

Review: Evaluation of the current control logic model for a CODLAG type naval propulsion plant.

Review: Evaluación del modelo actual de la lógica de control para una planta de propulsión naval tipo CODLAG.

Autores:

Chafuelán Vera, Ariel Humberto
UNIVERSIDAD LAICA ELOY ALFARO DE MANABÍ
Manta – Ecuador
Ingeniero Mecánico Naval



arielchafuelan1999@gmail.com



<https://orcid.org/0000-0002-9526-5268>

Zambrano Vera, Folke
UNIVERSIDAD LAICA ELOY ALFARO DE MANABÍ
Manta – Ecuador
Docente



folkezave@hotmail.com



<https://orcid.org/0000-0002-3889-9141>

Citación/como citar este artículo: Chafuelán Vera, A. y Zambrano Vera, F.(2022). Review: Evaluación del modelo actual de la lógica de control para una planta de propulsión naval tipo CODLAG. MQRInvestigar, 6(4), 828-848.

<https://doi.org/10.56048/MQR20225.6.4.2022.828-848>

Fechas de recepción: 15-NOV-2022 aceptación: 12-DIC-2022 publicación: 15-DIC-2022



<https://orcid.org/0000-0002-8695-5005>

<http://mqrinvestigar.com/>

RESUMEN

El documento presenta un enfoque matemático – simulado y bibliográfico para simular el comportamiento de una planta de propulsión tipo CODLAG en situaciones normales o transitorias, junto a ello las condiciones de diseño que se utilizará para el entorno del sistema de control y el estudio general de las plantas de propulsión de barcos. Esta clase de barcos tiene un nuevo concepto de planta de propulsión: el tipo combinado “*diésel, electric and gas*” (CODLAG), con engranaje único y dos líneas de eje. En el documento se informa una comparación entre los resultados de los transitorios de simulación, los datos de referencia para evaluar la relación óptima en el uso de recursos y prevención de fallas.

El modelo de simulación se realizará mediante el uso de plataformas de software y hardware que permitan el estudio del comportamiento del buque en condiciones transitorias (aceleración, desaceleración, etc.) y en estado estacionario (navegación a velocidad constante), así como el análisis de la interacción mutua entre todos los elementos involucrados.

Palabras Clave: CODLAG, lógica de propulsión, simulación, transitorio, estacionario.

ABSTRACT

The paper presents a mathematical approach to simulate propulsion system behavior during normal situations and design conditions to be used for control system environment and general study of ship propulsion plants. This class of ships has a new concept of propulsion plant: the combined type of electric and diesel gas (CODLAG), with single gear and two shaft lines. The document reports a comparison between the results of the simulation transients and the reference data to evaluate the optimal relationship in the use of resources and failure prevention.

The simulation model will be carried out through the use of software and hardware platforms that allow the study of the ship's behavior in transient conditions (acceleration, deceleration, etc.) and in a stationary state (navigation at constant speed), as well as the analysis of the mutual interaction between all the elements involved.

Keywords: CODLAD, simulation, propulsion logic, transient, stationary.

INTRODUCCIÓN

El diseño y la optimización de las plantas de control de la propulsión es una parte crucial del diseño de barcos (1). De hecho, el comportamiento de la planta de propulsión está muy influenciado por la dinámica del sistema de control (2). La aceleración, la desaceleración, la parada forzosa, los giros bruscos son algunos ejemplos de condiciones transitorias que una planta de propulsión debe soportar mientras mantiene un rendimiento óptimo sin reducir la seguridad y la fiabilidad del barco. En este proyecto de investigación se discuten la metodología y los modelos de simulación necesarios para diseñar las lógicas de control de propulsión para una innovadora planta de propulsión CODLAG. La metodología se basa en el RT-HIL y consiste en el desarrollo de las lógicas de control de propulsión en un entorno virtual (3).

En los últimos años, los sistemas de propulsión de barcos han experimentado importantes innovaciones para satisfacer las necesidades del propietario del barco, satisfacer las normas obligatorias en términos de seguridad e impactos medioambientales y reducir el consumo de fuel-oil. La creciente complejidad de estos nuevos sistemas de propulsión marina, como el objetivo CODLAG de este estudio, incluye diferentes tipos de motores con potencias y velocidades de rotación muy diferentes. Esto conduce necesariamente al desarrollo de estrategias de control de propulsión específicas (4). El control de propulsión debería diseñarse para gestionar un sistema tan complejo de forma segura y económica, en todas las condiciones previsibles. Además, los sistemas de control de la propulsión también deben poder garantizar el mejor rendimiento de la instalación de propulsión en todas las condiciones; que es lo que se pretende poder alcanzar.

El tiempo total de diseño se reduce y esto permite minimizar el tiempo y el costo relacionado de las pruebas en el mar para la puesta en servicio final. Gracias a esta metodología, es posible probar el sistema de control en diferentes condiciones operativas fuera de línea, en tierra en la oficina, sin riesgos para el sistema real.

El enfoque mencionado anteriormente ha demostrado su eficacia técnica y económica para el diseño de sistemas marinos, especialmente cuando no existe experiencia (Altosole et al., 2007; Johansen y Sorensen, 2009; Michetti et al., 2010).

Con respecto a la experiencia de los autores anteriores y la literatura de vanguardia, la principal innovación es el simulador de propulsión de barcos altamente no lineal capaz de ejecutarse en tiempo real (1) (3) (5). El objetivo del enfoque de simulación propuesto es describir adecuadamente el comportamiento global del buque mediante modelado de la maniobrabilidad del barco, la planta de propulsión y el sistema de control en una plataforma de simulación que contiene términos de interacción mutua (enfoque de sistema de sistemas). Este modelado complejo permite una retroalimentación realista de los sistemas de barcos que de otro modo no estaría disponible con las técnicas de simulación estándar.

Los modelos matemáticos de barcos y maquinarias que serán utilizados dentro del desarrollo de la investigación y pruebas están completamente validados por Martelli et al. (2014a, 2014b), donde se ha probado la fidelidad y completitud de los diversos submodelos matemáticos.

METODOLOGÍA

La planta propulsora, objeto de este estudio, es un sistema CODLAG (Combined Diesel Electric And Gas). En un sistema CODLAG, como se ve en la Ilustración 1, los motores eléctricos se usan a bajas velocidades, la turbina de gas se usa a velocidad media-alta y ambos motores primarios se usan para alcanzar la velocidad máxima o la potencia máxima, si es necesario. Con este tipo de combinación, un barco tiene una disponibilidad de energía más flexible. La máxima potencia está garantizada por una turbina de gas, que está unida al eje de la caja de engranajes de entrada. Los motores eléctricos, alimentados por generadores diésel, están montados directamente en las líneas de eje. Está presente un tipo particular de caja de cambios (X-cross): una entrada, doble salida, con una doble etapa de reducción. Dos líneas de ejes impulsan dos hélices de paso controlable (6).

