

Metodología de ahorro de consumo de combustible en embarcaciones mediante variables de programación dinámica.

Methodology for saving fuel consumption in ships through dynamic programming variables.

David Rizzo¹, Yusnier de la Rosa², Ariel Chafuelán³

RESUMEN:

El enrutamiento meteorológico del barco se define como un seguimiento óptimo de la ruta del barco con una velocidad y potencia del motor óptimas para un viaje por mar en función de los pronósticos meteorológicos en ruta y las características del barco. En este trabajo de titulación se utilizó el método de programación dinámica para optimizar la ruta, el cual se basa en el principio de optimalidad de Bellman, y compararlo con el método MEPC de la OMI, con el objetivo directo de minimizar el consumo de combustible del viaje en una embarcación, mientras que los movimientos del barco y el tiempo de llegada se gestionan a través de restricciones: por lo tanto, se utilizó una metodología de optimización de un solo objetivo para minimizar una función de costo (el consumo total de combustible). Como resultado se obtuvo que el método de programación dinámica permite un ahorro entre 4,5 y 6 % de combustible en condiciones meteorológicas previsibles con configuraciones de velocidad.

Palabras Clave: Consumo de combustible, enrutamiento meteorológico, eficiencia energética, programación dinámica.

Palabras claves: Arcilla, Propiedades mecánicas, resistencia a la compresión, granulometría.

Recibido 17 de noviembre de 2023; revisión aceptada 22 de marzo de 2024

ABSTRACT:

Ship's weather routing is defined as optimal following of the ship's route with optimal speed and engine power for a sea voyage based on en-route weather forecasts and ship characteristics. In this degree work, the dynamic programming method was used to optimize the route, which is based on the Bellman optimality principle, and compares it with the IMO MEPC method, with the direct objective of minimizing the fuel consumption of the vehicle. voyage in a vessel, while ship movements and arrival time are managed through constraints: therefore, a single objective optimization methodology was used to minimize a cost function (total fuel consumption). As a result, it was obtained that the dynamic programming method

¹ Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí, Manta, Ecuador, e1315254951@live.uleam.edu.ec

² Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí, Manta, Ecuador, yusnier.delarosa@uleam.edu.ec

³ Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí, Manta, Ecuador, e1750930776@live.uleam.edu.ec

allows saving between 4.5 and 6% of fuel in foreseeable weather conditions with speed configurations.

Keywords: *Fuel consumption, weather routing, energy efficiency. dynamic programming.*

Recibido 17 de noviembre de 2023; revisión aceptada 22 de noviembre de 2023

1. INTRODUCCIÓN

La organización marítima internacional ha elaborado un plan preliminar sobre cómo reducir las emisiones de gases de efecto invernadero relacionadas con el transporte marítimo en un 50 % para 2050 en comparación con los valores de emisiones de 2008 (1). Para alcanzar este objetivo, las emisiones del transporte marítimo están reguladas en MARPOL Anexo VI, que limita las emisiones de dióxido de carbono relacionadas con el transporte marítimo a través de un índice de diseño de eficiencia energética (EEDI) que se aplica a las nuevas construcciones (2). Además, el Anexo VI de MARPOL regula la emisión de óxidos de azufre, óxidos de nitrógeno y material particulado.

La eficiencia energética es un tema crucial en la gestión y operación de barcos. Una estrategia de rutas adecuada orientada al ahorro de combustible puede ser útil para reducir los costos de funcionamiento y las emisiones contaminantes, así como para aumentar la seguridad y la comodidad del viaje (3). Esta investigación presenta una metodología para la planificación de viajes de barcos basada en programación dinámica 3D.

Su objetivo es seleccionar los rumbos óptimos y el perfil de velocidad relacionado para un viaje de barco de acuerdo con una estrategia de consumo mínimo de combustible, sobre la base de la respuesta del barco a las condiciones de las olas y el viento deducidas de los mapas de pronóstico del tiempo.

El viaje del barco se parametriza como un proceso de decisión de múltiples etapas donde la optimización del combustible se lleva a cabo en un dominio de espacio-tiempo discreto y la solución óptima, en relación con los requisitos de tiempo de llegada y las restricciones relacionadas con el movimiento, se encuentra mediante un algoritmo de programación dinámica (4).

Los viajes marítimos están significativamente influenciados por las condiciones ambientales encontradas a lo largo de la ruta. En los últimos años, la disponibilidad cada vez mayor de datos meteorológicos confiables ha mejorado significativamente la seguridad de los viajes en barco, lo que permite a los operadores seleccionar rutas convenientes para evitar el mal tiempo y estimar mejor los tiempos de llegada de los barcos, así como los costos asociados. Además, hoy

en día se presta una mayor atención a las capacidades de navegación de los barcos, aumentando así la seguridad del barco también en condiciones climáticas adversas. Por otro lado, las condiciones meteorológicas de intensidad media no perjudican la seguridad del buque pero sí afectan al consumo de combustible y al confort a bordo.

