

DETERMINACIÓN DE LA DISTANCIA DE PARADA UTILIZANDO UN MODELO DE MANIOBRABILIDAD EN TIEMPO ACELERADO; CASO DE ESTUDIO PUERTO DE LÁZARO CÁRDENAS.

M. en I. Manuel Mendoza Grande, Ing. Rodolfo Ramírez Xicotencatl, Dra. Karina G. Ocaña Espinosa de los M.

e-mail: mmendoza@imt.mx, rramirez@imt.mx, karina.ocana@imt.mx

RESUMEN

Los modelos de maniobrabilidad en tiempo acelerado, han contribuido para determinar el comportamiento de los barcos, como puede ser: la distancia de parada y la entrada y salida de los puertos, y para ello se requiere conocer las condiciones oceanográficas y meteorológicas en la zona de estudio. Actualmente, para determinar la maniobrabilidad en tiempo acelerado, se requiere utilizar el modelo de Abkowitz (1964), el cual describe las ecuaciones del movimiento del barco.

En base a dicho modelo, se realizó el análisis para determinar la distancia de parada en la entrada al puerto de Lázaro Cárdenas, Mich., el cual se describe en el presente artículo, y para definir este valor, se requirió conocer las condiciones batimétricas, viento, oleaje y de corrientes litorales que se presentan en dicho puerto, con dichas variables (oceanográficas y meteorológicas), nos permitirán conocer los efectos que se puedan presentar en la maniobrabilidad del barco.

INTRODUCCIÓN

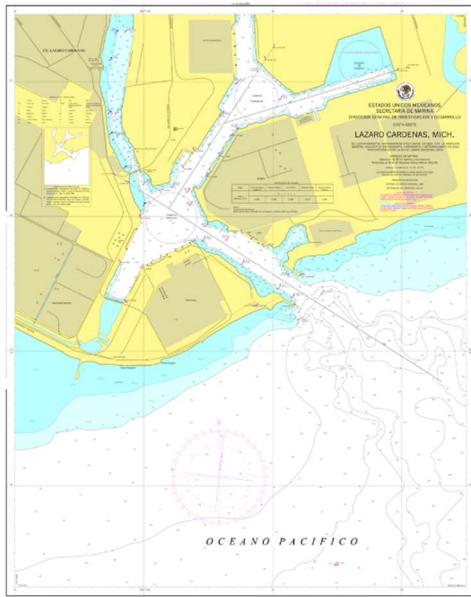
La maniobrabilidad de un barco se ha llevado a cabo desde que el hombre empezó a utilizar embarcaciones para empezar a navegar, generalmente estas eran controladas por remos, el cual generaba una fuerza para que la embarcación se moviera de estribor a babor, y esto a través del tiempo ha ido evolucionando hasta lo que se conoce como timón; por lo tanto, se puede definir que, a la capacidad de poder controlar la trayectoria del barco, la velocidad, dirección y al apoyo del recurso humano y a los equipos eléctricos y mecánicos se le conoce como maniobrabilidad.

Los modelos de simulación de maniobras en tiempo acelerado, se han desarrollado para evaluar y optimizar el diseño de las áreas de navegación. Los modelos que incorporan en su modelo matemático el pilotaje del barco en su simulación, se les conoce como modelos de simulación de maniobrabilidad en tiempo acelerado, que al incluirlos elimina la intervención humana en el control del barco. Las principales ventajas de dichos modelos, presentan resultados de forma rápida y permiten comparar y evaluar los diferentes escenarios de análisis.

Actualmente, el puerto de Lázaro Cárdenas es uno de los cinco puertos importantes en México, y para ello es importante conocer el comportamiento de las maniobras en el canal de entrada, y definir la distancia de parada, para ello debe de tomar en cuenta las condiciones batimétricas, oceanográficas, meteorológicas (viento, oleaje y corrientes).

RECOPILCACIÓN DE LA INFORMACIÓN

Para llevar a cabo las simulaciones es necesario definir la localización geográfica y el área de análisis que requerirá el modelo numérico, para ello se utilizará la información batimétrica de portulanos, mapas y planos. Otra información que se debe incluir para la simulación es el área de pilotaje. La información antes mencionada se muestra en la figura 1.



