



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

“NUEVOS CRITERIOS PARA EL DIMENSIONAMIENTO Y LA OPERACION PORTUARIA”

295:43

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO CIVIL
P R E S E N T A
FERNANDO BUSTAMANTE IGARTUA
DIRECTOR DE TESIS: ING. MIGUEL A. YAÑEZ MONROY



MEXICO, D. F.

2001



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION
FING/DCTG/SEAC/UTIT/003/01

Señor
FERNANDO BUSTAMANTE IGARTUA
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor ING. MIGUEL ANGEL YAÑEZ MONROY, que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de **INGENIERO CIVIL**.

"NUEVOS CRITERIOS PARA EL DIMENSIONAMIENTO Y LA OPERACIÓN PORTUARIA"

- INTRODUCCION**
OBJETIVOS
- I. EVOLUCION DEL TRANSPORTE MARITIMO Y SU IMPACTO EN EL DESARROLLO PORTUARIO**
 - II. NUEVOS CRITERIOS PARA EL DIMENSIONAMIENTO PORTUARIO**
 - III. NUEVOS CRITERIOS PARA LA REVISION DE LA OPERACIÓN MARITIMA EN LOS PUERTOS**
 - IV. CASO PRACTICO DE DIMENSIONAMIENTO PORTUARIO**
 - V. CASO PRACTICO DE OPERACIÓN PORTUARIA**
 - VI. CONCLUSIONES**
- BIBLIOGRAFIA**
PRESENTACION POR COMPUTADORA ANEXA AL DOCUMENTO IMPRESO

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el Título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Cd. Universitaria a 12 de enero de 2001
EL DIRECTOR

M.C. GERARDO FERRANDO BRAVO
GFB/GMP/mstg.



FACULTAD
DE INGENIERIA
DIVISION DE
INGENIERIA CIVIL
MATERIA DE MECANICA Y ESTRUCTURAS

A Dios, porque gracias a Él estoy vivo, haciendo lo que me gusta, y rodeado de personas que me quieren.

A mis padres, Guillermo y Gabriela, por su confianza, su apoyo y el amor que siempre me han brindado. Por que gracias a ellos soy lo que soy.

A mis hermanos, Rodrigo y Andrés, porque siempre hemos sido muy unidos, y han respondido cuando los he necesitado. Por todo lo que hemos vivido juntos.

A mis abuelos, Fernando y Rebeca, Alfonso y Elena, por su amor.

A toda mi familia. Gracias por su cariño y respaldo incondicional. A Lina y a Cristi.

Los quiero mucho a todos.

A Claudia, por su amor infinito, porque me ha acompañado en todo momento. Gracias por todo lo que hemos caminado juntos; gracias por ser lo que eres, y por compartirlo conmigo. Te amo.

A mis amigos, de la Facultad, del CEMAC, del trabajo, en fin, de todas esos lugares donde he compartido con personas muy valiosas. Mil gracias por su amistad y apoyo.

A la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional. Porque en esta escuela aprendí lo que es México. Por la calidad de sus profesores, por sus espléndidas instalaciones, por el respaldo que siempre me brindó. Prometo regresar a ella para devolverle lo que me ha regalado.

A los profesores que comparten sus conocimientos sin esperar nada a cambio. Su labor es de gran valor para el país, gracias.

A Consultoría Yáñez – Taylor por su apoyo para realizar esta tesis. Porque me han abierto las puertas al mundo de la ingeniería. Por la experiencia que me han ido forjando.

Al ingeniero Migue Ángel Yáñez, por su confianza. Por que me brindó la oportunidad de trabajar con él, y me guió en el desarrollo de esta tesis. Por el tiempo que dedicó a mi formación y por compartir su experiencia profesional conmigo.

A mis Sinodales, Ingenieros Javier Gutiérrez Reynoso, Carlos Gómez Toledo, Gonzálo López de Haro y Víctor Franco, por su gran calidad como personas y profesionistas. Por el soporte que me brindaron en mi desarrollo académico.

A todos las personas, ingenieros, instituciones y empresas que coadyuvaron en mi formación universitaria y en la realización de este trabajo.

Gracias a todos, no los defraudaré.

**NUEVOS CRITERIOS
PARA EL DIMENSIONAMIENTO
Y LA OPERACIÓN
PORTUARIA**

CONTENIDO

<i>TEMA</i>	<i>Pag.</i>
Índice de Tablas	iv
Índice de Figuras	vi
INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVOS	4
CAPÍTULO I	
<u>EVOLUCIÓN DEL TRANSPORTE MARÍTIMO Y SU IMPACTO EN EL DESARROLLO PORTUARIO</u>	5
1.1 SITUACIÓN ACTUAL DEL COMERCIO MARÍTIMO INTERNACIONAL	5
1.1.1 DESARROLLO DE LA ECONOMÍA MUNDIAL Y EL COMERCIO MARÍTIMO	7
1.1.2 MERCADO DEL TRANSPORTE MARÍTIMO DE CARGA	8
1.1.3 COSTO TOTAL DEL TRANSPORTE DE LA CARGA EN EL COMERCIO MUNDIAL	9
1.1.4 LÍNEAS NAVIERAS Y ALIANZAS	10
1.2 PLANES DE CRECIMIENTO FUTURO DE LA FLOTA MERCANTE	12
1.2.1 DESARROLLO Y PRODUCTIVIDAD DE LA FLOTA MUNDIAL	13
1.2.2 CRECIMIENTO DE LAS EMBARCACIONES	15
1.3 PUERTOS CONCENTRADORES Y LOGÍSTICOS	19
1.4 MODERNIZACIÓN DE LOS PUERTOS A NIVEL MUNDIAL	21
1.5 CONTEXTO DE LA INFRAESTRUCTURA PORTUARIA NACIONAL	22
CAPÍTULO II	
<u>NUEVOS CRITERIOS PARA EL DIMENSIONAMIENTO PORTUARIO</u>	26
2.1 SELECCIÓN DE PARÁMETROS DE DISEÑO	27
2.1.1 LAS EMBARCACIONES Y SU EVOLUCIÓN TECNOLÓGICA	27
2.1.2 EQUIPOS DE REMOLQUE	34
2.1.3 AYUDAS A LA NAVEGACIÓN	41
2.1.4 CONDICIONES AMBIENTALES	47
2.1.4.1 <i>Viento</i>	48
2.1.4.2 <i>Oleaje</i>	49
2.1.4.3 <i>Mareas</i>	50
2.1.4.4 <i>Corrientes</i>	50
2.1.4.5 <i>Visibilidad</i>	51
2.1.4.6 <i>Impacto Ambiental</i>	51

TEMA	Pag.
2.2 DIMENSIONAMIENTO DE CANALES DE NAVEGACIÓN. CRITERIOS PIANC	54
2.2.1 ALINEAMIENTO DEL CANAL DE NAVEGACIÓN PRINCIPAL	55
2.2.2 ANCHO DEL CANAL DE NAVEGACIÓN PRINCIPAL	59
2.2.3 PROFUNDIDAD DEL CANAL DE NAVEGACIÓN PRINCIPAL	70
2.2.4 LONGITUD DEL CANAL DE NAVEGACIÓN PRINCIPAL	77
2.3 DIMENSIONAMIENTO DE ÁREAS INTERIORES DE MANIOBRAS	79
2.3.1 DÁRSENAS DE CIABOGA	79
2.3.2 DÁRSENAS DE ATRAQUE	83
2.3.3 CANALES INTERIORES DE NAVEGACIÓN	86
2.4 OPTIMIZACIÓN DEL DISEÑO CONCEPTUAL CON EL USO DE SIMULADORES	91
2.4.1 SIMULACIÓN DE TIEMPO RÁPIDO	92
2.4.2 SIMULACIÓN DE TIEMPO REAL O DE MISIÓN COMPLETA	94
2.4.3 EXPERIENCIA DEL OPERADOR (PILOTO)	100
2.4.4 INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	101
CAPÍTULO III	
<u>NUEVOS CRITERIOS PARA LA REVISIÓN DE LA OPERACIÓN MARÍTIMA EN LOS PUERTOS</u>	103
3.1 FACTORES QUE AFECTAN LA OPERACIÓN Y MANIOBRABILIDAD DE LOS BUQUES	104
3.1.1 RESTRICCIONES DEBIDO AL CRECIMIENTO DE LAS EMBARCACIONES	104
3.1.2 EQUIPOS DE REMOLQUE	109
3.1.3 AYUDAS A LA NAVEGACIÓN	118
3.1.4 CONDICIONES AMBIENTALES	122
3.1.5 EXPERIENCIA HUMANA	127
3.2 REVISIÓN Y MEJORA DE LOS CRITERIOS DE OPERACIÓN CON EL USO DE SIMULADORES	130
CAPÍTULO IV	
<u>CASO PRÁCTICO DE DIMENSIONAMIENTO PORTUARIO</u>	136
4.1 EL PUERTO DE VERACRUZ	136
4.1.1 ARREGLO DE LOS MUELLES EN ESPIGÓN	138
4.2 ANÁLISIS DE LOS PROCESOS FÍSICOS	142
4.2.1 VIENTO	143
4.2.2 OLEAJE	146
4.2.3 MAREAS	151

<i>TEMA</i>	<i>Pag.</i>
4.2.4 CORRIENTES	151
4.3 REVISIÓN DE LOS ESCENARIOS PROPUESTOS	153
4.3.1 REVISIÓN POR CONDICIONES CLIMATOLÓGICAS	153
4.3.2 REVISIÓN POR CRITERIOS DE DIMENSIONAMIENTO	156
4.3.3 REVISIÓN POR CONDICIONES DE AMARRE	161
4.4 SIMULACIÓN DE MANIOBRAS	161
4.5 IMPACTOS OPERATIVOS DEBIDO A LA OPTIMIZACIÓN	169
 CAPÍTULO V	
<u>CASO PRÁCTICO DE OPERACIÓN PORTUARIA</u>	174
5.1 EL PUERTO DE COATZACOALCOS	174
5.2 DETERMINACIÓN DE LAS CONDICIONES AMBIENTALES	176
5.2.1 VIENTO	176
5.2.2 OLEAJE	178
5.2.3 MAREAS	179
5.2.4 CORRIENTES	180
5.3 PREPARACIÓN DEL MODELO VISUAL DEL PUERTO	183
5.4 CAMPAÑA DE SIMULACIÓN	185
5.4.1 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	188
5.5 IMPACTOS ECONÓMICOS DEBIDO A LA REVISIÓN DE OPERACIÓN	192
CONCLUSIONES	199
BIBLIOGRAFÍA	204