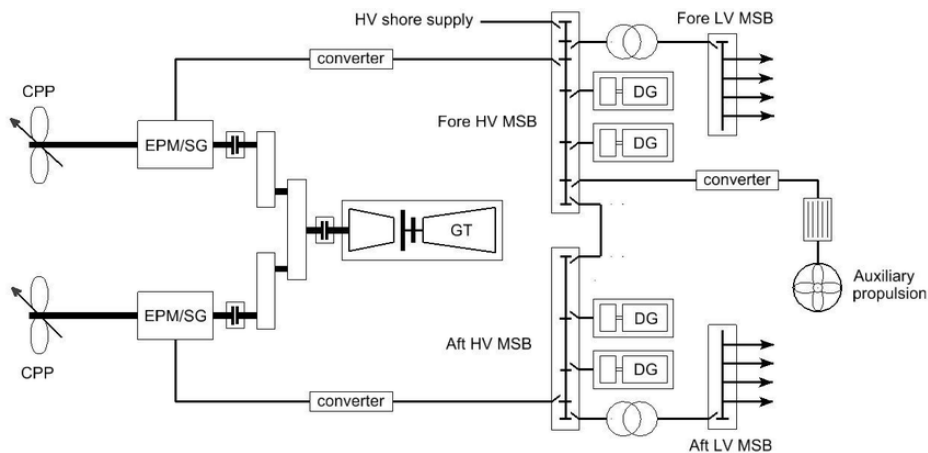


Ilustración 1. Planta de propulsión

Fuente: Martelli, (2012), Reiche (2019), elaboración propia. GENESIS 1.3: a fully 3D time-dependent FEL simulation code

Un resumen de los principales elementos presentes:

- Una turbina de gas
- Dos motores eléctricos
- Cuatro generadores diésel
- Una caja de cambios
- Dos hélices de paso controlable

Turbina de gas

La elección de un modelo de turbina de gas adecuado depende en gran medida del sistema particular que se esté investigando. En el primer enfoque, el modelo matemático de la turbina de gas se ha estructurado en una disposición modular, en la que cada módulo, que representa un componente específico del motor (es decir, compresor, turbina de alta presión, turbina de potencia, cámara de combustión, etc.), se modela mediante mapas de rendimiento de estado estacionario, dependiente del tiempo, ecuaciones de energía y masa, y ecuaciones algebraicas no lineales (7). Las principales ecuaciones diferenciales a resolver en el dominio del tiempo se refieren tanto a los parámetros mecánicos como termodinámicos del motor. En particular, los procesos de fluidos de trabajo se rigen por la ecuación de continuidad:

$$\frac{d(\rho V)}{dt} = M_i - M_o$$

Ecuación. 1 Ecuación de continuidad

Y por la siguiente ecuación de energía:

$$\frac{du}{dt} = \frac{1}{\rho V} (M_i h_i - M_o h_o) + M_f LHV$$

Ecuación. 2 Ecuación de energía.

La dinámica de los ejes giratorios, tanto para alta como para baja turbinas de presión, están determinadas por la ecuación de momento dinámico:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} (Q_m - Q_{br})$$

Ecuación. 3. Ecuación de momento dinámico

Desafortunadamente, las ecuaciones matemáticas introducidas para el modelado numérico de turbinas de gas marinas no suelen ser muy confiables con cargas de motor muy bajas. Para superar esta dificultad, se han desarrollado métodos más efectivos basados en pruebas de fabricantes de motores utilizando mapas de turbinas. La potencia del motor se puede simular mediante una superficie numérica que depende de la velocidad del motor y del caudal de consumo de combustible.

En particular, en la Ilustración 2 se reporta la superficie de potencia de una turbina de gas. La superficie ha sido modelada sobre el suelo de la carga, diagrama proporcionado por el fabricante del motor. A partir de estos datos, es posible obtener la potencia (o par) de la turbina de gas a través de una interpolación superficial. El flujo de combustible es evaluado por el controlador de la turbina de gas que transforma el punto de ajuste de rpm en un punto de ajuste de flujo de combustible.

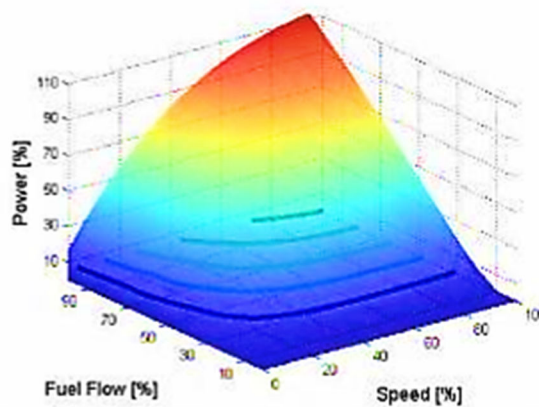


Ilustración 2. Superficie de potencia de la turbina de gas.

Fuente: Martinelli, 2020

En el modelo de turbina de gas también se ha incluido un submodelo que representa el regulador interior de la maquinaria conocido como Sistema de Control de Turbina (TCS). El TCS está en el bucle de segundo nivel jerárquico. Las principales variables controladas son, en analogía con el supervisor de control de propulsión: el par, el régimen de revoluciones, la temperatura y el flujo de combustible (3).

Motor de propulsión eléctrico

Los modelos de motores eléctricos utilizados para los análisis del sistema de propulsión se pueden agrupar en dos tipos de modelos: modelos no físicos y modelos físicos. Mediante la primera opción de enfoque, que se emplea en este trabajo, el motor se modela mediante ecuaciones simples para configurar el comportamiento del motor de propulsión eléctrica; por lo tanto, es necesario identificar algunos parámetros de los datos del fabricante del motor.

Mediante esta técnica, solo se representan el par y las rpm del motor sin ninguna referencia a las variables eléctricas de la máquina. Este enfoque es adecuado solo para una simulación de alto nivel. El par se calcula según una acción proporcional e integral sobre el error de velocidad (1)). En el proceso de simulación, se compara la velocidad real del motor con la velocidad del motor comandada por el gobernador, y luego el torque del motor es ajustado por una acción no lineal para lograr y mantener la velocidad deseada del motor.

Se representan las protecciones de par y sobre velocidad para garantizar un comportamiento más realista.

Cuerpo de transmisión

Debido a la simetría axial de la línea de transmisión (caja de cambios, eje y hélice) y despreciando la deformación de la línea del eje, el sistema se puede estudiar como un sistema holonómico¹ con un grado de libertad: el ángulo de la línea del eje. La línea del eje, que se muestra en la Ilustración 3. Dinámica de la línea de ejes. Dinámica de la línea del eje, se ha modelado utilizando la ecuación de Lagrange:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{T}{\partial \dot{\Phi}} \right) - \frac{T}{\partial \Phi} = Q$$

Ecuación. 4. Ecuación de Lagrange

La tensión Q es la suma de los momentos que actúan sobre la línea de transmisión.

$$Q(t) = \sum_{i=1}^{n_{eng}} Q_{eng}(t) - Q_{fric}(t) - Q_P(t)$$

Ecuación. 5 Tensión Q, suma de los momentos.