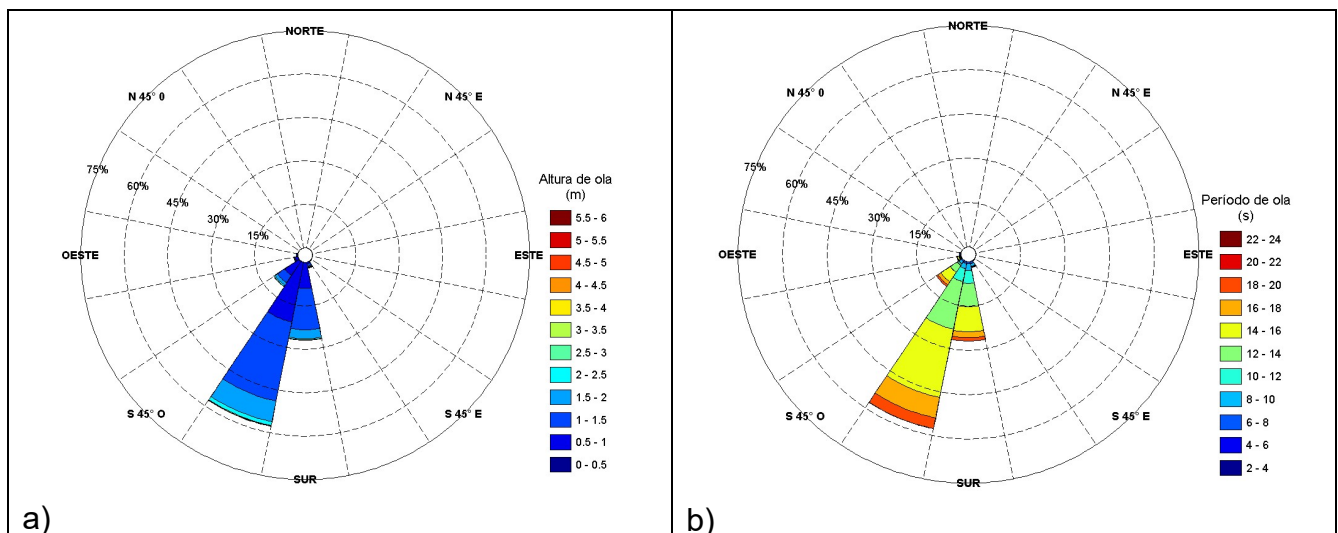
a)

b)

Figura 1 a) Carta náutica y b) disposición de las áreas de agua

Oleaje

Otra parte importante es la información del oleaje, dichos datos se tomaron de una boya ubicada al exterior del puerto, con registros que van desde 2008 al 2014. Las direcciones predominantes para la zona de estudio son: $S22.5^\circ E$, Sur, $S 22.5^\circ O$, $S 45^\circ O$ y $S 67.5^\circ O$, y los resultados antes mencionados están representados en la figura 2.



a)

b)

Figura 2 a) Distribución de altura de ola y b) Distribución del período de ola

En la tabla 1, se muestran los valores de altura de ola y de período, los cuales son el resultado de la caracterización del oleaje normal en su régimen anual.

