SIOP
VII Seminario Internacional de Ingeniería y Operación Portuaria | San Antonio | 2016
Puertos sostenibles: el gran desafío

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

VII SEMINARIO INTERNACIONAL DE INGENIERÍA Y OPERACIÓN PORTUARIA

OPTIMIZACIÓN DE DIMENSIONES DE CANALES DE ACCESO Y ÁREAS DE MANIOBRA PORTUARIAS MEDIANTE LA APLICACIÓN DE PROGRAMAS INFORMÁTICOS DE SIMULACIÓN DE MANIOBRAS

FERNANDO GONZÁLEZ CHANA
REBECA AGUILAR[1]
DAVID AMES
ERIC SMITH

1. RESUMEN

A continuación se presenta una comparación cuantitativa entre las dimensiones de canales de navegación y áreas de maniobras obtenidos mediante la aplicación directa de métodos determinísticos o reglas generales, principalmente las recomendaciones de PIANC para etapas de diseño conceptual, y los generados a partir de programas informáticos de simulación de maniobras de navegación, bien sean en tiempo real o en tiempo acelerado, con el fin de demostrar que la aplicación de herramientas informáticas resulta en una optimización del diseño.

Como soporte para la discusión se analizan una serie de casos de variada naturaleza, que abarcan un extenso rango de ubicaciones geográficas, condiciones climáticas, buques de diseño y características de operación. Para cada caso se exponen las características y problemática particulares del proyecto, luego se señalan las dimensiones que resultan de la aplicación de métodos determinísticos simples, como la normativa PIANC para diseño conceptual, y las derivadas a partir de simulaciones en tiempo acelerado y/o tiempo real, para terminar, por último, con una comparación de dichos resultados, su análisis y las conclusiones que resultan de ello.

2. INTRODUCCION

A través de los años la flota de buques a nivel mundial ha evolucionado significativamente hacia mayores dimensiones para aprovechar economías de escala y satisfacer nuevos mercados y mayor demanda en la trasferencia de carga. Esta evolución de los buques mercantes, de mayores dimensiones, ha tenido un impacto notable en los diseños de la

[1] *Rebeca Aguilar, Ingeniero Marítimo Estructural, Moffatt & Nichol, raguilar@moffattnichol.com*

infraestructura portuaria y obras de ingeniería relacionada, que han sido modificadas y ampliadas con el fin de ser capaces de atender los nuevos requerimientos del mercado. Estas naves de nueva generación no solamente han aumentado en tamaño, sino que presentan una mejor maniobrabilidad en comparación con la flota actual, en algunos casos, anticuada. Además, en forma paralela se ha producido una mejora y optimización de las herramientas utilizadas como apoyo a los diseños de proyectos portuarios, lo cual ha sido de utilidad al momento de determinar sus dimensiones y verificar la seguridad en las maniobras y navegación de las naves para las cuales han sido diseñadas, dependiendo del nivel de ingeniería en que se encuentren dichos diseños.

El proceso de diseño normalmente inicia con la aplicación de recomendaciones generales basadas en métodos deterministas sencillos, que proporcionan a nivel conceptual un predimensionamiento de las características generales del proyecto a desarrollar. Luego en una fase posterior de ingeniería, es necesaria la utilización de simulaciones de escritorio en tiempo acelerado o en tiempo real cuyo objetivo es el de proporcionar una mayor precisión de las zonas requeridas para una navegación segura, ya que se introducirán variables físicas y ambientales específicas del sitio de proyecto, así como se tendrá en cuenta el comportamiento dinámico de la nave. Finalmente, previo a la etapa de construcción y operación del proyecto, es recomendable realizar una simulación en tiempo real sobre puente de mando (*full bridge simulation*), que además de considerar las condiciones específicas del lugar del proyecto, simula la maniobra desde el interior del buque, pudiendo incorporar el manejo y comando de remolcadores, y llevada a cabo por pilotos, por lo que puede ser complementada como herramienta de familiarización y entrenamiento de pilotos prácticos para el nuevo proyecto.

Es en este contexto, esta ponencia presenta casos de análisis, en los cuales la infraestructura portuaria, existente, recientemente construida, o proyectada, ha debido ser modificada con el fin de permitir la navegación de buques de diseño de mayores dimensiones. Para el caso de la Bahía de Chesapeake las simulaciones de navegación sirvieron para optimizar ciertos sectores del canal de aproximación, cuyas dimensiones definidas por métodos determinísticos resultaban superiores a las requeridas. Por su parte, en el caso de la Terminal GNL de Sabine Pass, en Louisiana, se demostró que las dimensiones recomendadas según el método conceptual del PIANC para el área de maniobras del buque gasero y la dársena de atraque, son extremadamente conservadoras, y una optimización/verificación del diseño fue posible gracias a la aplicación de herramientas informáticas avanzadas. En el caso del Terminal Yolanda, se realizó un análisis para determinar el efecto generado por la utilización de una simulación de escritorio en las dimensiones de las áreas de navegación, en comparación con las definiciones de proyecto logradas con la aplicación de normativa PIANC.

Este trabajo presenta por tanto una comparación de diferentes metodologías de análisis utilizadas para el diseño de los canales/áreas de navegación en cuestión. Una primera metodología se basa en la utilización de formulaciones empíricas para la definición de diseños a nivel conceptual y definidas en la publicación del Grupo de Trabajo 121, *Harbour Approach Channels Design Guidelines* **[Ref 9]**, desarrollada por el PIANC en 2014, y en segundo lugar, aquella que utiliza nuevas tecnologías informáticas de modelos de simulación de maniobras, de tal manera que sea posible comprender el momento en el proceso de diseño en el que cada caso debe ser aplicado y las consecuencias que la aplicación de una y otra metodología generan sobre las dimensiones de las obras y dragados.