El par requerido de la hélice se evalúa utilizando procedimientos ilustrativos y el par debido a la fricción se evalúa a través de una tabla que representa datos experimentales en función del régimen de revolución y potencia entregada; la evaluación del par motor se muestra en el punto ***Turbina de gas***.

Dado que el sistema se considera como un cuerpo rígido de eje fijo, la energía cinética total es la suma algebraica de la energía cinética de cada componente:

¹ Un sistema es holonómico cuando el número de grados de libertad controlables es igual a los grados totales de libertad (30)

$$T = \frac{1}{2} \omega I_G(\omega) = \frac{1}{2} \left(\sum_{i=1}^n I_i \omega_i^2 \right)$$

Ecuación. 6. Suma algebraica de la energía cinética

Sustituyendo la expresión de Q y T en la ecuación de Lagrange, expresada en términos del régimen de revolución de la línea de eje, obtenemos:

$$I_s \dot{\omega}_s(t) = \sum_{i=1}^{n \text{ eng}} Q_{eng}(t) - Q_{fric}(t) - Q_P(t)$$

Ecuación. 7. Régimen de revolución de la línea de eje

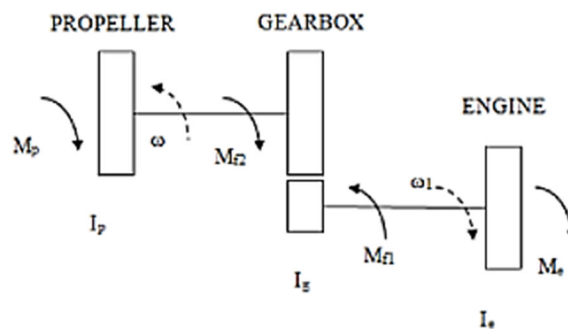


Ilustración 3. Dinámica de la línea de ejes.

Control de propulsión

La creciente demanda de transporte marítimo rápido y económico de pasajeros y mercancías está dando un renovado interés a varias innovaciones y desarrollos que establecerán los nuevos estándares para los próximos diseños de barcos.

Las principales innovaciones ya se han centrado en los sistemas de propulsión, y han sido diseñados para cumplir con las normas obligatorias de seguridad e impacto ambiental y para reducir el consumo de fuel oil (8). Además, la creciente complejidad de estos nuevos sistemas de propulsión marinos, que a menudo incluyen motores con diferentes niveles de potencia y/o de diferentes tipos de motores (especialmente en las marinas), conduce necesariamente al desarrollo de sistemas de control de propulsión dedicados que sean capaces de gestionar dichos sistemas.

En algunos casos, los sistemas de control de propulsión según (9) también deben poder garantizar el máximo rendimiento de la planta de propulsión. Normalmente se dispone de dos técnicas diferentes para desarrollar y diseñar un sistema de control: el lazo abierto y el lazo cerrado. El sistema de control de lazo abierto está compuesto por el controlador (PLC) y las líneas y maquinaria de transmisión. Mediante este enfoque, la variable a gestionar se establece en un valor específico, pero dado que no hay comparación con el valor del campo, no es seguro que la variable controlada asuma el valor deseado.

En el sistema de control de lazo cerrado, los elementos principales del sistema son el controlador (PLC) y las líneas de transmisión, maquinaria y sensores. La variable controlada es regulada (punto de ajuste) por una comparación continua con los datos provenientes del campo (retroalimentación).

Por lo general, en el diseño de sistemas de control de propulsión marina, se prefiere el bucle cerrado porque es más preciso (10). El motivo principal es el hecho de que el buque opera en un entorno hostil, el mar, en el que las condiciones ambientales pueden variar rápidamente con una magnitud que no se puede predecir. Utilizando el enfoque de circuito cerrado, la información sobre el rendimiento se mide y se utiliza para corregir el comportamiento del sistema.

Las rampas

Las rampas son un conjunto de constantes definidas para cada valor alcanzado por la palanca de pasos. Las rampas modulan la señal procedente de la palanca del telégrafo², que suele ser un escalón. Las rampas son diferentes para el paso y las rpm, para la aceleración y la desaceleración, y también para los distintos modos de propulsión. En la Ilustración 4 se muestra en forma adimensional el conjunto de rampas de rpm en modo navegación para una maniobra de aceleración.

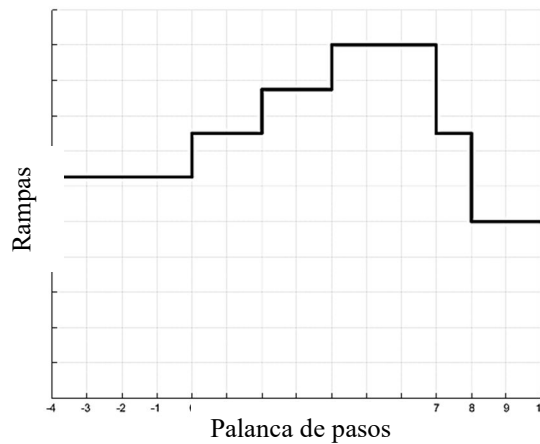


Ilustración 4. Ejemplo de rampas

El valor de las rampas es el coeficiente angular, que se asigna a la señal variable en el tiempo que ingresa al bloque (la unidad de los valores constantes de las rampas es 1/s o Hz) (1). De esta forma, la señal que llega a la maquinaria es más gradual y así se evita la posibilidad de recibir señales con grandes discontinuidades, que pueden generar problemas a los PLC. En la Ilustración 5 se muestran los efectos del bloque de rampas en el dominio del tiempo. El estudio de estos valores ha sido posible gracias a una intensa campaña de simulación a través de la cual se han seleccionado y probado los valores adecuados. Los valores se consideran apropiados para que, durante maniobras cerradas, las máquinas sean capaces de evitar cortes en voladizo debido a las protecciones del sistema de control. Todos estos valores se implementan en un bloque adecuado dentro de la estructura del controlador.

² El sistema de telégrafo es un sistema utilizado para la comunicación entre el puente y el equipo de ingenieros en la sala de control de motores del barco, seleccionando una a la vez de un conjunto de opciones preestablecidas (13).