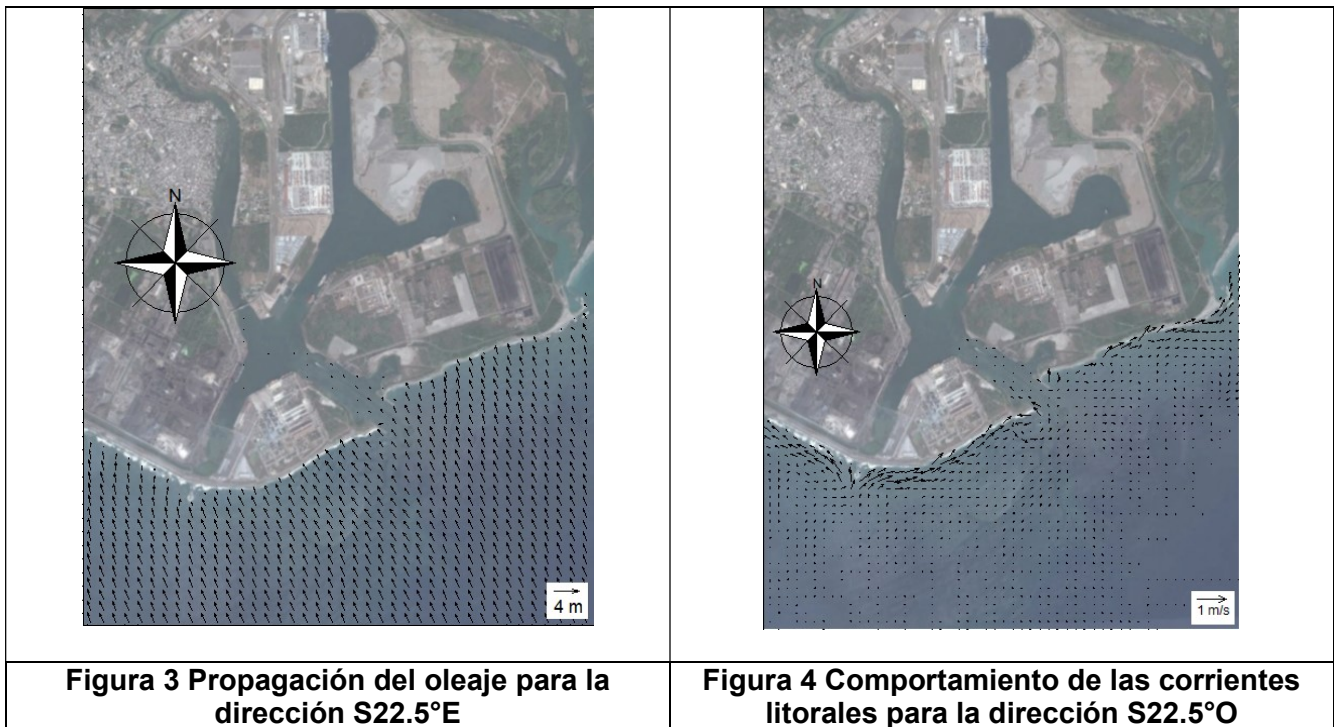
Tabla 1 Valores de altura de ola y período de las direcciones que actúan en la zona de estudio

Dirección	Altura de ola (m)	Período (s)
S 22.5° E	1.59	9.07
Sur	1.21	13.31
S 22.5° O	1.23	14.26
S 45° O	1.15	13.72
S 67.5° O	1.09	12.69

Propagación de oleaje y corrientes

Para conocer el comportamiento del oleaje y de corrientes litorales, se requirió utilizar un modelo numérico, y el que se utilizó fue un modelo numérico de propagación de oleaje conocido como Mike 21 SW (Spectral Wave) y para el caso de las corrientes litorales fue el Mike 21 HD (Hydrodynamic), dichos modelos son desarrollados en el Danish Hydraulic Institute (DHI).

Aplicando los modelos numéricos antes mencionados, se obtuvieron resultados para cada una de las direcciones (ver tabla 1), y en las figuras 3 y 4 se muestran algunos resultados representativos.



Viento

La información del viento, se tomó de los registros obtenidos de la Estación Meteorológica Automatizada (EMA), la cual se encuentra localizada en el faro del puerto, con una tendencia de frecuencias de incidencia de los vientos de los cuadrantes al Norte (del sector N22.5°O al sector N45°E) con un 32.24 % y los cuadrantes al Oeste (del sector S22.5°E al sector S67.5°O) con un 42.02%. Las mayores velocidades de viento se registraron del sector S45°O al sector Norte. La información anterior se presenta en frecuencias cruzadas de la magnitud del viento-dirección en su régimen anual, estos resultados se presentan en la tabla 2.

Tabla 2 Magnitud promedio y máxima del viento por dirección en su régimen anual

Dirección	Velocidad promedio (m/s)	Velocidad máxima (m/s)
NORTE	3.59	56.91
N 22.5° E	3.02	29.29
N 45° E	4.07	29.35
N 67.5° E	4.15	29.23
ESTE	4.55	29.29
S 67.5° E	3.78	28.52
S 45° E	4.47	31.37
S 22.5° E	3.86	29.76
SUR	5.25	38.56
S 22.5° O	5.38	50.08
S 45° O	5.41	56.91
S 67.5° O	5.92	56.44
OESTE	5.49	58.46
N 67.5° O	4.22	58.10
N 45° O	4.05	58.04
N 22.5° O	3.43	56.91

Otro factor importante para este tipo de simulaciones es el tipo de barco a analizar, para este caso se utilizó un barco PANAMAX portacontenedor, y en la figura 5 se muestra las características generales del barco.

