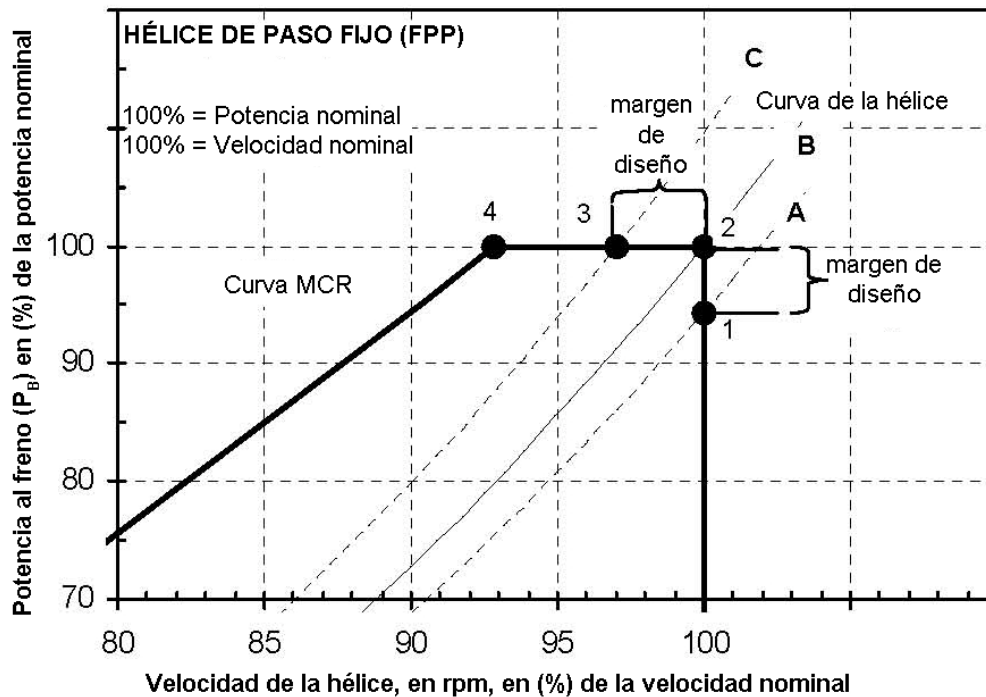


Fig. 50 Elección del punto de proyecto para una hélice de paso fijo
Punto 2: Preferido / recomendado como punto de diseño para la hélice

Procedimiento MTU (Curva característica del motor con amplio margen para funcionar a la potencia nominal por encima de cierta velocidad)

Punto 2: Punto de proyecto o diseño de la hélice preferido/ recomendado

La característica de un motor diesel MTU es el amplio margen de que dispone para funcionar a la potencia nominal (Fuel Stop Power) por encima de cierta velocidad del motor (n). Este margen puede ser usado como margen de proyecto. En condiciones de mala mar, o con la resistencia del casco incrementada, la curva de la hélice se moverá hacia la izquierda. Esto significa que en las pruebas de mar, con las condiciones de carga de proyecto (Figura 50) y a la potencia nominal, el motor diesel debería funcionar en el punto situado más a la derecha posible de este margen (Punto 2, curva de potencia efectiva para las condiciones de pruebas = curva de la hélice **B**); por ejemplo en el punto de proyecto o diseño de la hélice. Con el crecimiento normal a lo largo del tiempo (debido a ensuciamientos, etc.), la curva se moverá hacia la izquierda (por ejemplo, Punto 3, curva de la hélice **C**).

El diseño del motor permite que la hélice funcione a la potencia nominal (100% P_B) siempre que la curva de la hélice no sobrepase en punto 4 (Inicio de la caída de la curva característica del motor) dado que el funcionamiento continuo del motor en este punto debe evitarse. El punto de funcionamiento del motor situado más a la izquierda sería 1- 2% por debajo de la velocidad (n) correspondiente a este punto de caída. La velocidad máxima del buque (v) disminuirá lentamente a medida que la curva se desplaza hacia el punto 3.