Indice de Tablas

<i>TABLA</i>	<i>Pag.</i>
 CAPÍTULO I	
1.1.A PRINCIPALES LÍNEAS NAVIERAS SEGÚN SU CAPACIDAD EN TEUS	11
1.2.A CARACTERÍSTICAS Y DIMENSIONES PROMEDIO DE LAS EMBARCACIONES	15
1.2.B EVOLUCIÓN DE LOS BUQUES PORTACONTENEDORES	16
1.5.A MOVIMIENTO PORTUARIO TOTAL SEGÚN TIPO DE CARGA	23
1.5.B MOVIMIENTO DE CONTENEDORES POR PUERTO EN TRÁFICO DE ALTURA	23
1.5.C MOVIMIENTO DE CRUCEROS POR PUERTO	24
 CAPÍTULO II	
2.1.A DIMENSIONES TÍPICAS DE LAS EMBARCACIONES (TPM)	31
2.1.B DIMENSIONES TÍPICAS DE LAS EMBARCACIONES (TONELAJE BRUTO)	33
2.1.C FACTORES QUE INFLUYEN EN LA SELECCIÓN DE UN REMOLCADOR	36
2.1.D REQUERIMIENTOS PARA EL DISEÑO DE UN SISTEMA VTMS	46
2.2.A ANCHO BÁSICO DE MANIOBRA	66
2.2.B ANCHO ADICIONAL PARA SECCIONES DE CANAL RECTAS	66
2.2.C NIVEL DE RIESGO DE LA CARGA	68
2.2.D DISTANCIA DE PASO EN CANALES DE DOBLE VÍA	69
2.2.E DENSIDAD DEL TRÁFICO	69
2.2.F DISTANCIA AL BANCO	69
2.2.G VALORES DE CB PARA DIFERENTES TIPOS DE EMBARCACIONES	73
2.3.A DENSIDAD DEL TRÁFICO	81
2.3.B DIMENSIONES DE DÁRSENA DE CIABOGA Y PARADAS DE EMERGENCIA PARA DIFERENTES VELOCIDADES	81
 CAPÍTULO III	
3.1.A CONDICIONES PERMISIBLES DE OPERACIÓN	124
3.1.B MOVIMIENTOS LÍMITE PARA DIFERENTES EMBARCACIONES	125
 CAPÍTULO IV	
4.1.A CAPACIDAD Y DIMENSIONES PROMEDIO DE LOS BARCOS DE DISEÑO	141
4.1.B CAPACIDAD Y DIMENSIONES MÁXIMAS DE LOS BARCOS DE DISEÑO	141
4.1.C CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE LOS REMOLCADORES	142
4.2.A DIRECCIONES SIGNIFICANTES DEL VIENTO REINANTE (PERIODO ANUAL)	145
4.2.B COMPARACIÓN DE DATOS DE OLEAJE OBTENIDOS DE DIVERSAS FUENTES	147
4.2.C OLEAJE NORMAL PARA ANÁLISIS DE AGITACIÓN	148
4.2.D NIVELES PRINCIPALES DE LA MAREA EN EL PUERTO DE VERACRUZ	151

T A B L A	Pag.
4.2.E CORRIENTES SUPERFICIALES, PERIODOS VERANO E INVIERNO	152
4.3.A ÁNGULOS DE INCIDENCIA DE LOS VIENTOS CON RESPECTO A LOS MUELLES (ESCENARIO NO. 1)	154
4.3.B ÁNGULOS DE INCIDENCIA DE LOS VIENTOS CON RESPECTO A LOS MUELLES (ESCENARIO NO. 2)	156
4.3.C REVISIÓN DEL DIMENSIONAMIENTO DE LAS ÁREAS DE AGUA PARA LAS ALTERNATIVAS PROPUESTAS	157
4.4.A MODELOS DE RESPUESTA DE EMBARCACIONES	163
4.4.B EJEMPLO DE RELACIÓN DE MANIOBRAS SIMULADAS (ESCENARIO NO. 1)	167
 CAPÍTULO V 	
5.2.A CONDICIONES DE OLEAJE EN AGUAS PROFUNDAS (ESTACIÓN WIS 108)	178
5.2.B PLANOS DE MAREA PARA EL PUERTO DE COATZACOALCOS	179
5.2.C GASTOS DE DESCARGA EN EL RÍO COATZACOALCOS	181
5.3.A MODELOS DE RESPUESTA DE EMBARCACIONES	183
5.4.A LISTADO DE MANIOBRAS SIMULADAS	186
5.4.B PROPUESTA DE LÍMITES DE MANIOBRABILIDAD PARA EL PUERTO DE COATZACOALCOS	191
5.5.A VELOCIDAD Y FRECUENCIA DEL VIENTO EN COATZACOALCOS	194
5.5.B TARIFAS DEL PUERTO DE COATZACOALCOS EN PESOS (MAYO 2001)	195
5.5.C CONSIDERACIONES PROMEDIO POR BUQUE	196
5.5.D COSTO PROMEDIO POR BUQUE	196
5.5.E GANANCIA ANUAL	197

Indice de Figuras

<i>FIGURA</i>	<i>Pag.</i>
CAPÍTULO I	
1.2.A COMPOSICIÓN DE LA FLOTA MUNDIAL POR TIPO DE EMBARCACIÓN	13
1.2.B FLOTA MUNDIAL DE PORTACONTENEDORES (1996)	17
1.2.C ÓRDENES DE CONSTRUCCIÓN DE PORTACONTENEDORES (1996)	18
CAPÍTULO II	
2.1.A EJEMPLOS GRÁFICOS DE THRUSTERS	29
2.1.B PROPELAS TIPO AZIPOD	29
2.1.C REMOLCADORES ASISTIENDO UNA EMBARCACIÓN	34
2.1.D PRINCIPALES TIPOS DE REMOLCADORES	39
2.1.E ALGUNOS ASPECTOS ILUSTRATIVOS DE LOS SISTEMAS VTS Y VTMS	47
2.1.F NAVEGACIÓN CON VIENTOS INTENSOS	49
2.1.G GRADOS DE MOVIMIENTO DE LAS EMBARCACIONES	53
2.2.A ELEMENTOS QUE COMPONEN LAS CURVAS DE UN CANAL	56
2.2.B DETERMINACIÓN DEL RADIO DE GIRO (R) EN FUNCIÓN DEL ÁNGULO DEL TIMÓN Y DE LA RELACIÓN PROFUNDIDAD/CALADO	57
2.2.C DETERMINACIÓN DEL ANCHO DE LA TRAYECTORIA DE DESLIZAMIENTO (WS) EN FUNCIÓN DEL ÁNGULO DEL TIMÓN Y DE LA RELACIÓN PROFUNDIDAD/CALADO	58
2.2.D ANCHO REAL DE LA LÍNEA DE MANIOBRA	60
2.2.E DISTANCIA DE PASO (WP)	62
2.2.F DESVIACIONES DE CURSO DEBIDO A LA PRESENCIA DE BANCOS	63
2.2.G DISTANCIA AL BANCO (WB)	63
2.2.H ELEMENTOS QUE CONSTITUYEN EL ANCHO DE CANAL	64
2.2.I EFECTO DEL SQUAT	72
2.2.J MÉTODO GRÁFICO PARA DETERMINAR EL SQUAT	74
2.2.K LONGITUD DEL CANAL DE ACCESO	78
2.3.A TRAYECTORIA DE MANIOBRA DEL BARCO	80
2.3.B DÁRSENA DE MANIOBRAS CON REMOLCADORES	82
2.3.C DÁRSENA DE MANIOBRAS SIN REMOLCADORES	83
2.3.D DÁRSENA DE MANIOBRAS PIVOTEANDO EN EL ATRAQUE	83
2.3.E ATRAQUE DE UN SOLO LADO	84
2.3.F ATRAQUE DE AMBOS LADOS	85
2.3.G ATRAQUE DE AMBOS LADOS Y EN LÍNEA	85
2.3.H DOBLE VÍA SIN RESTRICCIÓN DE VELOCIDAD	86
2.3.I DOBLE VÍA CON RESTRICCIÓN DE VELOCIDAD	87
2.3.J UNA VÍA DE CIRCULACIÓN	87
2.3.K DOS TIPOS DE MANIOBRAS DE ATRAQUE	89
2.3.L TRAZO DE LA ENVOLVENTE DE DIVERSAS CORRIDAS	90
2.4.A DISPLAY TÍPICO DE UN SIMULADOR DE TIEMPO RÁPIDO	94

FIGURA	Pag.
2.4.B PUENTE DE UN SIMULADOR DE MISIÓN COMPLETA	95
2.4.C VISTA DESDE EL PUENTE DE MANDO DE UN SIMULADOR	96
2.4.D COMPONENTES DE MODELACIÓN EN UN SIMULADOR DE MISIÓN COMPLETA	97
2.4.E FUERZAS MODELADAS EN UN SIMULADOR	99
2.4.F DISPLAY TÍPICO DE UN SIMULADOR DE TIEMPO REAL	100

CAPÍTULO III

3.1.A COSTO DE TRANSPORTE POR TONELADA DE CARGA COMO FUNCIÓN DEL TAMAÑO DEL BARCO	105
3.1.B EVOLUCIÓN DE LA VELOCIDAD DE LOS BARCOS	106
3.1.C VISTA DEL PUENTE DE MANDO DE UN REMOLCADOR	111
3.1.D EJEMPLOS DE DEFENSAS EN REMOLCADORES	112
3.1.E MÉTODO DE ASISTENCIA (A)	114
3.1.F MÉTODO DE ASISTENCIA (B)	114
3.1.G MÉTODO DE ASISTENCIA (C)	115
3.1.H MÉTODO DE ASISTENCIA (D)	115
3.1.I MÉTODO DE ASISTENCIA (E)	116
3.1.J REMOLCADORES ESCOLTANDO UNA EMBARCACIÓN	116
3.1.K NUEVAS TECNOLOGÍAS DE INFORMACIÓN SOBRE EL CLIMA	127
3.2.A RESULTADOS DE SIMULACIÓN DEL TRÁFICO MARÍTIMO	134

CAPÍTULO IV

4.1.A ZONA DE PROYECTO EN LA PARTE NORTE DEL PUERTO DE VERACRUZ	137
4.1.B ESCENARIO NO. 1 DE DISPOSICIÓN DE MUELLES EN ESPIGÓN	139
4.1.C ESCENARIO NO. 2 DE DISPOSICIÓN DE MUELLES EN ESPIGÓN	140
4.2.A FIGURA 4.2.A – ROSA DE VIENTOS REINANTES (PERIODO ANUAL)	144
4.2.B CURVAS DE PROBABILIDAD DE EXCEDENCIA (VIENTOS REINANTES)	146
4.2.C CURVA DE PROBABILIDAD DE EXCEDENCIA (TODAS LAS DIRECCIONES)	150
4.4.A ESCENARIO NO. 3 DE DISPOSICIÓN DE MUELLES EN ESPIGÓN	165
4.4.B ESCENARIO NO. 4 DE DISPOSICIÓN DE MUELLES EN ESPIGÓN	166
4.4.C EJEMPLOS DE GRÁFICAS DE SIMULACIÓN EN VERACRUZ	168
4.5.A ARREGLO DE MUELLES IMPLEMENTADO EN EL PUERTO DE VERACRUZ	172

CAPÍTULO V

5.1.A FIGURA 5.1.A – VISTA PANORÁMICA DEL PUERTO DE COATZACOALCOS	175
5.2.A FIGURA 5.2.A – CONDICIONES DE VIENTO	177
5.2.B FIGURA 5.2.B – DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES DE CORRIENTES FLUVIALES	182
5.3.A MODELOS DE BUQUES EMPLEADOS PARA LA SIMULACIÓN	184
5.5.A VELOCIDAD Y FRECUENCIA DEL VIENTO EN COATZACOALCOS	193

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la importancia que tienen los puertos en el ámbito mundial los convierte en centros comerciales, industriales e incluso sociales estratégicos para el desarrollo de las naciones. Las terminales portuarias son los principales puntos de intercambio de mercancías a gran escala, manejando a través de las embarcaciones volúmenes de carga que ningún otro medio de transporte es capaz de soportar. A su alrededor se desarrollan industrias y se establecen poblaciones, se fomentan inversiones en infraestructura, servicios y transporte terrestre, se crean empleos y se impulsa el turismo.

