

ESCUELA DE GRADUADOS EN INGENIERÍA PORTUARIA

CATEDRA

DISEÑO DE VÍAS NAVEGABLES

PROFESOR TITULAR

INGENIERO RAÚL S. ESCALANTE

PROFESOR ADJUNTO

INGENIERA GISELA SIVORI

TEMA 15

SIMULACIÓN – MODELOS MATEMÁTICOS

Noviembre 2017

TEMA 15
SIMULACIÓN – MODELOS MATEMÁTICOS

INDICE

15	SIMULACION - MODELOS MATEMÁTICOS
15.1	CONSIDERACIONES GENERALES
15.2	NECESIDAD DE LA SIMULACIÓN
15.3	USO DE LA SIMULACIÓN
15.4	DIFERENTES TIPOS DE SIMULACIÓN
15.5	ELEMENTOS CONSTITUYENTES DE LOS MODELOS
15.5.1	Base de datos topográficos y medioambientales
15.5.2	Modelo de buque
15.5.3	Modelo propiamente dicho
15.6	PLANIFICACIÓN DE LA SIMULACIÓN
15.7	FAST TIME SIMULATION TECHNIQUES
15.7.1	Ventajas
15.7.2	Desventajas
15.7.3	Diagrama de Abkowitz
15.7.4	Análisis estadístico
15.7.5	Modelo SHIPMA
15.7.6	Validación del modelo matemático del buque
15.8	REAL TIME SIMULATION TECHNIQUES
15.8.1	Criterios de evaluación
15.8.2	Resultados obtenidos
15.9	SIMULADORES DE MANIOBRA MARÍTIMA
15.9.1	Validación del modelo
15.9.2	Participación de los prácticos
15.9.3	Modelo del puente de mando
15.9.4	Proceso a seguir para realizar un estudio en SMM
15.10	COMPARACIÓN DE MODELOS
15.11	SECUENCIA DEL PROYECTO
15.12	ASPECTOS A CONSIDERAR EN LA EVALUACIÓN DE RESULTADOS
15.13	BIBLIOGRAFÍA

INDICE DE FIGURAS

Figura 15.1	Diagrama de flujo para la ejecución del proyecto (PIANC, 1997)
Figura 15.2	Diferentes tipos de simulación (PIANC, 1992)
Figura 15.3	Diagrama de Abkowitz
Figura 15.4	Ejemplo de salida FTST (PIANC,2014)
Figura 15.5	Ejemplo de salida del modelo SHIPMA
Figura 15.6 (a)	Modelo SHIPMA – Datos de entrada
Figura 15.6 (b)	Modelo SHIPMA – Datos de entrada
Figura 15.7	Archivo .MAN – Maniobra del buque
Figura 15.8	Parámetros del archivo .MAN
Figura 15.9	Parámetros del archivo .MAN
Figura 15.10	Piloto automático – Control de velocidad
Figura 15.11	Modelo SHIPMA – Vista de la pantalla principal
Figura 15.12	Validación modelo de buque – Turning circle
Figura 15.13	Validación modelo de buque – Zig Zag
Figura 15.14	Corridas de simulación – Modelo Toolbox

Figura 15.15 Modelo Toolbox
Figura 15.16 Modelo Toolbox – Menu principal
Figura 15.17 Modelo Toolbox – Características del buque
Figura 15.18 Modelo Toolbox – Consola principal de maniobra
Figura 15.19 Paraná de las Palmas – Vuelta del Este – Buque granelero
Figura 15.20 (a) Ejemplo de resultados
Figura 15.20 (b) Ejemplo de resultados
Figura 15.21 Vista desde el puente de un SMM
Figura 15.22 Niveles de simulación en SMM
Figura 15.23 Secuencia de ejecución del proyecto

INDICE DE TABLAS

Tabla 15.1 MARIN – Lista parcial de modelos de buque
Tabla 15.2 Comparación de modelos
Tabla 15.3 Comparación de modelos (Puglisi, 2000)
Tabla 15.4 Mediciones de performance

15 SIMULACIÓN – MODELOS MATEMÁTICOS

15.1 CONSIDERACIONES GENERALES

La simulación es el proceso de diseñar un modelo de un sistema real y realizar experimentos con ese modelo con el propósito de entender el comportamiento del sistema o para evaluar diversas estrategias para la operación del mismo.

Vamos a denominar “simulación” a la realización de estudios de verificación del proyecto mediante modelos, tanto modelos matemáticos como modelos físicos. En esta oportunidad se detallarán los modelos matemáticos mientras que los modelos físicos se explicitarán en el Tema 16 de estos apuntes. Hay de todas maneras aspectos muy similares en el tratamiento de ambos tópicos que por lo que se realizarán también aquí consideraciones generales válidas para los diferentes tipos de modelos.

Un aspecto importante a tener en cuenta es que los modelos son una herramienta de verificación de un diseño y que aunque pretenden representar la realidad de una manera razonablemente fidedigna nunca dejan de ser una representación de la misma. Y por lo tanto la fidelidad que se logre con esa representación va a depender de muchos factores que habrá que analizar y tener en cuenta en cada caso.

Dentro de los factores que influyen en la confiabilidad de los resultados está la calidad de los modelos matemáticos utilizados, los datos de base, la verosimilitud de la validación y/o calibración y otros aspectos.

La simulación ofrece un método relativamente económico para asegurar que la solución técnica elegida satisface los requerimientos del usuario de una manera eficiente.

Recordemos que a los efectos de realizar el proyecto de un canal de navegación existen diversas herramientas de acuerdo al nivel que se esté desarrollando. Esos niveles son:

- Reglas del arte (Rules of thumb)

- Manuales (Guidelines)

- Modelos matemáticos

- Modelos físicos

En el desarrollo del curso se han mencionado hasta ahora las dos primeras herramientas y en el tema actual y los siguientes se desarrollaran los correspondientes a modelos

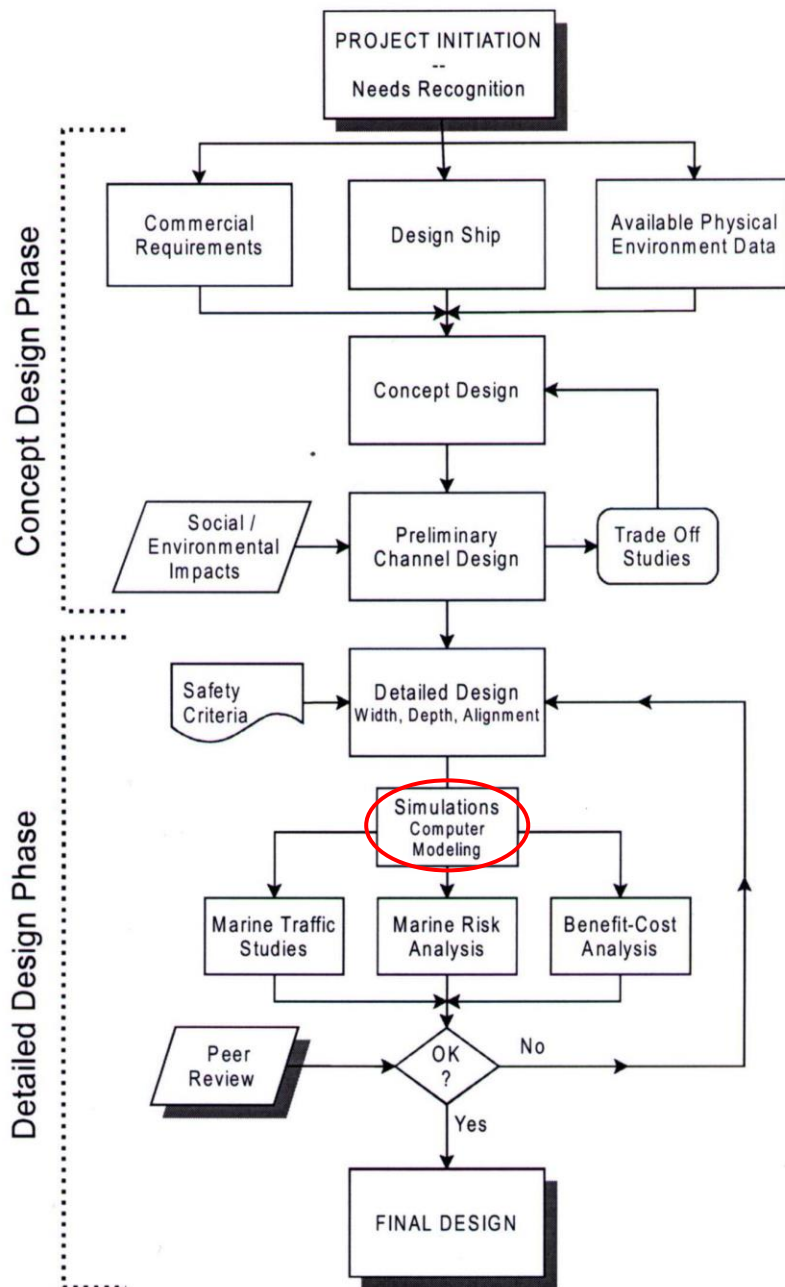


Figure 2.4. The Channel Design Process (after [4]).

Figura 15.1 – Diagrama de flujo para la ejecución del proyecto (PIANC 1997)

15.2 NECESIDAD DE LA SIMULACIÓN

Se ha realizado el proyecto de la obra de navegación utilizando las herramientas adecuadas para el nivel correspondiente. En lo que respecta a la traza elegida, así como el ancho asignado al canal se presentan habitualmente observaciones de distinta naturaleza por parte de los interesados directos en la misma. Por un lado, los prácticos que van a estar a cargo de la navegación de los buques consideran que el canal es estrecho, o sea, que el ancho asignado al mismo no es suficiente para navegar en condiciones de seguridad. Por otra parte, el Comitente de la obra que va a estar a cargo del pago de la misma considera que el canal es demasiado ancho y que podría reducirse y así reducir el costo del mismo.

Frente a esta disyuntiva es necesario recurrir a herramientas más sofisticadas de proyecto que permitan convencer a todas las partes involucradas en el proyecto.

En determinadas oportunidades puede suceder que se presenten observaciones acerca de problemas prácticos de tipo operativo que pueden estar relacionadas con temas de percepción, reacción o capacidades de manejo del buque. Todas ellas requieren incluir el comportamiento y reacciones del ser humano (factor humano) en el proceso de proyecto.

El otro elemento a demostrar es la seguridad del canal, o lo que es lo mismo, el riesgo que implica el proyecto.

Al proveer de una herramienta de simulación al proyectista se consigue una mejora general para tener una operación segura y eficiente al asistir en demostrar la operación de la vía navegable en forma previa a navegar con un buque real en el área.

El objetivo de utilizar la simulación en el diseño de vías navegables es probar, demostrar y documentar diferentes escenarios con alternativas de vías navegables bajo diferentes condiciones hidro meteorológicas con el objeto de identificar condiciones operativas seguras y eficientes.

Asimismo, los resultados obtenidos mediante modelos pueden servir para mostrarle al Comitente de manera gráfica las ventajas o desventajas del proyecto y así favorecer su aprobación.

Los tipos de modelos que se van a considerar son

- Modelos de simulación rápida (Fast Time Simulation Techniques)
- Modelos de simulación en tiempo real (Real Time Simulation Techniques)
- Simuladores de Maniobra Marítima

15.3 USO DE LA SIMULACIÓN

Una referencia bibliográfica de mucha importancia es Webster (1999). Esta publicación es citada en todos los artículos y libros que se escriben sobre simulación y se justifica su lectura, aunque hayan transcurrido muchos años desde su publicación. Webster destaca claramente la importancia de la simulación por un lado y por otro indica todos los cuidados que hay que tener al utilizar la misma a los efectos de tener representaciones válidas.