El abordaje simultáneo de la eficiencia del buque, la ruta del buque, la seguridad del buque y los problemas de comodidad se pueden manejar numéricamente, en tiempo real, proporcionando una herramienta de apoyo a la toma de decisiones relevante. En este marco, las variables de optimización encuentran su aplicación, con el fin de brindar un apoyo significativo a la toma de decisiones; permiten integrar múltiples aspectos de un proceso y seleccionar de manera óptima con respecto al objetivo.

La seguridad humana y del barco, el consumo de combustible, la eficiencia energética, la comodidad de la tripulación y los pasajeros, el tiempo de viaje, el control de los retrasos: todos estos son aspectos diferentes que contribuyen a formular el objetivo general (función de costo) del viaje del barco. El “viaje óptimo” es el asociado al valor mínimo de la función de costo, dentro de las restricciones del problema

Se presentarán y discutirán los ensayos de simulación para un buque que navega por diferentes rutas típicas en el Mar, en una amplia gama de condiciones climáticas y utilizando mapas de pronóstico del tiempo de alta calidad.

Objetivo

Presentar y discutir una metodología para mejorar la eficiencia energética en función del consumo de combustible en embarcaciones mediante variables de programación dinámica

2. METODOLOGÍA

2.1. Método semiempírico de Kwon

La fórmula semiempírica de Kwon, es adecuada para barcos con un coeficiente de bloque (CB) entre 0,55 y 0,85 y un Número de Froude (NF) entre 0,05 y 0,30. Se utiliza para calcular en función de las condiciones del viento, pérdida causada por el movimiento del casco y la resistencia adicional de las olas; a partir de los resultados de Kwon, se puede saber que los resultados del cálculo de esta fórmula son más precisos.

La $\Delta v/v_1$ es el porcentaje de pérdida del barco calculado por la fórmula de Kwon.

$$\frac{\Delta v}{v_1} \cdot 100\% = C_\mu \cdot \Delta R \cdot C_F \quad (1)$$

Dónde en la fórmula anterior $\Delta v = v_1 - v_2$, donde v_1 es la velocidad de diseño del barco en aguas tranquilas y v_2 es la velocidad de navegación del barco en las condiciones del mar, seleccionadas ambas en m/s; se puede expandir a la siguiente forma:

$$v_2 = v_1 - \left(\frac{\Delta v}{v_1} \cdot 100\right) \cdot \frac{1}{100\%} \cdot v_1 \quad (2)$$

$$v_2 = v_1 - (C_\mu \cdot \Delta R \cdot C_F) \frac{1}{100\%} v_1 \quad (3)$$

v_1 en la C_F y la C_μ se puede expandir en una forma compuesta por el número de Froude, la distancia de escala vertical y la aceleración gravitacional $g = 9,80 \frac{m}{s^2}$, como sigue:

$$v_1 = Fr \cdot \sqrt{L_{pp} \cdot g} \quad (4)$$

Para aplicar las fórmulas anteriores, se requiere la escala de viento bushel BN que se muestra en las tablas a continuación, el factor de bloque requerido para calcular el factor de corrección de velocidad ΔR , el número de Froude y el factor de reducción de dirección sinóptica C_μ .

Tabla 1. Factor de rumbo.

FACTOR DE RUMBO C_μ		
Dirección de la onda	Meteorología y ángulo de proa β	Factor de reducción C_μ
Onda superior (onda irregular)	0°	$2C_\mu = 2$
Onda oblicua (onda irregular)	30° hasta 60°	$2C_\mu = 1,7 - 0,03(B_N - 4)^2$
Onda lateral (onda irregular)	60° hasta 150°	$2C_\mu = 0,9 - 0,06(B_N - 6)^2$
Onda de seguimiento (onda irregular)	150° HASTA 180°	$2C_\mu = 0,4 - 0,03(B_N - 8)^2$

Tabla 2. Coeficiente del tipo y forma de barco.

COEFICIENTE DEL TIPO Y FORMA DEL BARCO C_F	
Tipo de carga	Coeficiente de forma de la embarcación
Barcos que no sean de carga que estén completamente cargados	$0,5BN + \frac{BN^{6.5}}{(2,7\sqrt[3]{2})}$
Barcos que no sean de carga en condiciones de carga ligera	$0,7BN + \frac{BN^{6.5}}{(2,7\sqrt[3]{2})}$
Barco de carga totalmente cargado	$0,7BN + \frac{BN^{6.5}}{(22,0\sqrt[3]{2})}$

Tabla 3. Factor de corrección de velocidad.