Es indudable que se han experimentado cambios sustanciales en materia de tecnología, fuentes de financiamiento, formas de administración, métodos de operación y criterios de dimensionamiento portuario, por lo que el tema del desarrollo portuario es muy amplio. En este trabajo no se pretende hacer un análisis exhaustivo de la evolución que ha sufrido este sector en los últimos tiempos, sino abocarse a un tema específico particularmente relacionado con aspectos de ingeniería civil, como es el diseño y el funcionamiento de los puertos, observando los procesos tecnológicos que en materia naval y comercial se están suscitando a nivel mundial.

Debido a lo anterior, en el presente documento se pretende llevar a cabo una revisión de los nuevos criterios que se emplean para el dimensionamiento y la operación portuaria, específicamente en las áreas de navegación o áreas de agua, que a fin de cuentas constituyen el sector del puerto en el que se desenvuelven sus principales usuarios y clientes: los barcos.

Por esto, el primer capítulo trata el tema de la evolución del transporte marítimo y su impacto en el desarrollo portuario, ya que el crecimiento de las embarcaciones y su evolución tecnológica es la causa principal de las nuevas políticas de desarrollo y modernización en los puertos del mundo, y describe la situación actual del comercio marítimo internacional, proporcionando datos y cifras relevantes al respecto. Asimismo, se habla de la forma en que han ido aumentando las dimensiones y capacidad de los buques con el paso del tiempo, incluyendo tendencias futuras de crecimiento.

Por otra parte, se hace una breve descripción de lo que son los puertos concentradores y logísticos, así como de la manera en que las terminales han ido evolucionando para adaptarse a las nuevas generaciones de navíos y formas de manejo de carga. En la última sección del Capítulo I se presenta un análisis de las condiciones en que se encuentra la infraestructura portuaria nacional, buscando que los ingenieros conozcan la situación de los puertos en México y apliquen los criterios que en este trabajo se presentan en beneficio de nuestro país.

Los siguientes dos capítulos constituyen la base del trabajo, ya que en ellos se analizan los nuevos criterios para el dimensionamiento y la operación portuaria que se utilizan en nuestros días. En ambos capítulos se estudian los factores que afectan la maniobrabilidad de los buques y que, por lo tanto, funcionan como parámetros de diseño, como son las características tecnológicas de las embarcaciones y las restricciones debido a su crecimiento, el uso de remolcadores, las ayudas a la navegación, las condiciones ambientales y la experiencia humana.

El Capítulo II, el más extenso del documento, trata el tema del dimensionamiento de las áreas de navegación de un puerto, y abarca los diferentes métodos de dimensionamiento tanto para canales de navegación (criterios PIANC) como para las áreas interiores de maniobras. Por su parte, al Capítulo III le corresponde el tema de los nuevos criterios para la revisión de la operación marítima en los puertos.

Parte fundamental de dichos capítulos se refiere al uso de simuladores para optimizar el diseño de las áreas de navegación, así como para revisar y mejorar los criterios de operación de un puerto.

Finalmente, el tercer y cuarto capítulos proporcionan dos casos reales, ocurridos en nuestro país, en los que se aplican los criterios descritos en los capítulos previos. Su importancia radica en ilustrar, de forma práctica y tangible, el empleo de estos criterios en puertos nacionales, como prueba de la conveniencia, mejora y beneficios que conllevan para las terminales.

El Capítulo IV describe el caso del Puerto de Veracruz, en el que se evaluaron varios arreglos de muelles en espigón y por medio de la aplicación de los métodos de dimensionamiento y de un modelo de simulación de tiempo real, se hizo la elección del

escenario óptimo. Igualmente se presenta un análisis de los impactos operativos debido a la optimización en el diseño.

El Capítulo V detalla la forma en que se elaboraron una serie de recomendaciones para la mejora en la operación del Puerto de Coatzacoalcos, con base en la simulación de las maniobras en las áreas de agua del puerto bajo la influencia de condiciones ambientales diversas, para posteriormente evaluar los impactos económicos debido a la revisión de operación.

Para la elaboración de esta tesis se buscó que las fuentes de información representaran un acervo vigente, con elementos de vanguardia en el ámbito portuario, siendo incluso una premisa la consulta de información a través de Internet, definitivamente el medio que permite tener acceso a los más modernos sitios especializados en el tema de todo el mundo. Del mismo modo, Los manuales y criterios de diseño expuestos se han implementado en una gran cantidad de proyectos en diversos países, y marcan la pauta en el dimensionamiento y la operación de los principales puertos hoy en día.

La intención primordial del presente trabajo es que su contenido permita a los estudiantes de ingeniería y a los profesionistas interesados en ámbito portuario, recibir la información básica necesaria para comprender el panorama portuario nacional e internacional, la tendencia de los cambios en este campo y sus causas principales.

México requiere especialistas en ingeniería portuaria, marítima y costera formados en el país, que conozcan sus necesidades y características, con experiencia, ética y responsabilidad, comprometidos con la nación para que el potencial de sus costas y recursos naturales sea explotado y desarrollado eficientemente, y genere beneficios para toda la población.

OBJETIVOS

El impresionante y vertiginoso crecimiento que han observado los puertos en los últimos tiempos, ha fomentado el surgimiento de nuevas tecnologías, modelos y criterios para el dimensionamiento y la operación portuaria.

De acuerdo con la idea anterior, se plantearon los siguientes objetivos básicos que sirven como guía para el desarrollo de esta tesis:

1. Analizar, de manera clara y precisa, los aspectos fundamentales que constituyen los nuevos criterios para el dimensionamiento y la operación portuaria.
2. Mostrar los métodos de vanguardia empleados en todo el mundo para el diseño portuario, en cuanto a manuales y recomendaciones generadas por organismos internacionales.
3. Describir los elementos que influyen en la maniobrabilidad de las embarcaciones, y su implicación en el dimensionamiento y la operación de los puertos.
4. Sintetizar los avances tecnológicos que se han presentado en las embarcaciones concernientes a su control y maniobrabilidad, y sus implicaciones en la operación de las instalaciones portuarias, referentes a la operación y asistencia a los barcos, y en la modelación y simulación tanto de maniobras como de procesos operativos.
5. Proporcionar a los profesionistas involucrados en este medio una idea general, fundamentada en aspectos técnicos, teóricos y prácticos, de las tendencias actuales en el diseño y manejo de los puertos, que los provea de las bases para proponer e implementar mejoras que beneficien a los puertos del país.

CAPÍTULO I

EVOLUCIÓN DEL TRANSPORTE MARÍTIMO Y SU IMPACTO EN EL DESARROLLO PORTUARIO

El comercio entre naciones históricamente se ha basado en su mayoría en el transporte marítimo, debido principalmente a la gran capacidad de las embarcaciones. El crecimiento explosivo que ha experimentado el comercio internacional en las últimas décadas conlleva, sin lugar a dudas, a una mayor demanda en el servicio de transporte de carga por mar, sobre todo con el surgimiento del concepto de carga contenerizada, que representa la simplificación y estandarización mundial en el transporte de mercancías, sin olvidar el movimiento de graneles y pasajeros, que es igualmente de gran relevancia.

Debido a lo anterior, la capacidad y dimensiones de los barcos han aumentado hasta el punto en que muchos de los puertos en México y el mundo deben considerar, casi obligatoriamente, una modernización y ampliación de su infraestructura para poder recibir embarcaciones de gran magnitud y darles un servicio eficiente.

En este capítulo se presenta un panorama actual de la situación del comercio marítimo internacional y su repercusión en las tendencias de crecimiento de los buques, sintetizándose el impacto que esto significa en el dimensionamiento y la operación portuaria, tanto en el ámbito mundial como en nuestro país.

1.1. SITUACIÓN ACTUAL DEL COMERCIO MARÍTIMO INTERNACIONAL

El creciente desarrollo del intercambio mundial de productos y servicios ha provocado la eliminación gradual de las barreras comerciales, una rápida generación de información relacionada con flujos de mercado y notables mejoras en la infraestructura de comunicaciones y transportes en el ámbito internacional. Con la globalización, la producción ha ingresado en un ambiente de competencia que demanda nuevos

requerimientos en el transporte y la distribución de mercancías, como son: confiabilidad, seguridad y reducción de los costos, así como la creación de una diversidad de alternativas que proporcionen flexibilidad al usuario del transporte.

Lo anterior fomenta una tendencia de los mercados hacia la economía de escala, en la cual se busca el manejo de volúmenes de carga cada vez mayores disminuyendo los costos de transporte y propiciando la integración de redes de transferencia internacionales para el intercambio de mercancías de alto valor, en las que se incorporan los modos de transporte marítimo y terrestre (principalmente ferroviario). Debido a esto han surgido servicios integrales de carga que, combinando ambos modos de transporte, llevan las mercancías de un punto a otro en las modalidades puerta – puerta o almacén – almacén, por lo que la capacidad del transporte por tierra ha tenido que aumentar, originándose sistemas como el de vagones de ferrocarril de doble estiba (con capacidad para filas dobles de contenedores). La organización de la carga de forma automatizada y eficiente ha requerido la aplicación de equipos computarizados de comunicación y logística.

Es evidente la importancia del transporte marítimo dentro del comercio internacional, ya que el comercio marítimo mundial ha participado siempre de forma predominante en los flujos e intercambios de materias primas y productos elaborados entre naciones. Los cambios tecnológicos y de organización que ha experimentado el comercio marítimo han fomentado la modernización de la infraestructura y equipamiento de los puertos, con el fin de que el tiempo de estadía de los barcos en puerto sea cada vez menor. Gracias a esta transformación que ha generado la necesidad de cambio en los puertos, éstos constituyen actualmente un factor clave para el desarrollo del comercio, por lo que ha surgido el concepto de mercado portuario, tanto en el ámbito regional como mundial.