Procedimiento estándar (Utilizable con cualquier tipo de motor)

Punto 1: Punto de proyecto o diseño de la hélice preferido/ recomendado

En el punto de proyecto o diseño la hélice funciona a la velocidad nominal (100% n) y una pequeña cantidad (margen de proyecto o de diseño) por debajo de la potencia nominal (100% de P_B). En este caso el motor diesel está efectivamente trabajando en condición de “desratización” (Punto 1, curva de potencia efectiva para condiciones de pruebas = Curva de la hélice **A**). Con mala mar (desplazamiento ambiental) o con el paso del tiempo la curva de la hélice se moverá hacia la izquierda, con lo que llegará a estar disponible la potencia nominal (Punto 2, curva de la hélice **B**).

El proyecto permite que la hélice funcione al 100% de rpm (velocidad nominal) en tanto que la curva de la hélice no pase del Punto 2. La velocidad del buque (v) aumentará con el desplazamiento de la curva de la hélice, y alcanzará su máximo en el punto 2.

Utilizando este procedimiento, el proyectista debe considerar que puede no ser posible demostrar la capacidad del buque para alcanzar la velocidad máxima (v) en las condiciones de pruebas, dado que la velocidad del motor diesel (n) está limitada a la velocidad nominal (100% n).

La diferencia entre la potencia nominal y la potencia de proyecto se llama “margen marino” = margen de proyecto. Si no existen requisitos específicos, debe usarse un margen de proyecto de aprox. 6 – 10%. La potencia nominal debe coincidir con la curva de la hélice **A** a una velocidad (n) del 101 – 103,5% de n, pero estos son valores puramente teóricos.

Resumen

Cualquier procedimiento, o bien una mezcla de ellos puede ser usada para elegir el punto de diseño o proyecto de una hélice de paso fijo (FPP) con un motor diesel con un margen determinado de velocidad en el cual puede desarrollar la potencia nominal. Si la aplicación no especifica requisito alguno relativo al punto de proyecto de la hélice, debería usarse la recomendación de MTU (Punto 2 = punto de diseño primario para la hélice). Con independencia del punto de diseño o proyecto elegido, la curva de la hélice se comporta como una curva fija a través del diagrama característico del motor diesel. De todas formas, no deben olvidarse algunos aspectos adicionales:

- Sí la curva de la hélice en el punto de diseño o proyecto no pasa a través de la región de mínimo consumo de combustible, la curva no puede cambiarse con posterioridad.
- Sí la curva de la hélice llega a estar demasiado cercana a la curva MCR, la curva no puede moverse fuera de esta zona, porque ello daría como resultado un bloqueo del margen de funcionamiento.

7.4.3. Hélice de palas orientables (CPP)

La hélice de palas orientables puede considerarse como una extensión de las hélices de paso fijo. Cada paso dará lugar a una nueva curva de la hélice. Se muestra un ejemplo típico en la Figura 51, donde la característica de la hélice de palas orientables está superpuesta sobre el diagrama característico de un motor diesel.