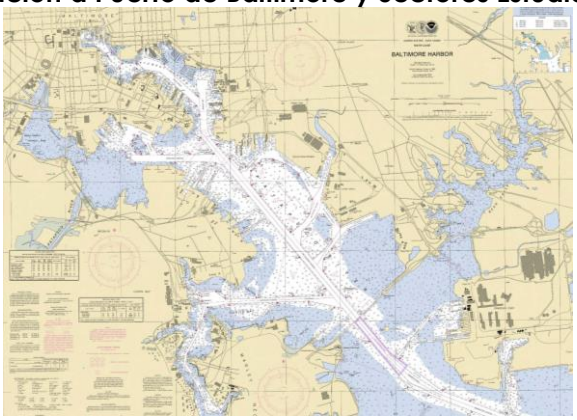
3. CASOS PRACTICOS DE ESTUDIO

3.1. CASO 1: Canal de Acceso a Sitio 4 en Terminal Seagirt, Puerto de Baltimore *[Ref 4] [Ref 5]*

3.1.1. Ubicación

Terminal Seagirt y su canal de acceso, se encuentran ubicados en la ciudad de Batimore, Estado de Maryland, en Estados Unidos.

Figura 1: Ubicación Canal de Aproximación a Puerto de Baltimore y Sectores Estudiados



3.1.2. Características Meteoceánicas

Los vientos implementados en el modelo son de 25-30 nudos, principalmente desde el Sur y Noreste. Los efectos de corriente y oleaje se consideraron despreciables para el análisis.

3.1.3. Buque de Diseño

Para el análisis se utilizó un buque del tipo New Panamax, específicamente el MSC Kalina. A continuación en la **Tabla 1**, se presentan sus características.

Tabla 1: Nave de Diseño

Capacidad	13.798 TEU**s**
Eslora	366,0 m
Manga	51,3 m
Calado	14,5 m*
Desplazamiento	198.160 t*
DWT	135.406 t*

* Calado, desplazamiento y DWT limitado por restricciones de profundidad (50 pies ≈ 15.24 metros).

3.1.4. Descripción de las Obras

Terminal Seagirt es uno de los tres terminales que forma parte del Puerto de Baltimore, cuenta con 4 sitios de atraque y 112 hectáreas de respaldo. Los Sitios del N°1 al N°3, tienen una longitud de 953 m y una profundidad de 13,7 m. El Sitio N°4, construido recientemente el año 2012 posee

una longitud de 373,4 m y una profundidad de 15.2 m. Este sitio fue diseñado para atender naves del tipo New Panamax de 14.000 TEUs de capacidad. Para acceder a esta facilidad portuaria se utilizaría el canal Dundalk y una zona de maniobras, que poseen condiciones adecuadas para tránsito de naves menores a las del tipo New Panamax.

3.1.5.Situación de Análisis

El canal de acceso Dundalk previo a la operación del SitioN°4 posibilitaba la navegación de buques un poco menores a los del tipo New Panamax, con 362,3 m de eslora, manga de 43,2 m y 13,4 m de calado. Posterior a la construcción del SitioN°4 y durante la fase de preparación para la operación del mismo, las maniobras asociadas al buque de diseño fueron revisadas, ya que dada la estrechez del canal de acceso, sus puntos de inflexión, en combinación con las características de viento del sector y la nueva condición de uso para naves New Panamax, dificultaría las maniobras de acceso. Considerando lo anterior es que inicialmente pilotos e ingenieros realizaron propuesta de mejoramiento de las dimensiones de las obras y luego en forma posterior, se realizaron estudios de simulación en tiempo acelerado y en tiempo real sobre puente de mando, para naves New Panamax en el canal de acceso y zona de maniobras.

3.1.6.Resultados

Una vez ejecutadas las simulaciones, se llegó a las siguientes principales conclusiones:

- Las dimensiones existentes del canal de acceso y área de maniobras no eran seguras para la nave de diseño New Panamax descrita en la **Tabla 1**.
- Se realizaron mejoras al canal de acceso (ajuste en codos del canal y suavización del trazado) y se redujo significativamente el área de maniobras de la nave de diseño y junto con la operación de la flota de remolcadores de apoyo.
- Se definieron los límites de operación (vientos de hasta 30 nudos).
- Se confirmó la cantidad y tipos de remolcadores a utilizar para el tránsito del buque de diseño por el canal y área de maniobras, 2 remolcadores de 60 toneladas de capacidad de tracción y 2 remolcadores de trasmisión Z-drive de 40-50 t BP.

Al comparar las dimensiones establecidas por ingenieros y recomendaciones PIANC con las simulaciones en tiempo real, se puede observar la optimización obtenida mediante este último método en las obras. En la **Tabla 2** se muestra dicha comparación.