Del mismo modo, las innovaciones tecnológicas y el avance en la organización del transporte por mar se reflejan en el aumento del tamaño de las embarcaciones de carga así como en el desarrollo de los modos de empaque y estandarización en el manejo de mercancías alrededor del mundo (contenerización, paletización, unitización, roll on – roll off, etc.) que requieren de mayor planeación, equipamiento y mano de obra especializada que se traducen en una mayor inversión en las instalaciones y operación portuarias.

1.1.1 DESARROLLO DE LA ECONOMÍA MUNDIAL Y EL COMERCIO MARÍTIMO

De acuerdo con datos de la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Comercio y Desarrollo (UNCTAD, "United Nations Conference on Trade and Development") publicados en el documento *Review of Maritime Transport* (1999 y 2000), la producción mundial creció para el año de 1998 en un 2% por encima de la producción de 1997, y aumentó 2.7% para 1999 con respecto al año anterior. Asimismo, se pronostica que para el año 2000 el crecimiento en la producción mundial estará entre el 3.5 y 4.5% con respecto a 1999. Actualmente la UNCTAD aún no ha manifestado los resultados obtenidos en ese año, sin embargo es evidente la tendencia de crecimiento de la producción mundial con el paso del tiempo, debido principalmente a los avances tecnológicos y al aumento de la población que se traduce en una mayor demanda de producción.

La importancia de las cifras anteriores radica en que el crecimiento y evolución de la economía mundial tiene una relación directa con el desarrollo del comercio marítimo internacional, por lo que el aumento constante de la producción mundial se traduce en la necesidad de captar una mayor cantidad de mercancías en las terminales portuarias y de dar cabida a buques de mayores dimensiones con el paso del tiempo, lo cual implica el replanteamiento de los criterios de dimensionamiento portuario acorde con la tendencia de crecimiento de la producción.

Confirmando la aseveración anterior, la UNCTAD afirma que el comercio marítimo experimentó su catorceavo crecimiento anual consecutivo para 1999, logrando el mayor movimiento de carga en la historia con 5,230 millones de toneladas. Sin embargo, la tasa de crecimiento anual descendió al 1.3%, la más baja desde 1987, debido a la disminución en el comercio marítimo de graneles sólidos, que seguramente se recuperará en los años siguientes. Los primeros datos procesados para el año 2000 indican una tendencia de crecimiento del comercio marítimo del 2% para ese año.

Asimismo, el total de la actividad marítima (medida en ton – milla) decreció a un nivel mínimo de 21,480 miles de millones de ton – milla en 1999, en comparación con los 21,492 miles de millones de ton – milla del año anterior. Dado que la cantidad de toneladas transportadas va en aumento desde hace catorce años, el decremento en la cantidad de ton – milla quiere decir que cada vez se recorren menores distancias

acumuladas por año a pesar de que el tonelaje aumenta, por lo que definitivamente la capacidad de las embarcaciones tiende a ser mayor con el paso del tiempo. Esto significa que se busca realizar el menor número de viajes transportando la mayor cantidad de carga posible.

Por otra parte, el movimiento de contenedores por los puertos del mundo es un índice directo del desarrollo y participación de las naciones en el comercio internacional. Así, el tráfico de carga contenerizada en los puertos del mundo continúa incrementándose. En 1997 creció a una tasa de 8.6% sobre el movimiento de 1996, alcanzando 163.7 millones de TEUs, de los cuales 83.3 millones (es decir, 50.9%, comparado con 50.3% en 1996) se manejaron en los puertos de los países en desarrollo. Para 1998 el crecimiento en el manejo de carga contenerizada fue de 6.7% con respecto al año anterior; se movilizaron 165 millones de TEUs, manejándose 88.5 millones (el 53.6%) en naciones en vías de crecimiento.

1.1.2 MERCADO DEL TRANSPORTE MARÍTIMO DE CARGA

El mercado del transporte marítimo de carga se puede dividir básicamente en tres sectores: mercado de carga contenerizada, mercado de graneles y mercado de crudo y derivados del petróleo.

En cuanto al mercado de carga contenerizada, la UNCTAD publicó en el documento *Review of Maritime Transport 2000* que la totalidad de embarques registrados en este rubro para 1999 alcanzó aproximadamente 50 millones de TEUs, y se esperaba que esta cifra aumentara a 53 millones de TEUs para el año 2000. La flota mundial de portacontenedores continuó expandiéndose sustancialmente, en términos tanto de número de embarcaciones como de capacidad, constituyéndose por 2,433 barcos con una capacidad conjunta de 4,298,000 TEUs para fines de 1999, representando un incremento del 2.9% en cuanto al número de unidades y del 5.8% en capacidad (TEUs) con respecto al año anterior.

El mercado de graneles sólidos finalizó 1998 con indicadores en niveles más bajos que en 1997, principalmente debido a la crisis financiera en Asia y su influencia negativa en otras áreas, la cual afectó negativamente la demanda de graneles sólidos y

consecuentemente la tasa de desarrollo del transporte de este tipo de carga. Para 1999 el balance de la oferta y la demanda de graneles sólidos mostró una clara mejoría. El crecimiento en la demanda de este tipo de carga se intensificó notablemente en la segunda mitad de 1999 alcanzando aproximadamente 2,970 millones de toneladas, específicamente gracias a la demanda del mercado asiático de carbón y mineral de hierro como resultado de su recuperación económica.

Para 1998 el comercio de crudo sufrió un estancamiento que detuvo el índice de carga favorable del año anterior, debido en gran parte a la crisis asiática y deteriorado aún más por factores estructurales y comerciales como las alianzas de compañías petroleras de enorme relevancia internacional, cuyo poder de "regateo" en el mercado petrolero tuvo un efecto negativo en el rubro de los buques – tanque. Otro factor importante fue que, para 1998, se introdujeron al mercado 118 nuevos buques – tanque petroleros agregando 12.6 millones de TPM, comparadas con 5.5 millones de TPM que se perdieron o retiraron del mercado. La producción de petróleo crudo decreció en 1.5% para 1999 en relación con la de 1998. Consecuentemente la totalidad del volumen de crudo transportado vía marítima disminuyó en 2%. Sin importar lo anterior, los cargamentos de productos derivados del petróleo se incrementaron en 2%.

1.1.3 COSTO TOTAL DEL TRANSPORTE DE LA CARGA EN EL COMERCIO MUNDIAL

El factor de transporte de carga se define como la proporción que representa el costo del traslado de la carga en relación con el valor total de las importaciones. Este factor tiende a disminuir con el paso del tiempo, descendiendo de 6.64% en 1980 a 5.22% en 1990. En 1997 permaneció estable con un valor de 5.24%, descendiendo a 5.06% en 1998.

El factor de transporte para los países desarrollados descendió de 4.4% en 1990 a 4.17% en 1997 y 4.07% en 1998, mientras que en los países en vías de desarrollo decreció a 8.04% en 1997, comparado con 8.6% en 1990; en 1998 se incrementó marginalmente alcanzando un valor de 8.06%.

Dentro de los países en desarrollo, el factor para las naciones africanas y oceánicas en el año de 1997 fue el más elevado con 11.53% y 12.36% respectivamente, siendo el

más bajo el de los países americanos con 7.02%. Para 1998 la tasa más alta la obtuvieron los países africanos de este grupo, con un 11.36%.

El factor de transporte de carga refleja que en los países desarrollados el costo de los fletes es mucho menor gracias al avance tecnológico y gran capacidad de los puertos, así como a la infraestructura de transporte terrestre que respalda al comercio internacional. Al mismo tiempo, y como consecuencia de lo anterior, el valor de las importaciones es mayor dado el poder adquisitivo de las potencias económicas mundiales, por lo que el factor tiende a ser más reducido. En los países subdesarrollados ocurre totalmente lo contrario: el transporte es costoso, deficiente y de baja capacidad, y el valor de las importaciones es muy bajo, por lo que el factor es mayor que en las naciones del primer mundo. Aún así, es un hecho que el factor de transporte de carga en todos los países desciende con el paso de los años, gracias al abaratamiento en los costos del transporte y a la economía de escala, en la cual se transporta mayor cantidad de mercancías por menor precio.

1.1.4 LÍNEAS NAVIERAS Y ALIANZAS

Las líneas navieras son las empresas que se encargan del transporte de carga por vía marítima. Por lo general estos viajes se llevan a cabo de acuerdo a un programa regular y con rutas fijas. Los cargamentos se aceptan bajo un contrato denominado conocimiento de embarque.

Con base en datos obtenidos de diversos sitios de Internet relacionados con este tema, existen alrededor de ciento setenta líneas navieras en todo el mundo. Según cifras de la UNCTAD, para principios del año 2000 las veinte principales líneas navieras poseían el 69% de la capacidad mundial total, de las cuales tan solo diez compañías controlaban el 51% de esta capacidad. A pesar de esto, en comparación con otras actividades económicas, la industria naviera está aún un tanto fragmentada, y ninguna compañía controla de manera individual más del 60% de la capacidad de plazas total del mundo. La *Tabla 1.1.A* presenta una lista de las principales líneas navieras portacontenedores.

Actualmente la tendencia es el surgimiento de alianzas entre las compañías navieras, conocidas como compartición de espacios, en las que una empresa reserva

espacio en su embarcación para la carga manejada por la empresa competidora, evitando la necesidad de aumentar el número de barcos de cada línea para cubrir todas las rutas, y cumpliendo a su vez con la frecuencia y versatilidad requeridas por el usuario.

Tabla 1.1.A – Principales Líneas Navieras Según su Capacidad en TEUs

PUESTO	LÍNEA NAVIERA	PAÍS / TERRITORIO	NÚMERO DE BARCOS	CAPACIDAD EN TEUs (2000)	CAPACIDAD EN TEUs (1999)
1	Maersk Sealand	Dinamarca	244	599,601	548,090
2	Evergreen / Uniglor / Lloyd Triestino	Taiwan / Italia	139	327,813	289,892
3	P&O / Nedlloyd	Reino U. / Holl.	114	277,582	246,131
4	Hanjin / DSR-Senator	R. Corea / Alem.	83	258,025	230,320
5	Mediterranean Shp.	Suiza	122	233,751	189,334
6	COSCO	China	114	201,263	197,347
7	NOL / APL	Singapur	70	191,284	197,853
8	NYK Line	Japón	67	154,344	151,820
9	CMA / CGM / ANL	Fran. / Australia	61	138,956	94,860
10	CP Ship Group	Canadá	68	138,823	124,411
<i>Total 1 a 10</i>			<i>1,082</i>	<i>2,521,442</i>	<i>2,270,058</i>
11	Zim	Israel	59	124,425	110,064
12	MOL	Japón	48	116,152	104,302
13	K Line	Japón	49	109,463	99,289
14	Hyundai Merchant M.	Rep. De Corea	32	106,137	117,042
15	OOCL	Hong Kong	40	103,896	90,765
16	Yangming Marine	Taiwan	36	95,712	87,295
17	Hapag-Lloyd	Alemania	26	89,076	88,711
18	UASC	Kuwait	23	61,461	61,416
19	CSAV	Chile	29	54,839	53,672
20	Cho Yang	Rep. De Corea	23	51,129	58,668
<i>Total 1 a 20</i>			<i>1,447</i>	<i>3,433,732</i>	<i>3,141,282</i>
Total Mundial			3,696	4,967,496	4,612,730

FUENTE: Kaiun (Shipping), Junio 2000. Extraída de: Review of Maritime Transport 2000. UNCTAD, 2000.