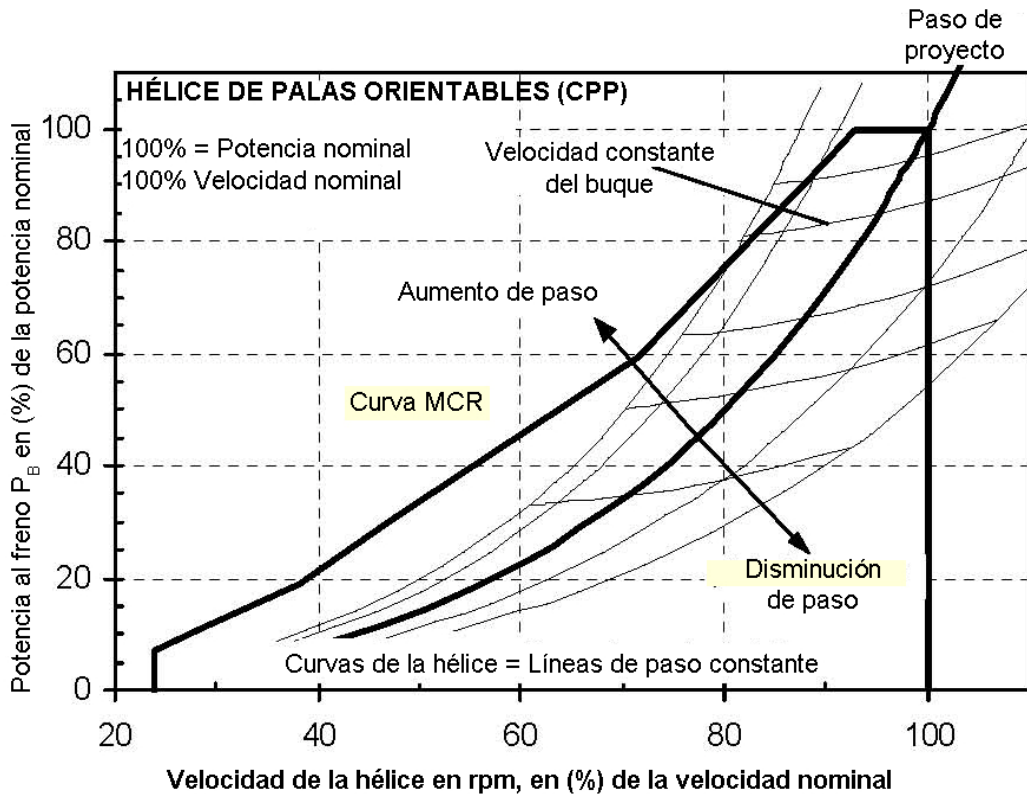


Fig. 51 Características de una hélice CPP sobre un diagrama típico de características de un motor diesel

Cada cambio en el paso de la hélice cambia la relación entre la velocidad de proyecto (n) y la potencia al freno (P_B) para un buque determinado.

Debido al posible ajuste posterior del paso de la hélice, no existen restricciones para el punto de diseño o proyecto dentro del diagrama de funcionamiento del motor diesel. Debe elegirse un punto al 100% de la potencia el freno (P_B) y a la velocidad (n), Figura 52.

No se fija a priori el margen de variación del paso disponible. Es una parte de la especificación del cliente para la hélice. Por parte del fabricante de la misma, este margen está limitado por el tamaño del núcleo de la hélice y la magnitud de las fuerzas máximas sobre la pala. Normalmente, el margen de paso disponible o utilizable estará referido al paso de proyecto o diseño, y se da en grados. El margen por encima del paso de proyecto o diseño es muy pequeño porque, en general, no es necesario, excepto para aplicaciones muy especiales.

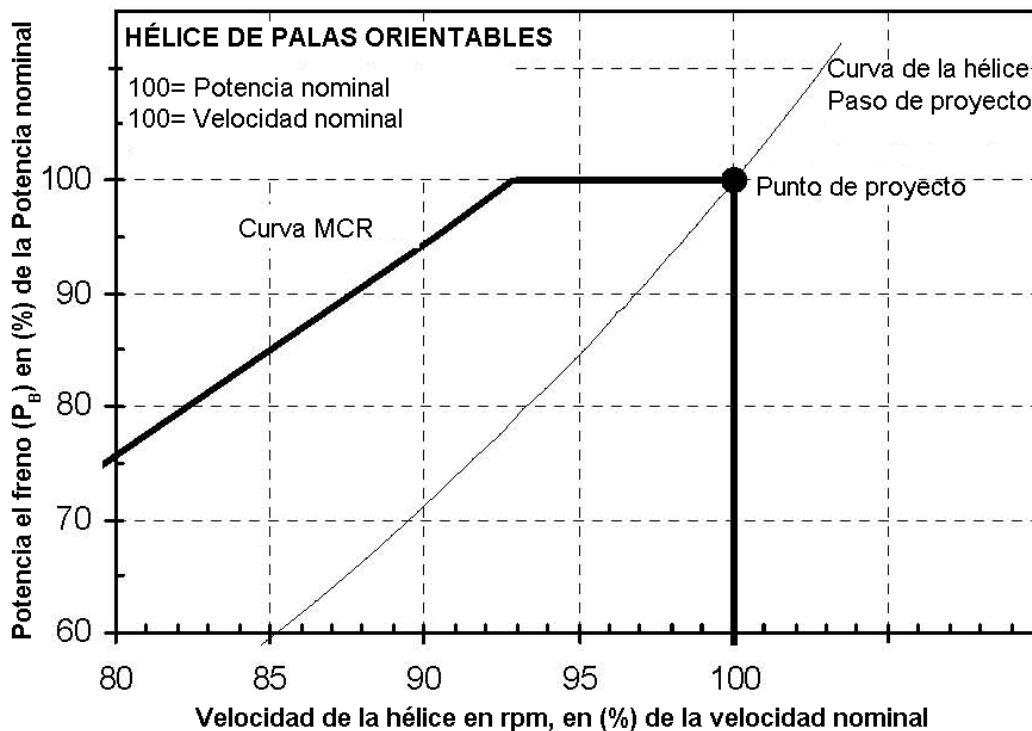


Fig. 52 Punto de diseño o proyecto de una hélice de palas orientables (CPP)