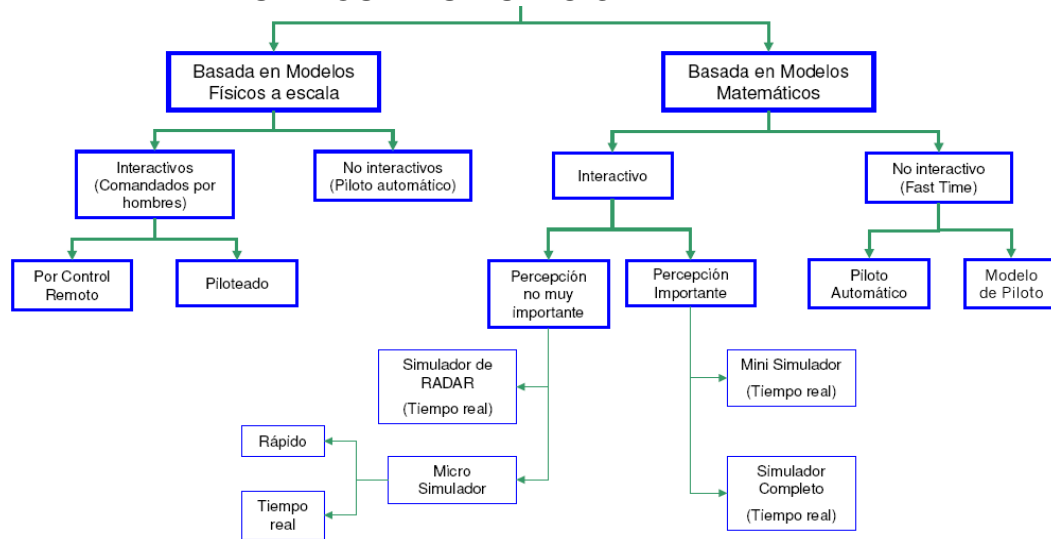
Webster (pp xviii) hace la importante pregunta de cuándo es necesario utilizar técnicas de simulación e indica tres aspectos importantes:

- a) El riesgo de la operación del buque es un aspecto significativo en el diseño. La incorporación de las habilidades del práctico en la predicción del comportamiento de un buque en una determinada vía de navegación es una capacidad que solamente posee la simulación. Pueden identificarse con estas técnicas las diferencias de riesgo que surgen de una variedad de condiciones ambientales críticas. Igualmente pueden ser evaluadas las ayudas a la navegación necesarias para disminuir aun más ese riesgo.

- b) La optimización del costo de la obra y del diseño son temas importantes en el proyecto en estudio. Con la simulación se puede determinar las diferencias operativas entre alternativas
- c) Son relevantes intereses contrapuestos entre participantes con experiencia técnica y otros sin esa experiencia (políticos) en el proceso de toma de decisiones del proyecto. Los resultados no requieren experiencia técnica para ser entendidos y permiten convencer a todas las partes de las soluciones adoptadas.

Uno o varios de los ítems mencionados están habitualmente presentes en los casos de diseño de vías navegables. Por ello la simulación debería ser hoy una herramienta standard en el diseño. El nivel de sofisticación a utilizar depende de cada proyecto.

15.4 DIFERENTES TIPOS DE SIMULACIÓN



PIANC – Capability of Ship Manoeuvring Simulation Models for Approach Channels and Fairways in Harbours – Report of Working Group No 20 – Supplement to Bulletin Nº 77 (1992)

Figura 15.2 – Diferentes tipos de simulación (PIANC 1992)

En la Figura 15.2 se muestra un gráfico obtenido de PIANC (1992) donde se muestran los diferentes tipos de simulación que se aplican en el estudio de las vías navegables. Se presenta este gráfico al solo efecto de destacar el interés desde hace muchos años de PIANC en la problemática de la simulación

15.5 ELEMENTOS CONSTITUYENTES DE LOS MODELOS

Los modelos matemáticos han tomado en los últimos años una gran difusión. Esto es debido en gran parte al aumento de potencia de las computadoras al mismo tiempo que su disminución de costo y tamaño.

Los modelos matemáticos están compuestos por módulos que representan a) una base de datos geográfica; b) un modelo hidrodinámico; c) un modelo de buque

En general, los modelos tienen módulos similares a pesar de las diferencias de operación de los mismos.

Los modelos están compuestos por una serie de componentes básicos que son comunes a todos los tipos de modelos y que se describen a continuación

15.5.1 Base de datos topográficos y medioambientales

Para el desarrollo del modelo es necesario disponer de información detallada de

- Batimetrías
- Corrientes
- Mareas
- Olas
- Vientos
- Características de los bancos
- Aspectos visuales del terreno circundante
- Instalaciones portuarias
- Ayudas a la navegación

Los datos e ingresan a una base de datos geográfica para su fácil manejo y verificación.

Dependiendo del tipo y sofisticación del modelo alguno de estos aspectos puede estar desarrollado en mayor o menor medida.

Por ejemplo, los aspectos hidrodinámicos se pueden ingresar como datos o pueden ser el resultado de modelos hidrodinámicos aplicado a cada caso.

Es importante recordar que el modelo es una herramienta muy valiosa que ayuda a entender la problemática en estudio pero que no es milagrosa. Esto significa que los datos que se ingresan al modelo deben ser de la mejor calidad posible para obtener resultados confiables

15.5.2 Modelo de buque

Un componente fundamental de los modelos de simulación lo constituye el modelo del buque que es un modelo matemático que reproduce con la mejor precisión posible la maniobrabilidad de un buque en el caso de los modelos matemáticos y una representación física en el caso de los modelos físicos.

En la realidad los buques navegan más del 95 % del tiempo en aguas abiertas y a velocidad de crucero (sea speed) El tiempo que estos buques transcurren en aguas restringidas como son los canales de navegación y en las zonas portuarias es muy reducido. Sin embargo, es necesario que los modelos de buques que se utilizan en el proyecto de canales de navegación y áreas portuarias sean capaces de reproducir maniobras a baja velocidad. Los que solo reproducen las maniobras a sea-speed no son adecuados para este propósito

El modelo del buque debe ser capaz de reproducir los movimientos del buque como respuesta a las fuerzas actuantes sobre él. Para poder realizar estos modelos es necesario poder definir coeficientes de las ecuaciones de movimiento. Estos coeficientes se obtienen de modelos físicos realizados en laboratorios especializados.

Cada buque requiere un modelo propio. No es adecuado escalar los modelos en función de otros existentes.

Un laboratorio de renombre que se dedica desde hace muchos años a todo tipo de estudios sobre buques es MARIN, ubicado en Wageningen, Holanda. Este Instituto es de renombre mundial y conocido por todos los ingenieros navales.

La calidad del modelo del buque se puede determinar también por los grados de libertad que están representados. Los buenos modelos incluyen los movimientos en los seis grados de libertad.

MARIN tiene una lista de modelos de buques que vende en forma comercial. Es interesante la lectura de la lista de buques disponible pues muestra que es necesario utilizar en las modelaciones el buque más adecuado. En la Tabla 15.1 se presenta una lista parcial de los modelos de buques ofrecidos por MARIN

CODE		SHIPS DATA						
	Ship's type	Length over all	Length between perpendiculars	Beam	Depth	Draught amid ship's	Displacement	Dead Weight tonnage
		[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	tons	tons
BUL004	Bulk Carrier	297.00	285.00	49.00	24.30	16.70	205000	184000
	Bulk Carrier	297.00	285.00	49.00	24.30	9.00	107000	184000
BUL007	Bulk Carrier	283.00	269.00	41.60	22.65	15.50	149000	125000
BUL008	Bulk Carrier	320.00	310.00	53.00	25.80	18.90	274000	210000
	Bulk Carrier	320.00	310.00	53.00	25.80	9.96	139300	210000
BUL010	Bulk Carrier	209.00	200.00	32.20	18.10	6.40	33890	47503
BUL016	Bulk Carrier	120.00	108.40	16.90	11.00	7.20	11265	6600
BUL020	Bulk Carrier	277.00	266.40	42.20	22.50	15.20	154700	150000
BUL021	Bulk Carrier	242.00	234.00	39.60	22.02	16.50	126400	100000
BUL022	Bulk Carrier	198.40	185.00	24.40	15.10	10.00	37843	32377
BUL024	Bulk Carrier	290.00	280.00	43.00	22.00	9.00	92200	150000
	Bulk Carrier	290.00	280.00	43.00	22.00	17.00	180000	150000
	Bulk Carrier	290.00	280.00	43.00	22.00	15.20	160900	150000
BUL025	Bulk Carrier	200.00	190.50	32.20	16.60	10.80	54800	48000
BUL027	Bulk Carrier	240.00	228.60	32.20	17.80	7.12	41760	68000
BUL028	Bulk Carrier	225.00	210.00	32.20	17.80	6.80	36400	65000
	Bulk Carrier	225.00	210.00	32.20	17.80	13.00	76000	65000
BUL034	Bulk Carrier	342.00	328.00	63.50	30.20	23.00	442000	365000
	Bulk Carrier	342.00	328.00	63.50	30.20	22.65	442000	365000
BUL036	Bulk Carrier	300.00	285.00	45.00	22.50	16.50	180000	150000
	Bulk Carrier	300.00	285.00	45.00	22.50	9.00	92200	150000
BUL040	Bulk Carrier	245.30	233.60	32.20	19.00	13.00	80000	65000
BUL042	Bulk Carrier	225.00	217.00	32.20	17.80	13.40	79700	65000
	Bulk Carrier	225.00	217.00	32.20	17.80	9.00	53400	59800
	Bulk Carrier	225.00	217.00	32.20	17.80	12.00	71200	59800
BUL045	Bulk Carrier	180.00	171.00	25.50	15.90	10.40	27550	30000
	Bulk Carrier	180.00	171.00	25.50	15.90	5.40	19000	30000
BUL046A1	Bulk Carrier	295.00	284.00	44.00	23.90	17.00	186000	150000
BUL046A4	Bulk Carrier	295.00	284.00	44.00	23.90	11.80	127500	150000
BUL064A2	Bulk Carrier	184.70	178.00	28.43	17.80	10.50	43990	39000
BUL064A5	Bulk Carrier	184.00	178.00	28.43	17.80	6.50	26550	39000
BUL065A1	Bulk Carrier	201.00	193.70	29.40	17.70	11.70	56500	47000
BUL047A1	Bulk Carrier	280.00	266.00	40.00	20.50	15.00	130000	100000
BUL047A4	Bulk Carrier	280.00	266.00	40.00	20.50	10.00	90000	100000
BUL053	Bulk Carrier	244.40	236.00	38.70	20.50	13.00	108000	105000
BUL061	Bulk Carrier	247.60	234.80	39.70	22.70	15.85	123000	103000
BUL062	Bulk Carrier	265.00	252.00	40.00	21.00	13.70	121000	120000
BUL120	Bulk Carrier	277.00	266.40	42.20	22.50	13.30	131200	150000
BUL242	Bulk Carrier	225.00	217.00	32.20	18.40	12.00	69450	58750

Tabla 15.1 – MARIN – Lista parcial de modelos de buques disponibles

Es interesante observar que, para algunos buques como el BUL024, se presentan tres opciones de diferente calado (9m, 15,20 m y 17m) y para cada una de ellas un diferente desplazamiento. Esto es así porque no es lo mismo para la maniobrabilidad del buque que navegue con 9 m de calado que con 17 m de calado. Por lo tanto, para la simulación son dos buques diferentes y requieren dos modelos de buque.

Hay modelos de simulación simples que poseen una estructura de modelo de buque y que solicitan al usuario ingresar el tipo de buque, por ejemplo, buque

portacontenedores, y las dimensiones principales y a partir de allí ya habilitan un modelo de buque para el caso a estudiar. Este tipo de aproximaciones sirven para uso didáctico, pero no son recomendables para investigaciones de proyectos reales

15.5.3 Modelo propiamente dicho

El modelo propiamente dicho consiste en una serie de ecuaciones que resuelve paso a paso el sistema de fuerzas actuantes sobre el buque y determina la posición, rumbo y velocidad para un paso de tiempo posterior.

En el párrafo 15.7.3 se describe el diagrama de Abkowitz que representa esta situación.

15.6 PLANIFICACIÓN DE LA SIMULACIÓN

Hay un sinnúmero de factores que deben ser tenidos en cuenta cuidadosamente cuando se efectúa la planificación de un estudio de simulación.

Entre otros aspectos se puede enumerar:

- Determinación del lay-out presente y futuro de la vía navegable o zona portuaria a ser estudiada
- Condiciones ambientales a ser consideradas: vientos, corrientes, mareas, olas, swell, batimetría, efecto de bancos, visibilidad (operaciones diurnas/nocturnas), etc
- Tipo de usuarios, buques y combinación de tráficos
- Condiciones de emergencia a ser incluidas en las simulaciones
- Elección del tipo de simulador a utilizar
- Determinación de la participación de actores principales durante la simulación. Quienes y cuantos
- Determinación acerca de si el estudio debe incluir recomendaciones para capacitación de prácticos/patrones de remolcadores/capitanes
- Determinación del buque de diseño y remolcadores tipo a ser utilizados en la simulación

15.7 FAST TIME SIMULATION TECHNIQUES

Esta denominación se utiliza para designar modelos de simulación de vías navegables que funcionan con tiempo de computadora en contrario de los denominados modelos a tiempo real.

Los modelos denominados Fast Time se refieren a: a) que los tiempos de ejecución del modelo son los tiempos requeridos por la computadora para correr el modelo; b) que las maniobras del buque son ejecutadas por un piloto automático.

Las FTST pueden utilizarse en las etapas iniciales de planificación especialmente cuando se están evaluando diversas alternativas.

