

SISTEMA INNOVADOR PARA EL SUMINISTRO DE LNG MEDIANTE UN BUQUE REGASIFICADOR (TERMINAL MEGA. BAHÍA BLANCA, ARGENTINA)

por José Ramón Iribarren¹, Carlos Cal², Luis López³,
María Victoria Martínez⁴, Raúl Atienza⁵, Jorge Zickermann⁶, Josu Murguialday⁷

RESUMEN

Este trabajo presenta la metodología y resultados principales de una amplia serie de estudios realizados para **Repsol-Gas Natural LNG** e **YPF**, cuyo objetivo fue el análisis de las condiciones de atraque de una **FSRU (Floating Storage and Regasification Unit)** (también llamado EBRV) en la **Terminal Mega del Puerto de Bahía Blanca** (Argentina), así como la combinación **FSRU+LNG carrier** abarloados, con el fin de **evaluar la viabilidad de operaciones de transferencia barco a barco de LNG** bajo diversas condiciones. Además se evaluó la influencia del paso de buques en navegación sobre el buque atracado. Para estos análisis se empleó como herramienta fundamental la simulación mediante el **modelo numérico SHIP-MOORINGS** desarrollado por Alkyon (Holanda). Para el análisis del paso de buques (“passing ships”) se contó con la colaboración de la Universidad de Delft en la aplicación del **modelo numérico DELPASS**.

También se realizó un estudio de maniobras de buques para la evaluación del acceso marítimo a la Terminal Mega, tanto por el buque FSRU de 138.000 m³ como por el buque tanque LNG de 138.000 m³ (para ser amarrado al FSRU y realizar las operaciones de descarga abarloados “ship-to-ship”). El análisis consideró la viabilidad de acceso marítimo en relación con las dimensiones del área de navegación y maniobra, considerando tanto maniobras normales como de la emergencia. Se realizó un detallado análisis usando el **simulador de maniobras en tiempo real** de SIPORT XXI, el instrumento más avanzado aplicable para este tipo de proyectos. En una fase preliminar se aplicó también el **modelo matemático SHIPMA**, desarrollado por Delft Hydraulics (Holanda), para analizar un gran número de maniobras de emergencia.

Es muy importante destacar el amplio equipo técnico participante en un proyecto de esta complejidad, dirigido por Repsol-Gas Natural LNG e YPF. Las principales empresas y organismos involucrados son: Repsol-YPF (Argentina), Mega (Argentina), Excelerate Energy (USA), Exmar (Bélgica), Naviera Elcano (España), Knutsen OAS España (España), Teekay (España), Skaugen (Noruega), Consorcio de Gestión del Puerto de Bahía Blanca CGPBB (Argentina), Prefectura Naval Argentina (Argentina) Meridian Maritime (Argentina), Siport XXI (España).

El Puerto de Bahía Blanca se eligió para este proyecto por una serie de factores, entre los que destacan:

- Puerto industrial (petróleo, graneles sólidos)
- Acceso próximo a red de gasoductos
- Proximidad relativa a BBAA
- Disponibilidad de instalaciones de la Compañía Mega (participada por Repsol-YPF)

Sin embargo, el puerto presentaba diversas limitaciones que debían de ser analizadas y resueltas:

¹ Director General. Siport 21. España, jose.r.iribarren@siport21.com

² Capitán de la Marina Mercante. Siport 21, España, carlos.cal@siport21.com

³ Gerente de Proyectos, Siport 21, España, luis.lopez@siport21.com

⁴ Ingeniera de Proyectos, Siport 21, España, victoria.martinez@siport21.com

⁵ Gerente de Proyectos, Siport 21, España, raul.atienza@siport21.com

⁶ Dirección de Transporte Marítimo. REPSOL GAS NATURAL LNG, España, jzickermann@streamrgn.com

⁷ Dirección de Transporte Marítimo. REPSOL GAS NATURAL LNG, España, jmurguialday@streamrgn.com

- El buque máximo admitido era un Panamax (245 x 32 x 12 m)
- El canal de acceso a puerto es de sentido único
- Presenta varios tramos complejos por su trazado o anchura limitada
- Existe una importante corriente de marea
- También son habituales los vientos cruzados al canal
- Los duques de alba de la Terminal fueron diseñados para buques menores
- Hay también importantes restricciones geométricas para situar el brazo de alta presión
- La posición del buque en el atraque también está muy condicionada por la geometría de los equipos

1. INTRODUCCIÓN

La crisis energética en Argentina durante el invierno austral de 2007 provocó la necesidad de incrementar el suministro de gas natural de manera acelerada en previsión de otro episodio semejante al año siguiente. Una terminal marítima de LNG convencional no era una solución adecuada, dado el dilatado plazo de construcción de la propia terminal, los tanques de almacenamiento y la planta regasificadora en tierra. En este sentido, un amplio equipo técnico dirigido por **Repsol-Gas Natural LNG** e **YPF** concibió, diseñó y analizó la viabilidad y operatividad de un sistema absolutamente innovador. Éste consiste en emplear un buque tanque de LNG especial, dotado de una planta regasificadora a bordo, como receptor de gas natural licuado transferido a flote mediante buques nodriza. El buque regasificador quedó amarrado en la terminal Mega de Bahía Blanca, que hubo de ser adaptada incluyendo la instalación de un brazo de descarga de gas a alta presión.