FACTOR DE CORRECCIÓN DE VELOCIDAD ΔR		
Factor de bloque C_B	Condición de carga	Factor de corrección de velocidad ΔR
0,55	Normal	$1,7 - 1,4F_N - 7,4(Fn)^2$
0,60	Normal	$2,2 - 2,5F_N - 9,7(Fn)^2$
0,65	Normal	$2,6 - 3,7F_N - 11,6(Fn)^2$
0,70	Normal	$3,1 - 5,3F_N - 12,4(Fn)^2$
0,75	Cargada o normal	$2,4 - 10,6F_N - 9,5(Fn)^2$
0,80	Cargada o normal	$2,6 - 13,1F_N - 15,1(Fn)^2$
0,85	Cargada o normal	$3,1 - 18,7F_N - 28,0(Fn)^2$
0,75	Lastre	$2,6 - 12,5F_N - 13,5(Fn)^2$
0,80	Lastre	$3,0 - 13,3F_N - 21,6(Fn)^2$
0,85	Lastre	$3,4 - 20,9F_N - 31,8(Fn)^2$

Tabla 1. Intensidad a escala del viento.

INTENSIDAD A ESCALA DEL VIENTO		
Pos.	Descripción	Velocidad del viento en m/s
0	Sin viento	< 0,3
1	Suave corriente	0,3 – 1,5
2	Suave brisa	1,5 – 3,3
3	Brisa ligera	3,3 – 5,5
4	Brisa moderada	5,5 – 8,0
5	Brisa fresca	8,0 – 10,8
6	Viento fuerte	10,8 – 13,9
7	Viento fuerte	13,9 – 17,2
8	Viento violento	17,2 – 20,7
9	Tormenta	20,7 – 24,5
10	Tormenta Violenta	24,5 – 28,4
11	Tormenta tipo Huracán	28,4 – 32,6
12	Huracán tipo I	$\geq 32,6$

Tabla 2. Intensidad de olas y vientos en la superficie del mar.

INTENSIDAD DE OLAS Y VIENTOS EN LA SUPERFICIE DEL MAR				
Escala de las olas	Escala del viento	Estado del mar	VALOR (m)	
			Altura de las olas	Longitud de onda aprox.
0	0	Mar tranquilo	0 – 0,1	0
1	1	Mar tranquilo y ondulante	0,1 – 0,3	$H_{1/3} < 0,1$
2	2-3	Mar apacible	0,3 – 0,9	$0,1 \leq H_{\frac{1}{3}} < 0,5$
3	4	Mar claro	0,9 – 1,25	$0,5 \leq H_{\frac{1}{3}} < 1,25$

4	5	Mar moderado	1,25 – 2,5	$1,25 \leq H_{\frac{1}{3}} < 2,5$
5	6	Mar agitado	2,5 – 3	$2,5 \leq H_{\frac{1}{3}} < 4,0$
6	7	Mar muy agitado	3 - 4	$4,0 \leq H_{\frac{1}{3}} < 6,0$
7	8-9	Alta mar	4 – 9	$6,0 \leq H_{\frac{1}{3}} < 9,0$
8	10	Alta mar tipo II	9 – 11	$9,0 \leq H_{\frac{1}{3}} < 14,0$
9	11-12	Mar extremadamente pesado	>11	$14,0 \leq H_{1/3}$

2.2. Método de regresión MEPC de la OMI

El Comité de Protección del Medio Marino (MEPC) de la Organización Marítima Internacional (OMI) introdujo el fw (factor meteorológico) calculado utilizando una curva de regresión .

Esta fórmula está especialmente diseñada para calcular las condiciones de las olas correspondientes bajo la escala de viento Beaufort de (5). La salida es Stall al 75% HP; mayor fw significa menor pérdida y mejor rendimiento del barco en mares agitados. El cálculo se define en IMO-EEDI como de la siguiente manera:

$$fw = a \cdot \ln(\text{desplazamiento}) + b \quad (4)$$

Esta fórmula se compone del factor de desplazamiento, tipo de barco que se muestra en la Tabla 3 y el factor de carga b.

Tabla 3. Parámetros para determinar el tipo de embarcación.

PARÁMETROS a y b PARA DETERMINAR EL TIPO DE EMBARCACIÓN		
Tipo de Barco	a	b
Granelero	0,0429	0,294
Petrolero	0,0238	0,526
Barco mercante	0,0208	0,633

2.3. Fuerza de flujo

El método de cálculo de la fuerza de flujo es diferente de la fórmula semiempírica de Kwon y la fórmula de regresión de MEPC, pero en realidad resuelve el campo de flujo alrededor del casco y predice que el casco navega en olas irregulares mediante simulación de autopropulsión y cálculo de la resistencia adicional de las olas.

Al calcular la entrada en pérdida de un barco, primero es necesario calcular la resistencia del casco navegando en condiciones de aguas tranquilas y con olas grandes, y luego estimar la velocidad del barco en diferentes condiciones del mar de acuerdo con el desempeño de la hélice en las olas.