Es una herramienta bidimensional que opera en forma acelerada y no tiene ninguna persona que actúe en el manejo de la embarcación. Los datos de entrada requeridos por el modelo incluyen el buque de proyecto, datos geográficos detallados incluyendo batimetría, condiciones oceanográficas y meteorológicas, dimensiones de la vía navegable y restricciones. Requiere que se ingrese la trayectoria deseada a seguir por el buque que luego será utilizada por el piloto automático para verificar su posición

Es una herramienta muy valiosa que permite evaluar casos o alternativas a través de la simulación de maniobra de buques. Por ejemplo, puede utilizarse en los siguientes casos:

- Entradas a puertos
- Zonas de giro
- Pasaje bajo puentes
- Navegación en canales
- Entradas a dársenas
- Operaciones Offshore

El modelo permite evaluar la factibilidad de realizar las maniobras en condiciones de seguridad bajo la acción de condiciones ambientales predefinidas. En efecto, la facilidad y rapidez con se ejecutan las corridas permite, en un determinado cao, evaluar todas las combinaciones de aspectos ambientales que se consideren factibles. Por ejemplo, para el caso de estudiar el canal de acceso de entrada a un puerto que va a estar sujeto a condiciones de vientos, corrientes y olas, se pueden realizar ensayos en condiciones de calma, con vientos de diferente intensidad y diferentes direcciones, con corrientes de diferente intensidad y con olas de diferente altura, periodo y dirección, cada efecto por separado y posteriormente ensayos con combinaciones razonables de los efectos de olas, corrientes y vientos combinados.

De esta manera se puede determinar de qué manera cada uno de los efectos ambientales afecta la navegación del buque y en qué manera. Así se puede evaluar si el canal proyectado es adecuado o si debe modificarse alguna de sus características (ancho, rumbo) o si conviene extender la escollera de protección del puerto. Este análisis puede repetirse para los diferentes buques tipo elegidos para el proyecto.

También se puede determinar la necesidad de la utilización de asistencia de remolcadores.

15.7.1 Ventajas

- Es una herramienta de bajo costo
- Todas las condiciones físicas están incorporadas
- Es una herramienta fácilmente transportable de un lugar a otro, lo que permite la participación de diversos actores
- Puede suministrar rápidamente una apreciación del problema como parte de un estudio de factibilidad inicial
- Permite evaluar rápidamente múltiples escenarios
- La herramienta es accesible para un profesional especializado o puede obtenerse por medio de empresas que tienen el sistema listo para utilizar
- El sistema provee una distribución probable de trazas en un tiempo relativamente corto
- Provee rápidamente información de los resultados de la simulación
- Permite una relativamente sencilla modificación de los escenarios en base a los resultados obtenidos

15.7.2 Desventajas

- Los ensayos no son a tiempo real y esta es la mayor desventaja de esta herramienta
- Por el hecho de realizar las maniobras mediante un piloto automático no permite evaluar la influencia de factores humanos

- La verosimilitud de la simulación depende de la calidad del modelo de piloto automático
- No hay posibilidad de interacción entre buques

15.7.3 Diagrama de Abkowitz

SHIPMA module

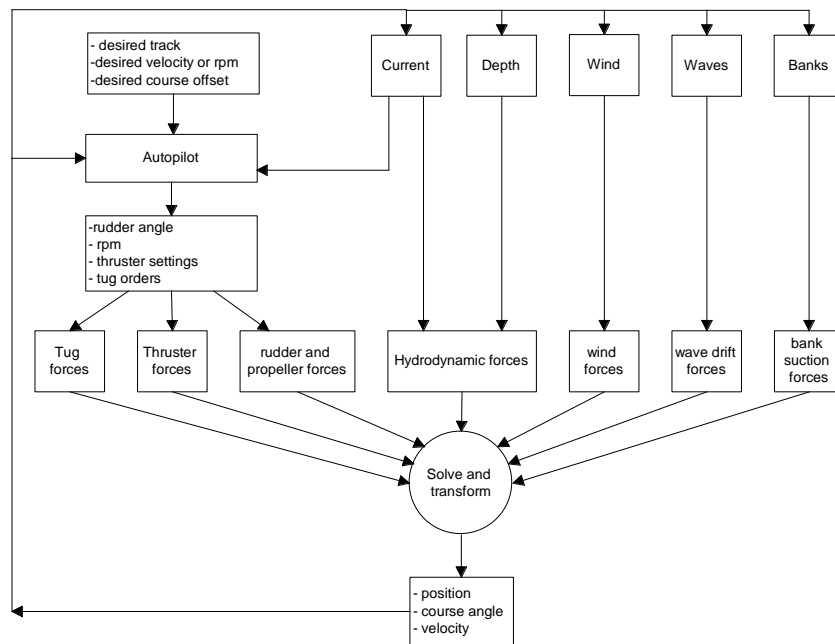


Figura 15.3 – Diagrama de Abkowitz

El diagrama de Abkowitz (1964) muestra la relación entre los diferentes factores actuantes en el modelo y la forma de resolverlos. En el diagrama es fundamental la función del piloto automático que se describe más adelante y que es la función que decide la manera en que se desarrollará la navegación a partir de una posición inicial.

Es importante destacar que para operar las técnicas de simulación rápida requieren que se les suministre la trayectoria que debe seguir el buque, la velocidad requerida para navegar y la máxima distancia que se permite al buque alejarse de la trayectoria señalada antes de tomar alguna acción. Esos son datos de entrada al modelo y en conocimiento del piloto automático. Son también datos para cada punto del modelo las corrientes actuantes, las profundidades, viento, olas y características de los bancos.

El piloto automático da órdenes para fijar el ángulo de timón, las rpm, el uso de hélice de proa y el uso de remolcadores. Cada uno de estos aspectos se convierte en fuerzas provocadas sobre el buque por la acción de los remolcadores, hélice de proa, máquina y timón que, junto con las fuerzas hidrodinámicas, fuerzas provocadas por el viento y el oleaje y la succión de bancos permite resolver un sistema de ecuaciones que

suministra la nueva posición, rumbo y velocidad. Para un paso de tiempo siguiente se vuelve a repetir el proceso.

El piloto automático utiliza la trayectoria deseada y el máximo alejamiento permitido para utilizar máquina y timón para mantener el curso.

El diagrama de Abkowitz es muy importante pues representa la lógica empleada en la simulación en cualquiera de sus versiones. Para el caso de simulación a tiempo real basta con reemplazar el piloto automático con un práctico que tome las decisiones correspondientes. En este caso se denomina “man in the loop”

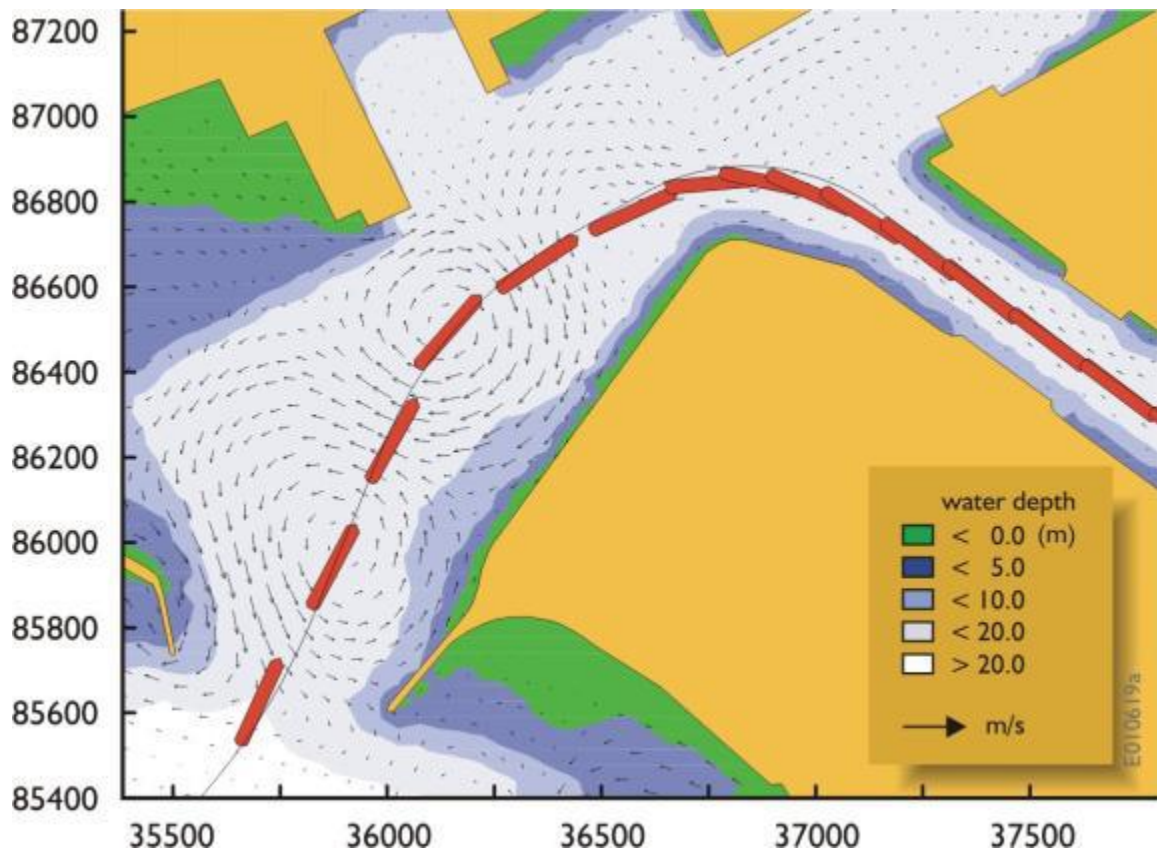


Figura 15.4 – Ejemplo de salida FTST (PIANC, 2014)

15.7.4 Análisis estadístico

Para ser efectiva las FTST requieren realizar un gran número de corridas a los efectos de permitir un análisis estadístico de los resultados

El piloto automático consiste en general de cinco o más parámetros principales los cuales pueden ser variados para representar un rango de acciones humanas de prácticos reales.

Estos parámetros pueden incluir la distancia de anticipación, ganancia, fase y otros aspectos del algoritmo del piloto automático y el máximo ángulo de timón que puede ser utilizado

Adicionalmente, los algoritmos de control de máquinas y de control de remolcadores van a tener un número de parámetros. Para que los resultados tengan sentido es necesario realizar un número de corridas repetidas para cada condición operativa con los parámetros para seguir la traza variando dentro de un rango para representar un

rango de performance de los operadores. Si esto no se realiza de esta manera el proceso es equivalente a utilizar el mismo algoritmo todo el tiempo y los resultados disminuyen sensiblemente en su validez. Se sugiere representar alrededor de 10 corridas por escenario para tener un nivel adecuado del estudio.

15.7.5 Modelo SHIPMA

Dentro de los modelos disponibles en el mercado es muy recomendable el modelo denominado SHIPMA. Este modelo fue desarrollado por MARIN. La modalidad para su utilización es contratar a alguna empresa consultora que lo tenga disponible o adquirirlo directamente. MARIN ofrece cursos de capacitación para la utilización del modelo y también tiene disponibles modelos matemáticos de buques. Si la utilización que se va a hacer del modelo es puntual o sea se va a aplicar a la resolución de un caso específico casi es conveniente contratar los ensayos a un tercero. Si por el otro lado la utilización del modelo se va a realizar con una cierta frecuencia puede resultar beneficioso adquirirlo y capacitar a los profesionales intervinientes en su uso. En la Figura 15.5 se muestra un ejemplo de salida del modelo SHIPMA que muestra la trayectoria simulada de un buque



Figura 15.5 – Ejemplo de salida del modelo SHIPMA

El modelo SHIPMA tiene en cuenta

- Las características de maniobra del buque
- La maniobra y deriva deseadas
- Acciones de motor y hélice
- Asistencia de remolcadores
- Viento, olas y corrientes
- Efecto de aguas poco profundas
- Succión de bancos

En las figuras siguientes se va a mostrar, a título ilustrativo, aspectos relacionados con la operación del modelo SHIPMA

MARIN

SHIPMA requires the following input:

- desired track, initial values and stop criteria
- manoeuvre description and setting of the autopilot
- tug configuration
- ship particulars, manoeuvring characteristics of the ship (to be expressed in the hydrodynamic derivatives) and other ship-dependent data (wind, wave and bank suction coefficients)
- bank positions
- water depth
- current-pattern
- wind field
- wave field
- swell field

Module Organisation of SHIPMA SHIPMA course 11

Figura 15.6 (a) – Modelo SHIPMA – Datos de entrada

Diseño de Vías Navegables

- **Modelo SHIPMA Inputs**
- **Todos archivos distintos**
 - .MAN : descripción de la maniobra del buque
 - .SHP : dimensiones del buque y coeficientes de viento
 - .CFT : coeficientes hidrodinámicos (Modelos físicos), varían para cada relación h/t
 - .BNK : coeficientes de succión de bancos
 - .CUR : Datos de corriente
 - .WND: Datos de viento
 - .WAV: Datos de olas
 - .BOT : Datos Geométricos del lecho
 - .SWT : Configuración de los remolcadores