Tabla 2: Dimensiones de Diseño Maniobra Acceso a Sitio 4 Puerto Baltimore

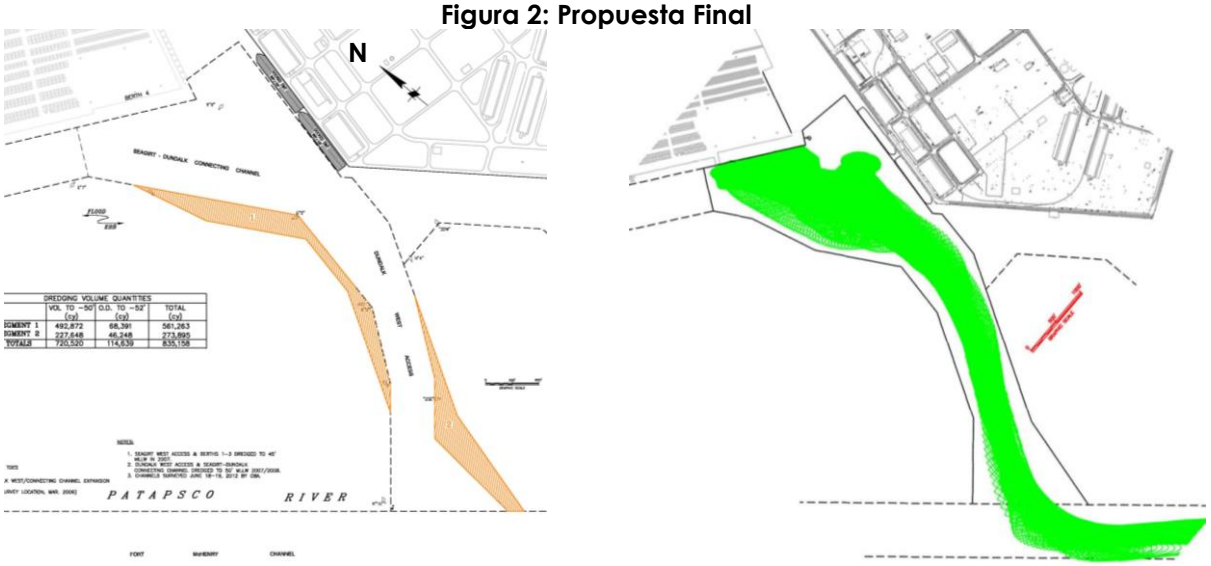
Sector	Ancho existente [pies] (metros)	Ancho Propuesto por Ingenieros, Pilotos y PIANC [pies] (metros)	Ancho Simulación [pies] (metros)
Ancho canal/ Factor Multiplicador	500 (152)	800 (244)/ 4,8 x Manga	600 (183)/ 3,6 x Manga
Zona maniobras/ Factor Multiplicador	1.340 (408)	2.400 (732)/ 2 x Eslora	1.590 (485)/ 1,32 x eslora

Mientras que la recomendación de pilotos e ingenieros para el canal de acceso habría sido de 244 metros de ancho, los resultados arrojados por las simulaciones muestran que un ancho de 183 m resultaría suficiente para permitir la operación segura del buque de diseño. De igual forma, el diámetro del círculo de maniobras siguiendo recomendaciones PIANC debería ser 732

metros de diámetro, los resultados de la simulación indican que 485 m de diámetro son suficientes.

La propuesta de dimensiones verificada mediante simulación tipo full bridge, reduce la cantidad de materia a dragar en 76.500 m^3. A continuación en **Figura 2** se observa una imagen con la geometría propuesta final (izquierda) y la verificación de las maniobras realizadas en la simulación (derecha).

Figura 2: Propuesta Final

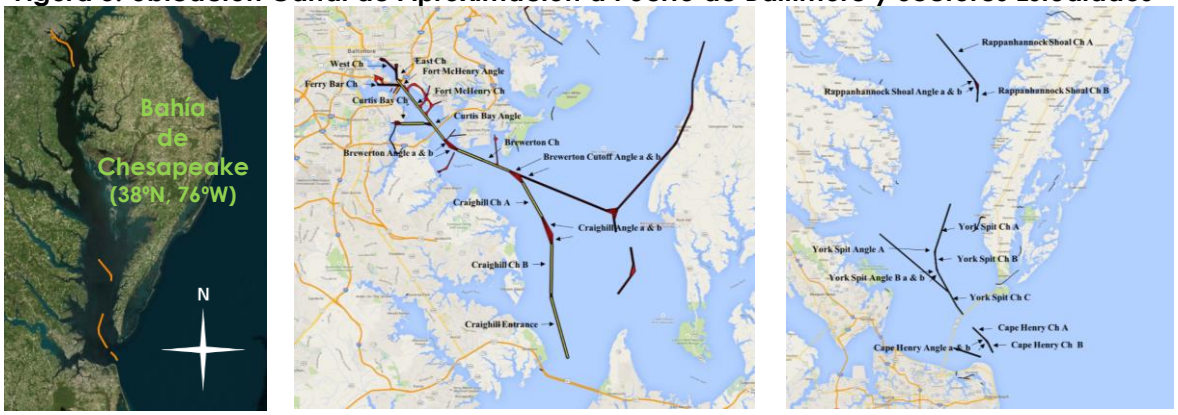


3.2. CASO 2: Canal de Aproximación al Puerto de Baltimore, Bahía de Chesapeake *[Ref 6]*

3.2.1. Ubicación

El canal de aproximación al Puerto de Baltimore discurre aproximadamente unos 270 km a lo largo de la Bahía de Chesapeake. Varios sectores críticos fueron analizados desde el punto de vista de la navegación segura.

Figura 3: Ubicación Canal de Aproximación a Puerto de Baltimore y Sectores Estudiados



3.2.2.Características Meteoceánicas

Los vientos implementados en el modelo son de 25-30 nudos, con dirección perpendicular a la dirección de tránsito de los buques (vientos en la zona pueden llegar desde cualquier dirección). Se incluyeron corrientes mareales a lo largo de todo el trayecto, simulando casos de marea llenante y marea vaciante. La acción del oleaje fue considerada únicamente en el sector correspondiente a la zona de aguas expuestas (Cape Henry Channel).

3.2.3.Buque de Diseño

Para el análisis se utilizaron dos buques de diseño: portacontenedores del tipo New Panamax, específicamente el MSC Kalina y el granelero Capesize Zhong Xing Hai, según **Tabla 3**.