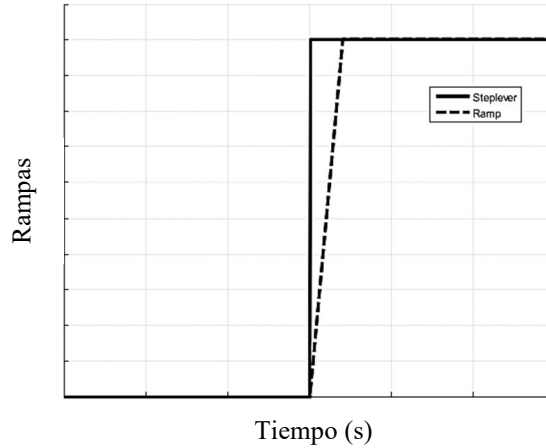


Ilustración 5. Efecto de rampas vs. tiempo.

Combinaciones

La regulación de la velocidad del barco se realiza modulando las rpm y/o el paso de la hélice. Las curvas combinatorias, un ejemplo de las cuales se muestra en la Ilustración 6, proporciona el rendimiento óptimo de la nave en los distintos modos de propulsión. Con respecto a este importante tema, es apropiado señalar que las curvas combinatorias se estudian para minimizar el consumo de combustible (11).

La señal, modulada por las rampas, se convierte en un valor de referencia para los regímenes de giro de eje y paso de hélice mediante dos tablas en las que se muestran los puntos de equilibrio en estado estacionario para los regímenes de giro de eje y paso de hélice (en función de la posición de la palanca). Durante la gestión normal, cuando todas las variables controladas están dentro de los límites permitidos, el set-point tanto de rpm como de pitch es generado por un algoritmo PID basado en el error entre el valor deseado y el monitorizado:

$$e(t) = \text{theresold}(t) - \text{feedback}(t)$$

Ecuación. 8. Set-point

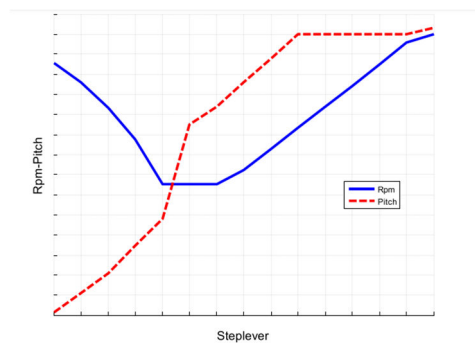


Ilustración 6. Curvas combinadas.

$$\text{setpoint}(t) = K_p e(t) + K_I \int e(t) dt + K_D \frac{d}{dt} e(t)$$

RESULTADOS

Descripción del sistema

Dos hélices de paso controlable (CPP) son impulsadas a través de una caja de cambios conectada en cruz por una turbina de gas (GT), una LM 2500 General Electric/Avio, 32 MW a 3600 rpm. Se pueden utilizar dos motores eléctricos de propulsión (EPM Jeumont, 2 x 2,2 MW), montados directamente en las dos líneas de eje, para las bajas velocidades del buque durante el funcionamiento silencioso o junto con la turbina de gas para obtener la máxima potencia. El uso de los dos tipos diferentes de motores primarios (EPM y/o GT) está asegurado por dos embragues entre la caja de cambios y los dos EPM y por otro embrague entre el GT y la caja de cambios. La energía eléctrica es suministrada por Generadores Diésel Isotta Fraschini y la energía eléctrica puede ser producida en modo GT por los dos EPM, trabajando como Generadores de Eje (SG).

El controlador principal está conectado a las unidades operativas de control (CPP, EPM, PLC de engranajes reductores y TCS de turbina de gas) mediante la unidad de E/S remotas.

Simulación

El simulador consta de un conjunto de ecuaciones diferenciales, ecuaciones algebraicas y tablas que representan los diversos elementos del sistema de propulsión y el comportamiento de maniobrabilidad del buque. Se modelan los siguientes elementos:

Automatización, motor y motores, hélices, mecanismos de cabeceo, acoplamientos, timones; y este modelo a su vez incluye interacciones mutuas entre los elementos.

La resolución numérica de las ecuaciones diferenciales de movimiento permite obtener historias temporales del comportamiento del sistema de propulsión (potencia, par, RPM, etc.) y de la maniobrabilidad (en particular, los tres grados de libertad considerados son el impulso, el balanceo y la guiñada). Este tipo de modelos de simulación de parámetros agrupados han demostrado su validez técnica en trabajos anteriores, incluida la validación en el mar (3).

Para el propósito de este documento, el componente de propulsión eléctrica y las partes de gestión pertinentes se simulan un poco.

La Ilustración 8 muestra el esquema del simulador CODLAG.

La dinámica de la planta de propulsión está representada por las dos ecuaciones de movimiento de las dos líneas

de ejes del tipo:

$$2\pi J_p \frac{dn(t)}{dt} = \sum_{i=1}^I Q_{motor(i)}^{(t)} - \sum_{j=1}^J Q_{carga(j)}^{(t)} - Q_{fricción}^{(t)}$$

Ecuación. 9. Ecuaciones de movimiento de las dos líneas

La maniobrabilidad del barco está representada por las ecuaciones de movimiento de 3 grados de libertad (DOF) en el plano horizontal:

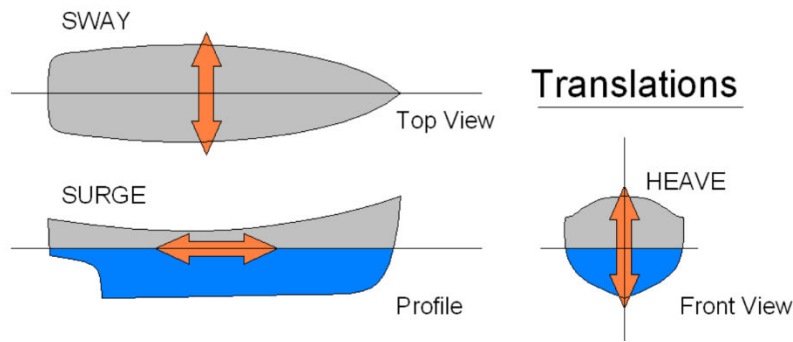


Ilustración 7. Impulso, Balanceo y guiñad.

$$\text{Impulso (surge): } \sum F_x = m(\dot{u} - vr)$$

$$\text{Balanceo (sway): } \sum F_y = m(\dot{v} - ur)$$

$$\text{Guiñada (yaw): } \sum M_z = I_{zz}\dot{r}$$

Las fuerzas y los momentos del casco se evalúan a partir de series de regresión habituales que se probaron en detalle en (12). En particular, las fórmulas de regresión dedicadas a los vasos de doble tornillo se obtuvieron a partir de los modelos de Clarke e Inouse con ajuste menor para considerar el modelo con ajuste menor para los resultados de las pruebas del modelo. En cuanto a las fuerzas de timón, se adopta el modelo descrito en.