La característica de una hélice de palas orientables (CPP) en el punto de proyecto puede calcularse como una hélice de paso fijo (FPP). Debe evitarse la necesidad de usar las características de una hélice de paso fijo (FPP) sobrepasando en 5° el paso de proyecto, porque el efecto de la distorsión de la sección afecta de forma considerable a los cálculos.

La hélice de palas orientables permite varias operaciones:

- Sí la curva de potencia entregada en el punto de diseño o proyecto (paso de proyecto) no pasa a través de la zona de mínimos consumos de combustible, es factible ajustar el paso en condiciones de carga parcial.
- Sí la curva de potencia llega a estar demasiado cercana al límite operativo MCR del motor diesel, la curva de funcionamiento puede moverse fuera de esta zona.
- Sí el buque, durante las pruebas de mar, no es capaz de conseguir la potencia al freno de proyecto (P_B), puede corregirse el paso de proyecto o cuando aumenta la resistencia del buque con la vida operativa, la potencia al freno de proyecto (P_B) y la velocidad (n) permanecerán inalterables.
- Puede elegirse una hélice de palas orientables (CPP) con una posición de plena reversibilidad y el buque puede moverse cuando sin necesidad de reductor inversor. La distancia de frenado del buque es significativamente menor que con una hélice de paso fijo (FPP). De forma general, las características de maniobrabilidad son mejores.
- Puede elegirse una hélice de palas orientables (CPP) con una posición de las palas "en bandera" (mínima resistencia), sí el modo de funcionamiento con un solo eje forma parte del perfil operativo del buque.
- En cierto margen, el motor diesel puede funcionar a velocidad constante. En este modo, el motor puede accionar, además de la hélice, un alternador o una bomba contraincendios.

Pero, como contrapartida de las ventajas:

- La hélice de palas orientables (CPP) es más cara que una hélice de paso fijo (FPP).
- Sí la hélice se ajusta fuera del paso de proyecto, el rendimiento disminuye.
- Es necesario espacio adicional en el interior del buque para ubicar la unidad de control de la hélice.
- Debido a su mecanismo interno, la hélice de palas orientables (CPP) tiene un núcleo de mayor tamaño (Del orden de un 50% en comparación con la de paso fijo) que una hélice de paso fijo (FPP), lo que puede conducir a un mayor diámetro.
- Sí una hélice es totalmente reversible, debe tenerse cuidado de que las palas no interfieran entre sí cuando pasen por paso cero. El área de la parte superior de la pala estará limitada.

Existe un aspecto adicional que debe citarse. Sí el motor diesel tiene un diagrama de funcionamiento escaso, la curva de proyecto de la hélice no se situará en el interior del diagrama en la zona de bajas potencias. Estos tipos de motor diesel pueden usarse solamente con una hélice controlada por una relación PASO – RPM, según lo que normalmente se conoce como “diagrama del combinador” (Figura 53). Únicamente en el último tercio del margen de potencia la hélice puede funcionar con el paso de proyecto.