Tabla 3: Naves de Diseño

	MSC Kalina	Zhong Xing Hai
Capacidad	13.798 TEU**s**	127.525 t
Eslora	366,0 m	300,0 m
Manga	51,3 m	50,0 m
Calado	14,5 m*	14,5 m*
Desplazamiento	198.160 t*	198.433 t*

* Calado y desplazamiento limitado por restricciones de profundidad (50 pies ≈ 15.24 metros).

3.2.4.Descripción de las Obras

El canal de aproximación y acceso al Puerto de Baltimore pretende ser ampliado para poder dar servicio a las nuevas embarcaciones New Panamax. Se espera que en un corto plazo estas naves sean manejadas en las terminales del Alto Chesapeake con la suficiente frecuencia y continuidad como para plantear la necesidad de establecer canales de navegación de dos vías, en los que se produzca el encuentro entre dos buques New Panamax.

El canal se encuentra en la actualidad dragado a una profundidad de 50 pies (15,24 m), pero su anchura es en algunos sectores insuficiente para dar servicio a estas naves. El ancho existente fue ejecutado como una primera fase de ampliación; sin embargo, para la segunda fase, que arrancó en Febrero de 2012, existe autorización para poder dragar un mayor ancho de canal. Tanto el ancho existente en el presente como el máximo autorizado se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 4: Anchos existentes y autorizados por Sector del Canal de Acceso al Puerto de Baltimore

Sector	Ancho existente [pies] (metros)	Ancho autorizado [pies] (metros)
Fort McHenry Channel	700 (213)	800 (244)
Curtis Bay Channel (1 vía)	400 (122)	600 (183)
Brewerton Channel	700 (213)	800 (244)
Craighill Channel	700 (213)	800 (244)
Rappahannock Shoal Channel	800 (244)	1.000 (305)
York Spit Channel	800 (244)	1.000 (305)
Cape Henry Channel	1.000 (305)	1.000 (305)

3.2.5.Situación de Análisis

Utilizando métodos determinísticos sencillos y en base a las condiciones medioambientales de los respectivos sectores, se establecieron, los anchos de canal necesarios para una maniobra segura. También se consideraron para ello recomendaciones realizadas por los pilotos prácticos. Éstos, junto con los anchos autorizados fueron puestos a prueba mediante simulaciones en tiempo real sobre puente de mando, para los sectores más críticos del canal.

Tabla 5: Anchos analizados en Sectores Críticos del Canal de Acceso al Puerto de Baltimore

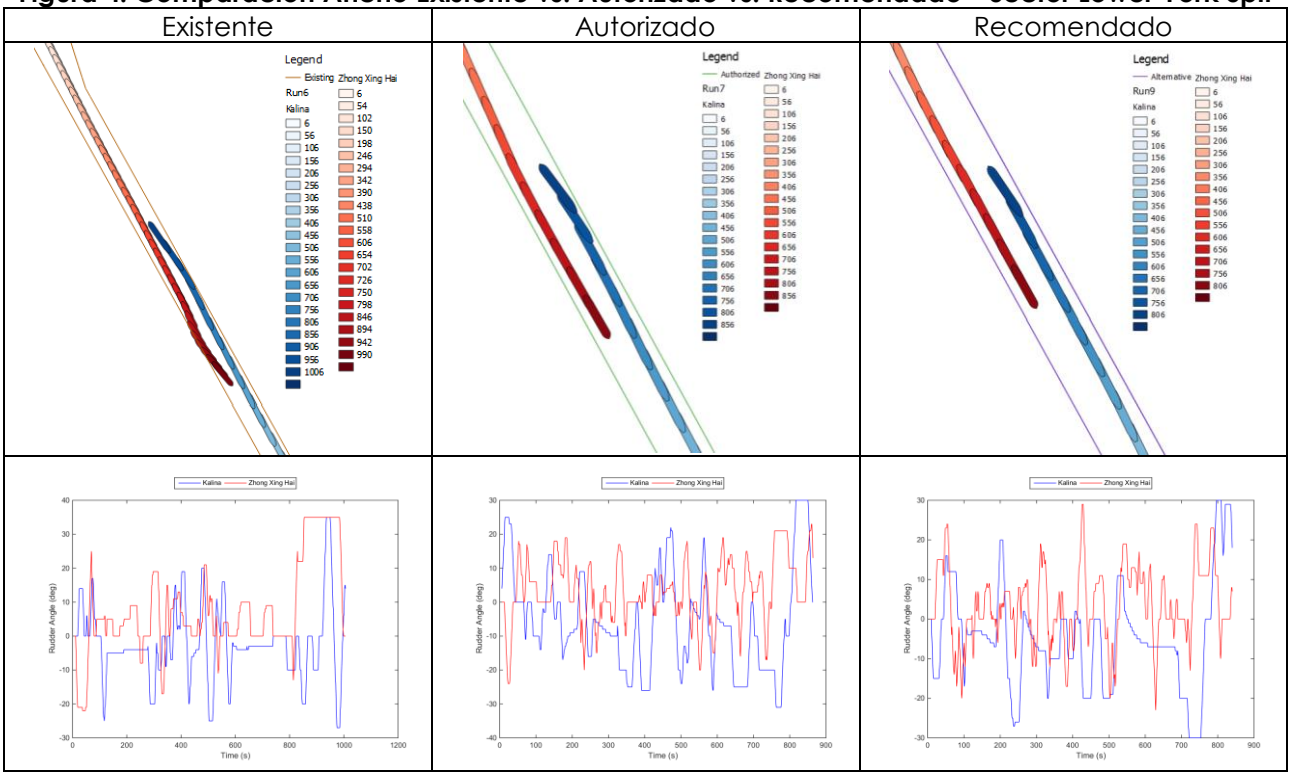
Sector	Ancho autorizado [pies] (metros)	Ancho recomendado con base en métodos determinísticos [pies] (metros)	
		USACE Engineering Manual – EM 1110-2-1613 *[Ref 11]*	Recomendaciones de PIANC
Craighill Channel	800 (244)	950 (290)	1.150 (350)
Rappahannock Shoal Channel	1.000 (305)	1.100 (335)	1.300 (396)
York Spit Channel	1.000 (305)	1.100 (335)	1.300 (396)