Diseño de Vías Navegables Escuela de Graduados en Ingeniería Portuaria
 Curso 2007 - 2008 UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES FACULTAD DE INGENIERIA Departamento de Transporte

Figura 15.6 (b) – Modelo SHIPMA– Datos de entrada

En la Figura 15.6 (a) y (b) se muestra los datos que deben ingresarse para realizar una corrida con el modelo SHIPMA. Son todos archivos distintos

Diseño de Vías Navegables

.MAN : descripción de la maniobra del buque

- 1 Título
- 2 Coordenadas y radios a emplear
- 3 Coordenadas de inicio
- 4 Escalas de tiempo
- 5 Criterios de detención
 - Velocidad mínima
 - Distancia relativa
 - Angulo de deriva relativos
 - Mínimo UKC
- 6 Descripción de la maniobra
- 7 Tipo de maniobra
 - Seguir una definida
 - Circulo de giro
 - Zig - Zag
- 8 Remolcadores

Diseño de Vías Navegables
Curso 2007 - 2008



UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES
FACULTAD DE INGENIERIA
Departamento de Transporte

Escuela de Graduados
en Ingeniería Portuaria

Figura 15.7 – Archivo .MAN – Maniobra del buque

En la Figura 15.7 se muestran los parámetros que componen el archivo .MAN que describe la maniobra del buque

Diseño de Vías Navegables

.MAN : descripción de la maniobra del buque

4 Escalas de tiempo

5 Criterios de detención

- Velocidad mínima
- Distancia relativa
- Angulo de deriva relativos
- Mínimo UKC

6 Descripción de la maniobra

```
** Record 4: Time-step. [s]
** Maximum number of time-steps. Minimum = 2 [-]
1.0
5000
**
-----
** Record 5: Stop criteria
** Record 5a: Minimum forward speed for terminating the run [m/s]
** (value -99 means the criterion is not used)
0.0
** Record 5b: distance travelled relative to the start of the track [m]
** (negative value means the criterion is not used)
3000
** Record 5c: Maximum course deviation [deg]
** (value 0.0 means the criterion is not used)
0.0
** Record 5d: Minimum under keel clearance [m]
** (negative value means the criterion is not used)
-1.0
**
-----
** Record 6: Manoeuvre definition
** The manoeuvre is defined along the specified track. More than
** one manoeuvre section can be distinguished.
** For propeller revolution control. Minimum = 1 [-]
Record 6a: Number of manoeuvre sections.
5
**
-----
** Record 6b: choice of velocity control
** 0 = velocity defined by propeller revolutions [1/s]
** 1 = velocity in [m/s]
1
**
-----
** Record 6c: Manoeuvring description:
** Start section [m] | offset course [deg] | rps or velocity | Pilot's
0.0 15.0 8.0 1
500.0 0.0 8.5 2
1500.0 0.0 7.0 1
1800.0 0.0 8.0 2
2500.0 0.0 7.5 3
**
```

Diseño de Vías Navegables
Curso 2007 - 2008



UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES
FACULTAD DE INGENIERIA
Departamento de Transporte

Escuela de Graduados
en Ingeniería Portuaria

Figura 15.8 – Parámetros del archivo .MAN

Diseño de Vías Navegables

.MAN : descripción de la maniobra del buque

7 Tipo de maniobra

- Seguir una definida
- Círculo de giro
- Zig – Zag

```

**-----**
** Record 7: kind of manoeuvre/specification of the autopilot(s)
**      1 = Track keeping.      (specify record 7.1)
**      2 = turning circle.    (specify record 7.2)
**      3 = Zig-zag.           (specify record 7.3)
**
**-----**
** Record 7.1: Autopilot(s) for track keeping      (if record 7 = 1)
** Record 8.1a: Number of Autopilots (Nauto)      (Maximum=15) [-]
**
**-----**
** Record 8.1b: Autopilotsettings (Nauto times)
** Autopilot id
** 1
** Choice Manoeuvring Devices
** Rudder | Powerburst | Propeller | Thrusters | Tugs      [0-100%]
** 100      0      100      0      0
** Anticipation Length expressed in ship's length.        [-]
** 1.5
** Autopilot coeff's x-dir (1)                            [-]
** 0.0
** Autopilot coeff's y-dir (5)                            [-]
** 0.0 1.0 1.0 1.0 1.0
** Autopilot coeff's N-dir (5)                            [-]
** 0.0 1.0 1.0 1.0 1.0
** Autopilot id
** 2
** Choice Manoeuvring Devices
** Rudder | Powerburst | Propeller | Thrusters | Tugs      [0-100%]
** 80      0      100      0      0
** Anticipation Length expressed in ship's length.        [-]
** 1.0
** Autopilot coeff's x-dir (1)                            [-]
** 0.0
** Autopilot coeff's y-dir (5)                            [-]
** 1.0 1.0 1.0 1.0 1.0
** Autopilot coeff's N-dir (5)                            [-]
** 1.0 1.0 1.0 1.0 1.0
** Autopilot id
** 3
** Choice Manoeuvring Devices
** Rudder | Powerburst | Propeller | Thrusters | Tugs      [0-100%]
** 100      0      100      0      0
** Anticipation Length expressed in ship's length.        [-]
** 1.0
** Autopilot coeff's x-dir (1)                            [-]

```

Figura 15.9 – Parámetros del archivo .MAN

Diseño de Vías Navegables

•Piloto Automático

Responde a desviaciones de curso o de deriva deseados, el piloto automático se anticipa utilizando una distancia de anticipación definida por el usuario

• Control de velocidad

$$n_{req} = f(u_{req}) - 2 * k_1 * c_1(u, L_{pp}, AD) * \Delta u$$

$$X_{req} = \max(F_{prop}(n_{req}) - F_{prop}(n_{max}), 0)$$

with:

- Δu the forward velocity deviation;
- u the forward velocity;
- L_{pp} the shiplength;
- AD the anticipation distance

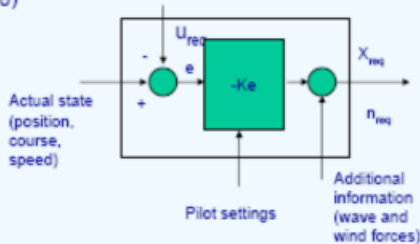
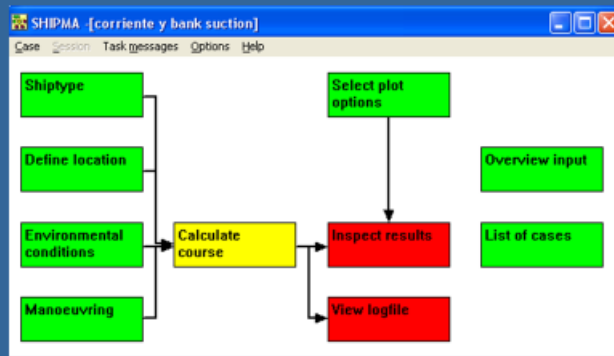


Figura 15.10 – Piloto automático – Control de velocidad

Diseño de Vías Navegables

- Interfase del usuario para definir condiciones medio Ambientales



- Selección del buque
- Selección del lugar
- Condiciones Ambientales
- Características de la maniobra
- Piloto automático
- Correr el Programa
- Ver los resultados

Diseño de Vías Navegables
Curso 2007 - 2008

UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES
FACULTAD DE INGENIERIA
Departamento de Transporte

Escuela de Graduados
en Ingeniería Portuaria

Figura 15.11 – Modelo SHIPMA – Vista de la pantalla principal

En la Figura 15.xx se muestra como se ve la pantalla principal del modelo SHIPMA. Cada uno de los cuadros se va activando para introducir los datos correspondientes y para realizar la corrida del modelo.

15.7.6 Validación del modelo matemático del buque

El objetivo de validación de la maniobra del buque modelado es verificar que la respuesta del buque desarrollado responda de la manera más próxima posible a lo que lo haría el buque real.

Deben representarse maniobras de turning cycle, en zig-zag y maniobras de frenado, aceleración, específicas para el lugar de los ensayos.

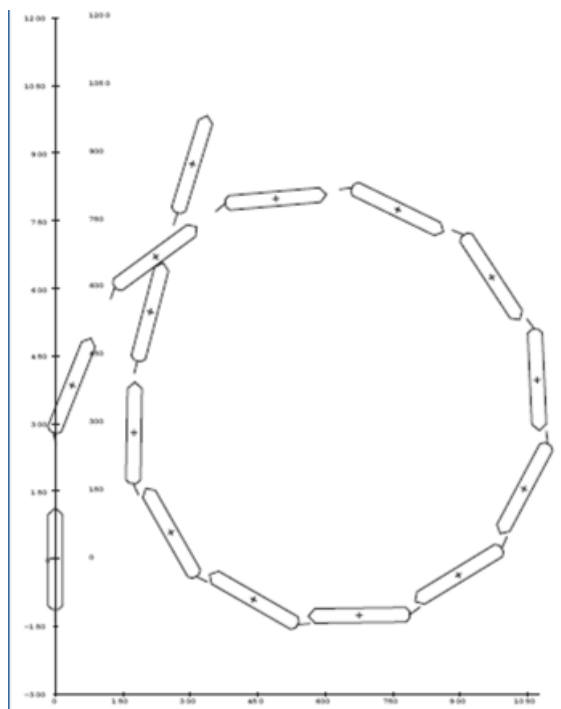


Figura 15.12 – Validación modelo de buque – Turning circle

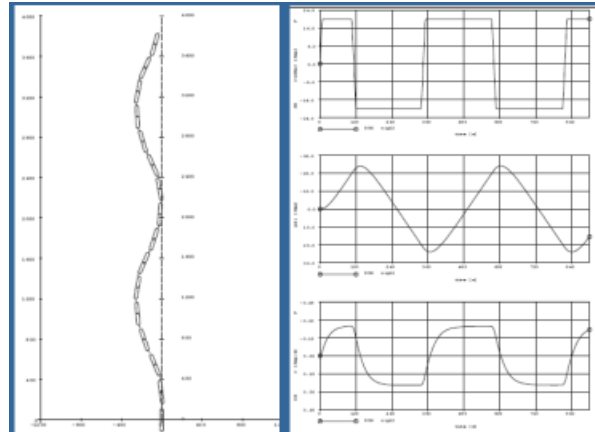


Figura 15.13 – Validación modelo de buque – Zigzag

15.8 Real Time Simulation Techniques

Una de las críticas más importante a las FTST es que en la maniobra del buque no participa un práctico, sino que es realizada por un algoritmo matemático denominado piloto automático. Para salvar este aspecto es que se reemplaza en el Diagrama de Abkowitz el piloto automático por un práctico verdadero. Esta decisión tiene muchas consecuencias en el desarrollo del modelo pues pasa de realizar las operaciones en tiempo de computadora, es decir, casi instantáneos, a tiempo real. Tiempo real implica que si una maniobra en la Naturaleza lleva 30 minutos para ejecutarla va a requerir 30 minutos de correr el modelo.

Por lo tanto, los modelos denominados Real Time se refieren a: a) que el tiempo necesario para realizar una corrida es el mismo que el tiempo que necesita el buque para realizar ese recorrido en la Naturaleza; b) que las maniobras del buque son ejecutadas por un práctico a medida que se va desarrollando la corrida.

Además de las salidas gráficas que son similares al caso de las FTST para las corridas del modelo RTST se proyecta sobre una pantalla, a vista de pájaro, la trayectoria que va siguiendo el buque y que permite al práctico ir dando las órdenes de máquina y timón para navegar.

Que la representación sea a vista de pájaro es una gran desventaja pues está muy alejado de la realidad. Igualmente, la proyección sobre una pantalla no tiene ninguna similitud con el puente de un buque. No obstante estos aspectos, la simulación RTST presenta grandes ventajas sobre las FTST.

Como en el proceso de validación del proyecto es recomendable realizar primero FTST y luego RTST se estudian en este caso solamente las alternativas que merecen un análisis más detallado habiéndose descartado en la etapa FTST aquellas alternativas que no presentan dificultades o que no son aceptables. Esto es así pues el tiempo necesario para realizar las corridas exige estudiar solamente aquellas que lo requieren.

Para el desarrollo de las corridas se constituye un grupo de profesionales integrado por proyectistas y prácticos que constituyen un grupo multidisciplinario. Este aspecto es de gran importancia y da gran validez a los resultados que se obtienen.

En la Figura 15.14 se muestra una de las sesiones de trabajo realizando corridas con el modelo de simulación a tiempo real Toolbox desarrollado por la firma Port and Maritime Consultants de Holanda (Figura 15.15). Este modelo se aplicó como parte del estudio realizado para determinar la factibilidad de navegar el Río Paraná de las Palmas con buques de más de 230 m de eslora.