Tipo de Buque	Toneladas de desplazamiento (T)	Eslora (m)	Manga (m)	Calado (m)
Portacontenedor PANAMAX	39, 200	200.0	30.5	10.5

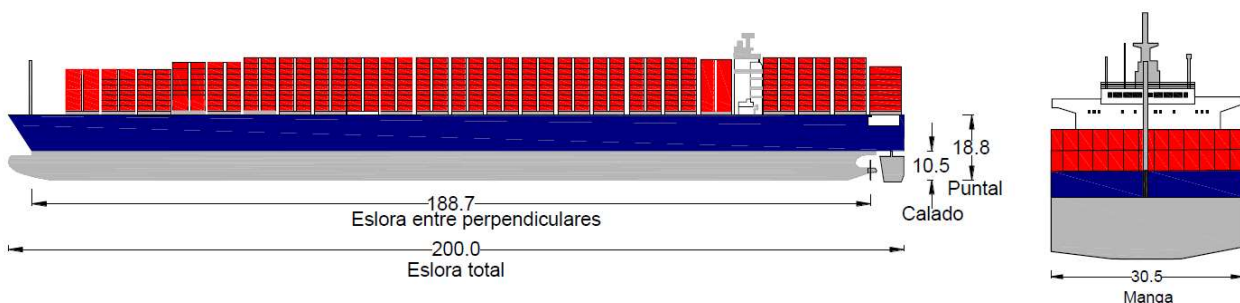


Figura 5 Dimensiones generales del modelo de embarcación

MODELO NUMÉRICO

Para realizar las simulaciones de maniobrabilidad de embarcaciones en tiempo acelerado se utilizó el programa Ship Manoeuvring (SHIPMA), dicho modelo consiste en un conjunto de ecuaciones que constituyen una relación entre la posición y las velocidades del barco en dos puntos posteriores en el tiempo. El ángulo del timón y el movimiento de la hélice o propela son parte importante en estas ecuaciones. Por lo tanto, la maniobrabilidad se desarrolla como una serie de estados del sistema al siguiente paso de tiempo, siendo principalmente la posición, el rumbo y las velocidades del barco.

Cuanto más pequeño sea el paso de tiempo se asemeja más al modelo, para el caso de las simulaciones realizados se utilizó un intervalo de 1 segundo.

El modelo numérico toma en consideración la configuración del puerto, áreas, profundidades, características específicas del buque, la acción del remolcador, condiciones de oleaje, viento y corrientes, entre otras; y el diagrama del modelo numérico se muestra en la figura 6.