En esta investigación, se utilizó el software de cálculo de flujo Star CCM+, que resuelve la ecuación de Navier-Stokes (RANS) de la tensión media de Reynolds para calcular la resistencia del casco. Es la condición de contorno la del dominio de cálculo y la configuración de la red al ingresar parámetros; el cálculo en este documento utiliza el modelo de turbulencia SST k- ω .

2.4. Diseño de la cuadrícula

Dado que el gran círculo es una ruta óptima en condiciones de aguas tranquilas desde la salida hasta el destino, se elige como referencia para la construcción del sistema de cuadrícula utilizado en la optimización de la ruta.

Como se describió anteriormente, los estados son de tres dimensiones, es decir, tiempo y ubicación geográfica con una unidad de desplazamiento ΔY ubicada en un escenario, perpendicularmente lejos de los grandes círculos. Los estados más alejados del gran círculo en un escenario son los posibles lugares por los que puede pasar el barco para evitar el mal tiempo o ciertas condiciones del mar.

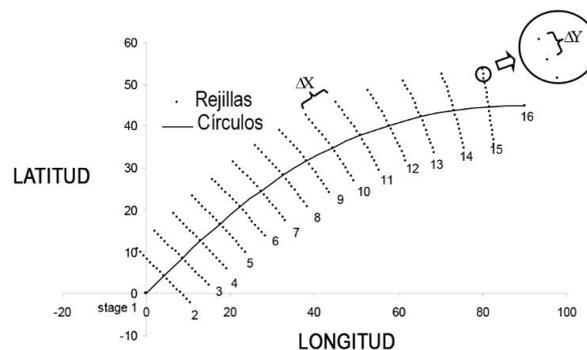


Figura 1. Proyección del sistema de cuadrícula.

A diferencia de la programación dinámica tradicional, la variable de tiempo de viaje OMI de estados se determina a medida que avanza el procedimiento de optimización. Las cuadrículas deben eliminarse cuando una ruta de envío cruza islas/rocas dando otras condiciones de navegación.

La Ilustración 1 muestra un ejemplo de proyecciones de etapa en un plano de longitud y latitud donde se han asignado dieciséis etapas desde la salida hasta el destino de una ruta de navegación.

La distancia entre dos etapas puede estar igualmente espaciada Δx . El número total de etapas se determina de acuerdo con la distancia total de la ruta y la disponibilidad de capacidad informática.

2.5. Estimación del consumo de combustible

El consumo de combustible es una función de la hidrodinámica del barco. La hidrodinámica del barco se modela y simula en el proceso de estimación del consumo de combustible. Por lo tanto, la precisión del modelado de la hidrodinámica del barco es fundamental en la precisión de la estimación del consumo de combustible. Como consecuencia de la resistencia añadida debida al viento y las olas, así como al aumento de la rugosidad del casco con el tiempo, la velocidad del barco suele ser menor que la velocidad de diseño, lo que se denomina reducción involuntaria de la velocidad.

Además de eso, se necesita una reducción voluntaria de la velocidad para garantizar la seguridad del barco para minimizar o evitar los golpes, la humedad de la cubierta, las carreras de hélices, el balanceo paramétrico, el mareo por movimiento, la sobrecarga del motor, etc. Todos estos factores deben considerarse en la optimización del enrutamiento como restricciones.

Dado que el objetivo de esta investigación es analizar la optimización del consumo de combustible mediante un estudio de caso, no se analiza en profundidad ni más cómo predecir con precisión la hidrodinámica del barco en el mar. Sin embargo, aquí se presenta el procedimiento de predicción del consumo de combustible entre dos etapas. Este procedimiento puede tratarse como un subproblema de un problema de programación dinámica.

El consumo de combustible optimizado durante un viaje completo se obtiene sumando todo el consumo de combustible individual entre dos etapas a lo largo de una ruta con el método de programación dinámica elegido.

Como el viaje de un barco sigue un sistema de cuadrícula predefinido, su rumbo se fija entre dos etapas. La velocidad del barco sobre el suelo es la única variable de control que determina directamente el consumo de combustible entre dos etapas cualesquiera durante el curso del viaje.

El procedimiento que se ha seguido para determinar el consumo de combustible a detalle es:

- Paso 1: Cálculo de la resistencia del buque. La resistencia del barco se calcula en función de la velocidad del barco sobre el fondo, el calado, el asiento y las condiciones climáticas. La resistencia del buque se puede dividir en tres componentes principales: a). la resistencia del agua tranquila; b). la resistencia añadida debida al oleaje; C). la resistencia añadida debida al viento. Se utilizan datos de pruebas de mar de barcos, datos de pruebas de modelos y resultados de simulaciones numéricas para estimar estas resistencias.