Para cada elemento ilustrado en la Ilustración 8, se han desarrollado modelos numéricos con diferente nivel de precisión, teniendo en cuenta el objetivo general de un buen equilibrio entre la fidelidad de los resultados de la simulación y el rendimiento del código.

Las hélices se modelan por sus características de aguas abiertas en condiciones de estado estable (K_T y K_Q frente a J en diferentes ángulos de pala).

Los EPM se modelan considerando el par máximo y las diferentes estrategias de control, es decir, velocidad constante o potencia constante.

La caja de cambios se tiene en cuenta solo por la relación de reducción y la inercia; se consideran acoplamientos para modelar todas las posibles configuraciones de propulsión.

El modelo es capaz de considerar también configuraciones con líneas de eje conectadas cruzadas, lo que da como resultado una única ecuación diferencial de movimiento con dos pares impulsores y dos pares de hélices (más pérdidas por fricción debidas a los acoplamientos y cojinetes mecánicos de las líneas de eje).

El comportamiento asimétrico de las líneas de ejes durante la maniobra se tiene en cuenta mediante la introducción de variaciones asimétricas tanto de las fracciones de estela w como del factor de deducción de empuje t .

En particular, durante las maniobras, los valores de los coeficientes Δw y Δt se calculan para cada eje, en función de la velocidad del barco y el ángulo de deriva del barco; se suman a los valores en movimiento rectilíneo, obtenidos de las pruebas habituales de autopropulsión. Como consecuencia, el valor de J es diferente para los ejes internos y externos, por lo que se obtendrán valores de K_T y K_Q diferentes.

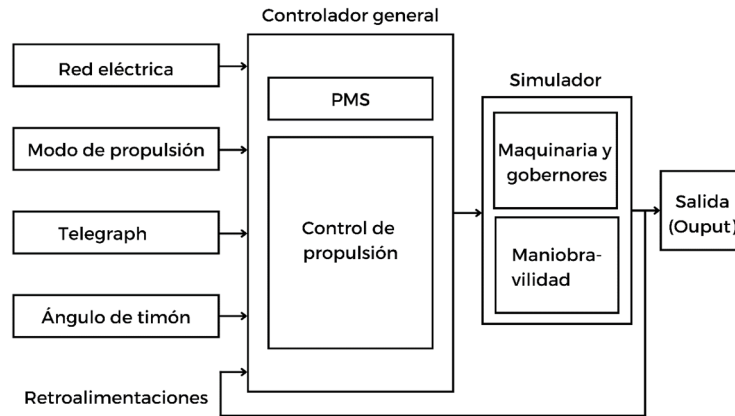


Ilustración 8. Modelo de propulsión y maniobra.

Fuente: Elaboración propia

En náutica, el telégrafo de un buque, es un dispositivo instalado en el puente de mando con una réplica en la sala de máquinas o en cubierta, por medio del cual se transmiten órdenes y/o información entre ambos, seleccionando una a la vez de un conjunto de opciones preestablecidas (13).

La Ilustración 9 muestra el esquema funcional del Controlador del Sistema de Propulsión. Se han probado cinco tipos de esquemas de control mediante simulación. Las entradas principales son la posición de la palanca del telégrafo y el modo de propulsión (navegación, maniobra, etc.), ambos seleccionados por el operador. Las salidas principales del controlador son: punto de ajuste de paso de las hélices, punto de ajuste de GT, punto de ajuste de EPM. Los bloques de la Ilustración 9 representan las funciones principales.

El cálculo del punto de consigna del motor incluye un regulador PI basado en la velocidad del eje y una protección GT basada en los pares máximos. El cálculo del punto de ajuste del paso de la hélice se basa en la curva del combinador adaptativo e incluye la reducción del paso para evitar la sobrecarga del eje. El equilibrio de par entre las líneas de eje evita la sobrecarga de la caja de cambios.

La estrategia de control descrita anteriormente representa el control de propulsión de "alto nivel". Además, cada subsistema principal (es decir, el motor, el motor eléctrico, la hélice) tiene su propio controlador (modelado en el bloque de maquinaria y gobernadores) que opera simultáneamente con el control de "alto nivel".

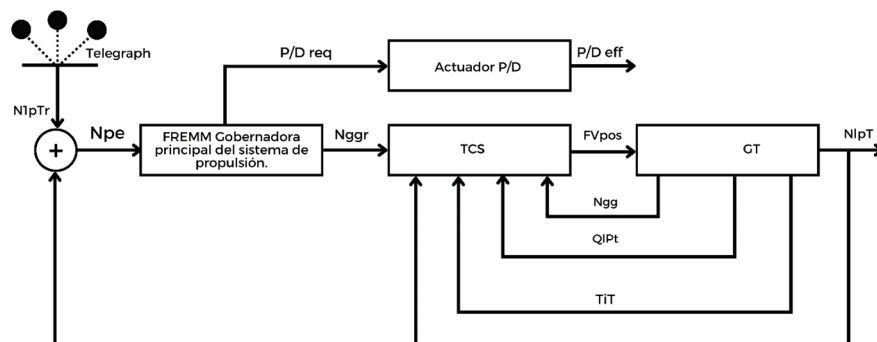


Ilustración 9. Esquema de control de propulsión en modo GT.

Turbina de gas

El modelo matemático de turbina de gas (GT) se basa en el método de volúmenes entre componentes (7). Este esquema de cálculo se basa en un enfoque termodinámico para la simulación de componentes de turbinas de gas, como consecuencia durante los transitorios se considera la acumulación de masa y energía en los volúmenes GT mediante las ecuaciones dinámicas de energía y continuidad, aplicadas a los volúmenes intercomponentes GT.

El enfoque termodinámico para el modelo de simulación GT es más importante para el desarrollo del simulador TCS, porque eventualmente los valores de sobredimensionamiento en los parámetros GT, causados por la acumulación de masa, energía y momento en los transitorios rápidos, pueden reproducirse con precisión con este tipo de simulación GT.

El modelo GT está estructurado en una disposición modular. Cada módulo es pertinente a un componente GT (es decir: compresor, turbina, cámara de combustión, etc.). En los módulos de compresores y turbinas se utilizan los mapas de rendimiento de estado estacionario (14). El módulo de combustión se modela como una capacidad adiabática³, teniendo en cuenta la acumulación de masa y energía dependiente del tiempo. En el módulo de dinámica de ejes, la variación temporal de la velocidad angular del eje se determina mediante la clásica ecuación de equilibrio dinámico de ejes.

El Sistema de Control de Turbina (TCS en la Ilustración 10) gestiona la turbina de gas LM 2500 para obtener el valor de velocidad de la hélice requerida desde la posición del telégrafo. El modelo TCS se desarrolla de acuerdo con (15). La carga de la turbina de gas se correlaciona con la velocidad del generador de gas GT; el valor requerido de este parámetro (N_{gg} en la Ilustración 10) provino del controlador de propulsión FREMM, el TCS gestiona la válvula de combustible (FV_{pos} en la Ilustración 10) mediante un esquema de control PID.