Detrás de la mayoría de las alianzas, fusiones, y otras formas de concentración en el transporte marítimo hay tres motivaciones principales, que son: disminuir los costos por unidad, a través del aumento de productividad y economías de escala; lograr un mayor dominio del mercado con miras a incrementar los ingresos; y reducir la exposición al riesgo, al participar en un número mayor de rutas comerciales, con más buques, ya que la baja de fletes de un mercado puede compensarse con el aumento de las tarifas en otro.

Los grandes buques portacontenedores que utilizan las alianzas comerciales del sector han reducido al máximo el número de puertos de escala, por razones de eficiencia y economía. Esta tendencia conduce a una mayor concentración del tráfico portuario en un menor número de puertos más grandes. Por ejemplo, en la costa oriental de Estados Unidos, los 10 puertos de mayor tamaño tuvieron una tasa de crecimiento del 12% en 1997, frente a una tasa media de sólo el 6% en los puertos restantes más pequeños.

Con esta nueva organización de las líneas navieras, existe una inclinación hacia la concentración en el ámbito del transporte marítimo, que significa que los puertos, empresas navieras, alianzas entre compañías y proveedores de otros servicios marítimos, relativamente más grandes, están aumentando su participación en el mercado, a expensas del resto de los participantes más pequeños.

El aumento en la eficiencia de los servicios portuarios y marítimos ha facilitado como nunca antes la compra y venta de mercancías, materias primas y componentes en casi todas las partes del mundo. La incorporación al mercado de buques más grandes y el incremento del transbordo, exigen inversiones adicionales en los puertos, pero éstos también venderán más servicios. Lo anterior conducirá directamente a un mayor movimiento de contenedores en los puertos y a una reducción de las millas – barco.

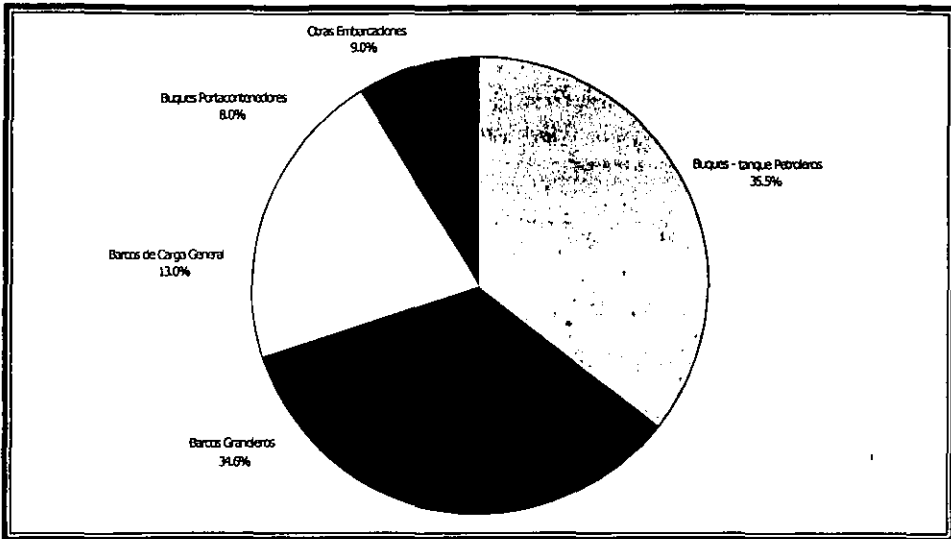
1.2. PLANES DE CRECIMIENTO FUTURO DE LA FLOTA MERCANTE

Para principios del año 2000, la totalidad de la flota mundial comprendía 799 millones de toneladas de peso muerto (TPM, se refiere a la capacidad del barco: peso del combustible, agua, víveres, lubricantes, tripulación y carga) de las cuales el 35.5% lo

representaban los buques – tanque petroleros, el 34.6% los barcos graneleros, el 13% las embarcaciones de carga general y el 8% los barcos portacontenedores. La *Figura 1.2.A* ilustra la distribución de la flota mundial por tipo de embarcación.

A pesar de que los buques portacontenedores representan un porcentaje relativamente bajo con respecto a los demás tipos de embarcaciones, la tendencia actual es que el movimiento de carga contenerizada aumente año tras año.

Figura 1.2.A – Composición de la Flota Mundial por Tipo de Embarcación



FUENTE: Elaborada con datos de: *Review of Maritime Transport 2000*. UNCTAD, 2000.

1.2.1 DESARROLLO Y PRODUCTIVIDAD DE LA FLOTA MUNDIAL

La publicación *Review of Maritime Transport (1999 y 2000)* de la UNCTAD indica que la flota mercante mundial expandió su capacidad a 788.7 millones de TPM a fines de 1998 y a 799 millones de TPM a fines de 1999, representando un incremento del 1.3% entre ambos años. La tasa de crecimiento es relativamente baja debido a que refleja el balance entre las embarcaciones nuevas entregadas, que representan 40.5 millones de

TPM, y las embarcaciones destruidas, inservibles o perdidas que constituyen 30.7 millones de TPM, obteniéndose una ganancia neta de 9.8 millones de TPM.

La misma fuente indica que para 1998 el tonelaje de los barcos portacontenedores se incrementó en 5 millones de TPM (equivalente al 9%), lo que demuestra el importante auge del transporte de carga contenerizada. Mientras tanto, el tonelaje de las embarcaciones graneleras disminuyó en 2.5 millones de TPM (es decir, 12.5% con respecto a 1997).

Por otra parte, en 1999 el tonelaje de la flota perteneciente a los países con economías de mercado desarrolladas cayó en un 0.3%, mientras que los países que propician el registro de los barcos bajo su bandera dadas las facilidades legales que ofrecen a los armadores, conocidos como países de registro abierto (en inglés llamados "open – registry countries") incrementaron su flota en 0.3%, y los países en desarrollo lo hicieron en 0.1%. Dentro de las embarcaciones que navegan con bandera de países de registro abierto, la flota de los países en desarrollo registrada bajo esta modalidad se incrementó levemente, representando alrededor de una tercera parte en 1999, mientras que la flota perteneciente a los países desarrollados registrada en estas naciones sufrió un decremento, constituyendo aproximadamente dos tercios del tonelaje total.

En cuanto a la productividad de la flota mundial, la UNCTAD indica que en 1999 las toneladas de carga transportadas por TPM permanecieron en 6.42, misma cifra que para 1998. Asimismo, el tonelaje mundial excedente total se mantuvo en 23.7 millones de TPM en 1999 (el más bajo en la década de 1990), que representa el 3% de la capacidad de la flota mercante en ese año. Como referencia, en 1998 el excedente fue de 24.7 millones de TPM, significando el 3.1% del tonelaje en ese periodo. La capacidad excedente en el sector de los buques – tanque descendió a 14 millones de TPM en 1999, es decir, el 5% del total del tonelaje de este tipo de embarcaciones. Mientras tanto, para el mismo año los buques de graneles sólidos disminuyeron su tonelaje excedente a 7.9 millones de TPM, el 3.2% de la capacidad total en este sector.

La razón por la cual se presentan los indicadores y datos anteriores es para hacer notar que, a pesar de que año con año la flota mercante internacional aumenta su capacidad, el tonelaje mundial excedente total va en descenso. Esto quiere decir que la demanda de los servicios de transporte de carga vía marítima está creciendo a un ritmo

más acelerado que la capacidad de la flota mundial. De la misma forma, resulta cada vez más económico adquirir una embarcación de carga, lo que se comprueba con el hecho de que la flota de las naciones en desarrollo se ha ido incrementando notablemente, a pesar de su menor suficiencia de inversión. Ambos hechos nos llevan a concluir que el aumento en las dimensiones de los buques es un fenómeno justificado, producto de la gran demanda del servicio y de la disminución de los costos de armado. Esta realidad confirma la necesidad de ampliar y modernizar los puertos en México y el mundo, para satisfacer los requerimientos de la flota mercante actual y venidera.

1.2.2 CRECIMIENTO DE LAS EMBARCACIONES

La evolución moderna del transporte marítimo surge con los buques – tanque petroleros, a partir de la década de 1950. En menos de treinta años el tamaño de estos barcos aumentó aproximadamente de 6,600 TPM hasta casi un millón de TPM, creciendo a su vez el calado de 5 hasta 35 metros, lo cual se reflejó en un incremento sustancial de la profundidad necesaria en las terminales petroleras.

Además de los buques – tanque, existen otros tipos de embarcaciones que son: barcos de carga general, barcos portacontenedores, barcos graneleros, cruceros turísticos y transbordadores. En la *Tabla 1.2.A* se muestran las características y dimensiones más comunes de los principales tipos de barcos, que influyen de manera determinante en el dimensionamiento y la operación portuaria.

Tabla 1.2.A – Características y Dimensiones Promedio de las Embarcaciones

EMBARCACIÓN	T P M	ESLORA [m]	MANGA [m]	CALADO [m]
Buques – tanque	250,000	330	53.3	20.5
Barcos de Carga General	20,000	177	23.4	10.0
Barcos Portacontenedores	50,000	290	34.0	13.5
Barcos Graneleros	150,000	300	45.0	16.0
Cruceros	50,000	245	30.5	10.5
Transbordadores	13,000	197	24.0	6.7

FUENTE: Elaborado con datos de: *Operación, Admón. y Planeación Portuarias*. Héctor López Gutiérrez, 1999.

Es importante hacer notar que, de los diferentes tipos de embarcaciones existentes, los barcos portacontenedores y los cruceros turísticos son los que muestran una mayor tendencia de crecimiento, debido primordialmente al fenómeno de economía de escala aplicado al transporte de carga y al de pasajeros, en donde cada vez es más barato y accesible tanto comerciar mercancías como realizar viajes de placer en cruceros.

La evolución de los barcos portacontenedores es muy rápida, y comienza con el surgimiento de la 1ª Generación (1960 – 1970) de este tipo de embarcaciones constituida por barcos cargueros y tanque “convertidos” adaptados para transportar contenedores. La 2ª Generación (1970 – 1980) está integrada por barcos celulares diseñados ex profeso para contenedores. La 3ª Generación son los buques celulares Panamax (1985) cuyas dimensiones permiten su paso por el Canal de Panamá, no así la 4ª Generación (1988 – 2000) conformada por embarcaciones post – Panamax que presentan dimensiones de eslora, manga y calado de gran magnitud por lo que no pueden hacer uso de dicho canal. Finalmente surge la 5ª Generación (2000 – ?) o buques post – Panamax Plus de gran capacidad, como se ilustra en la *Tabla 1.2.B*.