- Paso 2: Estimación de la potencia del motor. La potencia del motor se calcula para superar las resistencias calculadas anteriormente en función de las características de la hélice.
- Paso 3: si la potencia del motor es mayor que MCR (tasa continua máxima), la velocidad del barco se reducirá en Δu y luego volverá al paso 1.
- Paso 4: Cálculo de la probabilidad viento, humedad en la cubierta y carrera de hélices. Para garantizar la seguridad del barco, si estos valores de restricción exceden límites (mayor a 2 en la escala de Beaufort), la velocidad del barco se reducirá con Δu y luego volverá al paso 1.
- Paso 5: Cálculo del consumo de combustible y la posición del barco para el siguiente intervalo de tiempo Δt .
- Paso 6: Ejecutar los pasos 1 a 5 de forma repetitiva en un intervalo de tiempo fijo Δt entre dos etapas hasta que el barco (paso de simulación) llegue a la siguiente etapa o destino final.

El intervalo de tiempo Δt para el cálculo se elige normalmente en función de la frecuencia de recepción de las previsiones meteorológicas a bordo, que suele ser cada 6 horas, datos obtenidos de un viaje realizado por Chien (6).

2.6. Descripción de los algoritmos de entrada

El algoritmo de regresión se ha utilizado en la mayoría de la programación dinámica de enrutamiento meteorológico. Sin embargo, la programación dinámica directa ofrece más comodidad en la programación. La programación dinámica directa puede interpretarse como que una ruta es óptima si y solo si, para cualquier etapa intermedia, la elección de la ruta anterior es óptima para esta etapa.

Al usar este principio, el procedimiento de enrutamiento meteorológico se puede dividir en una secuencia de resolución de problemas más simple. Las notaciones definidas en la programación son las siguientes.

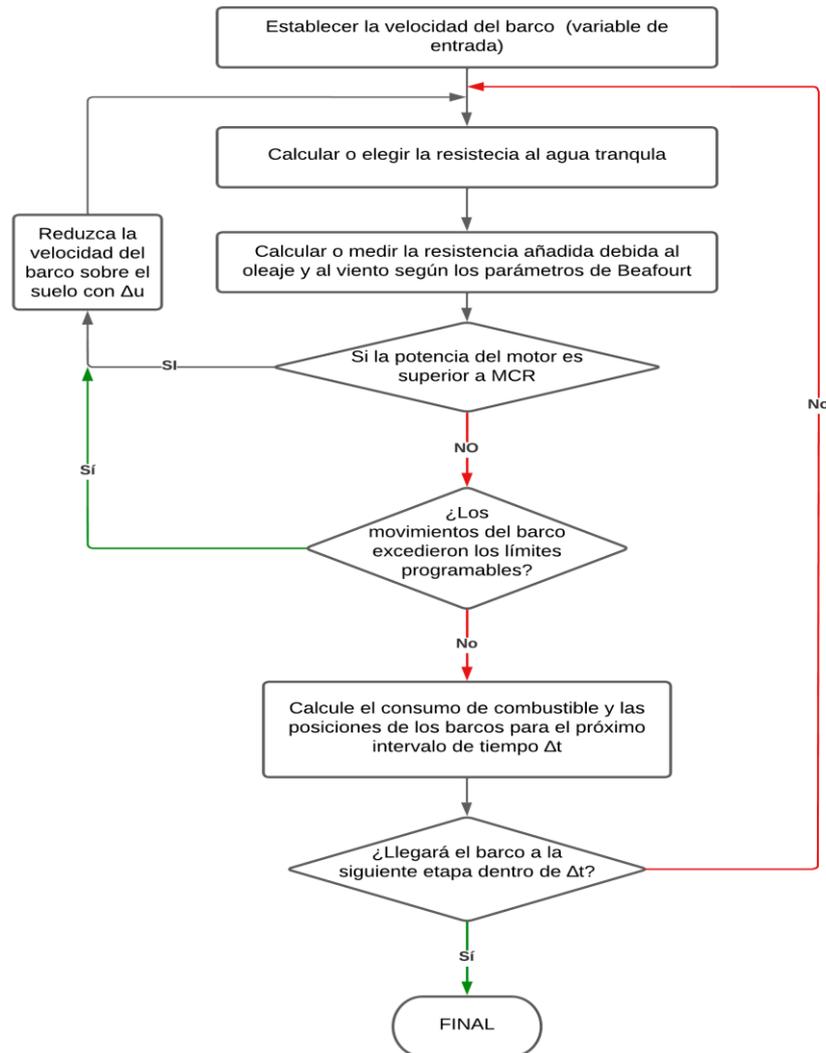


Figura 1. Algoritmo de programación.

3. RESULTADOS

Esta sección presenta dos estudios de caso con el uso del método de programación dinámica y regresión de la OMI descritos anteriormente. Como simplificación, las condiciones meteorológicas se establecen de forma artificial. Aunque las condiciones climáticas utilizadas no son reales y es posible que ciertas condiciones nunca ocurran en la realidad, el uso de condiciones climáticas artificiales ofrecerá el mismo efecto que las condiciones reales para ilustrar la metodología y las ventajas de la programación dinámica 3D. El método de MEPC, un método de análisis de regresión, se utiliza para predecir la resistencia total en aguas tranquilas. La potencia del motor se calcula por las características de la hélice del buque caso. En los estudios de casos se utilizan dos conjuntos diferentes de condiciones climáticas con los siguientes parámetros comunes:

Tabla 4. Condiciones de programación.