3.2.6.Resultados

Una vez ejecutadas las simulaciones, se llegó a las siguientes conclusiones:

- Los anchos de canal existentes son insuficientes para el cruce de buques tipo, mientras que el ancho autorizado es en líneas generales apropiado para la navegación segura. Esto se puede observar en la **Figura 4** a continuación.

Figura 4: Comparación Ancho Existente vs. Autorizado vs. Recomendado - Sector Lower York Spit



- La reserva en la capacidad de maniobra (margen disponible) es función del 1) ángulo del timón menor de 35° (máximo disponible), y 2) periodos de tiempo en el que se utiliza el timón a un ángulo máximo (uso sostenido del timón máximo implica falta de reserva en capacidad de maniobra). Las simulaciones mostraron que anchos menores a los autorizados resultarían en una utilización prolongada del timón, reduciéndose sensiblemente el margen de seguridad, tal y como se muestra en la **Figura 4**.
- Anchos adicionales proporcionan mayor margen de seguridad en todos los canales, pero no resultan absolutamente necesarios si la operación se gestiona adecuadamente.
- El control de la velocidad de tránsito durante el cruce es crítica para que le interacción generada entre buques no implique situaciones de inseguridad.

3.3. CASO 3: Área de Maniobras para Acceso a Terminal GNL Sabine Pass, Cameron Parish, Louisiana, USA *[Ref 3]*

3.3.1. Ubicación

La Terminal GNL Sabine Pass (SPLNG Terminal) se encuentra localizado en el canal navegable de un solo sentido de Sabine Pass, parte del canal Sabine – Neches, aproximadamente a una distancia de 22 millas náuticas de la boya de pilotos en el Golfo de México.

Figura 5: Localización de Terminal GNL Sabine Pass

3.3.2. Características Meteoceánicas

Los vientos implementados en el modelo son de 25 nudos llegando de todos los sectores dependiendo del caso (considerando la dirección más crítica para el escenario analizado). Se incluyeron corrientes asociadas a mareas llenantes y mareas vaciantes, con valores de hasta 2,5 nudos. No se consideró la acción del oleaje en el modelo.

3.3.3. Buque de Diseño

Para el análisis se utilizó un rango de buques gaseros desde los 125.000 m^3 hasta los 264.000 m^3 de capacidad. Para los efectos de este trabajo, se indica únicamente el buque de mayores dimensiones, de nueva construcción, con características presentadas en la **Tabla 6**. Durante la simulación de la maniobra en la dársena portuaria, se consideró un buque gasero de 200.000 m3 de capacidad atracado frente al muelle objetivo.

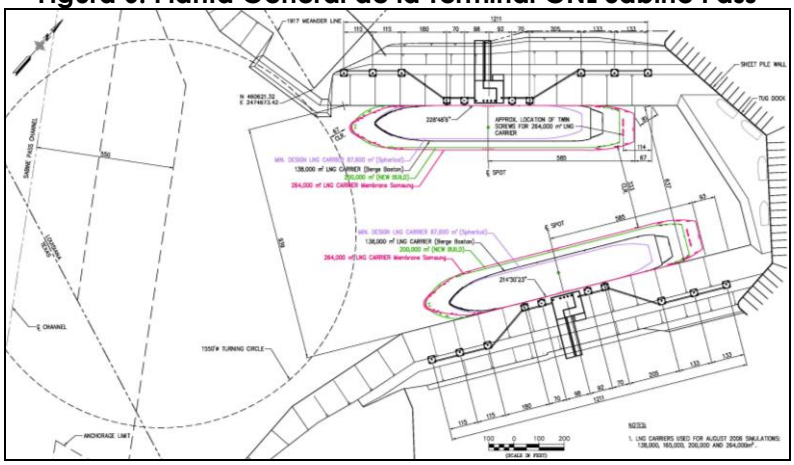
Tabla 6: Nave de Diseño Máxima

Capacidad	264.000 m^3
Eslora	345,0 m
Manga	53,8 m
Calado	12,0 m
Desplazamiento	174.800 t

3.3.4.Descripción de las Obras

Las instalaciones de la terminal marítima comprenden dos posiciones de atraque y un muelle para albergar la flota de remolcadores, construidas en el interior de una dársena artificial dragada en la margen Este del canal de Sabine Pass. El ancho de la dársena es variable, desde los 286 m en su parte exterior, hasta los 194 m en la interior, con una longitud de alrededor de 430 m. El acceso a dicha dársena se produce a través de un canal de navegación de 152 m de ancho, y un área de maniobras de diámetro 472 metros. El área de fondeo/espera temporal de los buques gaseros, previa al atraque en la terminal, se encuentra a menos de una milla náutica al Sur del círculo de maniobras.