La solución presentaba notables dificultades técnicas, entre las que destacan una tipología y tamaño de buques nuevo en el puerto. Ello forzó la adaptación del sistema de atraque/amarre del muelle y el diseño de un sistema de amarre especial para el buque. Por otra parte, el canal de acceso al puerto presenta notables complicaciones, a la vista de su longitud, trazado y anchura y la presencia de intensas corrientes de marea. Finalmente, la terminal seleccionada se sitúa al borde del canal principal de navegación del puerto, lo que podría suponer una interferencia importante en las maniobras de los buques adyacentes.

2. ALCANCE DEL ANÁLISIS

El estuario de Bahía Blanca tiene una longitud aproximada de 100 km y una superficie de 2300 km². Está formado por una serie de canales orientados en dirección NW-SE y extensas planicies de marea e islas. Presenta altas velocidades de corriente. La vía de acceso tiene 190 m de ancho de solera mínima y 98 km de longitud, la cual permite la navegación de buques de gran porte y calado. Posee un sistema de balizamiento integrado por 62 boyas luminosas.

Se distinguen varios tramos principales:

- Canal de acceso exterior
- Canal de acceso interior
- Puerto Ingeniero White

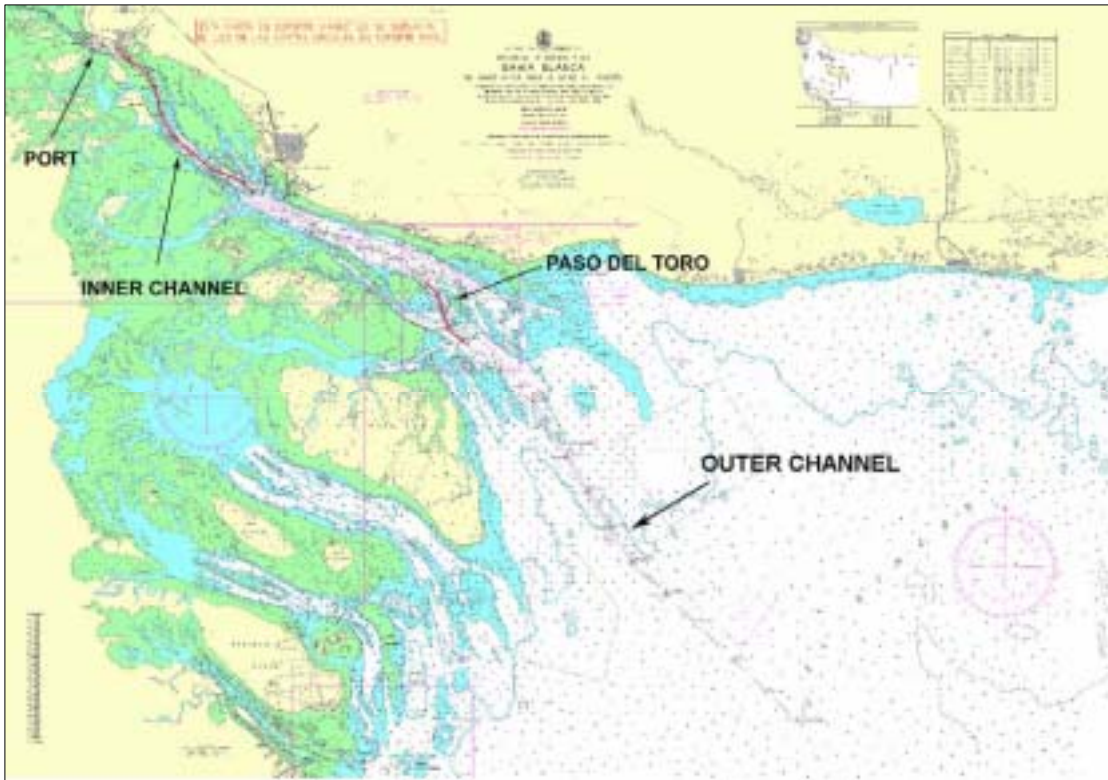


Figura 1. Estuario de Bahía Blanca



Figura 2. Planta de Puerto Galván y Terminal Mega



Figura 3. La Terminal Mega durante las tareas de adaptación

Los estudios técnicos realizados cubrieron los siguientes aspectos:

- Condiciones de atraque de una FSRU-EBRV (Floating Storage and Regasification Unit)
- Análisis de condiciones extremas
- Condiciones de atraque combinación FSRU+LNG carrier abarloadados
- Análisis de condiciones operativas
- Influencia del paso de buques en navegación (“passing ships”)
- Estudio de maniobras de buques para la evaluación del acceso marítimo
 - o Buque FSRU 138.000 m³
 - o Buque tanque LNG 138.000 m³
- Entrenamiento de Prácticos y Capitanes

El análisis de las condiciones de atraque se desarrolló sobre una FSRU de 138,000 m³ (buque “Excelsior”), equipada con tanques prismáticos, así como para un segundo buque LNG carrier, también de 138,000 m³ y tanques prismáticos, abarloado a la FSRU. Se analizó tanto el comportamiento de la FSRU sola como de los dos buques abarloadados para: 1) condiciones extremas definidas por la normativa OCIMF (viento y corriente) 2) condiciones severas características locales en la zona de estudio. El análisis de estas condiciones permitió analizar la resistencia de las líneas, defensas y bolardos bajo condiciones extremas. Además se establecieron los **límites en las operaciones de transferencia de gas licuado de un buque a otro**. Se establecieron recomendaciones para la optimización de la configuración de amarres.

El pantalán de la Terminal MEGA está próximo al canal de navegación interior del puerto, por lo que los buques atracados están expuestos a la influencia de los petroleros que entran y salen de Puerto Galván, especialmente cuando están abarloadados y realizando las operaciones de transferencia de carga. Por lo tanto, teniendo en cuenta la necesidad de continuar con las operaciones de la FSRU y las restricciones en las operaciones de transferencia de carga, se analizaron con detalle los movimientos de los buques y las fuerzas ejercidas sobre el sistema de amarre y defensas bajo diferentes condiciones de paso de buques.