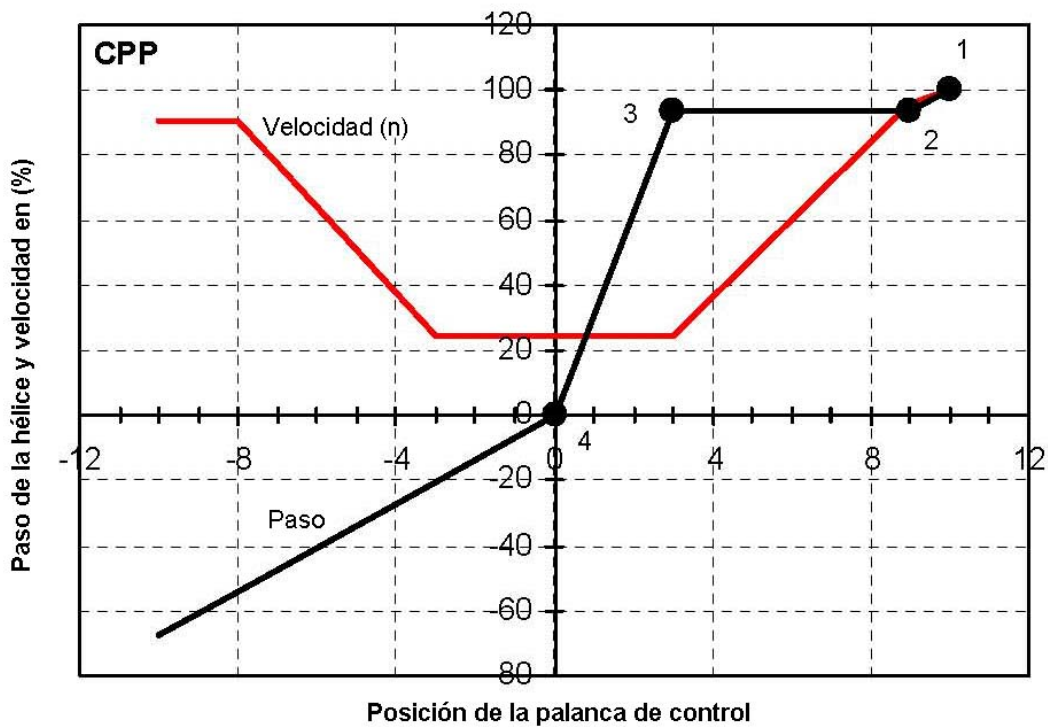


Fig. 53 Ejemplo: Diagrama del combinador (posición de la palanca de control)

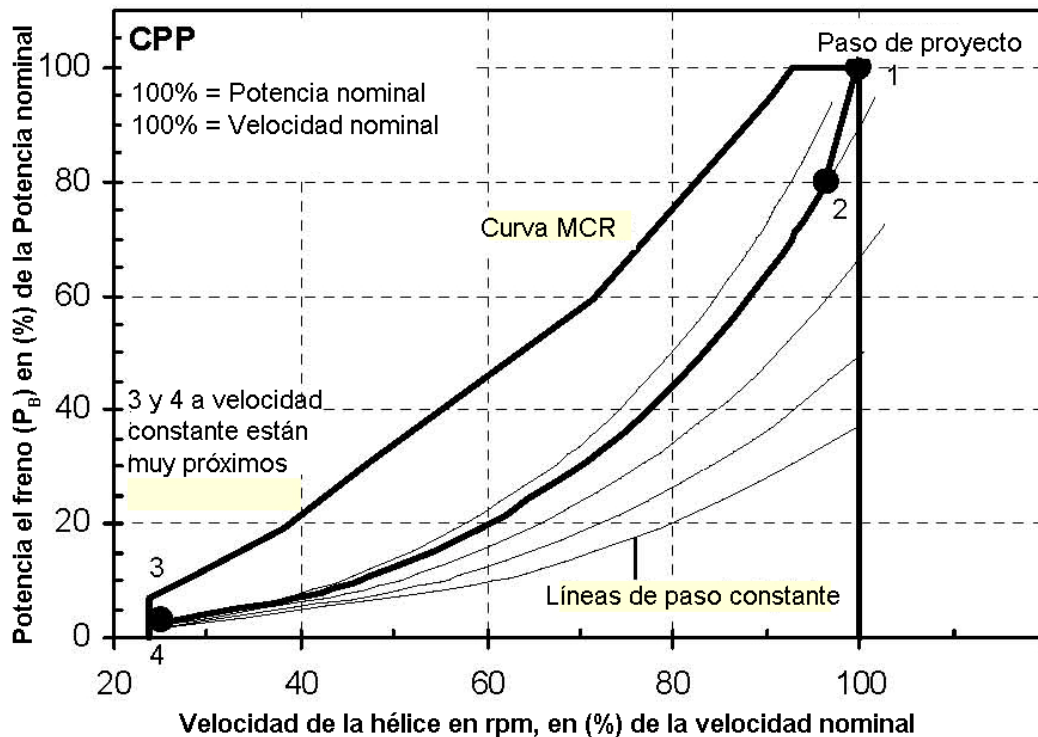


Fig. 54 Ejemplo: Combinador (posición en el diagrama de funcionamiento)