Figura 6: Planta General de la Terminal GNL Sabine Pass



3.3.5.Situación de Análisis

Considerando las condiciones medioambientales identificadas en el sitio, se llevaron a cabo simulaciones en tiempo real sobre puente de mando (full bridge). El propósito de este estudio era el de validar las dimensiones de diseño; confirmar o redefinir, para los varios buques tipo, los límites medioambientales operativos bajo los cuales las maniobras de acceso, aproximación, atraque y desatraque se pueden realizar de forma segura; validar las operaciones de la flota de apoyo (remolcadores) y las potencias requeridas para manejar con seguridad los buques metaneros; evaluar la ubicación de las nuevas enfilaciones propuestas, identificar cambios necesarios al plan de ayudas a la navegación privado existente y producir propuestas de mitigación que mejoren la seguridad de las operaciones marítimas.

3.3.6.Resultados

Una vez ejecutadas las simulaciones, se llegó a las siguientes principales conclusiones:

- Las dimensiones del canal de acceso, área de maniobras y dársena de atraques son apropiadas para proporcionar maniobras de forma segura.
- Se realizaron mejoras en el muelle de atraque de remolcadores (interior de la dársena), facilitando la operación de la flota de apoyo.
- Se definieron los límites de operación (vientos de hasta 20 nudos y corrientes de 2 nudos).

Al comparar las dimensiones establecidas en el diseño y confirmadas como apropiadas por las simulaciones en tiempo real con las recomendadas por el método planteado por PIANC, se puede observar el carácter conservador de éstas últimas. Ver **Tabla 7** a continuación.

Tabla 7: Dimensiones del Elementos de Diseño del Terminal GNL Sabine Pass

Elemento de Diseño	Dimensiones Verificadas con la Simulación [pies] (metros)	Factor Multiplicador de las Dimensiones Verificadas con la Simulación	Factor Multiplicador Recomendado según método del PIANC utilizado en Diseño Conceptual
Ancho Canal de Acceso	550 (152)	2,82 x Manga	3,70 x Manga
Diámetro Área de Maniobras	1,50 (472)	1,37 x Eslora	2,00 x Eslora
Ancho Dársena Portuaria (máx/min)	939 (286) / 637 (194)	5,31 / 3,60 x Manga	5,0* x Manga

* PIANC solo hace referencia a distancia recomendada entre buque atracado y buque en tránsito (para baja velocidad es 2 x Manga), considerando por tanto apropiado 5 x Manga (2+1+1+separación entre atraque y buque en tránsito). Como comparación, la Recomendación Española de Obras Marítimas 3.1-99 ***[Ref 10]*** propondría 4,6 x Manga.

Mientras que la recomendación de PIANC habría sido la consideración de un canal de acceso de 200 metros de ancho, los resultados arrojados por las simulaciones muestran que un ancho de 152 m resultaría suficiente para permitir la operación segura del buque tipo máximo. De igual forma, el diámetro del círculo de maniobras debería ser casi 220 metros mayor para satisfacer los requerimientos recomendadas por PIANC. Algo similar ocurre con las dimensiones mínimas de la dársena portuaria.

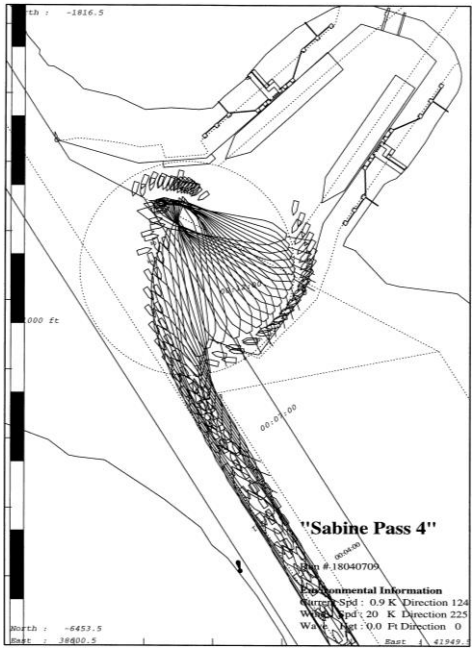


Figura 7: Maniobra de Acceso de buque de 265.000 m³ a Terminal GNL Sabine Pass

Adicionalmente, se obtuvieron los siguientes resultados:

- Se confirmó la necesidad de disponer de cuatro remolcadores de 75 toneladas de tiro nominal (bollar pull).
- La llegada de los buques se llevaría a cabo de una forma más segura si la zona de fondeo/espera se encontrara marcada con boyas en su extremo Sur y por el Norte en el límite de las aguas navegables.
- Se realizaron modificaciones en la configuración y diseño de las luces de enfilación.
- Se familiarizó a los pilotos prácticos de Sabine Pass en la maniobra de la nueva terminal.

3.4. CASO 4: Dársena Puerto Yolanda *[Ref 8]*

3.4.1. Ubicación

El proyecto se encuentra ubicado en Chile, en la Región de Valparaíso, en la ciudad y Bahía del mismo nombre, al este de los Terminales 1 y Terminal 2 existentes, entre el muelle Barón y la Caleta Portales.

3.4.2.Descripción de las Obras

Este terminal para transferencia de contenedores, con una capacidad de transferencia anual de 2,25 millones de TEUs, está compuesto por tres sitios de atraque, que atenderán buques del tipo New Panamax de 366 m de eslora de 14.000 TEUs de capacidad. La longitud de su frente de atraque es de aproximadamente 1.280 m, y está compuesta por un muelle marginal, y su explanada de respaldo tiene una extensión aproximada de 37,5 hectáreas. Además, el proyecto contempla un rompeolas que dé abrigo a dichos sitios de atraque, con un arranque perpendicular a la costa de aproximadamente 580 m de extensión y luego un desarrollo en forma paralela al frente de atraque de 1.600 m aproximadamente.