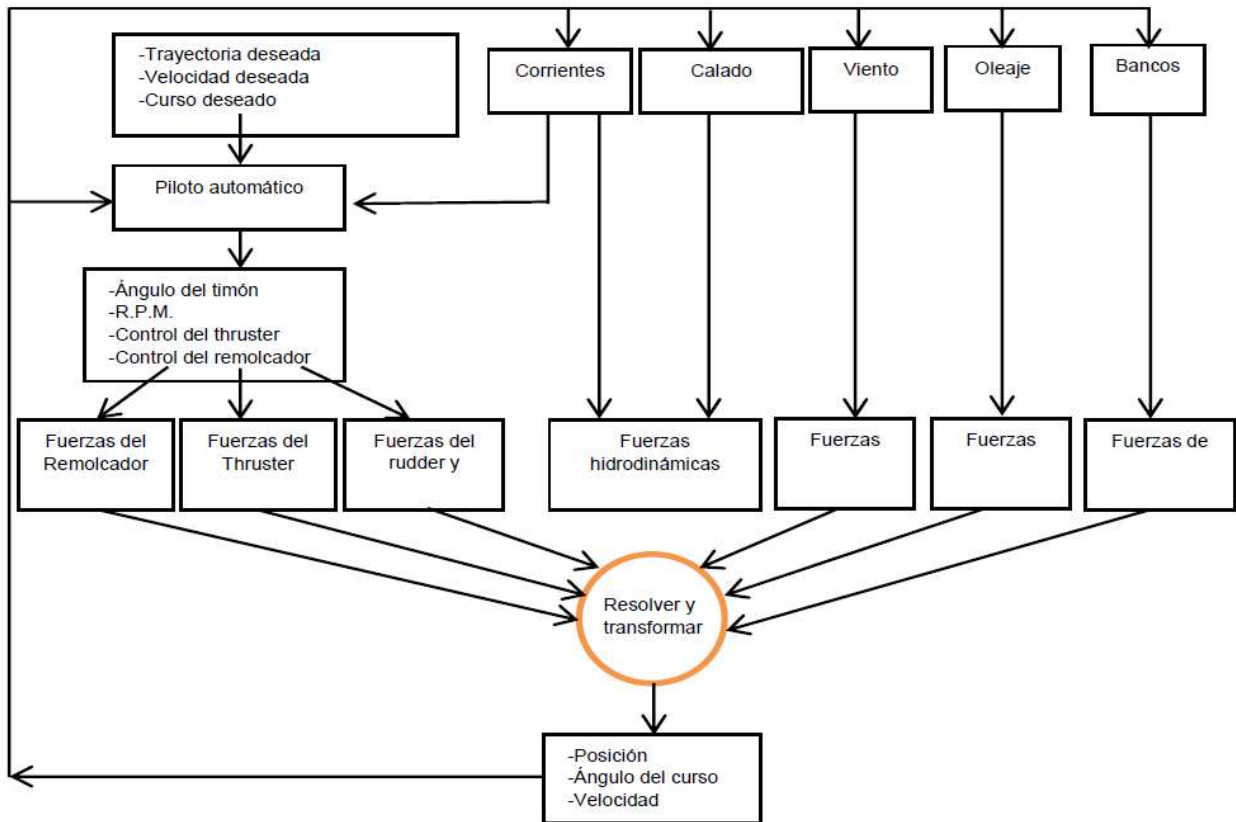


Figura 6 Diagrama del modelo numérico de maniobras del SHIPMA

RESULTADOS

Para determinar la distancia de parada la maniobra que se realizó fue una parada forzada (marcha atrás), para la cual se definió una trayectoria inicial y se muestra en la figura 7.

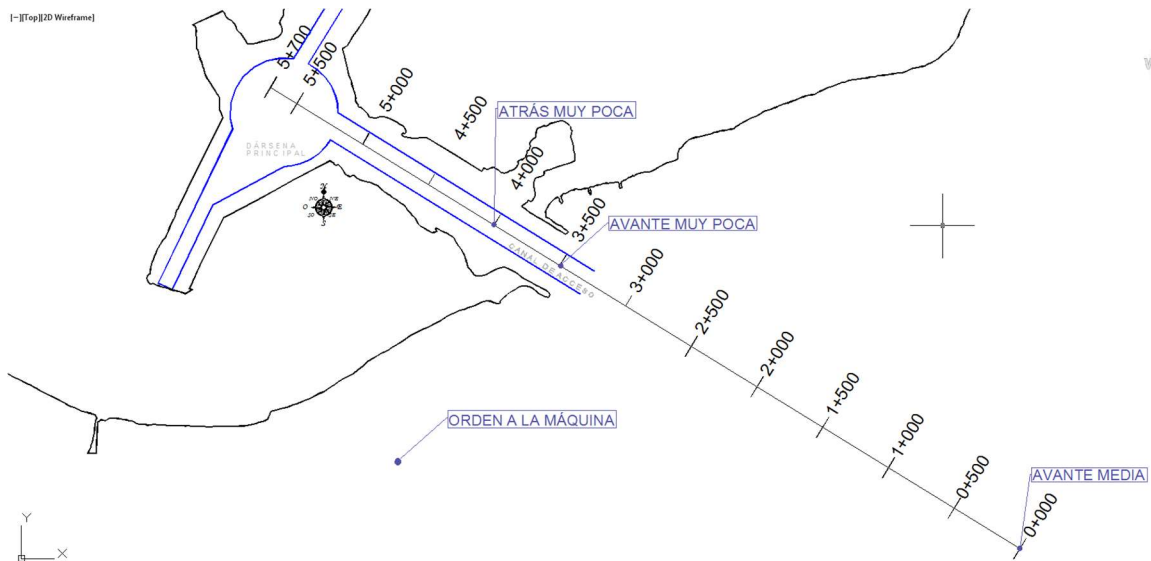


Figura 7 trayectoria inicial y ordenes de la maquina

El autopiloto del modelo SHIPMA, intentará seguir la trayectoria marcada en la figura 7, tomando en cuenta las ordenes de la máquina, de la velocidad del giro de la propela o de la velocidad de la embarcación en nudos.