Tabla 1.2.B – Evolución de los Buques Portacontenedores

GENERACIÓN	CAPACIDAD TEUs	DIMENSIONES [m]
Primera	750 – 1,000	E: 137 a 192 / M: 25 / C: 20
Segunda	1,500 – 2,000	E: 213 a 225 / M: 29 / C: 11.5
Tercera (Panamax)	3,000 – 4,000	E: 262 a 289 / M: 32 / C: 12.5
Cuarta (post – Panamax)	4,000 – 5,000	E: 274 a 306 / M: 34 / C: 13.5
Quinta (post – Panamax Plus)	5,000 o mayor	E: 335 o mayor

E.- Eslora M.- Manga C.- Calado (Los valores de las dimensiones son aproximados).

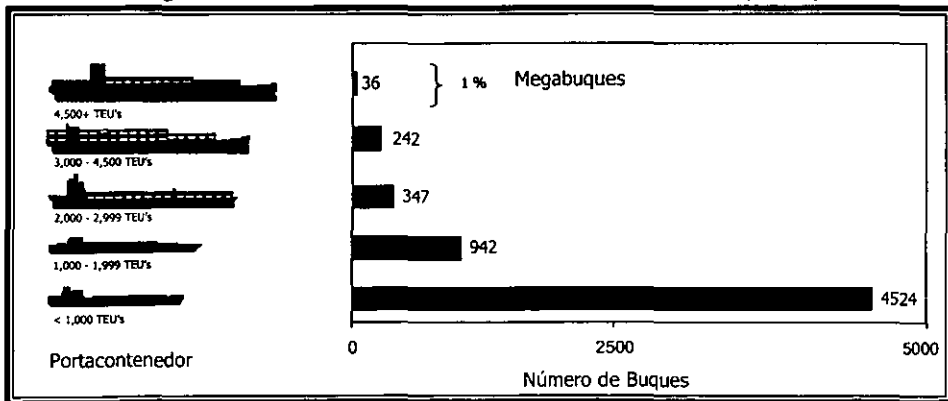
FUENTE: Elaborado con datos de: (1) *Operación, Administración y Planeación Portuarias*. Héctor López Gutiérrez, 1999. (2) *Vickerman – Zachary – Miller*. (3) *The Impacts of Changes in Ship Design on Transportation Infrastructure and Operation*. U.S. Department of Transportation, Office of Intermodalism, Febrero 1998.

Un elemento que permite conocer la forma en que crecerán los buques en los próximos años lo representa las órdenes de armado, es decir, las solicitudes de construcción de embarcaciones que hacen las navieras a las empresas armadoras. Los servicios de carga contenerizada son los que actualmente efectúan un mayor número de órdenes de embarcaciones de gran capacidad. La publicación británica *Containerisation*

International reporta que los buques post - Panamax representan el 40% de las solicitudes de armado de embarcaciones, a pesar de que su costo puede ser mayor a los 100 millones de dólares cada una. No obstante para principios del año 2000 las líneas navieras de mayor importancia ya contaban con este tipo de buques en sus flotas, y habían ordenado la construcción de otros tantos.

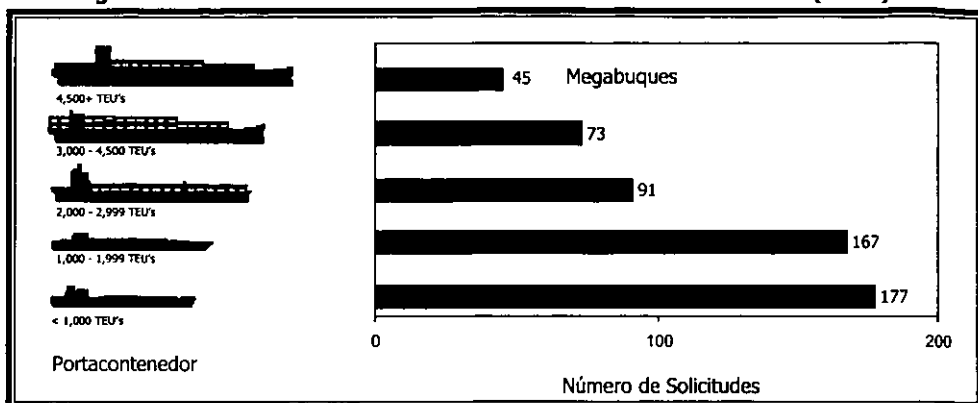
La razón para que las compañías prefieran este tipo de embarcaciones, como se ha mencionado con anterioridad, es que navíos de mayor capacidad permiten al operador alcanzar la economía de escala, logrando un beneficio promedio de ahorros del 20%. Además el mercado de la construcción de buques es relativamente competido, por lo que los precios de los barcos post - Panamax tienden a reducirse hasta en un 25% con respecto a los primeros años de fabricación, considerándose incluso más económicos que las naves de menor capacidad producidas anteriormente. Finalmente, las alianzas entre líneas navieras provocan la concentración de mayores volúmenes de carga en un solo servicio. Para ilustrar lo anterior se presenta la *Figura 1.2.B* y la *Figura 1.2.C*, en las que se aprecia claramente la composición de la flota mundial de portacontenedores así como las órdenes de armado para 1996; obviamente la tendencia actual es que el número de megabuques aumente con el paso de los años.

Figura 1.2.B – Flota Mundial de Portacontenedores (1996)



FUENTE: *The Impacts of Changes in Ship Design on Transportation Infrastructure and Operation*. U.S. Department of Transportation, Office of Intermodalism, Febrero 1998.

Figura 1.2.C – Órdenes de Construcción de Portacontenedores (1996)



FUENTE: The Impacts of Changes in Ship Design on Transportation Infrastructure and Operation. U.S. Department of Transportation, Office of Intermodalism, Febrero 1998.

Como ejemplo de la magnitud de los barcos solicitados por empresas navieras, se presentan tres reportes obtenidos vía Internet sobre el tema.

El primero, con fecha del 23 de marzo de 2000, menciona que la empresa Hapag – Lloyd ordenó a la industria sudcoreana Hyundai Heavy Industries la construcción de cuatro barcos con una capacidad de 7,200 TEUs, 100,000 TPM, 320 m de eslora, 42.8 m de Manga y 14.5 m de calado.

El segundo, del día 5 de enero del año 2001, indica que la compañía China Shipping Group está planeando pedir dos de las embarcaciones para contenedores más grandes del mundo, con una capacidad de carga de 9,800 TEUs, las cuales navegarían en rutas transpacíficas. Dichas naves serían construidas en Corea del Sur, con Hyundai Heavy Industries y Samsung Heavy Industries como principales productores. Los navíos, que se espera sean entregados en el año 2004, serán desplegados en un servicio de línea entre Hong Kong y Los Ángeles.

El último de estos reportes, publicado el 2 de Febrero de 2001, señala que Corea del Sur es el primer país armador de barcos portacontenedores, seguido por Japón y China. Los patios de los astilleros coreanos y japoneses se están preparando para construir embarcaciones de más de 9,000 TEUs.

Como dato adicional, el buque portacontenedores más grande que en nuestros días se encuentra en servicio tiene una capacidad de 6,200 TEUs, con eslora de 346.9 m, manga de 42.7 m y calado de 14.3 m.

Esta información, de considerable vigencia, confirma que las terminales portuarias de carga deben adaptarse a la actual corriente de crecimiento del tamaño de las embarcaciones, modernizando y ampliando su infraestructura, pues de lo contrario quedarán muy rezagadas en el mercado portuario y no tendrán oportunidades de desarrollo futuro, tendiendo incluso a desaparecer con el paso de los años.

1.3. PUERTOS CONCENTRADORES Y LOGÍSTICOS

De acuerdo con la capacidad de los puertos para concentrar carga de diferentes regiones dada su ubicación geográfica, infraestructura y planeación en el movimiento de mercancías, los puertos pueden ser alimentadores o concentradores.

Los puertos alimentadores reciben y distribuyen carga proveniente de su zona de influencia o "hinterland", que es el área que comprende el conjunto de centros productores y consumidores que manejan sus excedentes y déficits de satisfactores a través del puerto en cuestión; el hinterland es función de la red carretera y ferroviaria, los costos de transporte y las tarifas portuarias. Estos puertos poseen menor equipamiento e infraestructura, y una organización administrativa centralizada y dependiente del Estado. Generalmente envían su carga a los puertos concentradores sirviéndoles de apoyo, e inclusive funcionan como distribuidores locales.

Los puertos concentradores poseen mayor equipamiento, infraestructura y organización administrativa para manejar volúmenes de carga que no necesariamente provienen de su zona de influencia, sino de otros puertos y otras regiones. En estos puertos se aplican los conceptos de eficiencia (menor tiempo de estadía y costo reducido de maniobras), seguridad y oportunidad. Son puntos de embarque para las líneas navieras contenerizadas y nodos de cadenas multimodales. Generalmente poseen inversión privada.

Los puertos logísticos, también llamados de tercera generación, son puertos concentradores ubicados estratégicamente con respecto a los flujos internacionales de comercio, cuyo manejo de carga generalmente es exclusivo de contenedores. La participación del sector privado se da en todas las facetas de desarrollo, y el gobierno comúnmente sólo mantiene un papel de coordinador y dueño absoluto del suelo y frente de agua. En los puertos logísticos se da el concepto integrado de servicio multimodal, en el que la transferencia de la carga es responsabilidad de un solo representante.

Las líneas navieras de ruta fija tienen a este tipo de puertos dentro de su itinerario, por lo que se busca que siempre exista una posición de atraque disponible. Por esto, la decisión de establecer un puerto logístico no depende de la nación en que se localiza, sino de la conveniencia de los consorcios que intervienen en los flujos comerciales internacionales, los cuales definen y eligen los recorridos más rentables y benéficos a los mercados mundiales.

Es indudable que promover y alcanzar el desarrollo de puertos logísticos representa para las naciones una mayor fuente de ingresos por vía fiscal y el desarrollo de la región en que el puerto se encuentre generando empleos, establecimiento de industrias y mejoría en los servicios.

Para lograr la generación de un puerto de tales magnitudes, el Estado debe evaluar el costo de la inversión tanto en las instalaciones portuarias como en la infraestructura requerida para comunicar al puerto con otras regiones evitando el congestionamiento de la carga (carreteras, vías férreas, etc.), y compararlo con los beneficios económicos y sociales que esto conllevaría.

Igualmente es indispensable atraer a la inversión privada y ofrecer ventajas a los transportistas con respecto a otras terminales, así como evaluar y analizar las tendencias de crecimiento de las embarcaciones y el desenvolvimiento del comercio marítimo internacional, para lograr el diseño óptimo y eficiente del puerto, tanto en su capacidad e infraestructura como en su operación.