Al mismo tiempo, el TCS verifica una serie de parámetros de GT (principalmente: las velocidades del generador de gas y de la turbina de potencia N_{gg} y N_{PT} respectivamente, el par del eje de la turbina de potencia Q_{PT} y la temperatura intermedia de los gases de la turbina T_{IT}) para no exceder sus correspondientes valores máximos admisibles.

Las señales generadas por todos los controladores TCS PID se comparan y se adopta el valor mínimo de la señal para la gestión de la válvula de combustible. En las condiciones normales de trabajo de GT, el valor mínimo de las señales de los controladores PID es el del controlador N_{gg} .

Configuración del sistema de control

Para una configuración preliminar de TCS, se simula un banco de pruebas como se indica en el esquema SIMULINK de la Ilustración 10.

³ Proceso termodinámico en el que el sistema no intercambia calor con su entorno.

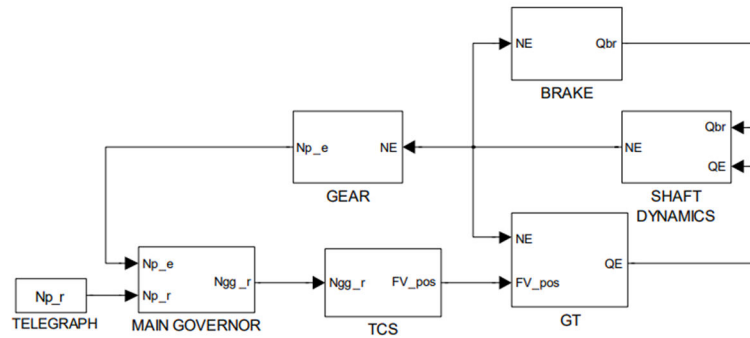


Ilustración 10. Banco de pruebas para el ajuste preliminar de TCS

En este simulador se mantienen los componentes originalmente de la planta CODLAG: telégrafo, gobernador principal, TCS, GT y engranaje, mientras que los otros simuladores de componentes de la planta originalmente de propulsión del buque: hélice y casco, con la inercia pertinente del buque, se sustituyen por un freno cuya ley de par es una función cuadrática de la velocidad del eje de la hélice. Este banco de pruebas se utiliza para comparar los resultados de los transitorios del modelo termodinámico GT, con y sin regulador TCS, con un modelo simulador de GT proporcionado por el fabricante de GT (AVIO), que incluye también el sistema TCS.

La Ilustración 11 muestra la comparación de los resultados transitorios referidos a una variación del telegraph escalonado entre 50 y 100%. En particular, la figura 2 a continuación muestra que el TCS desarrollado mantiene la temperatura intermedia (TIT) de las turbinas GT en su valor máximo corregido, no es el caso del modelo termodinámico GT sin TCS.

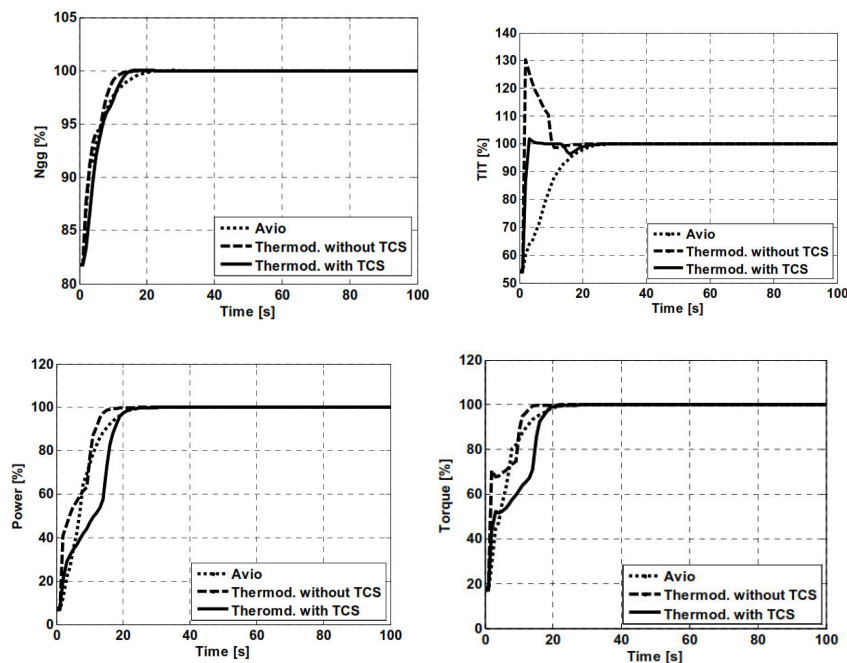


Ilustración 11. Telegraph 50 a 100 % Paso de prueba transitoria Banca Modelos de turbina de gas (comparación de resultados)

Fuente: Elaboración propia

Como se muestra en la Ilustración 11, existe una conformidad de resultados sustanciales entre el modelo termodinámico GT con TCS y el modelo AVIO; Se observa una correspondencia de resultados análogos en otros transitorios de aceleración - desaceleración. Aún de la misma figura, se puede observar la influencia del gobernador de TCS en los resultados del simulador termodinámico GT.

Resultados generales

El modelo de simulación CODLAG, incluido el gobernador TCS GT desarrollado, se prueba con una serie de simulaciones de transitorios de barcos. En las siguientes figuras se presentan los resultados de un transitorio generado por un telégrafo de paso con variación entre 50 a 100%. A pesar de la criticidad de la maniobra, todos los datos de GT y de planta monitorizados se mantienen en sus respectivos intervalos de valores corregidos.