Para determinar la distancia de para se requirió definir la siguiente estrategia: la embarcación se aproxima al puerto con el rumbo definido por la trayectoria inicial, la embarcación navega con su máquina en Avante media (60 RPM) que mantiene hasta llegar a la bocana (cadenamiento 3+500) en este punto se inicia el frenado de la embarcación por sus propios medios con el cambio a la orden a la maquina Avante muy poca (30 RPM), la embarcación avanza 500 m. y nuevamente se cambia la orden a la máquina, la orden es Atrás muy poca (30 RPM), en este momento la propela de la embarcación empieza a detenerse totalmente y empieza a girar en sentido contrario para dar marcha atrás (cuando la propela está en marcha atrás se pierde la eficiencia del timón), la maniobra termina cuando la embarcación se detiene.

Para determinar la distancia que requirió el barco para detenerse, tomando en cuenta las condiciones de oleaje y corrientes, se elaboró una matriz de pruebas, las cuales se muestran en la tabla 3.

En la primera prueba no se consideró la acción del viento oleaje y corrientes, esta prueba se utilizó como maniobra de referencia, en simulaciones posteriores se consideraron cuatro grupos de pruebas. En el primer y segundo grupo de pruebas de la matriz, se consideró la acción del viento en ocho direcciones, en el primer grupo se consideró la mayor velocidad promedio 10 nudos, viento dominante, y en el segundo se consideró el viento reinante, la mayor velocidad registrada 35 nudos.

En el tercer grupo de pruebas se consideró la acción del oleaje en cinco direcciones, la altura de ola significativa media y periodo medio resultado de la caracterización del oleaje normal. En el cuarto grupo de pruebas se consideró la acción de las corrientes que fueron modeladas numéricamente.

Tabla 3 Matriz de escenarios simulados para determinar la distancia de parada

Prueba No.	Puerto	Maniobra	Viento		Oleaje			Corriente			Distancia de Parada (m)	
			Dirección	Vel (Nudos)	Dirección	Altura (m)	Periodo (s)	Dirección	Vel (m/s)	Dir (grados)		
REF 1	Lázaro Cárdenas	Entrada - parada forzada	-	-							1,927.80	
GRUPO 1	2	Lázaro Cárdenas	Entrada - parada forzada	N 22.5° O	10						1,777.80	
	3	Lázaro Cárdenas	Entrada - parada forzada	NORTE	10						1,776.70	
	4	Lázaro Cárdenas	Entrada - parada forzada	N 67.5° E	10						1,928.20	
	5	Lázaro Cárdenas	Entrada - parada forzada	ESTE	10						1,959.40	
	6	Lázaro Cárdenas	Entrada - parada forzada	S 22.5° E	10						1,971.50	
	7	Lázaro Cárdenas	Entrada - parada forzada	SUR	10						1,944.40	
	8	Lázaro Cárdenas	Entrada - parada forzada	S 67.5° O	10						1,815.40	
	9	Lázaro Cárdenas	Entrada - parada forzada	OESTE	10						1,799.60	
	GRUPO 2	10	Lázaro Cárdenas	Entrada - parada forzada	N 22.5° O	35						1,132.50
11		Lázaro Cárdenas	Entrada - parada forzada	NORTE	35						encalló	
12		Lázaro Cárdenas	Entrada - parada forzada	N 67.5° E	35						encalló	
13		Lázaro Cárdenas	Entrada - parada forzada	ESTE	35						encalló	
14		Lázaro Cárdenas	Entrada - parada forzada	S 22.5° E	35						encalló	
15		Lázaro Cárdenas	Entrada - parada forzada	SUR	35						encalló	
16		Lázaro Cárdenas	Entrada - parada forzada	S 67.5° O	35						encalló	
17		Lázaro Cárdenas	Entrada - parada forzada	OESTE	35						encalló	
GRUPO 3	18	Lázaro Cárdenas	Entrada - parada forzada			S 22.5° E	1.59	9.07			1,945.30	
	19	Lázaro Cárdenas	Entrada - parada forzada			Sur	1.21	13.31			1,936.50	
	20	Lázaro Cárdenas	Entrada - parada forzada			S 22.5° O	1.23	14.26			1,937.00	
	21	Lázaro Cárdenas	Entrada - parada forzada			S 45° O	1.15	13.72			1,930.40	
	22	Lázaro Cárdenas	Entrada - parada forzada			S 67.5° O	1.09	12.69			1,929.30	
GRUPO 4	23	Lázaro Cárdenas	Entrada - parada forzada						S 22.5° E	0.045	137.5	1,942.30
	24	Lázaro Cárdenas	Entrada - parada forzada						Sur	0.036	131.8	1,921.50
	25	Lázaro Cárdenas	Entrada - parada forzada						S 22.5° O	0.039	126.1	1,922.30
	26	Lázaro Cárdenas	Entrada - parada forzada						S 45° O	0.029	135.8	1,924.70
	27	Lázaro Cárdenas	Entrada - parada forzada						S 67.5° O	0.02	140.4	1,926.70