Figura 8: Ubicación Puerto Yolanda

3.4.3. Características Meteoceánicas *[Ref 1]*

Los vientos dominantes se presentan en invierno, provenientes del Norte (N) y el Noroeste (NW) con una velocidad máxima del viento de 13,3 m/s (~26 nudos).Vientos de esta magnitud suceden menos del 1% del tiempo. Las olas son desde el NNW (330°) principalmente y las olas superan 1 m de altura menos del 2% del tiempo. Por último, la velocidad media de corriente de 4 cm/s y la amplitud de marea en el sitio es de 1,8 m.

3.4.4.Buque de Diseño

Tabla 8: Nave de Diseño

Capacidad (m3)	14.000 TEU
Tipo de Barco	Container 17
Desplazamiento (mt)	201.700
Eslora (m)	366
Manga (m)	51,2
Calado con Carga (m)	15,6

3.4.5.Situación de Análisis

Dada las limitaciones de espacio existentes en la zona de emplazamiento del Puerto Yolanda que limita al Este con la Playa Portales, al Oeste con el Muelle Barón, al Sur con la ciudad y al norte con la batimetría existente, que presenta altas profundidades a una próxima distancia de la costa, es que la optimización de las áreas de maniobra se torna relevante y crítica respecto de la vialidad del proyecto.

Para este caso se analiza el dimensionamiento de las áreas de navegación, zona de reviro y ancho de dársena en base a dos filosofías de diseño diferentes. La primera utilizando normativa

internacional PIANC de referencia, y en segundo lugar una filosofía de diseño que utiliza una simulación de escritorio realizada para este fin. Lo que se intenta mostrar es que debido a una disminución en el ancho de la dársena del puerto, fue posible reducir los volúmenes de material necesario para la construcción del rompeolas.

La longitud del rompeolas fue determinada mediante Estudios de Agitación y Onda Larga y Análisis de buque atracado y Down-time ***[Ref 2]***. El ancho de canal de acceso no se incluye en este análisis debido al amplio espacio que provee la situación batimétrica existente. Es importante notar que los aspectos como tipo de nave de diseño y nivel de fondo definido para proveer maniobras adecuadas de ingreso y salida a los sitios de atraque, se mantienen fijos a la cota -17,5 m y no serán parte de las variables de la situación a analizar.

3.4.6. Resultados

Al realizar un dimensionamiento basado en la normativa PIANC se tiene que el ancho de dársena se establece en 256 m y círculo de reviro en la entrada de la dársena de 732 m de diámetro. Por su parte, basado en las simulaciones de escritorio, se confirma un ancho de dársena total de 205 m y la zona de reviro la maniobra se define con una forma similar a un trapecio y no perfectamente circular. En todos los casos se verificó que las menores distancias libres registradas entre la nave en tránsito con rompeolas y la nave atracada en el muelle, eran de al menos la mitad de la manga de la nave de diseño, es decir, del orden de los 30 metros (100 pies). Al comparar las dimensiones establecidas en el diseño y confirmadas como apropiadas por las simulaciones de escritorio con las recomendadas por el método planteado por PIANC, se puede observar las diferencias de dimensiones en la dársena del proyecto y su impacto en cuanto a las cantidades de obra. A continuación se presentan las diferencias en cuanto a la geometría, ver **Tabla 9**.

Figura 9: Planta Basada en Recomendaciones PIANC (izq.) vs. Simulaciones de escritorio (der.)

Tabla 9: Dimensiones del Elementos de Diseño del Terminal Yolanda

Elemento de Diseño	Dimensión final optimizada [metros] (pies)	Factor Multiplicador Obtenido como Resultado de la Simulación	Factor Multiplicador Recomendado según método del PIANC para Diseño Conceptual
Área de Maniobras	Forma trapezoidal	Área trapezoidal de 260.000 m^2	Area circular de 420.600 m2 (diámetro 2,00 x Eslora)
Ancho Dársena Portuaria	205 (656)	4,0 x Manga	5,0 x Manga*

* PIANC solo hace referencia a distancia recomendada entre buque atracado y buque en tránsito (para baja velocidad, 2xManga). Se considera por tanto apropiado 5xManga (2+1+1+separación entre dique y buque en tránsito).

Las cantidades de obra se muestran a continuación [Ref 7], incorporando aquellas que presentan diferencias relevantes entre una alternativa y otra.

Tabla 10: Cantidades de Obra

ÍTEM		NOMBRE	UNIDAD	PIANC	SIMULACIÓN
DRAGADO		Dragado Zona Maniobras	m^3	480.000	0
ROMPEOLAS	ARRANQUE	Relleno Granular Núcleo	m^3	430.000	340.000
		Suministro e Instalación Filtros Roca	m^3	5.700	3.700
		Suministro e Instalación Coraza Roca	m^3	77.000	57.000
	TRONCO	Relleno Granular Núcleo	m^3	1.550.000	1.050.000
		Suministro e Instalación Filtros	m^3	33.000	21.000
		Suministro e Instalación Coraza	m^3	250.000	196.000
	CABEZO	Relleno Granular Núcleo	m^3	801.000	591.000
		Suministro e Instalación Filtros Roca	m^3	55.000	43.000

Es relevante notar la cantidad adicional de dragado que incorpora la alternativa basada en normativa PIANC, la cual conlleva dragar aproximadamente 480.000 m^3 adicionales. Como es de esperarse, los elementos de las secciones de rompeolas que se definen para las áreas próximas al fondo marino son aquellas que se sufren mayor impacto al modificar la filosofía de diseño. Se observa que los rellenos y filtros de roca aumentan en general un 40% su cantidad, la coraza en un 30% y los dolos en un 20%, aproximadamente. Los tramos de rompeolas que presentan mayores diferencias es el tronco y cabezo, especialmente se aprecia un fuerte aumento material utilizado para el núcleo del tronco, en 550.000 m^3. Si bien el rompeolas se dispone a mayores profundidades en su extremo final o cabezo, la diferencia de cantidades de obra no es tan marcada como para el tronco, lo cual es debido a la batimetría más uniforme en dicho tramo.