Se van a mostrar algunas de las pantallas del modelo Toolbox a título ilustrativo



Figura 15.14 – Corridas de simulación modelo TOOLBOX

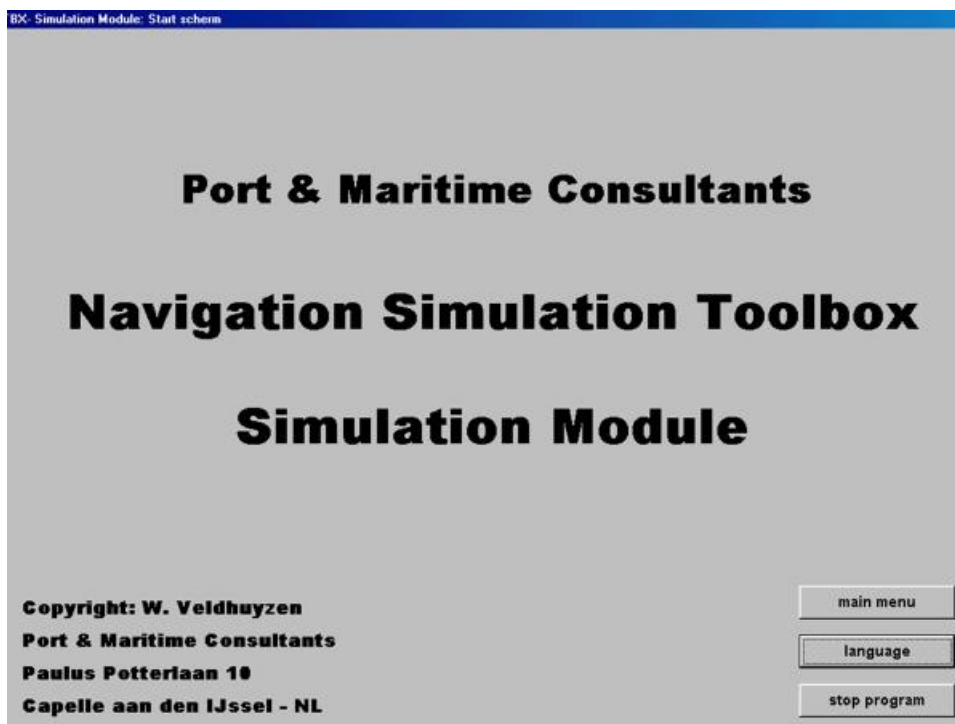


Figura 15.15 – Modelo Toolbox

En la Figura 15.16 se muestra la pantalla que corresponde al Menú Principal donde se presentan cinco opciones:

- General – elección de los parámetros de la simulación
- Área de navegación
 - o Área de ensayo
 - o Condiciones ambientales
- Buque
 - o Elección del buque
 - o Características
 - o Condiciones de carga
 - o Condiciones iniciales
- Registro
- Simulación
 - o Arranque de la simulación
 - o Información sobre fuerzas y momentos del buque

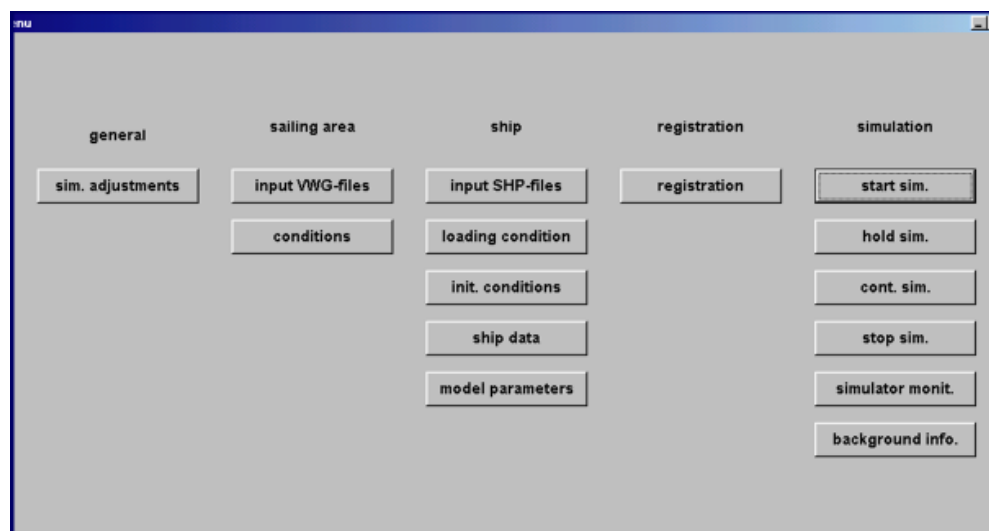


Figura 15.16 – Modelo Toolbox – Menu Principal

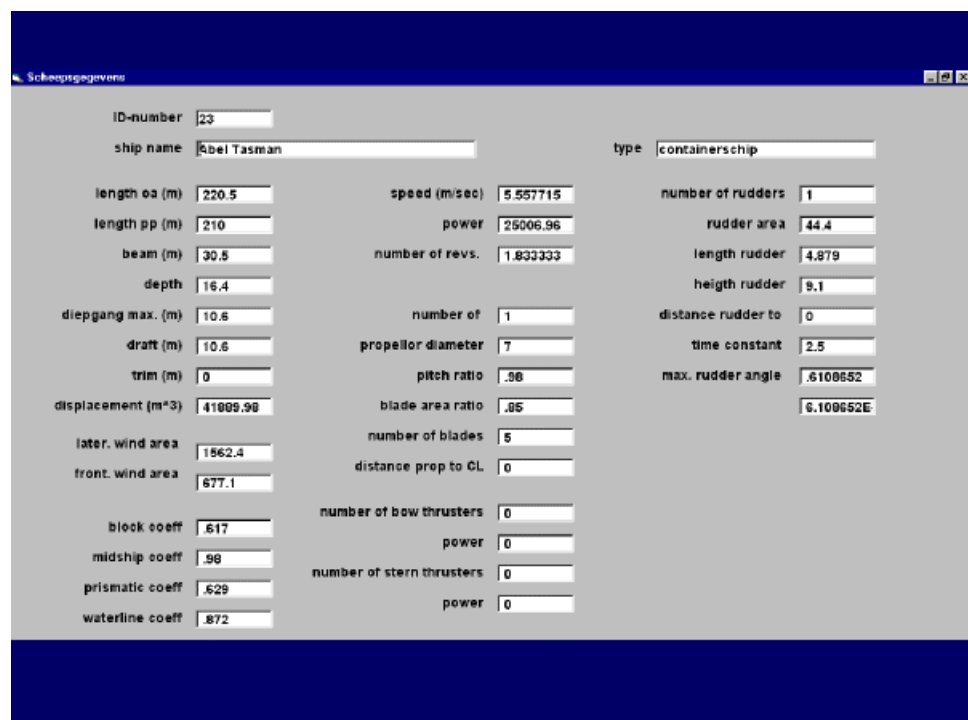


Figura 15.17– Modelo Toolbox – Características del buque

En la Figura 15.17 se muestra, como ejemplo, la pantalla correspondiente a las Características del Buque.

Los datos que solicita son:

- Tipo de embarcación
- Eslora total, eslora entre perpendiculares, manga, puntal, calado máximo, calado y desplazamiento
- Áreas expuestas al viento longitudinal y transversal, coeficiente de block, coeficiente de sección media, coeficiente de prisma
- Velocidad, potencia, rpm
- Número de hélices, diámetro de las hélices, relación de paso de hélice, área de pala, número de palas
- Número de hélices de proa, potencia de hélices de proa, número de hélices de popa, potencia de hélices de popa
- Número de timones, área de timones, longitud del timón, área del timón
- Máquina de timón, ángulo máximo de timón, velocidad máxima de timón

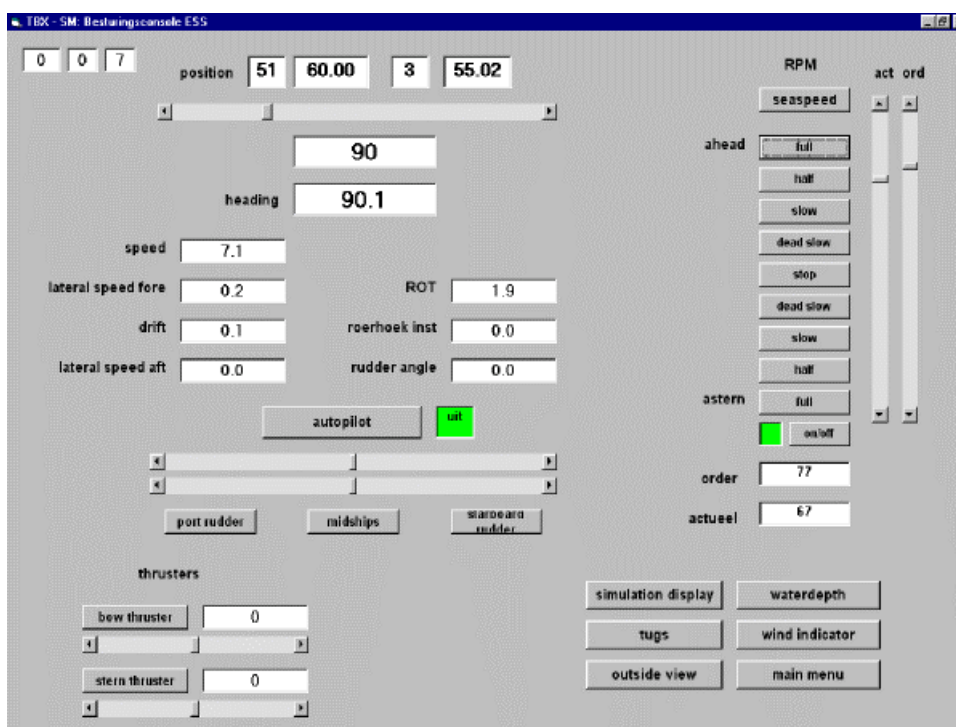


Figura 15.18 – Modelo Toolbox – Consola principal de maniobra

En la Figura 15.18 se muestra la consola principal de maniobra. Allí se muestra:

- Posición
- Rumbo
- Ángulo de caída
- Ángulo y posición del timón
- Elección del piloto automático
- RPM del motor

Desde esa pantalla se puede acceder a:

- Display de simulación
- Remolcadores
- Revancha bajo quilla
- Viento

15.8.1 Criterios de evaluación

A los efectos de la evaluación de los resultados obtenidos con la simulación se computó la distancia horizontal entre cualquier punto del casco y el banco del canal de navegación. La distancia horizontal es un indicador de la distancia disponible para maniobrar. Además, se consideró importante la potencia de máquinas utilizada y el ángulo de timón. Estos últimos, en relación con los máximos valores disponibles pueden ser considerados como una medida de la reserva de maniobra que tiene el Práctico respecto a las posibilidades de controlar el buque.

15.8.2 Resultados obtenidos

De cada corrida se obtuvieron los siguientes resultados:

- Vista en planta de la trayectoria descrita por el buque
- Mínima distancia a los veriles (en este caso, la isobata de 9,75 m)
- Velocidad de caída (ROT) medida en grados por minuto
- Angulo de pala del timón, medido en grados
- Rumbo, en grados
- Número de revoluciones por minuto
- Velocidad, en metros por segundo

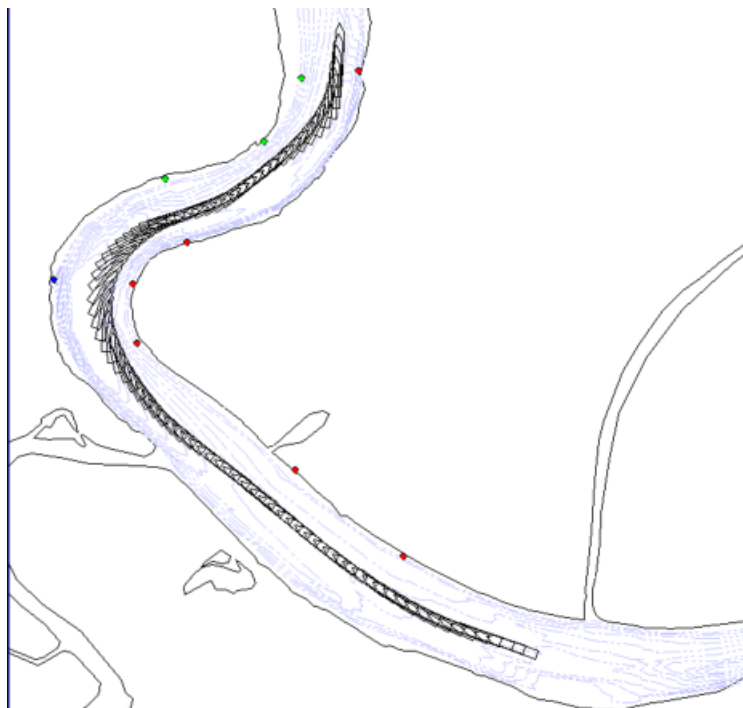


Figura 15.19 – Paraná de las Palmas – Vuelta del Este – Buque granelero

En la Figura 15.19 se muestra una salida de una corrida realizada en el Río Paraná de las Palmas, Vuelta del Este con un buque granelero navegando hacia aguas arriba