Pruebas con viento

De las pruebas definidas en la matriz se determinaron las distancias recorrida por la maniobra de parada forzada. La distancia recorrida por la embarcación, sin ninguna condición meteorológica u oceanográfica fue de 1927m.

En el primer grupo de pruebas, donde la dirección del viento es de 10 nudos para las diferentes direcciones consideradas, la distancia menor que la embarcación navegó fue de 1776 m., cuando el viento viene de la dirección Norte y ayuda al frenado, sin embrago la embarcación sale de los límites del canal de acceso aproximadamente en el cadenamamiento 5+000.

Cuando la acción del viento proviene de las direcciones N67.5°E–10N y Este–10N, el comportamiento de la trayectoria de la embarcación se mantiene en los límites de las áreas de maniobra. En otros casos, se observa que la acción del viento que actúa sobre el lado babor la embarcación, situación que hace que derive la embarcación dentro de los límites de las áreas de maniobra.

Cuando se considera la magnitud del viento en 35 nudos, la embarcación sale de los límites del canal de acceso por la deriva inducida por el viento.

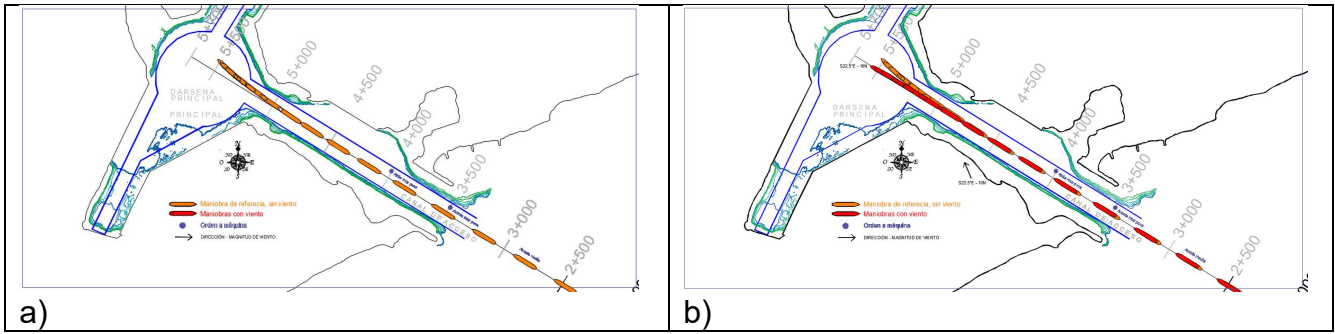


Figura 8 a) Trayectoria de la embarcación sin viento, b) trayectoria de la embarcación con viento de 10 Kn

Pruebas con oleaje

En el tercer grupo de pruebas, donde la acción del oleaje es considerada, la distancia que la embarcación navegó fue de mayor que la prueba de referencia en 18 m, (ver figura 8), en las diferentes pruebas con la acción del oleaje sobre la embarcación se mantiene la trayectoria de referencia por lo que el oleaje no influye de forma significativa en la maniobrabilidad de la embarcación.

Hay que tomar en cuenta que las pruebas realizadas considerando la acción del oleaje propagado y se consideró únicamente la altura promedio y periodo asociado.