La Figura 54 muestra la posición del paso de la hélice en un diagrama de funcionamiento de un motor diesel (solo se representa la parte derecha del diagrama). El lado izquierdo del diagrama del combinador (Figura 53) muestra el funcionamiento cuando de la hélice. La hélice estará continuamente cambiando de paso cero a paso máximo de inversión. Generalmente el paso máximo de inversión será del orden del 60 – 80% del paso máximo avante, con el resultado de que la hélice no utilizará la plena potencia al freno del motor diesel.

Otro aspecto adicional del funcionamiento con combinador es el acceso a la zona de mínimo consumo de combustible. En este modo de funcionamiento, la curva de la hélice puede llegar a estar muy cercana a la curva MCR del motor, con una pérdida en las características de aceleración. Un “diagrama del combinador” programado puede dar como resultado unas características de funcionamiento totales mucho mejores.

Con un motor MTU la hélice puede funcionar en “modo de combinador”; sin embargo, generalmente, no es necesario debido al amplio margen de funcionamiento del motor diesel.

Otra posible aplicación es el accionamiento de un alternador a velocidad constante, conectado al reductor. El motor diesel funciona a velocidad constante (n) accionando el alternador, y la velocidad del buque se controla por medio de cambios en el paso. Esta es una solución estándar para buques mercantes que navegan, la mayor parte del tiempo, con altas potencias de propulsión.

Esto se muestra en el próximo ejemplo (Figura 55), donde un combinador controlará el paso de una hélice de palas orientables (CPP). Un alternador de velocidad constante está accionado por el reductor y funcionará por encima del 50% de la carga del motor diesel. En el rango inferior de potencias, la hélice funcionará con el paso de proyecto. La línea gruesa (1-2-3-4) en el diagrama de funcionamiento muestra la relación potencia – velocidad – paso de la hélice.

En la zona de potencias bajas, hasta el Punto 3, la hélice CPP funciona con el paso de proyecto. Entre el Punto 3 y el Punto 2, el motor diesel alcanza la velocidad nominal, con disminución del paso de la hélice. La velocidad del buque no sufre cambios significativos. En el Punto 2 se alcanza la velocidad de accionamiento (n) del alternador accionado. Entre el Punto 2 y el Punto 1, el motor diesel funciona a velocidad constante (n) accionando la hélice y el alternador. La velocidad del buque (v) es controlada por medio del paso de la hélice.