CONDICIONES DE PROGRAMACIÓN	
Buque portacontenedores	54.000 TPM
Coordenadas de salida	$X_{sal} = (0i, 0j)$
Coordenadas de llegada	$X_{lleg} = (90i, 0j)$
Intervalo de tiempo	$\Delta t = 1$ hora
Intervalo de tiempo para el cálculo del consumo de combustible	$\Delta t = 6$ horas
Velocidad	$\mu = 5$ a 30 nudos
Número total de escenario	K= 16
Número total de proyección de escenario en un escenario	N (1) = 1 N (K) = 1 N (k) = 17 Dónde: k = 2, 3, 4.....K - 1
Espacio escénico para cálculo	$\Delta X = 360$ millas náuticas
Espacio de estados	$\Delta Y = 75$ millas náuticas.

3.1. CASO DE ESTUDIO I

Las restricciones geográficas y las condiciones climáticas para el caso de estudio se muestran en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

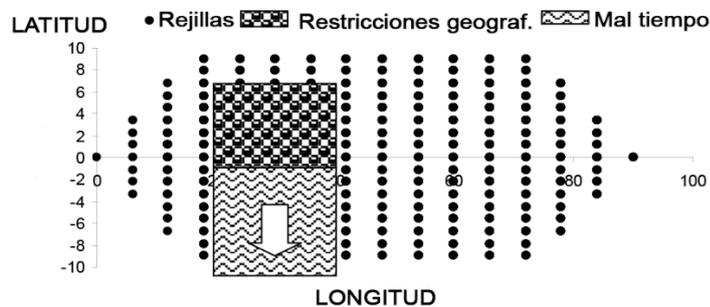


Figura 3. CASO I. Restricciones geográficas y condiciones climáticas.

Las restricciones geográficas se establecen como un área rectangular que puede ser islas, rocas o cualquier otro agente físico interviniente. El alcance de las restricciones geográficas es la longitud de cincuenta a setenta grados y la latitud de menos uno a siete grados. La envoltura del mal tiempo también se establece como un área rectangular, posicionada con una longitud de 50 a 70 grados, una latitud de -1 a -9 grados en el tiempo $t = 0$.

El mal tiempo permanece en esta área inicial durante 60 horas antes de moverse hacia el sur con una velocidad de 3 nudos. El barco no puede ingresar al área de mal tiempo por razones de seguridad.

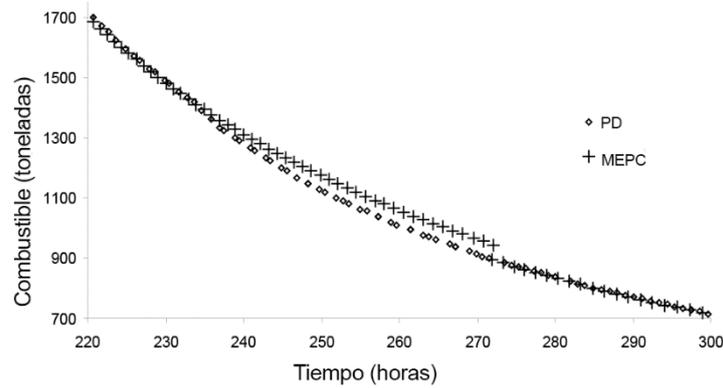


Figura 4. CASO I. La curva de consumo de combustible vs. Tiempo.

La Figura 4. a continuación muestra los resultados del consumo de combustible frente al tiempo obtenidos de la optimización de la ruta para el primer caso de estudio.

Cuando el tiempo de llegada especificado es inferior a 233 horas, tanto el método programación dinámica PD como la opción MEPC pueden obtener estrategias similares que eligen la ruta cerrada a la línea punteada en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y una velocidad constante del barco durante el viaje.

Esto significa que cambiar el rumbo del barco puede ser más beneficioso que cambiar la velocidad del barco en estas condiciones meteorológicas.

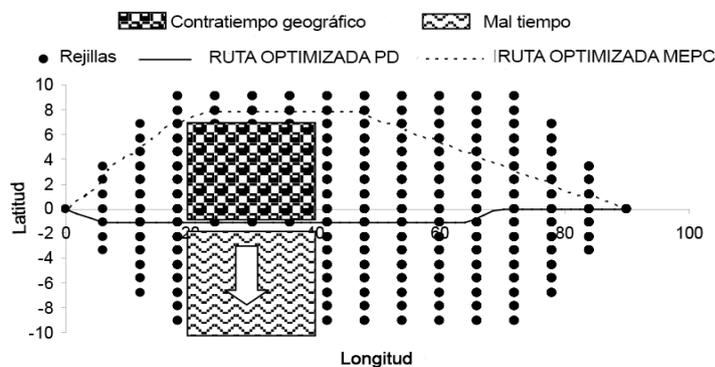


Figura 5. CASO I. Optimización de ruta.