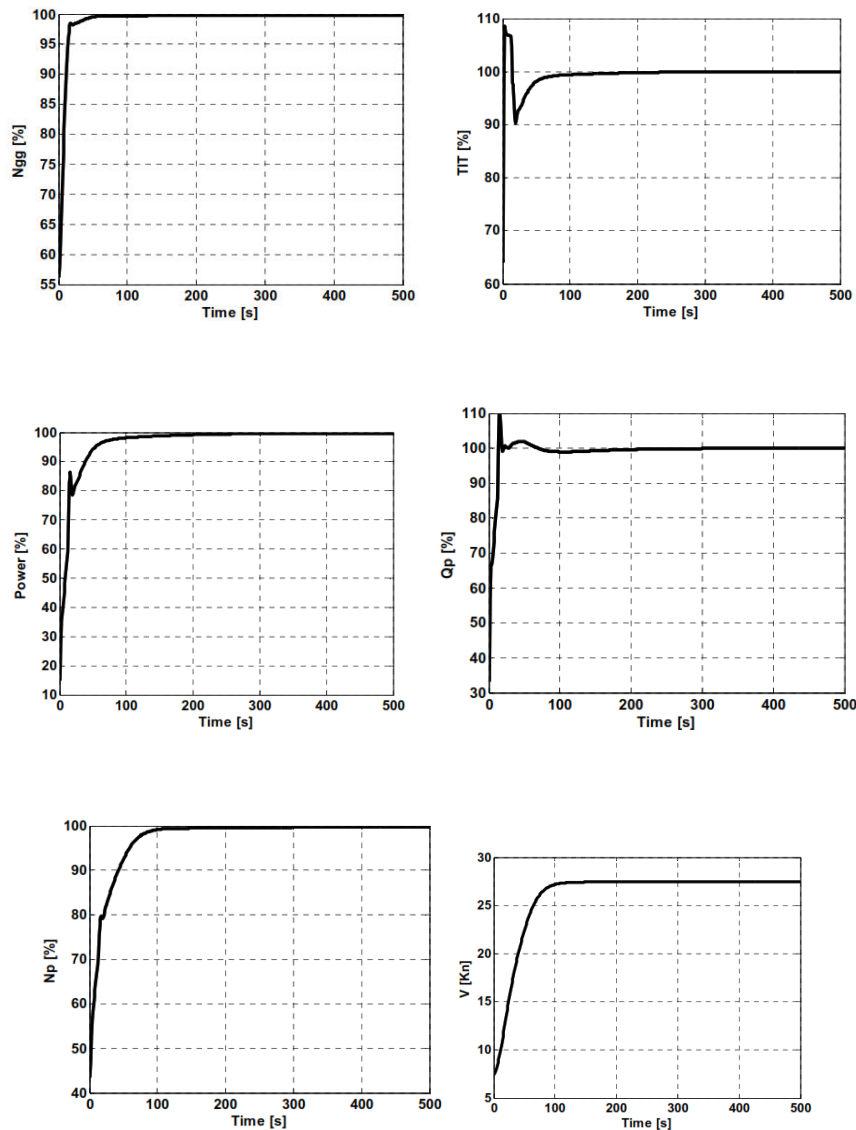


Ilustración 12. Telégrafo 50 a 100 % Resultados de simulador de Codlag transitorio

DISCUSIÓN

- El enfoque de análisis del sistema actual, denominado (sistema de sistemas) permite el examen de la interacción mutua de todos los subsistemas involucrados (Turbina de gas, motor eléctrico, mecánico, rampas. Hélices y controladora). Esto permite evaluar y medir el uso óptimo de recursos para el funcionamiento correcto del sistema.
- Este tipo de simulación permite una retroalimentación realista de los sistemas de barcos que de otro modo no estaría disponible con las técnicas de simulación estándar haciendo posible la prevención de fallas anticipándose a las pruebas de mar.
- Se ha presentado un método de diseño para el sistema de control de propulsión de un buque de alta velocidad. El método, desarrollado para el portaaviones italiano Cavour que ha sido objeto de comparación del sistema, a pesar de la antigüedad del cálculo los resultados en simulación estuvieron dentro de los rangos permisibles. El procedimiento integra conocimientos básicos y el uso masivo de simulación numérica.
- El enfoque presentado puede producir grandes ventajas para las embarcaciones donde la complejidad y versatilidad del sistema de propulsión requiere una amplia gama de condiciones de operación que son difíciles de analizar con los métodos tradicionales.
- Se sugiere algunas mejoras conceptuales a las estrategias de control, usando las técnicas de simulación presentadas con su modularidad inherente. Estas mejoras podrían conducir a varios beneficios en el área de consumo mínimo de energía, mínimo ruido/cavitación de la hélice, evaluación general del estado de la propulsión.
- El diseño y la optimización del sistema de propulsión es una tarea crucial del diseño del barco. De hecho, el comportamiento del sistema de propulsión es un aspecto clave del comportamiento global de un barco.
- Las técnicas de simulación pueden ser muy efectivas para predecir el comportamiento de la planta de propulsión durante las condiciones de trabajo normales, así como durante las situaciones críticas. La simulación numérica brinda la posibilidad de prever, en la etapa de diseño, el comportamiento de la planta de propulsión de buques durante las maniobras y le da al diseñador la posibilidad de optimizar la elección de los parámetros del sistema (elección de un tono adecuado/r.p.m.)
- En futuros diseños hacer uso de la ley de combinación por la naturaleza de los sistemas de propulsión tipo CO, sumando la calibración del gobernador de motores, encantación de la línea del eje) para evitar sobrecargas o fallas mecánicas y mecánicas. Además, por simulación, es posible estudiar y optimizar el sistema de control de maquinaria.
- Con respecto al estado del arte actual, el enfoque propuesto considera el mecanismo CPP con más detalle, realizando un estudio del casco con 6DOF.

BIBLIOGRAFÍA

1. Altosole M, Figari M. Métodos simples efectivos para el modelado numérico de motores marinos en el diseño de sistemas de control de propulsión de barcos. In Journal of Naval Architecture and Marine Engineering; 2011: DOI 10.3329/jname.v8i2.7366. p. 129-141.
2. Benvenuto G, Campora U, Carrera G, Figari M. Un modelo modular de turbina de gas para estudios de propulsión de barcos: IMAM Conferences Vol1 ; 2005.
3. Altosole M, Benvenuto G, Campora U. Modelado numérico de los gobernadores de motores de una planta de propulsión CODLAG. In Actas de la 10.ª Conferencia Internacional sobre Ciencias y Tecnologías Marinas, Mar Negro; 2010; Marva, Bulgaria: ISSN: 1314-0957. p. 173 178.
4. Benesty J, Chen J, Huang Y, Cohen I. Pearson correlation coefficient. In Noise Reduction in Speech Processing Germany: Berlin/Heidelberg; 2009.
5. BT. Buenas Tareas. [Online].; 2014. Available from: <https://www.buenastareas.com/ensayos/Sistemas-De-Propulsi%C3%B3n-Naval-Mediante-La/55790112.html>.
6. Martinelli M. Marine Propulsion Simulation: DE GRUYTER OPEN; 2014.
7. Benvenuto G, Campora U. A Gas Turbine Modular Model for Ship Propulsion Studies. In Symposium on High Speed Marine Vehicles; 2005: HSMV, 7th.
8. Grupo Moldtrans. Moldtrans. [Online].; 2020. Available from: <https://www.moldtrans.com/principales-caracteristicas-del-transporte-maritimo/>.
9. Carrillo C, Caiza L. UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO. [Online].; 2015. Available from: <https://redi.uta.edu.ec/bitstream/123456789/13426/1/Tesis%20I.M.%20294%20-%20Caiza%20Lema%20Luis%20Fabi%20c3%a1n.pdf>.
10. Castaño S. Control Automatico. [Online].; 2020. Available from: <https://controlautomaticoeducacion.com/control-realimentado/lazo-abierto-y-lazo-cerrado/>.
11. Figari M, Guedes C. Reducción del consumo de combustible y emisiones de escape por control dinámico de cabeceo. In Análisis y Diseño de Estructuras Marinas; 2009; Lisboa, Portugal: ISBN/ISSN: 978-0-415-54934-9. p. 543-550.
12. Viviani M, Dubbioso G, Soave M, Notaro C. Hydrodynamic coefficients regressions analysis and application to twin screw vessels. In 13th Congress of Intl. Maritime Assoc. of Mediterranean; 2019; Estambul: INAM.
13. MPL Techma. MPL Techma Ltd. [Online].; 2015. Available from: <https://mpltechma.pl/files/attachment/content/31/engine-order-telegraph-en.pdf>.
14. Cohen H, Rogers GFC, Saravanamuttoo HIH. Gas Turbine Theory, Longman Scientific & Technical India: Pearson; 1987.