1.4. MODERNIZACIÓN DE LOS PUERTOS A NIVEL MUNDIAL

Desde la aparición del contenedor en 1956 como elemento de apoyo a la economía mundial en el área de transporte, el crecimiento de los volúmenes de carga que lo utilizan ha sido de tal magnitud, que hoy prácticamente no se puede concebir un puerto moderno que carezca de una o varias terminales para el manejo de contenedores. La transferencia de contenedores a través de la interfase buque – puerto ha sido indudablemente importante en el proceso, sin embargo, el funcionamiento del patio de la terminal es fundamental para el éxito del total de las operaciones del puerto.

La configuración de un puerto y, particularmente, el sistema de operación de su terminal de contenedores estarán determinados por el tipo y volumen de tráfico que atienda. Estos sistemas de operación utilizan diferentes combinaciones de equipos para el manejo de contenedores.

En cuanto al volumen del tráfico, su influencia en el sistema operativo de la terminal tiene que ver fundamentalmente con el tamaño y robustez de los equipos, ya que a mayor cantidad de contenedores se requieren equipos de mayor capacidad, más pesados y, desde luego, demandantes de mayores inversiones.

Los sistemas de manejo de contenedores adoptados en las terminales dependen de condiciones tales como: el área disponible donde se ubicará la terminal, las conexiones terrestres y ferroviarias del puerto, la cantidad de contenedores a manejarse y la disponibilidad de inversión para la operación de la terminal.

La totalidad de la infraestructura de un puerto que desee dar servicio a los mega – buques portacontenedores debe ampliarse y volverse más productiva. Cada canal, dársena y puesto de atraque debe tener por lo menos una profundidad de 15.0 m, dado que el calado de los barcos a plena carga oscila entre 12.2 y 14 m, y será mayor en los próximos años. Las grúas deben tener un alcance capaz de satisfacer una embarcación de 21 contenedores de ancho para lograr transferencias de buque a mega – buque. De igual forma, muelles de mayores dimensiones y resistencia son necesarios para soportar más grúas de un peso superior y mayor equipo de patio, acomodar barcos de mayor calado en las posiciones de atraque (en algunos casos dragar para aumentar la profundidad puede

socavar los pilotes de los muelles existentes) y sostener vehículos sobre rieles a lo largo del muelle.

Para recuperar la inversión que representa un mega – buque, los operadores deben minimizar el tiempo de estadía del barco en puerto para maximizar el número de viajes realizados. La reducción del tiempo en puerto así como el elevado número de contenedores que transportan este tipo de barcos, incrementan el tráfico de contenedores que debe manejar el puerto y la capacidad del transporte terrestre que lo soporta. Las líneas navieras tienen tres alternativas para el transporte de contenedores desde el puerto hacia su destino: transporte carretero o ferroviario para mercados tierra adentro, o el uso de barcazas o barcos alimentadores hacia otros puertos de menor capacidad; esta diversidad en los modos subsecuentes de transporte refleja la complejidad y relevancia que tiene la magnitud del tráfico para el diseño de las terminales, y su afectación en la infraestructura de la región e inclusive en el ámbito nacional.

1.5. CONTEXTO DE LA INFRAESTRUCTURA PORTUARIA NACIONAL

De acuerdo con un reporte publicado por el periódico *Excelsior*, en el año de 1997 se movilizaron en el territorio nacional 661.7 millones de toneladas de mercancías, ya sea entre el interior del país, las que van a los mercados internacionales vía exportación, o bien lo que ingresa por importaciones. Después del transporte terrestre, que maneja 59% de la carga total por carretera, los puertos constituyeron el segundo medio de mayor importancia, al captar 32.1%, es decir, casi 220 millones de toneladas de productos. En las Tablas *1.5.A*, *1.5.B* y *1.5.C* se presentan algunos datos y cifras que brindan un panorama básico del estado actual del sistema portuario nacional y su operación.

Tabla 1.5.A – Movimiento Portuario Total Según Tipo de Carga

(Miles de Toneladas)							
TIPO DE CARGA	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999*
Carga General ^{1/}	12,235	12,437	13,755	15,270	18,425	19,954	22,402
Granel Agrícola	4,972	5,204	5,261	9,378	8,192	10,464	10,194
Granel Mineral	35,863	36,251	44,895	53,015	51,541	54,099	50,944
Petróleo y Derivados	127,172	127,247	119,125	126,565	137,322	147,392	140,839
Otros Fluidos	3,208	4,247	3,605	4,354	4,308	5,471	7,074
Total	183,450	185,375	186,640	208,581	219,788	237,380	231,433

^{1/} Incluye carga general suelta y contenerizada, así como perecederos.

* Cifras preliminares

FUENTE: Los Puertos Mexicanos en Cifras 1993 – 1999. Coordinación Gral. de Ptos. y Marina Mercante, S.C.T.

Tabla 1.5.B – Movimiento de Contenedores por Puerto en Tráfico de Altura

(Número de TEUs)							
PUERTO	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999*
<i>Pacífico</i>	<i>151,092</i>	<i>163,476</i>	<i>168,431</i>	<i>218,637</i>	<i>302,540</i>	<i>317,827</i>	<i>367,521</i>
Ensenada	12,049	2,328	849	1,178	14,796	13,668	20,744
Mazatlán	2,147	5,163	10,012	14,249	8,679	10,433	15,228
Manzanillo	50,899	63,798	86,542	171,944	256,405	276,542	319,570
Lázaro Cárdenas	59,610	78,954	55,069	13,325	8,111	7,167	4,468
Acapulco	2,640	2,611	1,649	1,208	-	-	-
Salina Cruz	23,747	10,622	14,310	16,733	14,549	10,017	7,511
<i>Golfo y Caribe</i>	<i>312,145</i>	<i>386,221</i>	<i>400,867</i>	<i>465,665</i>	<i>600,315</i>	<i>692,215</i>	<i>749,084</i>
Altamira	68,815	72,448	102,996	111,802	141,902	162,529	166,191
Tampico	30,202	36,830	56,799	70,823	69,445	67,477	47,898
Tuxpan	2,818	391	3,225	386	449	237	237
Veracruz	193,938	255,879	222,959	265,171	364,259	427,415	484,523
Progreso	9,220	13,794	11,545	13,963	19,753	28,777	43,017
Pto. Morelos	7,152	6,879	3,343	3,520	4,507	5,780	7,218
<i>Otros</i>	<i>469</i>	<i>224</i>	<i>16</i>	<i>-</i>	<i>-</i>	<i>10</i>	<i>890</i>
Total	463,706	549,921	569,314	684,302	902,855	1,010,052	1,117,495

* Cifras preliminares

FUENTE: Los Puertos Mexicanos en Cifras 1993 – 1999. Coordinación Gral. de Ptos. y Marina Mercante, S.C.T.

Tabla 1.5.C – Movimiento de Cruceros por Puerto

(Arribos)							
LITORAL / PUERTO	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999*
<i>Pacífico</i>	1,406	1,174	683	651	708	829	808
Ensenada	629	561	204	229	231	221	216
Cabo San Lucas	241	174	136	109	125	151	174
Mazatlán	180	124	77	83	85	93	92
Vallarta	197	144	100	97	96	128	115
Manzanillo	5	5	1	3	3	25	17
Zihuatanejo	42	34	39	14	18	37	28
Acapulco	112	132	126	116	114	124	132
Huatulco	-	-	-	-	36	50	34
<i>Golfo y Caribe</i>	630	763	1,250	1,318	1,441	1,366	1,627
Veracruz	-	-	-	-	-	-	1
Progreso	-	-	-	16	-	4	50
Playa del Carmen	-	-	576	625	594	505	530
Cozumel	630	763	674	677	725	764	862
Cancún	-	-	-	-	39	22	59
Punta Venado	-	-	-	-	83	71	125
Total	2,036	1,937	1,933	1,969	2,149	2,195	2,435

* Cifras preliminares

FUENTE: Los Puertos Mexicanos en Cifras 1993 – 1999. Coordinación Gral. de Ptos. y Marina Mercante, S.C.T.

Por otro lado, el buque portacontenedores más grande que actualmente arriba en México lo hace en el Puerto de Manzanillo. Este barco pertenece a la línea naviera Maersk – Sealand, y cuenta con una eslora de 292 m, manga de 32.3 m, calado de 13.5 m y una capacidad de carga en contenedores de 4,300 TEUs. Es por demás obvio que las embarcaciones de nueva producción superan por mucho esta capacidad y dimensiones, por lo que para atraer un mercado de mayor magnitud forzosamente hay que invertir en los puertos del país.

Con respecto al tema de la infraestructura portuaria nacional, datos del libro *Los Puertos Mexicanos en Cifras 1993 – 1999* publicado por la Coordinación General de Puertos y Marina Mercante de la S.C.T. indican que la longitud de atraque total de los puertos mexicanos es de 179,850 m, de los cuales 78,714 m los constituyen posiciones de

atraque para turismo, 29,115 m para pesca, 27,086 m para comercio de altura y 12,558 m pertenecen a Pemex. Únicamente los puertos de Manzanillo, Lázaro Cárdenas, Altamira, Tampico y Veracruz poseen más de 2,000 m de longitud de atraque para comercio de altura.

Se cuenta con un total de 3,724,099 m² de áreas de almacenamiento (más del 85% son patios), y solamente los puertos de Manzanillo, Altamira, Tuxpan y Veracruz cuentan con áreas de almacenamiento mayores de 300,000 m².

De la totalidad de los puertos que realizan actividades comerciales de importancia, Ensenada, Manzanillo, Lázaro Cárdenas, Altamira y Veracruz registran calados oficiales en sus principales instalaciones de 11 m o mayores, sin considerar terminales petroleras especializadas como monoboyas.

En el Sistema Portuario Nacional se cuenta con un total de 24 grúas de pórtico de muelle y 39 grúas de marco de patio, distribuidas en los puertos de Ensenada, Manzanillo, Lázaro Cárdenas, Altamira y Veracruz. Estos puertos cuentan también con la mayoría del equipo especializado como tractocamiones, plataformas, chasis y montacargas.

Con base en los datos anteriores, se puede concluir que muy pocos puertos mexicanos poseen la suficiente capacidad en infraestructura para dar cabida a las grandes embarcaciones que actualmente tienden a utilizarse en el ámbito del comercio marítimo internacional. Por ello es importante evaluar la magnitud de las inversiones necesarias para la modernización y ampliación de los puertos, haciendo uso de modernas técnicas y criterios de dimensionamiento portuario para valorar su factibilidad operativa y financiera.

En los capítulos subsecuentes se presenta un panorama de la evolución en los criterios de dimensionamiento y operación portuaria, los cuales toman en cuenta el progreso del transporte marítimo referido en el presente capítulo, además de apoyarse cada vez más en los avances tecnológicos del mundo moderno (telecomunicaciones, sistemas de cómputo, procesos constructivos, etc.). Es muy importante para los ingenieros marítimos y portuarios estar al tanto de los cambios producidos en el comercio por mar así como en el diseño y funcionamiento de los puertos, sobre todo para apoyar al sistema portuario de nuestro país.