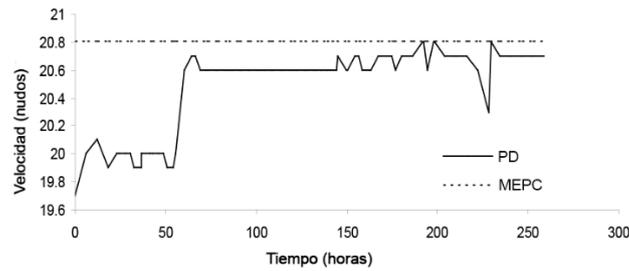


Figura 6. CASO I. Velocidad optimizada.

Cuando el tiempo de llegada especificado es más de 272 horas, el tiempo durante el viaje es relativamente largo, por lo que el mal tiempo ya pasa antes de que el barco llegue allí, el método 3D de programación dinámica también obtiene una estrategia similar con el método MEPC que elige la ruta cerrada a la línea continua en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y una velocidad constante del barco.

Cuando la hora de llegada especificada está entre las 233 horas y las 272 horas, el método de programación dinámica puede obtener un resultado mejor que el calculado.

La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** muestran la ruta optimizada y la velocidad del barco optimizada obtenidas usando los métodos de programación dinámica y MEPC de la OMI bajo un tiempo de llegada especificado $t_{leg} = 264 \text{ horas}$. Los resultados han demostrado que el consumo de combustible obtenido por MEPC es de 1014,54 toneladas para las condiciones de viaje dadas y de 969,25 toneladas si el buque sigue la ruta resultante de la programación dinámica.

Como resultado, el perfil de ruta y operación optimizado por el método de programación dinámica ofrece un ahorro de combustible de alrededor del 4,5 % en comparación con el MEPC de la OMI.

La razón del ahorro de combustible es que el método de PD permite que el barco cambie el rumbo y la velocidad durante la ruta. En el primer tramo de la ruta, el barco frena para dejar pasar primero el mal tiempo. Una vez que ha pasado el mal tiempo, el barco aumenta su velocidad para asegurar que se alcance el tiempo de llegada deseado.

3.2. CASO DE ESTUDIO II

En el estudio del caso 2, las restricciones geográficas son las mismas que en el caso 1. Mientras que el área meteorológica de mal tiempo en el momento $t = 0$ tiene una longitud de 50 a 70 grados, una latitud de -7 a -15 grados. El mal tiempo avanza hacia el norte con una velocidad de 3 nudos.

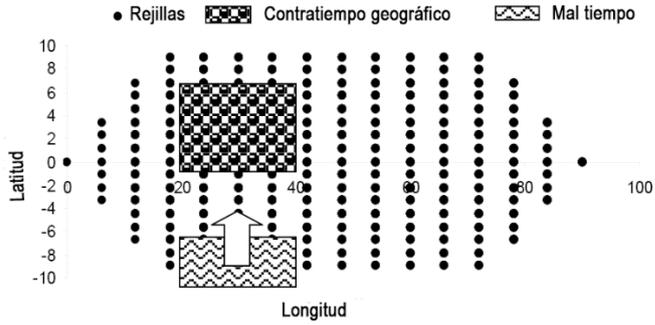


Figura 7. CASO II. Restricciones geográficas y condiciones climáticas.

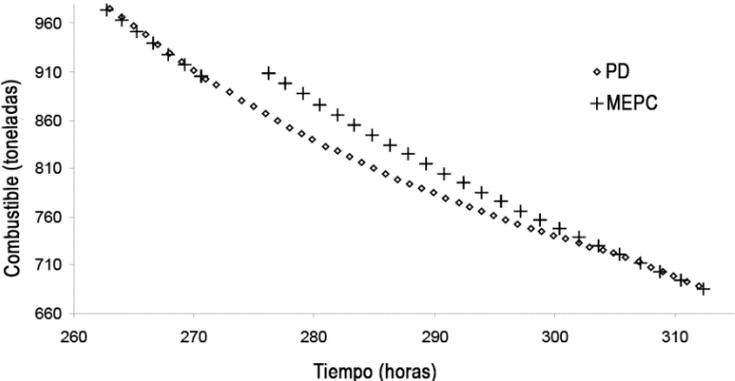


Figura 8. CASO II. Curva de consumo de combustible vs tiempo

La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** muestra las limitaciones geográficas y las condiciones climáticas. La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** muestra los resultados de consumo de combustible vs. tiempo obtenidos de la optimización de ruta para el caso de estudio II.