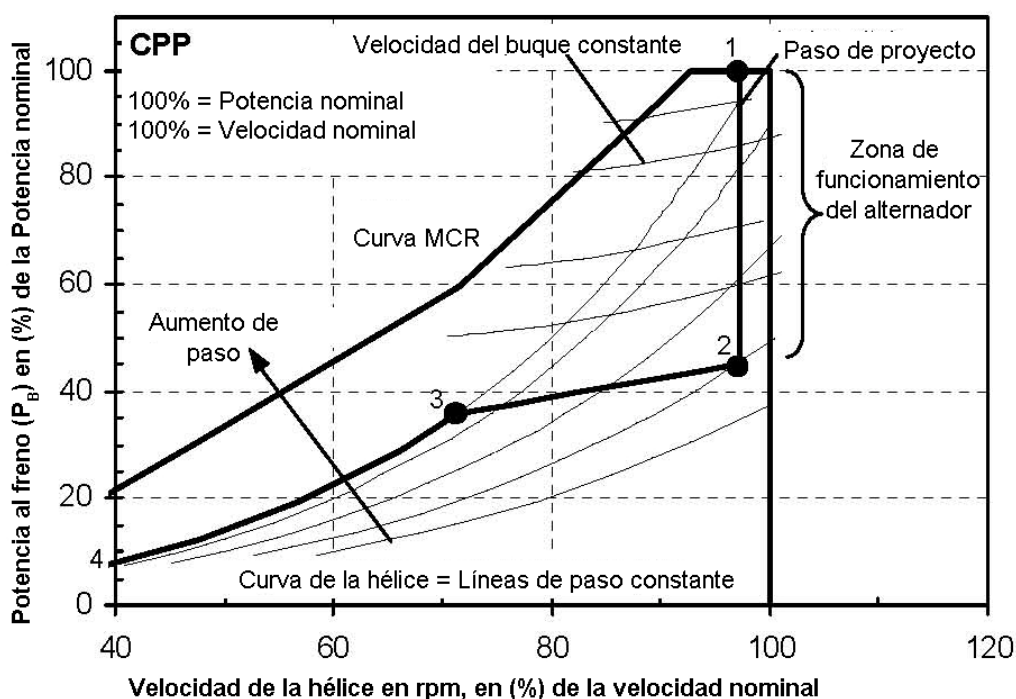


Fig. 55 Ejemplo: Alternador a velocidad constante con hélice de palas orientables (CPP)

Un ejemplo final de la versatilidad de la hélice de palas orientables (CPP): La Figura 56 es similar a la Figura 48, y muestra que sucede cuando en una planta propulsora con dos motores diesel se cambia a modo de funcionamiento con un solo motor.

La curva MCR 2 muestra la potencia disponible al freno (P_B) de un motor diesel. El motor diesel que está operativo debe encontrar un nuevo punto de funcionamiento en la curva de modo de operación con una sola hélice, dentro de los límites de funcionamiento del motor diesel. En este ejemplo, el Punto 2 es el nuevo punto de funcionamiento del motor diesel. Este punto señala también la máxima potencia al freno disponible (P_B) y velocidad (n) en el modo de funcionamiento con un solo eje y con el paso de proyecto para este buque.

Para usar la potencia al freno instalada del motor diesel que está operativo, el paso de la hélice debe reducirse (Punto 3). Sobre la curva de la hélice, se puede disponer de la plena potencia del motor diesel a la máxima velocidad del buque (v) para este modo de funcionamiento, con un solo eje.

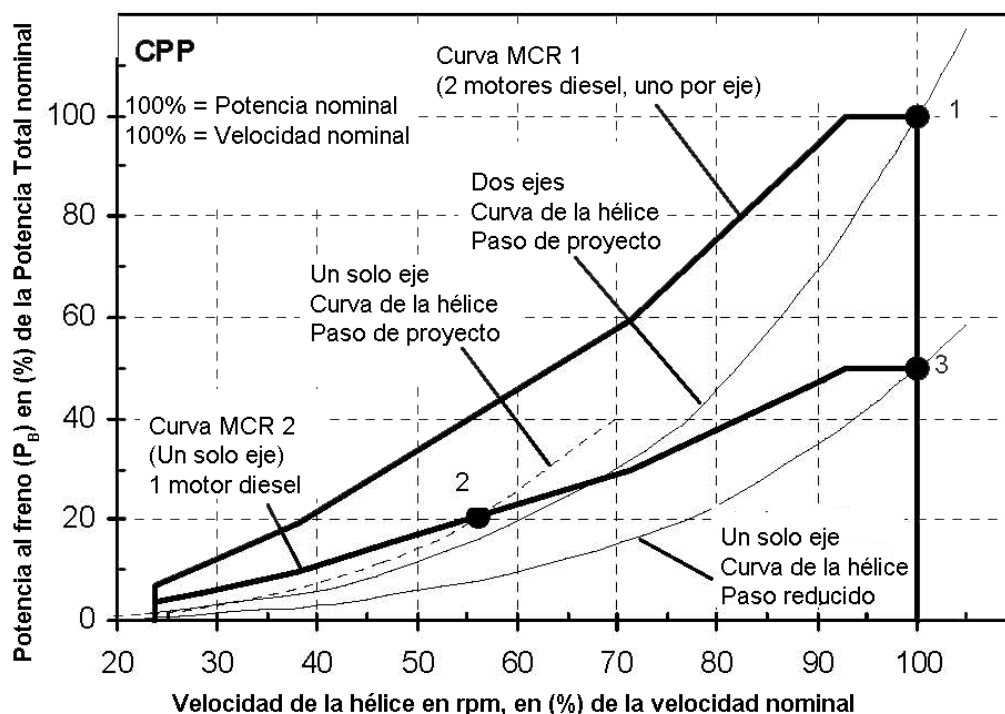


Fig. 56 Ejemplo: Funcionamiento con un solo eje con hélice de palas orientables (CPP)