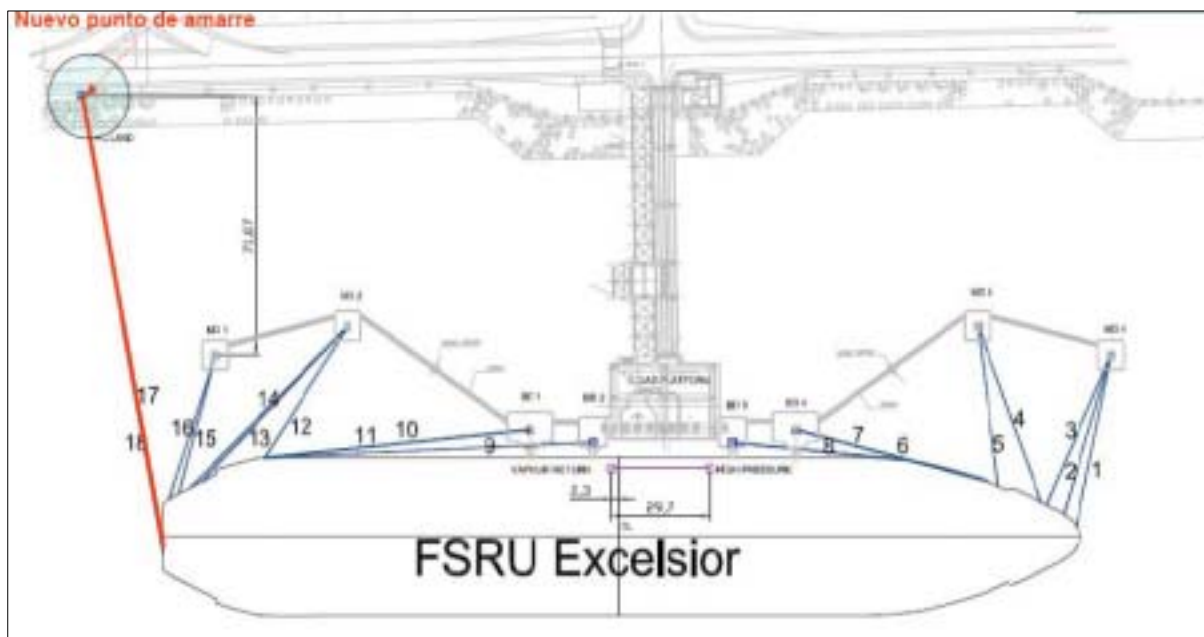


Figura 4. FSRU amarrada

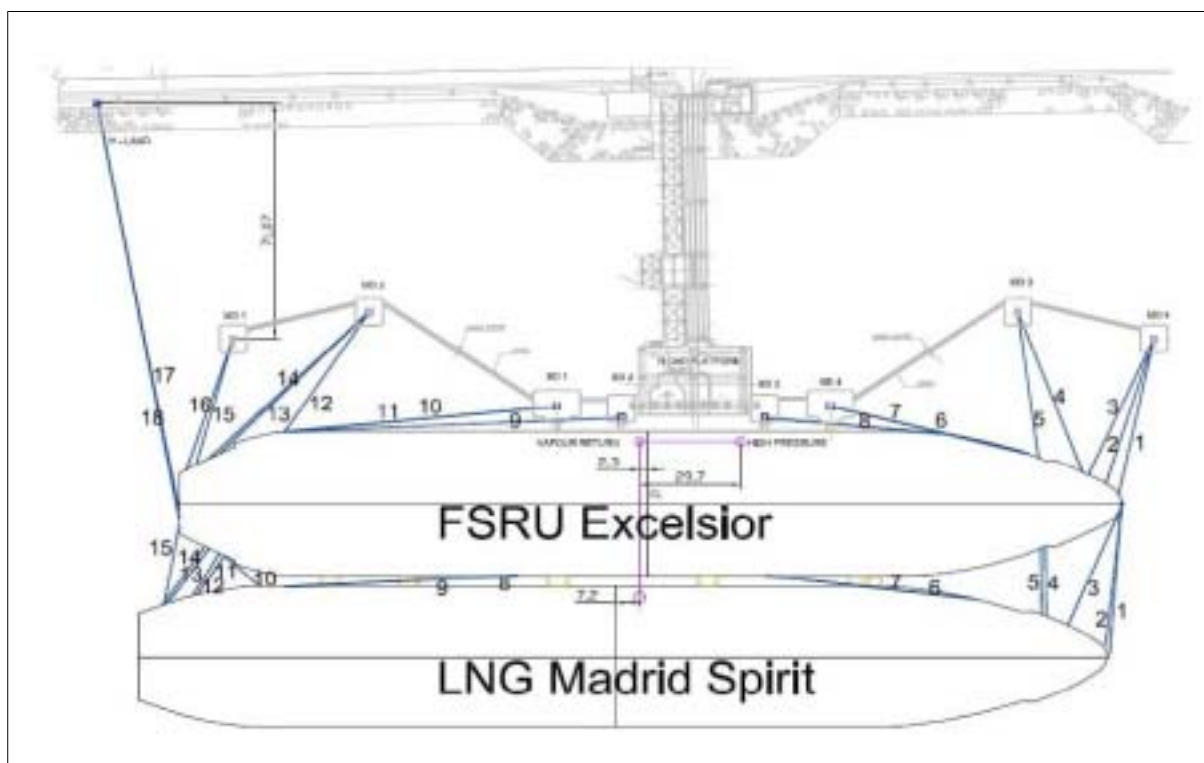


Figura 5. FSRU + LNG abarloados

- Los principales objetivos del análisis de las simulaciones de maniobra fueron:
- Evaluar las áreas de navegación y maniobra, considerando la disposición general tanto en planta como en alzado de la zona de estudio (Paso del Toro, Canal Interior y Puerto)
 - Evaluar los límites de operación en las maniobras de entrada y salida
 - Análisis de las estrategias de maniobras y asistencia de remolcadores
 - Análisis de situaciones de emergencia como base para elaborar planes de contingencia

- Entrenamiento de Prácticos del Puerto de Bahía Blanca y Capitanes de los buques que acceden a la Terminal MEGA.

A lo largo de los trabajos se emplearon diversos modelos numéricos, entre los que destacan:

- DelPass
- Ship-Moorings
- Shipma
- Simulador en tiempo real

Los buques analizados fueron la FSRU (o EBRV) “Excelsior” de 138.000 m³ con tanques prismáticos (L=277/266 m B=43.4 m T=11.5 m), propulsado con turbina de vapor y alta maniobrabilidad (hélices de maniobra en proa y popa) y el gasero tipo “Madrid Spirit” de 138.000 m³ igualmente con tanques prismáticos (L=284/277 m B=42.5 m T=11.4 m) y propulsado por turbina de vapor.

3. ESTUDIOS DE LOS BUQUES AMARRADOS

3.1 Objetivos y fundamento

El análisis de los buques amarrados tenía por objetivos garantizar unas condiciones de estancia en el muelle seguras y eficaces en dos situaciones:

- Buque FSRU solo en condiciones de supervivencia
Asegurar la permanencia del buque bajo condiciones extremas sin daños a las amarras defensas, estructura del muelle y al propio buque.

- Buque FSRU + buque LNG abarloado
Confirmar condiciones seguras para la transferencia de carga LNG de buque a buque, en términos de movimientos relativos en las mangueras de conexión y cargas en las líneas de amarre y las defensas, tanto entre buques como de FSR a tierra.