- 1 Tortarolo F. Marine Gas Turbine Control System Genova, Italy: WEGEMENT School Fast Ship Propulsion Plants, ISBN: 1 900 453 10 X; 2000.
5.
- 1 Schirinzi A, Cazzolla AP, Lovero R, Lo Muzio L, Testa NF, Ciavarella D, et al. New insights in laboratory testing for COVID-19 patients: looking for the role and predictive value of Human epididymis secretory protein 4 (HE4) and the innate immunity of the oral cavity and respiratory tract. Microorganisms. 2020.
6.
- 1 Bodnaruk , Rubis CJ. Acceleration Performance Analysis of a Gas Turbine Destroyer Escort. Journal of Engineering for Power. 1971.
7.
- 1 Campora U, Figari M. Numerical Simulation of Ship Propulsion Transients and Full Scale Validation. Journal of Engineering for the Maritime Environment. 2003;; p. Vol. 217.
8.
- 1 OPAL RT Technologies. OPAL RT Technologies. [Online].; 2021. Available from: <https://www.opal-rt.com/hardware-in-the-loop/>.
9.
- 2 Martínez I. Isidoro Martínez UPM. [Online].; 2019. Available from: <http://imartinez.etsiae.upm.es/~isidoro/bk3/c17/Marine%20propulsion.pdf>.
0.
- 2 Villa R, Pernas J. Propulsión CODOG en buques de guerra. Dialnet. 2020;; p. N°. 994, 2020 , ISSN 0020-1073.
1.
- 2 Grupel. Grupel. [Online].; 2020. Available from: <https://grupel.eu/es/faqs/como-funciona-un-generador-diesel>.
2.
- 2 BAE Systems. Preguntas y respuestas con BAE Systems sobre la actualización del diseño de la fragata tipo 26 en Euronaval 2012. 2013.
3.
- 2 Sirius S, Pedram E, Rahimi M. SISTEMA DE PROPULSIÓN HÍBRIDO Bandar Abbas 1 PARA NUEVA GENERACIÓN DE BUQUES. 2014.
4.
- 2 Gaona E. UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PANAMÁ. [Online].; 2020. Available from: https://www.academia.edu/44142849/TIPOS_DE_PLANTAS_COMBINADAS_NAVALES.
5.
- 2 Massi E. Universidad Tecnológica Nacional F.R.B.A. [Online].; 2006. Available from: <https://es.slideshare.net/intronaal/turbinas-a-gas-aplicadas-a-la-propulsin-naval>.
6.
- 2 Rueda A. Propulsión naval con turbina de gas BILBAO: ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA BILBAO; 2014.
7.
- 2 HMN. Wiki HMN. [Online].: https://hmn.wiki/es/Combined_gas_and_steam#cite_note-1; 2019. Available from: https://hmn.wiki/es/Combined_gas_and_steam#cite_note-1.
8.

- 2 Endesa. Endesa. [Online].; 2021. Available from:
9. <https://www.fundacionendesa.org/es/educacion/endesa-educa/recursos/centrales-electricas-convencionales/central-termica-convencional-ciclo-combinado>.
- 3 Corgero I. Universidad Politécnica de Madrid. [Online].; 2018. Available from:
0. http://oa.upm.es/50487/1/TFG_IVAN_CORDERO_CONDE.pdf.
- 3 sc.ehu. Física Estadística y Termodinámica. [Online]. Available from:
1. <http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/estadistica/otros/cuasiestatico/cuasiestatico.htm>.
- 3 Montoya L. RICE PROPULSION. [Online]. Available from:
2. ricepropulsion.com/TNLS/SistemasdePropulsion.htm.
- 3 García R. Ingeniero Marino. [Online].; 2016. Available from:
3. <https://ingenieromarino.com/timon/>.
- 3 Viviani M, Altosole M, Cerruti M, Menna A. Marine Propulsion System Dynamics.
4. In 6th International Conference On High-Performance Marine Vehicles; 2008; Naples, Italia: Hiper.
- 3 Martelli M. Researchgate. [Online].; 2012. Available from:
5. https://www.researchgate.net/publication/290330797_Propulsion_control_optimisation_for_emergency_manoeuvres_of_naval_vessels.

NOMENCLATURA

CPP	Hélices de paso controlable
GT	Turbina de gas
EPM	Motores eléctricos de propulsión
SG	Generadores de Eje
TCS	Sistema de Control de Turbina
CO	Combinated
$CODLAG$	Combinated Diesel – Electric an Gas
M_i	Caudal másico de entrada
M_o	Caudal másico de salida
v	Volumen del componente GT
h	Entalpía
u	Energía interna
LHV	Poder calorífico inferior del combustible
Q_m y Q_{br}	Pares del motor y del freno
ω	Velocidad angular
Q	Tensión que actúa sobre el sistema
$T(t)$	Energía Cinética
Φ	Grado de libertad del sistema
Q_{eng}	Par Motor
Q_p	Par necesario de la hélice
Q_{fric}	Par debido a la fricción
n_{eng}	Número del motor
I_s	Inercia polar de la línea de transmisión
$\dot{\omega}_s$	Aceleración de la línea del eje
V	Velocidad de la embarcación
Tel	Posición de la palanca escalonada
Q_{stbd} y Q_{port}	Pares reales de los ejes de estribor y babor
$navmode$	Modo operativo real
n_{max} , n_{min}	Regímenes máximo y mínimo de revolución de la línea del eje
Q_{max} , Q_{min}	Ángulos de paso máximo y mínimo permitidos de la hélice
n	Régimen real de revolución de la línea del eje

Conflicto de intereses:

Los autores declaran que no existe conflicto de interés posible.

Financiamiento:

No existió asistencia financiera de partes externas al presente artículo.

Agradecimiento:

N/A

Nota:

El artículo no es producto de una publicación anterior, proyecto, etc.