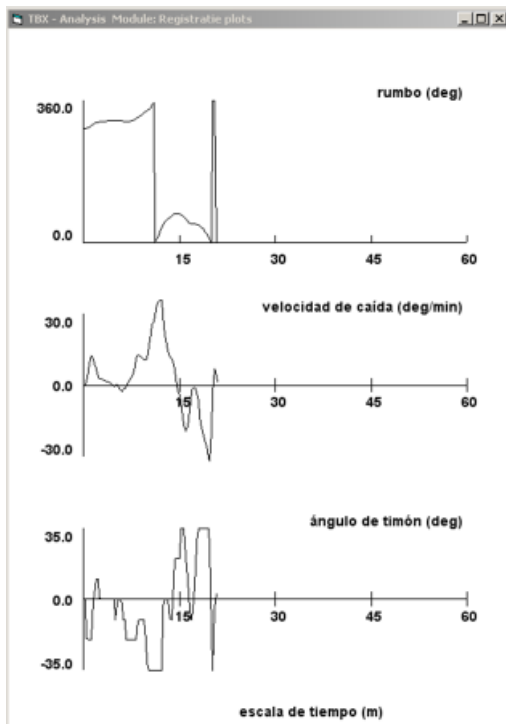


Figura 15.20 (a) Ejemplo de resultados

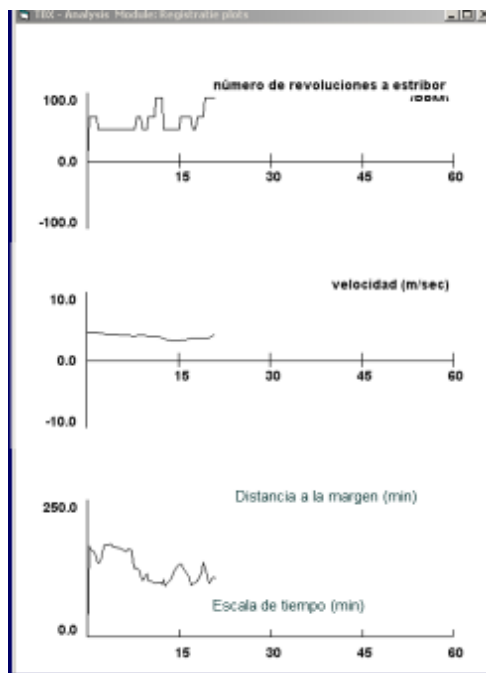


Figura 15.20 (b) – Ejemplo de resultados

15.9 Simuladores de Maniobra Marítima

Para la evaluación de proyectos que ya están en su etapa definitiva es necesario incorporar en la simulación factores humanos relacionados con la percepción de los problemas y tiempos de respuesta.

Para estos casos se utilizan los denominados Simuladores de Maniobra Marítima completos (full mission simulators) que a partir de ahora se denominarán SMM full. Esta distinción es pertinente porque existen una gran variedad de simuladores que incorporan algunas de las características de los SMM full pero no llegan a tener el mismo nivel.

Vamos a denominar modelos híbridos a aquellos que son modelos matemáticos en su esencia, pero tienen una componente de modelos físicos como es el caso del denominado “Simulador de maniobra marítima”

El simulador de maniobra marítima en sus diferentes formas es la mejor herramienta disponible para evaluar alternativas de canales. Consiste en un modelo matemático en tiempo real con los módulos para base de datos geográfica, modelo hidrodinámico y modelo de buque como se ha descrito previamente además de una maqueta o modelo a escala 1:1 para representar el puente del buque. Desde el puente es de donde se dan las instrucciones para la maniobra del buque.

En los casos más sofisticados la representación visual del ambiente cubre 360°

El SMM full es una herramienta que combina aspectos de modelos matemáticos con modelos físicos. El puente de mando es una reproducción 1:1 de un puente de mando real, con puerta, ventanas y todo igual. Al ser la maqueta escala 1:1 por Froude la escala de tiempos es también 1:1. Por lo tanto los ensayos que se realizan en los SMM son a tiempo real.

Se realizan proyecciones sobre las paredes del simulador que representan las vistas calculadas que vería el navegante lo que les da mucho realismo a los ensayos. La proa del buque también está representada por proyecciones.

El modelo matemático del buque y el modelo matemático propiamente dicho tienen características similares a las explicadas anteriormente para FTST y RTST. El realismo está dado por el ambiente que rodea al SMM.

Una de las características del SMM full es que la distancia entre el operador en el puente y la proyección tiene que ser superior a 10 m. Esto hace que la instalación fija del SMM full sea cara.

15.9.1 Validación del modelo

Estos modelos no se pueden calibrar fácilmente por lo que se recurre a varias técnicas para validar los resultados obtenidos.

Una forma es utilizar información teórica sobre maniobras conocidas como realizar maniobras de giro o maniobras en zig-zag. Asimismo, se puede utilizar resultados obtenidos en situaciones similares con otros modelos.

Una manera muy efectiva de validar las corridas es mediante la participación y opinión de prácticos que conozcan bien la zona de estudio y navegando buques conocidos ratifiquen la verosimilitud de la navegación. Esto es fundamental en lo que respecta a la influencia de factores externos como puede ser el campo hidrodinámico.

15.9.2 Participación de los Prácticos

En una modelación típica, ya sea física como numérica, los prácticos que navegan en el área y que están familiarizados con el canal y el tipo de buques, deben participar en el estudio y opinar sobre la calibración del modelo.

Inicialmente se opera el modelo en las condiciones actuales y efectúan recomendaciones a fin de que la representación sea acorde con la realidad. Luego se

realizan las modificaciones propuestas para el canal y se efectúan corridas adicionales.

Los resultados de una simulación son una gran ayuda para los proyectistas del canal, pero son por naturaleza muy subjetivos. Es fácil identificar áreas que presentan problemas, por ejemplo, si los 5 ó 6 prácticos involucrados en la experiencia encallan todos en la misma zona sin duda que esa área presenta algún problema. Pero, por otra parte, si los prácticos navegan todos satisfactoriamente no es una prueba total de seguridad.

El número de corridas debe ser lo suficientemente grande como para que pueda realizarse un mínimo análisis estadístico de los ensayos, así como un análisis de riesgo.

15.9.3 Modelo del puente de mando

Al puente de mando se accede por una escalerilla y por una puerta real. La tripulación en el puente está compuesta por el práctico a cargo de la navegación y por el timonel que recibe las instrucciones del práctico y está a cargo de la rueda de cabilla.

Es conveniente que en los ensayos no se encuentre demasiada gente en el puente pues ello atenta contra la atención que le tiene que prestar el práctico a la maniobra.

Puede realizarse en algún caso algunas corridas con representantes del Cliente y otros interesados para mostrar las características del SMM, el realismo de la navegación y la forma de hacer los ensayos. Estas demostraciones ahorran mucho tiempo de explicaciones y hacen que los responsables de la aprobación de los estudios se entusiasmen con la herramienta.

Los instrumentos del puente son verdaderos instrumentos de un barco y las comunicaciones entre el puente y la sala de máquinas también son reales.

En la Figura 15.21 se muestra una vista del puente de mando de un SMM y la vista exterior. Debe recordarse que la vista exterior está generada computacionalmente a partir de la base de datos geográfica.



Figura 15.21 – Vista desde el puente de un SMM

A los efectos de la operación solo una posición en el puente es la correcta para estar situado a los efectos de evitar los efectos de paralaje.

El campo de visión óptimo es 360° pero se encuentran SMM con pantallas que cubren 270°, 210°, 180° y en algunos casos se utilizan monitores que cubren solo una parte frontal de la escena.

15.9.3 Proceso a seguir para realizar un estudio en SMM

Una publicación muy valiosa en este aspecto es Hensen (1999) que da recomendaciones muy importantes sobre el proceso a seguir y los cuidados que hay que tener para realizar una simulación exitosa.

El Proyectista a cargo del proyecto ejecutivo de una terminal portuaria o de una vía navegable define el proyecto y determina que aspecto del proyecto considera conveniente que sea verificado en un SMM. Puede ser una entrada a puerto o una maniobra complicada.

- a) El Proyectista elige un Laboratorio o Institución que tenga las instalaciones adecuadas y que merezca la confianza del Proyectista y lo contacta poniéndolo en conocimiento del problema que desea estudiar.

Los problemas que se pueden estudiar en un SMM se pueden dividir en dos grandes grupos: investigación (research) o capacitación (training). Se dice que un proyecto está en etapa de investigación cuando se está buscando la solución a un problema y se dice que se desea hacer capacitación cuando se conoce la solución del problema y hay que capacitar a los prácticos para que apliquen esa solución. Como ejemplo se puede mencionar el caso de la entrada a puerto de un buque de grandes dimensiones operativa que no sido realizada previamente. Se debe investigar bajo diversas situaciones de condiciones ambientales y de luminosidad como debe ser la maniobra para hacer ingresar ese buque. Incluso en esta etapa de investigación se pueden establecer límites operativos a partir de los cuales no es recomendable realizar la maniobra. Estos

límites pueden ser condiciones de viento, o de olas, o de luminosidad. Este es un típico estudio de investigación. El resultado es una serie de recomendaciones para que la maniobra sea exitosa. En esta investigación colaboran dos o tres prácticos que conocen la zona y que son destacados en su profesión.

Una vez realizada la investigación es necesario capacitar a todos los prácticos que van a realizar la operación de ingreso de ese tipo de buques al puerto. Esa etapa es de capacitación. Los prácticos aprenden a aplicar el procedimiento sugerido en la etapa de investigación.

Es muy importante determinar en qué etapa se encuentra el estudio a efectuar porque para la etapa de investigación (research) es imprescindible utilizar un SMM full mientras que en la etapa de capacitación pueden utilizarse simuladores con menos prestaciones.

Un Laboratorio muy recomendado para realizar estudios de investigación es MARIN, ubicado en Wageningen, Holanda, que cuenta con todo tipo de simuladores.

- b) El Laboratorio pide datos, realiza el análisis del problema en función de la información recibida y propone una planificación del proyecto. Asimismo, propone modelos de buques a utilizar en las simulaciones y simulador a utilizar
- c) El Proyectista realiza la recopilación de datos básicos. En un caso estudiado sobre navegación en las curvas del Río Paraná de las Palmas con buques de esloras superiores a 230 m se consideraron de gran importancia los datos de las corrientes fluviales para diferentes condiciones del río. Para ello se recurrió a mediciones de campo. También pueden realizarse modelos hidrodinámicos adecuadamente verificados.

Para las vistas exteriores se consiguió información topográfica del IGM y además se realizó un relevamiento fotográfico y registro sobre video. Para ello se recorrió con una embarcación la zona de estudio y cada kilómetro se efectuó un relevamiento de 360° fotográfico y de video. Es importante que la altura desde donde se efectúa el relevamiento coincida con la altura del puente del buque a modelar para evitar efectos visuales inconvenientes. Toda la información relevada se envía al Laboratorio para que sea homogeneizada y cargada en las bases de datos del proyecto

- d) El Laboratorio realiza la implementación del modelo en función del buque elegido y el simulador o simuladores a utilizar
- e) Se constituye el grupo que va a participar en las simulaciones. Proyectista, Profesionales del Laboratorio, Prácticos que conocen el área (pocos), Cliente, Observadores (muchos).

Se recomienda que el número de Prácticos participantes en la etapa de investigación sea reducido (dos o tres). El motivo de esto es que el número de simulaciones a realizar está limitado por el tiempo disponible y a los efectos estadísticos es recomendable realizar un número mínimo de simulaciones con

las mismas condiciones. En un caso estudiado se llevaron nueve Prácticos y ello planteó algunos inconvenientes.

Los Observadores aportan un gran valor a la simulación por un lado por el aporte de experiencias y por el otro porque sirven de agentes de difusión una vez cumplidos los estudios. Es conveniente la participación de personal del SHN, PNA y otros actores involucrados.