El **modelo numérico SHIP-MOORINGS** ha sido desarrollado por Alkyon (Hydraulic Consultancy & Research, Holanda). Reproduce el comportamiento de un buque específico atracado bajo la acción combinada del viento, el oleaje y la corriente. El sistema resuelve las ecuaciones de movimiento del buque en 6 grados de libertad (vaivén, deriva, guiñada, alteada, cabeceo, balance) en el dominio del tiempo, sin limitaciones en las amplitudes de movimiento.

La finalidad del modelo es el análisis de las condiciones de atraque de un buque en situación operativa (carga/descarga) o en condiciones límites de permanencia. Los resultados de la simulación permiten valorar las amplitudes de movimiento del barco y las cargas transmitidas a las defensas y a los elementos de amarre en una condición de carga determinada.

Para ello, se define un modelo del buque en una condición de carga específica teniendo en cuenta los siguientes aspectos: formas del casco, características hidrostáticas, desplazamiento, centro de gravedad e inercia, coeficientes de fuerzas de flujo estático y dinámico, coeficientes de fuerzas de deriva del oleaje, coeficientes de fuerzas del viento, masa añadida y funciones de transferencia del oleaje.

En la construcción del modelo se definen también la disposición de las líneas de amarre y defensas, así como sus características elásticas individuales. Contempla elementos de comportamiento lineal y no lineal.

Como resultado, se obtienen tablas y gráficos de las siguientes variables: 6 movimientos, así como las velocidades y aceleraciones correspondientes; fuerzas en amarras individuales; fuerzas en defensas individuales. Asimismo, se elaboran análisis estadísticos y espectrales de las variables citadas, junto con curvas de excedencia. Finalmente, se genera una animación de los movimientos del buque, con vistas en planta y transversal, que permite observar su comportamiento con detalle.

Esta técnica de análisis ha sufrido un enorme desarrollo en los últimos años. En particular, el modelo que se describe ha sido elaborado por un equipo de ingenieros especialistas en hidrodinámica, hidráulica, cálculo numérico y desarrollo de sistemas con amplia experiencia en el análisis del comportamiento del buque atracado.

Por otra parte, se ha aplicado también el **modelo numérico DelPass**, desarrollado por la Delft University of Technology (Holanda), que implementa el modelo del “doble cuerpo” y permite calcular la serie temporal de las fuerzas de succión ejercidas por uno o varios buques moviéndose paralelamente a otro atracado, teniendo en cuenta la geometría del canal.

Además de los tipos de buques (formas del casco y condición de carga), las principales variables que definen las fuerzas de succión son:

- Velocidad del buque en tránsito
- Rumbo del buque en tránsito (respecto a crujía del buque amarrado)
- Profundidad del canal
- Distancia de paso entre los buques
- Configuración de la sección transversal del canal (vertical, talud, etc.).

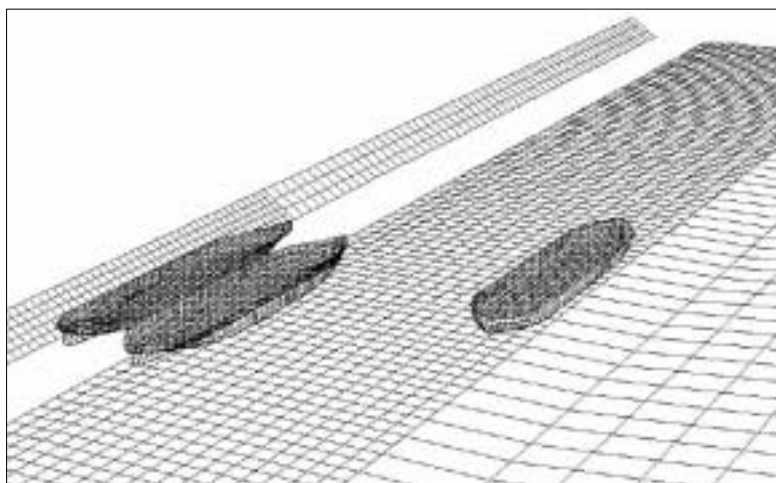


Figura 6. Modelo de simulación DelPass

3.2 Casos analizados

En cuanto al comportamiento de los buques amarrados, se consideraron dos situaciones:

- | | |
|---------------|--|
| - FSRU sola | - Límites OCIMF (60 nudos de viento (racha 30 s) + corriente 3 nudos) |
| | - Condiciones características (resultado de un análisis extremal de vientos) |
| - FSRU + LNGC | - Límites OCIMF (60 nudos de viento (racha 30 s) + corriente 3 nudos) |
| | - Condiciones características operativas (limitadas a 40 nudos) |

De este modo, se detectaron los límites de permanencia y operación y se adecuaron los sistemas de amarre para garantizar una estancia segura.