Pruebas con corrientes

En el cuarto grupo de pruebas, donde la acción de las corrientes es considerado, la distancia que la embarcación navegó fue de menor que la prueba de referencia en 6 m., en las diferentes pruebas con la acción las corrientes actuando la embarcación se mantiene la trayectoria de referencia por lo que las corrientes no influye de forma significativa en la maniobrabilidad de la embarcación debido a que la acción de las corrientes modeladas numéricamente tiene mayor influencia en la zona de la bocana. En la proximidad de la bocana, el efecto de las corrientes, hacen que en relación a la maniobra de referencia se tenga un desplazamiento de 15 m. y la deriva de 1°.

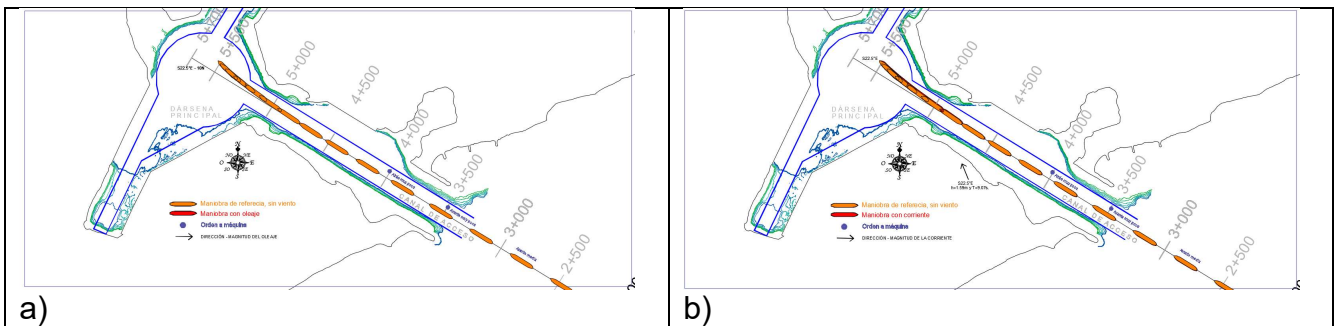


Figura 8 a) Trayectoria de la embarcación con oleaje y b) Trayectoria de la embarcación con corrientes litorales

CONCLUSIONES

Para determinar la distancia de parada se debe tener una información detallada de la zona de estudio, como es: la batimetría, las condiciones oceanográficas y meteorológicas, considerar los límites de las áreas de navegación, límites de los muelles y posición de los señalamientos marítimos.

El efecto del oleaje se analizó limitando únicamente a las condiciones medias normales en el régimen anual, sin embargo, se debe de ampliar el estudio del efecto del oleaje considerando el periodo de balanceo natural del barco, debido a que puede producir efectos de resonancia que pueden incrementar los movimientos de un barco. También se debe de ampliar el estudio del efecto del oleaje bajo una amplia gama de diferentes periodos, para el puerto de Lázaro Cárdenas se registraron mediciones de oleaje con periodos de hasta 28 s.

En relación a las simulaciones de la maniobra de parada, es evidente que el timón pierde eficiencia para controlar la trayectoria de la embarcación cuando la propela da marcha atrás, por lo que se puede observar que realizar una maniobra de este tipo involucra un grado de riesgo. En los estudios de maniobras las órdenes a la máquina deben de ser establecidas con base a un conocimiento náutico, debido a que esto está relacionado directamente con la velocidad de la embarcación y su comportamiento.

La distancia mínima recorrida por la embarcación para una maniobra de parada forzada, con las condiciones del puerto de Lázaro Cárdenas, fue de 1,971 m.

BIBLIOGRAFÍA

ROM 3.1-99 (1999). *Proyecto de la configuración marítima de los puertos; canales de acceso y áreas de flotación*, Obras Marítimas Tecnología, Puertos del Estado.

PIANC (2014). *Harbour approach channels design guidelines*. REPORT NO. 121-2014.

Secretaría de Comunicaciones y Transportes (2008). *Estudios de mareas, recopilación y análisis de la información*. Norma M-PRY-PUE-1-04-002/08.

Secretaría de Marina (2013). *Símbolos, Abreviaturas y Términos Usados en las cartas Náuticas*.

Marin Deltares (2014). *User's Guide*.

Armada de Chile Dirección General del Territorio Marítimo y de Marina Mercante (2002). *Frases normalizadas de la OMI para las comunicaciones marítimas*.