La ejecución de los ensayos debe realizarse con poca gente en el puente para recrear las situaciones reales de operación de un puente

- f) Una vez conformado el Grupo de Profesionales que van a participar en las simulaciones es conveniente realizar reuniones previas para explicar y discutir las herramientas a utilizar y los ensayos a realizar. En general, la realización de simulaciones mediante SMM full no es muy conocida. Además, los Prácticos y otros profesionales suelen ser un poco escépticos de las bondades de la simulación. Estas reuniones explicativas permiten aclarar muchas dudas y limitar las expectativas de los ensayos a realizar.
- g) Redacción de un Pre Informe Final. Es conveniente escribir el borrador de informe final indicando la descripción del problema a resolver, los datos básicos utilizados, el buque de diseño, las características del simulador, la ejecución de los ensayos, los criterios de análisis de resultados y los tipos de recomendaciones a obtener de los ensayos. Este Pre informe debe ponerse a consideración de todas las partes interesadas para que efectúen las observaciones que consideren pertinentes. De esta manera se evita que se omita algún aspecto de interés que puede ser de importancia para alguna de las partes y que puede ser incorporado en esta etapa y además se explicita claramente cuál va a ser el resultado a obtener al finalizar los estudios. Por supuesto que a la fecha de redacción de este pre informe van a existir numerosos aspectos que no van a ser conocidos, pero sí se puede indicar que se van a conocer y cuál va a ser el medio de obtenerlos. Este Pre informe no es una práctica habitual, pero es de gran utilidad sobre todo en los estudios complejos o en los cuales hay una participación de muchas partes interesadas.
- h) Programa de ensayos (pocos). El programa de ensayos debe incluir corridas de acostumbramiento para que los prácticos se habitúen al uso de la herramienta. Estas corridas de acostumbramiento suelen ser en condiciones conocidas para los prácticos en la vida real. En el caso del estudio de la navegación de las vueltas del Paraná de las Palmas las corridas de acostumbramiento se efectuaron con un buque Panamax cargado a 32 pies. Esta situación, conocida y habitual para los prácticos, permitió realizar la validación del modelo y de las condiciones ambientales.

La validación del modelo es el proceso cualitativo por el cual se verifica que el modelo está representando con verosimilitud la realidad.

- i) Las corridas programadas del modelo están previstas día por día de manera de poder cubrir en el tiempo disponible las diferentes combinaciones de buques y condiciones ambientales a estudiar. Esta etapa se denomina Explotación del modelo. Hay dos consideraciones a tener en cuenta. Por un lado, este es un modelo a tiempo real por lo que cada corrida del modelo consume el mismo

tiempo que la misma operación en la realidad. En el caso de las curvas del Paraná de la Palmas navegar una curva lleva aproximadamente 20 a 30 minutos. Con el debriefing del práctico y las operaciones asociadas al modelo se podía realizar una corrida por hora. Esto da unas ocho corridas por día. Hay que tener en cuenta que para el práctico es como si realizara una navegación en la realidad y si realiza una mala maniobra termina con el buque varado. Por ello requiere un nivel de atención muy alto que no puede mantener en forma ininterrumpida. El segundo aspecto es que el simulador se tiene asignado por un tiempo limitado, del orden de una semana o sea cinco días. La programación de ensayos debe ser muy cuidadosa y estricta para poder hacer los ensayos en el tiempo disponible.

- j) Debriefing del práctico. Una actividad de gran importancia es realizar un interrogatorio del práctico que ha estado al comando del buque siguiendo un cuestionario establecido. En ese interrogatorio el práctico debe decir todas las acciones que ha tomado y su motivo, los inconvenientes afrontados, las ayudas a la navegación utilizadas y su utilidad o no y todo otro comentario pertinente. El posterior análisis de los interrogatorios brinda información muy valiosa para llegar a las conclusiones y recomendaciones finales. En PIANC (1997) se presenta un formulario tipo para el interrogatorio del práctico Ver Fig. 6.9 pag. 38

- k) Obtención de resultados

Los resultados que se obtienen de cada corrida son los mismos que se obtienen con otros modelos a tiempo real. Una representación importante es la traza recorrida por el buque. Esta salida gráfica es muy ilustrativa. Del modelo se obtiene también la distancia a los veriles, la posición del timón a lo largo del tiempo, las rpm, etc

En base a los datos obtenidos se realiza un análisis detallado y se obtienen conclusiones de la facilidad de realizar la navegación en la traza propuesta

- l) Discusión diaria de resultados y avance

Durante el desarrollo de los ensayos es habitual realizar una reunión todas las mañanas antes de iniciar el programa del día. En esa reunión se comentan las actividades del día anterior, las actividades previstas para el día, comentarios generales sobre los resultados que se van obteniendo. En esta reunión de todo el equipo es buena oportunidad para escuchar las opiniones y comentarios y dudas de todos los presentes. Con esto se cumple con uno de los objetivos importantes de la ejecución del modelo y que es buscar una relación multidisciplinaria sobre el problema. Asimismo, permite establecer relaciones de camaradería entre los diferentes actores lo que es muy importante para las etapas siguientes de implementación del proyecto

- m) Ajuste del modelo

En función de las discusiones efectuadas y los resultados obtenidos en las corridas puede surgir la necesidad de ajustar el modelo y probar alguna nueva alternativa. El modelo está constituido por modelos matemáticos a los cuales hay que adaptar. Por este motivo el personal especializado del Laboratorio puede trabajar fuera de horario para tener implementadas los cambios para las sesiones del día siguiente

- n) Con las modificaciones efectuadas se realizan las corridas finales. Los resultados obtenidos, así como un primer borrador del informe final se presentan al grupo técnico ampliado ocasión en la que pueden participar otros representantes del Cliente u otros actores de relevancia. Es una ocasión óptima para realizar preguntas y aclarar las dudas que puedan surgir
- o) Se efectúa a posteriori el análisis de resultados obtenidos, se elaboran conclusiones y en caso de corresponder se puede realizar una extrapolación de resultados. En el caso del estudio de la navegación de las curvas del Paraná de las Palmas buscando la mejor señalización para una navegación nocturna segura el procedimiento seguido fue estudiar diversos esquemas de señalización en una curva. Una vez elegido con consenso el sistema de señales a aplicar en la curva se navegaron otras dos curvas con ese sistema aplicado. En función de los resultados positivos obtenidos se aplicó el sistema elegido a las otras seis curvas restantes. Las curvas estudiadas en principio fueron elegidas por su mayor grado de complejidad.
- p) Es de suma importancia que todo el proceso quede documentado de la manera más detallada posible en informes. Por ello la tarea “Redacción de Informes” es una parte importante del proceso.

15.9.4 Fidelidad y Validación

Hay dos conceptos importantes para destacar que son “Fidelidad de la representación” y “Validación de la representación”, la relación entre ambos y la manera que uno influye sobre el otro.

Ambos afectan la confianza que se tiene en el grado en el que la simulación representa el mundo real. Fidelidad de la representación es el concepto mas simple. En este caso lo utilizamos para significar la inclusión en la simulación de aspectos notables de la vida real. En algunos casos son elementos de importancia como por ejemplo la escena visual que se ve por la ventana del puente o la presencia de corrientes en la vía navegable. En otros casos son elementos de menor importancia como por ejemplo la existencia de alguna referencia visual localizada como una torre en particular sobre la costa.

La validación de la representación es un concepto mucho más complejo y más difícil de lograr y de demostrar. En este caso se refiere a la capacidad del sistema simulado o alguno de sus componentes principales de funcionar/operar como si fuera real.

Hay una relación fuerte entre fidelidad y validez. La fidelidad, o sea, la inclusión de elementos del mundo real contribuye a la validez. La omisión de elementos del mundo real puede hacer que el comportamiento válido del sistema no sea posible. De todas maneras, no hay que considerar que la inclusión de gran fidelidad reemplaza la validación del sistema. Sin embargo, hay en principio mayor confianza en los sistemas de alta fidelidad que en los de baja fidelidad.

Por ejemplo, si no se encuentra una diferencia notable entre alternativas en un simulador con baja fidelidad hay una incertidumbre fuerte sobre si no hay diferencias entre las alternativas o si la poca fidelidad no permite apreciar las diferencias entre las mismas.

Por lo tanto, es apropiado decir que a menor fidelidad de la simulación mayores son las incertidumbres acerca de su validez y mayores los problemas para demostrar la validez.

La aproximación mas utilizada para la validación del sistema ha sido concentrarse en uno de los componentes principales del sistema. El subsistema favorecido es el modelo de buque ya que es fundamental para el proceso de simulación ya sea FTST o RTST La validación frecuentemente consiste en la comparación de trayectorias obtenidas en el simulador con otras obtenidas en la vida real.

Otros subsistemas también pueden ser validados como el puente, los aspectos visuales, el radar, etc. Es importante que las distancias observadas sean las correctas o las costas coincidan con la imagen radar.

En años anteriores representar los sistemas con alto grado de fidelidad tenía una incidencia importante en los costos de modelación. En la actualidad no representan gastos adicionales por lo que se prefiere utilizar sistemas con alto grado de fidelidad.

15.9.5 Limitaciones de un SMM

Los SMM presentan algunas limitaciones, entre ellas:

- Debe verificarse siempre la calidad de los modelos matemáticos, especialmente, el modelo de buque
- El modelo solo tiene en cuenta los fenómenos que se han tenido en cuenta en su desarrollo. Por lo tanto, se debe verificar que se han incluido todas las fuerzas principales, por ejemplo, debe estar incluida la succión de bancos en aquellos casos que sean importantes para la navegación
- En la vista exterior se debe tener en cuenta que el realismo disminuye cuando el campo visual externo es limitado
- Asimismo, la distancia entre el operador y las pantallas de proyección tiene una consecuencia importante en la determinación de distancias
- Para el caso de requerirse el uso de remolcadores, el comportamiento de los mismos debe ser acorde con la realidad.

En la Figura 15.22 se presenta un análisis de la influencia de la calidad en los diferentes niveles de simulación para evaluar un SMM. Si bien este cuadro tiene su origen en Webster (1992) el enfoque es válido salvo algunos valores que el desarrollo tecnológico ha superado.

NIVELES DE SIMULACIÓN PARA EVALUAR SMM

Modelo Matemático		Display					Simulador de puente		Práctico
Grados de libertad	Fundamento para ecuaciones	Distancia Pantalla-ojo	Campo de visión	Color	Resolución	Grado de Actualización	Controles del puente	Instrumentos del display	Hombre al Mando
SEIS	Identificación Detallada	>10 m	360 grados en azimuth	Máximo Color	1 min. arc	>20 hz	Tamaño natural	Tamaño natural	Práctico con experiencia
TRES	Uso de modelo matemático de buque similar	< 0.1 m	Azimuth limitado	Blanco y Negro	Baja resolución	< 1 hz	Simulado	Simulado	Operador del simulador con experiencia

Alto
Bajo

Figura 15.22 – Niveles de simulación en SMM

15.10 SIMULACION EN EL DISEÑO DE AYUDAS A LA NAVEGACIÓN

IALA, la Asociación Internacional de Señalización Marítima le ha dado gran importancia al uso de SMM para el diseño de sistemas de Ayudas a la Navegación y ha publicado Guidelines al respecto.

En este aspecto, se realizó una experiencia muy valiosa en la oportunidad de tener que proponer un sistema de Ayudas a la Navegación para el Río Paraná de las Palmas que permitiera la navegación diurna y nocturna. Es conveniente recordar que con anterioridad al año 1995 la navegación nocturna no estaba permitida.

La Empresa a cargo de las tareas de dragado y balizamiento propuso al Comitente y a los Prácticos un sistema de Ayudas a la Navegación. Luego de ser analizado el sistema propuesto no fue aceptado por los prácticos que propusieron un sistema alternativo con importantes diferencias al propuesto por la Empresa.

Para dilucidar la cuestión se recurrió a hacer una simulación en el SMM Full de MARIN en Wageningen, Holanda, con la participación de prácticos con conocimiento de la zona.

Se siguió un procedimiento similar al detallado en el parágrafo 15.xx para programar y realizar los ensayos.

La navegación en el Río Paraná de las Palmas está muy condicionada por la existencia de 9 curvas de diferente complejidad. A los efectos del estudio se seleccionaron las tres curvas mas complicadas.

Se realizaron los ensayos navegando en primera instancia la Vuelta de San Antonio con la señalización propuesta por la Empresa. De cada corrida efectuada se registraron las dificultades de efectuar la navegación mediante un detallado debriefing del Práctico a cargo.

En segunda instancia se realizaron ensayos sobre la misma curva con la señalización alternativa propuesta. Como suele suceder en la mayoría de los problemas donde hay mas de una solución factible se tomaron los aspectos positivos de los dos esquemas propuestos que habían quedado en evidencia durante la realización de los ensayos.

Este tercer esquema de señalización se implementó en el modelo de la vuelta en estudio y se realizaron nuevas corridas de prueba con excelentes resultados para la navegación.

A los efectos de verificar si el esquema propuesto tenía suficiente validez se implementó en las dos curvas siguientes en orden de dificultad y se realizaron corridas del modelo sobre las mismas con óptimos resultados.