En lo que se refiere a la posible interferencia de los buques en tránsito en las proximidades de la Terminal Mega, se calcularon inicialmente las fuerzas de interacción, para en una segunda fase simular la respuesta dinámica de la FSRU o el conjunto FSRU+LNGC. Se consideraron diversos valores para la velocidad de paso (4-5-6-7 nudos) y también varias distancias de paso (55-70-100-120 m) de los petroleros máximos que acceden al interior del puerto.

De este modo, se obtuvieron como resultados curvas límite de velocidad - distancia de paso, basadas en criterios conjuntos de movimientos del buque atracado y cargas sobre amarras y/o defensas.

4. ESTUDIOS DE MANIOBRA DE BUQUES

4.1 Objetivos y fundamento

Los objetivos de esta fase de los estudios fueron:

- Evaluar áreas de navegación y maniobra
- Evaluar límites de operación, tanto para maniobras de entrada como de salida
- Análisis de estrategias de maniobra
- Evaluación de asistencia de remolcadores
- Análisis de emergencias
- Entrenamiento de Prácticos y Capitanes

Para ello, en primer lugar se analizaron en profundidad las condiciones de viento y corrientes en la zona, recopilando información histórica.

Se construyó un modelo virtual de los tramos principales del canal de acceso y del puerto en el simulador de SIPORT XXI. El modelo de simulación incluyó los siguientes conceptos:

- Disposición general:

Información de la topografía y batimetría de la zona de interés, así como un modelo visual necesario, para presentar en tiempo real durante la simulación la topografía del entorno, las estructuras portuarias existentes (muelles, escolleras, pantalanes etc.), edificios y equipos de carga/descarga, así como señalización marítima.

- Condiciones meteorológicas:

Información detallada de las condiciones físicas y meteorológicas específicas de la zona. En particular: Campos de corriente; Campos de oleaje, con la distribución de alturas y direcciones locales para los principales sectores; Campos de viento, con la distribución de velocidad y dirección local.

- Buques y remolcadores:

Modelos hidrodinámicos de los buques objetivo que reproducen adecuadamente su comportamiento durante la maniobra, navegando en aguas profundas o de calado limitado y sometidos a la acción de las corrientes, el oleaje y el viento. Se incluyeron los remolcadores necesarios para la ejecución de las diversas maniobras, teniendo en cuenta sus dimensiones principales, potencia, tiro a punto fijo y características del sistema propulsor.

Se reprodujeron las maniobras de acceso y salida de los buques objetivo empleando el simulador de maniobra de buques en tiempo real de SIPORT XXI (modelo MERMAID 500 desarrollado por MARIN-MSCN (Holanda)). Este sistema reproduce el comportamiento de un buque específico durante la ejecución de las maniobras de acceso o salida de puerto, sometido a la acción de los agentes ambientales (viento, corriente, oleaje, profundidad limitada, succión de orilla, etc.) y auxiliado, en su caso, por remolcadores.

El Capitán o Práctico usuario del sistema opera en un puente con instrumentación real y radar sintético, percibiendo el movimiento del buque en tiempo real sobre una pantalla de 260° de amplitud horizontal y 12 m de diámetro, así como los sonidos ambientales.

El modelo matemático es de una alta precisión y opera con 6 grados de libertad (movimientos del buque tanto en el plano como en la vertical). Permite reproducir de forma muy flexible buques de tipología variada, con sistemas de propulsión y gobierno diversos (1/2 hélices propulsoras, paso fijo/variable, hélices transversales de maniobra, etc.). Su concepción admite el desarrollo de maniobras de aproximación y atraque, con o sin remolcadores, así como de fondeo y amarre. Dispone de herramientas para la generación detallada de modelos de puertos y escenarios de maniobra con total versatilidad. Además, incorpora aplicaciones para el análisis de las simulaciones específicamente adaptadas a ingeniería portuaria y operaciones náuticas.

Las características de maniobrabilidad de los buques están recogidas en una serie de coeficientes hidrodinámicos (constantes de proporcionalidad entre fuerzas y movimientos y sus derivadas). Estos se determinan mediante ensayos con modelo físico en canal o extrapolación de datos anteriores y se adquieren como un juego de coeficientes para cada barco. El método de medición es muy riguroso y se contrasta con los tests de maniobrabilidad habituales, tanto en aguas profundas como poco profundas:

- curvas régimen de máquina-velocidad
- maniobra de giro
- maniobra de zig-zag
- maniobra de parada
- maniobra de aceleración
- maniobra de espiral

La definición de los buques se completa con ficheros de dimensiones, características de propulsión, equipos auxiliares de maniobra, coeficientes de respuesta al viento (fuerzas y momentos para diversos ángulos de incidencia), coeficientes de respuesta al oleaje (fuerzas, momentos y movimientos verticales para diversos períodos y ángulos de incidencia) y coeficientes de succión de orilla.