Es importante mencionar que el estudio de maniobras realizado para este proyecto, también verificó la posibilidad de ingreso y salida de naves de 397 m de eslora (18.000 TEUS de capacidad) al Sitio 3, de dimensiones un tanto mayores a las del buque de diseño expuesto anteriormente en la **Tabla 8**.

4. CONCLUSIONES

La utilización de programas informáticos para la definición de rutas de navegación, canales de acceso, áreas de maniobras y zonas de aproximación a terminales portuarias es aplicada no únicamente como herramienta de optimización de diseños conceptuales y preliminares, sino como un paso necesario para avanzar en fases de diseño de detalle.

Las recomendaciones del PIANC deben ser vistas como una primera aproximación al diseño de canales de navegación, acceso a dársenas portuarias y áreas de maniobras. De hecho, PIANC documenta estas etapas de diseño, indicando la necesidad de aplicar (1) métodos determinísticos conservadores como etapa de diseño conceptual, y (2) modelos de simulación de maniobras de buques para la etapa de diseño de detalle. PIANC expone que "*Si bien el método de Diseño Conceptual puede utilizarse para llegar rápidamente a un diseño inicial canal, con frecuencia es necesario llevar a cabo una evaluación más detallada. El propósito puede ser simplemente el de proporcionar información adicional para satisfacer a*

propietarios/operadores y a marineros/pilotos que tienen que utilizar el canal satisfactoriamente, o puede ser para proporcionar información adicional y/o refinamientos en el diseño."
Adicionalmente la recomendación afirma que son varios los beneficios adicionales que los modelos de simulación de navegación implican para el diseño de terminales o puertos: "*Otros aspectos de llevar a cabo un diseño detallado (simulaciones) implican (la posibilidad de definir) el número, tipo y posición de las ayudas a la navegación, la consideración de facetas de navegación precisas (tales como la navegación a través de puentes), o problemas localizados en canales para los cuales los requisitos de ancho recomendados no pueden ser satisfechos y en los que el canal no se puede ser realineado.*"

Los programas de simulación por ordenador, ya sean en tiempo acelerado (*fast-time*) o en tiempo real (*real-time*), son herramientas vitales para la optimización de diseños de accesos marítimos (tanto en planta como en alzado), identificación de los límites operativos del puerto/terminal marítima, definición de las características de la flota de apoyo en la maniobra (tiro nominal/potencia y número de remolcadores, necesidad de embarcaciones de apoyo, etc.), y la familiarización y entrenamiento de pilotos/prácticos de puerto.

Como tal, la aplicación de estos modelos debe ser considerada como pieza fundamental en el proceso de diseño de puertos y terminales portuarias.

5. REFERENCIAS

Baird (2015), Estudios de Ingeniería Básica para el Terminal 3 de Empresa Portuaria de Valparaíso, 19 de Octubre 2015. ***[Ref 1]***

Geo Mar Ingeniería (2015), Estudio Oceanográfico Valparaíso, Sector Yolanda V Región de Valparaíso – Campaña de Verano, Abril 2015. ***[Ref 2]***

Moffatt & Nichol (2007), LNG Carrier Simulations April 16-20, 2007 Report, Sabine Pass LNG Terminal, Cameron Parish, Louisiana (USA). Chevron y TOTAL, Mayo 2007. ***[Ref 3]***

Moffatt & Nichol (2011), Fast Time Maneuvering Study Draft for Seagirt Berth 4, Baltimore, Maryland (USA). Maryland Port Administration, Enero 2012. ***[Ref 4]***

Moffatt & Nichol (2012), Preliminary Summary and Conclusions from SMT Berth 4 Vessel Simulations, Baltimore, Maryland (USA). Maryland Port Administration, Mayo 2012. ***[Ref 5]***

Moffatt & Nichol (2015), Full Mission Bridge Simulation for Channel Alternative Width Validation, Baltimore Harbor and Channels 50-Foot Project GRR, Baltimore, Maryland (USA). Maryland Port Administration, Maryland Environmental Service y US Army Corps of Engineers, Diciembre 2015. ***[Ref 6]***

Moffatt & Nichol (2016), Informe Presupuesto Preliminar 8863-DGE-INF-03-RevE, Estudio de Ingeniería Básica para Proyecto de Desarrollo Portuario Puerto Valparaíso. Empresa Portuaria Valparaíso, Enero 2016. ***[Ref 7]***

Moffatt & Nichol (2016), Informe Estudio de Maniobras 8863-NG-INF-01 Rev 1, Estudio de Ingeniería Básica para Proyecto de Desarrollo Portuario Puerto Valparaíso. Empresa Portuaria Valparaíso, Agosto 2016. ***[Ref 8]***

PIANC (2014), MarCom Working Group 121, Harbour Approach Channels Design Guidelines, Permanent International Association of Navigation Congresses. ***[Ref 9]***

Puertos de Estado (2000), Recomendaciones Españolas de Obras Marítimas ROM 3.1-99, Proyecto de la Configuración Marítima de los Puertos; Canales de Acceso y Áreas de Flotación. ***[Ref 10]***

USACE (2006), "Hydraulic Design of Deep-Draft Navigation Projects", EM 1110-2-1613, U.S. Army Corps of Engineers. ***[Ref 11]***