Se dio por validada la solución resultante que se implementó en la realidad en las 9 curvas del Paraná de las Palmas. A los efectos de la autorización a navegar de manera nocturna PNA fue habilitando progresivamente mayores esloras de buques, comenzando por 120 m, después 165 m y finalmente hasta 230 m, para permitir el acostumbramiento de los prácticos a las nuevas condiciones de navegación.

De esa manera, mediante el uso del SMM se resolvió un problema complejo de diseño de un sistema de Ayudas a la Navegación.

15.11 COMPARACION DE MODELOS

Cada tipo de modelación presenta una serie de ventajas y desventajas que se van a ver en profundidad cuando se desarrollen cada uno de los temas. En la Tabla 15.1 se presentan en forma resumida aspectos importantes asociados a cada tipo de modelación tanto en lo que hace a fortalezas como limitaciones.

Método	Fortalezas	Limitaciones
Fast Time Simulation Techniques	Permite evaluar gran número de alternativas Relativamente rápido y económico	Al utilizar piloto automático no tiene en cuenta los factores humanos en la navegación
Real Time Simulation Techniques	Incluye la participación del práctico Al ser corrido el modelo en una computadora es mas económico que los SMM	Al ser ensayos en tiempo real sirve para analizar menor número de alternativas El ambiente donde se desarrollan los ensayos es poco realístico
Simulador de maniobra marítima limitado	Permite analizar problemas simples Es válido para entrenamiento de prácticos	Se debe ser muy cuidadoso con la validez de los matemáticos de buque utilizados No debe utilizarse para proyectos de investigación complejos
Simulador de maniobra marítima full	Permite analizar problemas complejos Es válido para realizar investigación Es la herramienta mas completa disponible	Está disponible en pocos lugares en el mundo Es la alternativa mas costosa El tiempo disponible para realizar las corridas es limitado por o cual solo se pueden estudiar pocas alternativas

Tabla 15.1 – Comparación de modelos

Notas:

- a) Para todos los casos la recopilación y obtención de información de base para utilizar en los modelos es una operación que demanda muchos recursos, tiempo y dinero.
- b) Igualmente, los resultados son muy dependientes de la calidad y validez de los modelos matemáticos de buque utilizados

A título ilustrativo, en la Tabla 15.2 se presenta una comparación de las características de los modelos desarrollada por Puglisi (2000)

Method	Strengths	Limitations
Physical model of waterway	Good representation of bank and bottom irregularities Source of data for mathematical models	High cost and time requirements Limited part of system
Fast-time mathematical model: direct control	Relatively fast and inexpensive Screens large numbers of alternatives	Not fast or inexpensive if waterway data must be collected and modeled
Fast-time mathematical autopilot	Relatively fast and inexpensive Screens larger numbers of alternatives Some inclusion of shiphandler function	Not fast or inexpensive if waterway data must be collected and modeled Not fast or inexpensive if shiphandler data must be collected and modeled Omits consideration of shiphandler and information available to him Question of validity of mathematical models No variability to shiphandler function Limited to scenarios for which developed Question of validity of mathematical models
Real-time man-in-loop simulation limited display and controls	Relatively fast and inexpensive Screen large numbers of alternatives Includes variability of human operator	Not fast or inexpensive if waterway data must be collected and modeled Question of validity of components other than shiphandler performance in response to display
Real-time man-in-loop simulation: high-fidelity visual scene, indicators and controls	Most inclusive of components of system Includes variability of human operator Allows demonstration,	Relatively high in time and cost requirement Question of validity components other than shiphandler

Tabla 15.2 – Comparación de modelos (Puglisi, 2000)

15.12 SECUENCIA DEL PROYECTO

En la Figura 15.23 se presenta una secuencia que deben seguir las etapas de un proyecto que incluya técnicas de simulación. En el proceso se indica primero una simulación Fast Time y después una simulación Real Time. Se destaca la importancia de las etapas de elaboración, revisión y aprobación de informes.

Figure 5-3. A General Schematic View of the Sequence of Project Elements

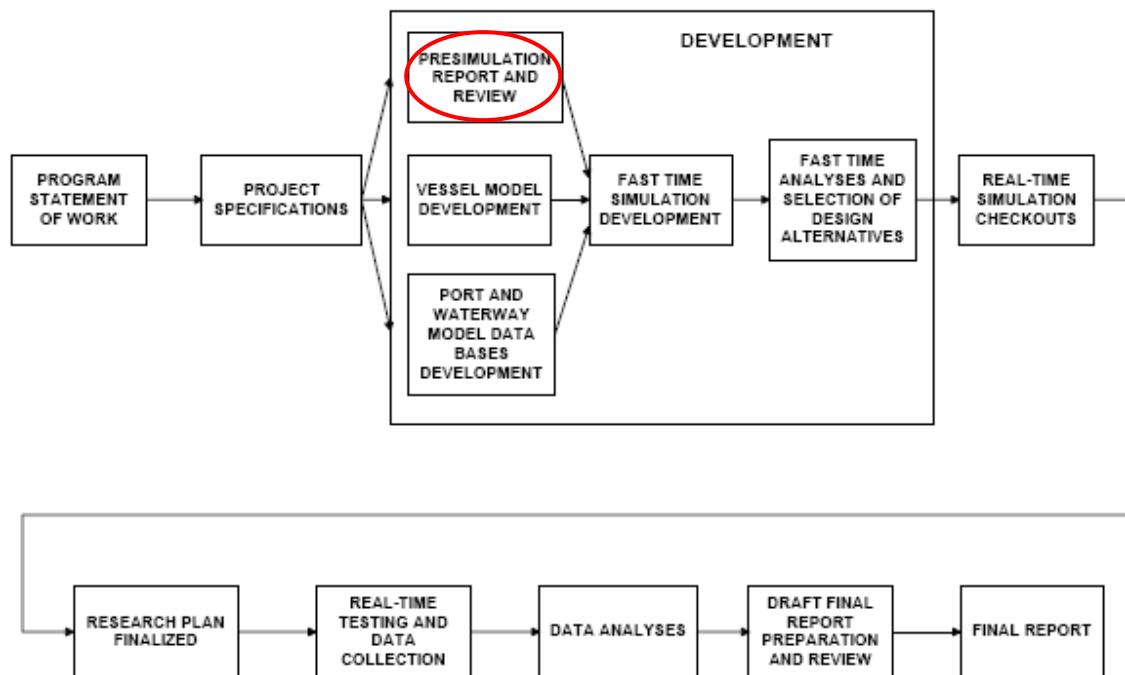


Figura 15.23 – Secuencia de ejecución del proyecto (Puglisi, 2000)

Las etapas indicadas son:

- Definición del proyecto y especificaciones a cumplir del mismo.
- Informe previo a la simulación y revisión por las partes: esta etapa del proyecto es muy novedosa y permite ajustar la programación de manera de que no quede nada pendiente y que los resultados a obtener cuenten con la aprobación del Comitente. Se propone realizar un detallado informe de todas las tareas a realizar por escrito como si hubieran sido realizadas. Se indica con toda claridad los procedimientos seguidos, la información de base, los resultados obtenidos, los plazos, recursos humanos, todos los aspectos propios de un informe final. La diferencia es que no se cuenta con los resultados de los modelos utilizados, pero si se cuenta con su formato de salidas.
- Ese pre-informe se envía a todas las partes involucradas de manera de obtener los comentarios a favor y en contra previo a ejecutar las tareas. Este método permite ajustar la programación de las tareas con la participación de todos, fundamentalmente del Comitente.
Esta propuesta responde a la pregunta ¿Cuándo se escribe el informe final? Con la respuesta: “Antes de empezar las tareas”
- Desarrollo del modelo de buque
- Desarrollo de las bases de datos del puerto y vía navegable
- Modelación Fast Time
- Análisis de los resultados de la simulación Fast Time y Selección de Alternativas
- Simulación Real Time
- Borrador de Informe Final y revisión por las partes: se vuelve a aplicar el concepto de revisión por las partes involucradas de los informes realizados.
- Informe Final

La aplicación de modelación matemática va a producir una serie de resultados. En la Tabla 15.3 se indican una serie de mediciones que pueden efectuarse sobre los resultados a los efectos de evaluar la performance de la vía navegable

Entre las mediciones sugeridas se encuentran:

- Distancia del buque a los veriles durante la navegación
 - o Frecuencia de salidas del canal
 - o Distancia media al veril
 - o Máxima distancia de alejamiento del eje del canal
 - o Variabilidad de la distancia al veril
- Proximidad del buque a otro buque
 - o Máximo punto de aproximación
 - o Distancia media del buque al otro buque
 - o Variabilidad de la distancia del buque al otro buque
- Medidas de controlabilidad del buque / Características de guiñada
 - o Variabilidad del rumbo
 - o Angulo de caída promedio (rate of turn) (tasa de guiñada)
 - o Variabilidad del ángulo de caída
- Franja de navegación (Swept path)
 - o Franja de navegación promedio durante pasaje bajo puentes
 - o Variabilidad de la franja de navegación
- Actividad del timón
 - o Promedio del ángulo de timón
 - o Variabilidad del ángulo de timón
 - o Número de veces que se cambió la dirección del timón
- Uso de los remolcadores de apoyo
 - o Número y disposición de remolcadores
- Evaluación del práctico de las condiciones/Escala de evaluación del practicaje (calificación del práctico de las navegaciones (transits))
- Escala de carga cognitiva
 - o Escala de Stress
 - o Escala de dificultad de la tarea
 - o Escala de manejo del buque
 - o Escala de carga de trabajo del práctico
- Cuestionario de opinión sobre la navegación realizado por los prácticos.
 - o Varias preguntas abiertas (que no tienen una respuesta “si” o “no”) relativas a las condiciones experimentales

Table 4: CHANNEL DESIGN PERFORMANCE MEASURES FOR SAFETY ANALYSIS

<p>Vessel's Proximity to Channel Bounds Measures</p> <ul style="list-style-type: none"> • Frequency of channel exits • Average distance from channel boundary • Furthest distance away from channel centerline • Variability of distance from channel boundary 	<p>Rudder Activity</p> <ul style="list-style-type: none"> • Average absolute rudder angle • Variability of rudder angle • Number of rudder reversals
<p>Vessel's Proximity to Traffic Vessel</p> <ul style="list-style-type: none"> • Closest Point of approach (CPA) • Average Distance of ship from traffic vessel • Variability of ship's distance from traffic vessel 	<p>Assist Tug Usage</p> <ul style="list-style-type: none"> • Number and deployment of tugs
<p>Vessel Controllability Measures</p> <p>Yawing Characteristics</p> <ul style="list-style-type: none"> • Variability of heading • Average absolute rate of turn (yaw rate) • Variability of rate of turn 	<p>Pilot's Evaluations of Conditions</p> <p>Pilotage Evaluation Rating Scale (The pilot's ratings of his transits)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Cognitive Load Scale Score • Stress Scale Score • Task Difficulty Scale Score • Shiphandling Scale Score • Pilot Workload Estimation Score • Composite Workload Score
<p>Swept Path</p> <ul style="list-style-type: none"> • Average "swept path" during bridge passage • Variability of "swept path" 	<p>Pilot Opinion Questionnaire</p> <ul style="list-style-type: none"> • Various open-ended questions pertaining to the experimental conditions

Tabla 15.3 – Mediciones de performance (Puglisi, 2000)

15.14 BIBLIOGRAFÍA

Hensen, H. **"Ship bridge simulators, a project handbook"**. The Nautical Institute, 1999.

IALA (2010) **"The use of simulation as a tool for waterway design and AtoN planning"** Guideline N° 1058 Edition 2

MARIN – Maritime Simulation Center The Netherlands (MSCN) - Van Uvenweg 9, Wageningen - P.O. Box 90, 6700 AB Wageningen – The Netherlands - Telephone 00-31-317-479911 // Fax 00-31-317-479999

PIANC (1992) **"Capability of ship manoeuvring simulation models for approach channels and fairways in harbours"**, Report of working group nr. 20 of Permanent Technical Committee II, Supplement to Bulletin 77 (1992)

PIANC (1997) **"Approach Channels – A guide for design"** – Report of WG 30 - pp36-39

PIANC (2014) **"Harbour Approach Channels Design Guidelines"** Report N° 121 – 2014 – pp. 104-107

Puglisi, Joseph (2000) **"Application of simulation to optimizing channel design and maintenance"** CAORF International Conference, New York, July 2000

Sellber, Charlott (2017) **"Simulators in bridge operations and training: a systematic review and qualitative synthesis"** Journal of Maritime Affairs 16:247 - 263

USACE EM1110-2-1613

USACE Coastal Engineering Manual – Chapter V.5

Webster, W.C.(editor)(1992) “**Shiphandling simulation: Aplicacion to Waterway Design**”. Committee on Assessment of Shiphandling Simulation, National Research Council, Washington, D.C. 1992. Esta publicación la citan todos los autores que tratan sobre el tema. Realmente merece una lectura detallada. Es muy completa y conceptual.