Por las mismas razones del caso 1, cuando el tiempo de llegada especificado es menor a 270 horas o mayor a 303 horas, tanto en el método de programación dinámica y el MEPC de la OMI pueden obtener resultados similares; cuando la hora de llegada especificada está entre 270 horas y 303 horas, el método de PD puede obtener un mejor resultado que el calculado por el método MEPC.

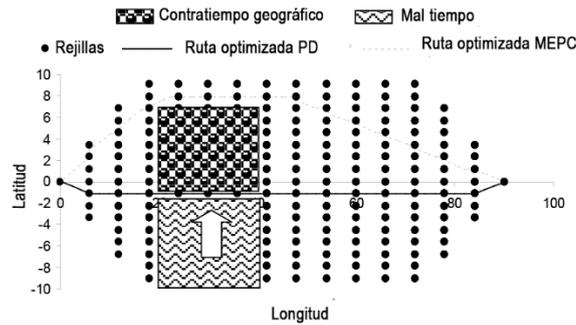


Figura 9. CASO II. Ruta optimizada.

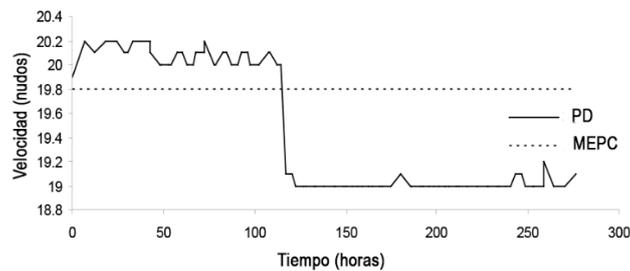


Figura 10. CASO II. Optimización de velocidad.

Las **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** presentan la ruta y la velocidad del barco optimizadas por los métodos MEPC y PD bajo la misma tendencia de tiempo de llegada = 278 horas. El consumo de combustible calculado por el MEPC es de 898 toneladas y 852 toneladas del de programación dinámica. Se ha logrado un ahorro de combustible del 5,1 % utilizando el método de programación dinámica en comparación con el método MEPC.

A diferencia del caso I donde la velocidad del barco se reduce para esperar a que pase el mal tiempo durante la primera parte de la ruta, la velocidad del barco se aumenta para pasar la región antes de que llegue el mal tiempo. Una vez que el barco ha pasado la región donde va a pasar el mal tiempo, se reduce la velocidad del barco y se mantiene el tiempo de llegada deseado.

4. CONCLUSIONES

Se logró presentar un modelo de programación 3D desarrollado para enrutamiento meteorológico con el objetivo de reducir el consumo de combustible. Los estudios de casos han demostrado que, en comparación con el uso del método MEPC tradicional DE LA OMI, se puede lograr un ahorro de combustible utilizando el método de programación dinámica recientemente desarrollado en ciertas condiciones climáticas y limitaciones.

En esta investigación en los estudios de caso no se considera el pronóstico del clima real, pero este método puede brindar información sobre el problema del enrutamiento del clima. En el

futuro, este método se podrá en función del pronóstico del tiempo real y la hidrodinámica del barco.

La optimización del perfil de consumo de combustible y eficiencia energética en relación con los casos de estudio I y II los cuales se desarrollaron con un algoritmo de programación directa para resolver el perfil de ruta y velocidad de un barco junto al método MEPC de la OMI dan como resultado que el método de programación dinámica permite ahorro entre 4.5 y 6% de combustible en condiciones meteorológicas previsibles con configuraciones de velocidad.

5. BIBLIOGRAFÍA

1. OMI. Estrategia de Reducción de Emisiones de GEI de los Buques: <http://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/GHG/Pages/default.aspx>; 2018.
2. OMI. Indice de Resoluciones y Directrices MEPC relacionadas con el Anexo VI de MARPOL. <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Index-of-MEPC-Resolutions-and-Guidelines-related-to-MARPOL-Annex-VI.aspx>; 2020.
3. Powell W. Approximate Dynamic Programming: Solving the curses of dimensionality: John Wiley & Sons,; 2011.
4. OMI. El proyecto de enmiendas al Convenio MARPOL requeriría que los barcos combinen un enfoque técnico y operativo para reducir su intensidad de carbono: <https://www.imo.org/en/MediaCentre/PressBriefings/pages/42-MEPC-short-term-measure.aspx>; 2020.
5. Dnv G. Evaluación de tecnologías y combustibles alternativos seleccionados.: DNV GL—Marítimo; 2018.
6. Bayo F. Wiki Nautico Lamarencalma. [Online].; 2018. Available from: <http://wiki.lamarencalma.com/index.php?title=METEOROLOG%C3%8DA#:~:text=El%20estado%20del%20tiempo%20es,informaci%C3%B3n%20de%20la%20previsi%C3%B3n%20del>.
7. Calderón I. RICE propulsión. [Online].; 2015. Available from: <http://www.ricepropulsion.com/TNLS/AhorroComustible.htm>.