El sistema y método de trabajo propuesto incorpora la actuación humana en el desarrollo de las maniobras. Por ello, su utilización permite obtener resultados de gran precisión, integrando gran parte de los factores involucrados en las maniobras reales. Como consecuencia, es especialmente adecuado para el análisis detallado de condiciones de maniobra especialmente complejas, en las que el factor humano resulta más relevante.



Figura 7. Simulador de maniobra de buques en tiempo real (Siport XXI)

4.2 Simulación de maniobras

El programa de simulación de maniobras cubrió tanto condiciones normales (maniobras de entrada, con dos opciones de reviro, y de salida) como diversas situaciones de emergencia:

- Pérdida de propulsión en el canal
- Parada de emergencia en el canal
- Pérdida de propulsión en el interior
- Bloqueos de timón

- Salida de emergencia
 - o Viento extremo
 - o Corriente extrema
 - o Remolque limitado

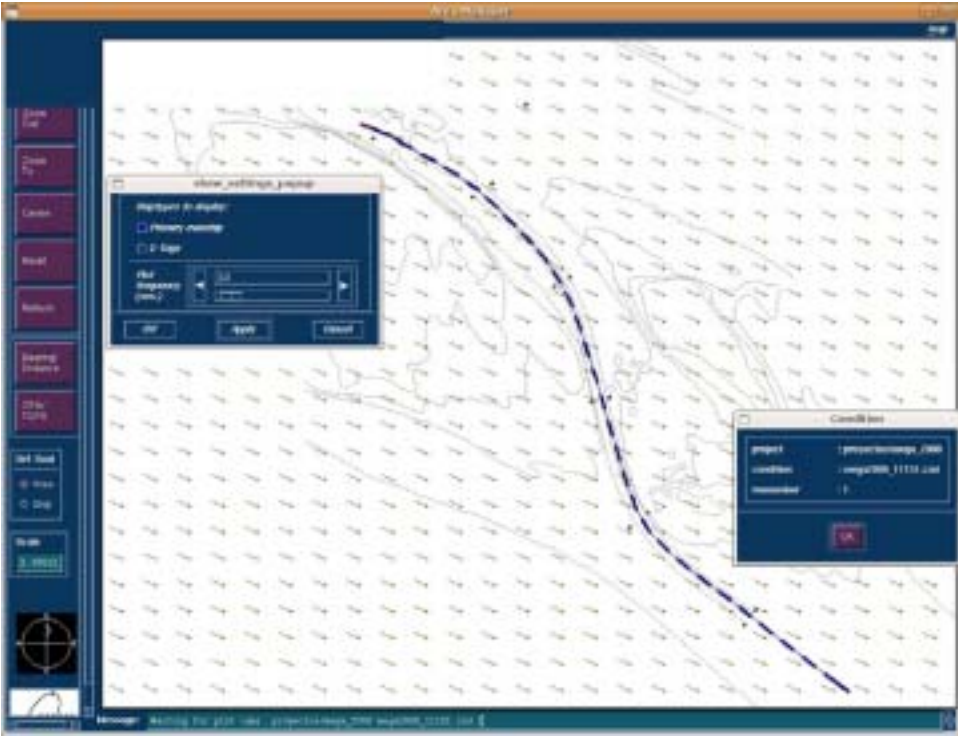


Figura 8. Trayectoria simulada (Paso del Toro)

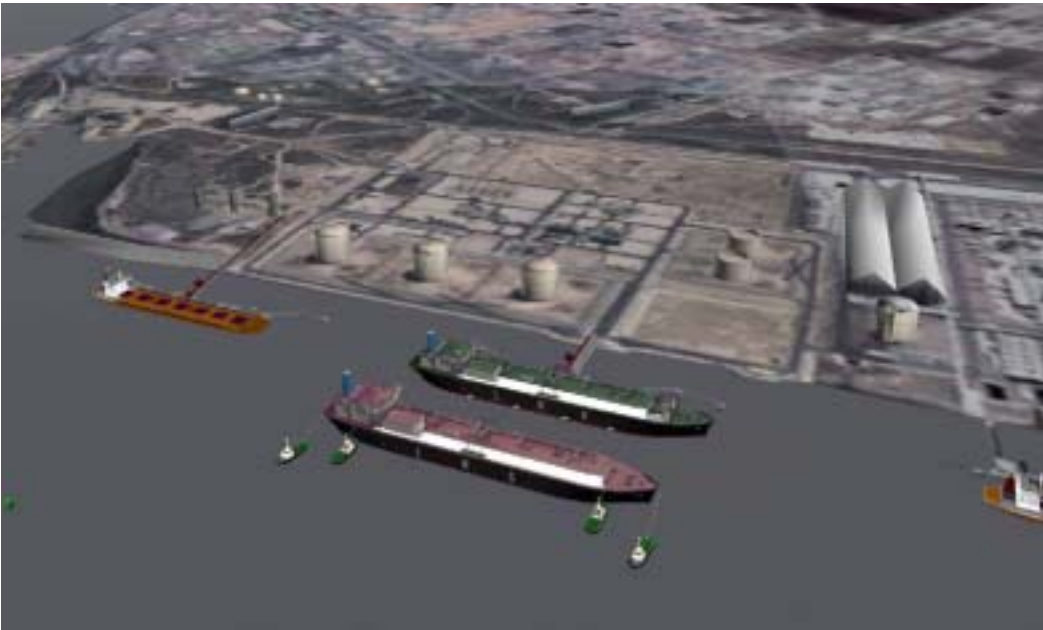


Figura 9. Modelo de simulación de maniobras

En total se cubrieron 85 escenarios diferentes y se realizaron 108 simulaciones, lo que supuso más de 60 horas de simulación.

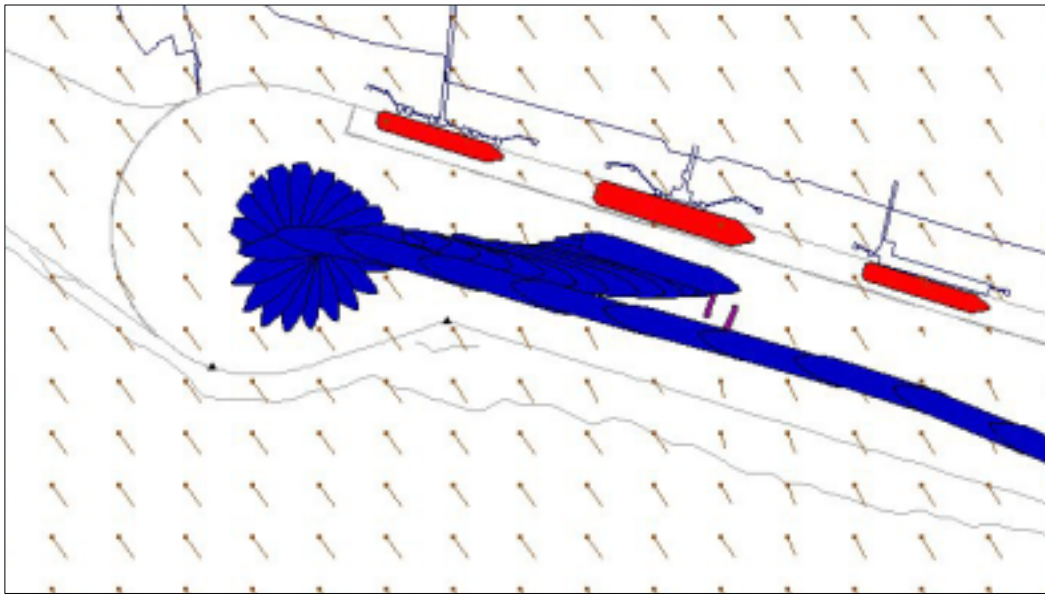


Figura 10. Maniobra de reviro y atraque

5. CONCLUSIONES

Los resultados del estudio han asegurado la viabilidad y seguridad de las operaciones proyectadas, dando respuesta a los diversos interrogantes iniciales.

Por otra parte, el plazo de ejecución de los estudios y puesta en marcha de la Terminal ha sido extraordinariamente breve.

Los estudios de prefactibilidad comenzaron en Octubre de 2007, los estudios de simulación se desarrollaron entre Febrero y Marzo de 2008 y ello permitió obtener los permisos correspondientes en Mayo (ante OPDS (Organismo Provincial de Desarrollo Sostenible), Prefectura Naval Argentina, Vías Navegables, Vialidad Provincial y ENARGAS). Previamente se habían llevado a cabo los estudios de riesgos (HAZID / HAZOP) de Diciembre a Marzo de 2008. La adecuación de las instalaciones supuso dotar al Muelle de Mega de los necesarios sistemas de seguridad, la construcción de un punto de amarre adicional, el traslado y montaje del brazo de descarga, el tendido de un gasoducto de conexión y el tendido de líneas criogénicas, como pasos fundamentales. Así, el buque regasificador atracó a principios de Junio de 2008, comenzando la regasificación ese mismo mes.

A lo largo del año 2008 (Junio-Septiembre) se realizaron seis operaciones de transferencia de LNG, con más de 290.000 t de gas licuado. Fue la segunda operación mundial a nivel comercial de regasificación y transferencia simultánea de gas natural licuado (GNL) entre dos buques. Las operaciones han continuado con éxito en el año 2009.



Figura 11. Buque regasificador atracado



Figura 12. Operación de transferencia STS “Ship-to-Ship” en la Terminal Mega