CAPÍTULO II

NUEVOS CRITERIOS PARA EL DIMENSIONAMIENTO

PORTUARIO

A partir de la evolución que ha experimentado el transporte marítimo, tal y como se ilustra en el Capítulo I, han surgido nuevos criterios para el dimensionamiento portuario que toman en cuenta los avances tecnológicos de esta época, con base en los cuales las herramientas y técnicas de diseño son cada vez más precisas, propiciando un diseño óptimo de las áreas de navegación que se traduce en la operación adecuada del puerto y en la disminución de la inversión requerida para generar infraestructura portuaria.

Dada la tendencia actual de crecimiento de las embarcaciones, es indispensable que los puertos y sus instalaciones sean capaces de responder a este desarrollo para evitar demoras, congestión, accidentes y otro tipo de incidentes que se traducen en un funcionamiento deficiente del puerto, con su consecuente impacto en la economía regional e incluso a nivel nacional.

Se observa además que adaptar un puerto existente a los requerimientos marítimos vigentes es a menudo difícil, muy tardado y costoso, especialmente si no existe flexibilidad suficiente en el diseño original. Por lo tanto en el desarrollo de nuevos puertos se debe realizar una evaluación inicial referente al tipo, tamaño, capacidad y número de embarcaciones que harán uso de la terminal ahora y en un futuro.

El principal objetivo del presente capítulo es, precisamente, mostrar estos nuevos criterios utilizados para el dimensionamiento portuario, aplicados en un proceso que comienza en la selección de los parámetros de diseño para posteriormente dimensionar las áreas de navegación (canales de acceso, dársenas de ciaboga y atraque, y canales interiores principalmente), haciendo uso de tecnología de vanguardia como son los simuladores.

2.1 SELECCIÓN DE PARÁMETROS DE DISEÑO

En la actualidad existen diversos factores que deben ser considerados para el dimensionamiento portuario, conocidos como parámetros de diseño, los cuales son incluidos en la aplicación de métodos y herramientas modernos y de gran precisión para lograr un diseño apropiado de las diversas áreas de navegación de un puerto. Para hacer una selección adecuada de los diferentes parámetros de diseño es indispensable considerar la experiencia del diseñador, así como el estado vigente de la tecnología, técnicas y conocimiento del diseño portuario.

A continuación se describen los principales parámetros de diseño, buscando plasmar su nivel actual de desarrollo y la manera en que son considerados para el dimensionamiento de las áreas de navegación en nuestros días.

2.1.1 LAS EMBARCACIONES Y SU EVOLUCIÓN TECNOLÓGICA

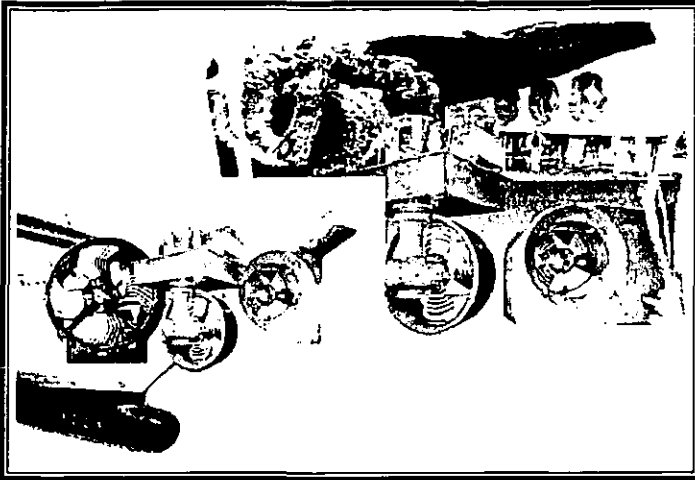
Dos avances tecnológicos aceleraron la evolución hacia las prácticas navieras actuales: la propulsión a vapor y el uso del hierro para la construcción de barcos, ambos implementados en la primera mitad del siglo XIX. En 1836 se introdujo la hélice, que fue sometida a prueba en una serie de barcos. Posteriormente se incorporaron dos hélices, y más tarde, hasta tres y cuatro hélices para minimizar el peligro que podía provocar la deriva de un buque desamparado si una hélice o un eje de cola fallaban o se rompían. En 1890 se realizaron los primeros ensayos para sustituir máquinas alternativas por turbinas. La desventaja de la turbina era que constituía por sí misma un mecanismo de alta velocidad, pero esto se resolvió en agregando un engranaje entre la turbina y el eje de cola, lo que permitía a la turbina mover la hélice a la velocidad apropiada.

El desarrollo del motor de combustión interna a finales del siglo XIX, y en particular el desarrollo de los motores diesel, posibilitaron el diseño de plantas generadoras de potencia para buques que son mucho más útiles que las plantas de vapor convencionales. La utilización de máquinas avanzadas y eficaces resulta un factor de primer orden en la construcción naval, debido a que estos motores permiten al barco un menor consumo de

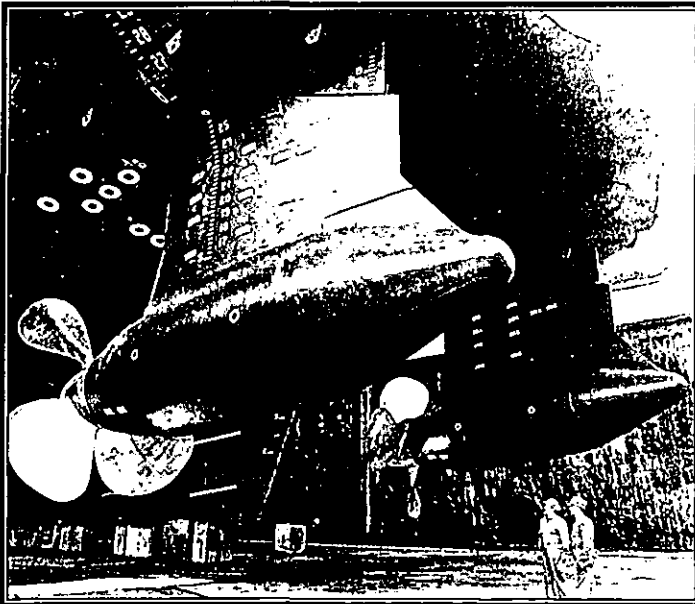
combustible y el transporte de mayor volumen de carga. Los primeros buques propulsados con diesel fueron construidos en los primeros años del siglo XX; en contraste con modelos precedentes, eran más pequeños, pero en los años que siguieron a la Primera Guerra Mundial se construyeron un determinado número de grandes transatlánticos accionados a motor y operaron con gran éxito. Los buques de motor constituyen el 76% de la flota mundial de más de 43,000 buques de 90,000 TPM y superiores; algo menos del 75% de la flota utiliza diesel. La velocidad media de los barcos en la actualidad oscila entre 15 y 40 nudos (27.8 y 74.1 km/hr), siendo la velocidad promedio de 27.5 nudos (50.9 km/hr).

Los datos anteriores son una muestra de la evolución tecnológica de las embarcaciones a partir del siglo XIX y hasta nuestros días, la cual ha influido determinadamente en el dimensionamiento portuario. El avance en cuanto al diseño de los sistemas de propulsión y a la estructura de los navíos ha permitido que éstos aumenten su capacidad y dimensiones vertiginosamente con el paso del tiempo, hasta llegar a la era de los megabuques que se vive en la actualidad. Asimismo, los elementos que controlan el movimiento de los barcos han evolucionado constantemente permitiéndoles una mayor libertad de operación (giros, control de la velocidad, etc.) que facilita las maniobras dentro del puerto.

Los adelantos tecnológicos más notables de reciente aplicación en la propulsión de los buques, son las propelas laterales o "thrusters" (*Figura 2.1.A*) que son hélices en posición vertical ubicadas en los costados del casco del barco con la finalidad de facilitar los giros de la embarcación, y la propelas tipo "azipod" (*Figura 2.1.B*) que comprenden un sistema de propulsión con capacidad de giro de 360° con lo cual se elimina el uso del timón, el apoyo en puntos "pivote", la necesidad de ejes largos en el motor y los thrusters de popa, ocupando por lo tanto un menor volumen a bordo de la nave y generando ahorros en peso, espacio y tiempo de construcción. Además, las propelas tipo azipod están diseñadas para facilitar la conducción y maniobrabilidad del barco con un menor gasto de combustible y mayor eficiencia hidrodinámica (por ejemplo, el radio de giro de una embarcación con azipods es menor que el de una de las mismas características sin este sistema en aproximadamente un 30%). Estas nuevas tecnologías deben ser consideradas en el diseño de las áreas de navegación y maniobras, para lograr su optimización.

Figura 2.1.A – Ejemplos Gráficos de Thrusters

FUENTE: Imágenes obtenidas de Diversas Páginas de Internet Relacionadas con el Tema, 2001.

Figura 2.1.B – Propelas Tipo Azipod

FUENTE: Imagen obtenida de Página de Internet Relacionada con el Tema, 2001.

En cuanto al dimensionamiento de las áreas de navegación, que es el tema principal de este trabajo, las diferentes magnitudes de éstas se expresan, por conveniencia, como múltiplos de la eslora, manga y calado de algún barco. Si estas áreas están designadas únicamente para una embarcación, entonces la elección de dichas dimensiones es simple. Sin embargo, es raro que esto ocurra, por lo que es necesario el uso del concepto de embarcación de diseño.

El barco de diseño es, por lo tanto, aquel para el cual se diseñan las diferentes áreas de navegación. Se elige con el fin de garantizar que estas áreas satisfagan completamente sus requerimientos, y que otros barcos que hagan uso de ellas naveguen con seguridad. Esta embarcación deberá satisfacer ciertos criterios de diseño, e incluso resulta apropiado el considerar más de un barco de diseño en los primeros bosquejos del proceso de dimensionamiento para determinar el ancho y la profundidad de las zonas de navegación.

La embarcación de diseño no es necesariamente el barco de mayores dimensiones que hará uso de las obras, ya que los buques más grandes reciben especial atención y están sujetos a reglas de operación especiales cuando arriban o dejan el puerto y consecuentemente no gozan de la máxima garantía de seguridad. La elección del barco de diseño debe, según los criterios del PIANC ("Permanent International Association of Navigation Congresses"), basarse en una o más de las siguientes observaciones:

- a) Maniobrabilidad inherente baja.
- b) Dimensiones excesivas en el contexto de la operación portuaria.
- c) Superficie vélica excesiva (área del barco sobre la cual ejerce fuerza el viento, constituida por la obra muerta, que es la parte del casco que sobresale de la línea de flotación, y la superestructura).
- d) Transportación de algún tipo de carga peligrosa.

Además, si se desea satisfacer un amplio rango de tipos de embarcaciones, es posible que se requiera más de un barco de diseño, en cuyo caso se tomarán como base de diseño las dimensiones máximas (calado, manga, eslora) de entre todas las embarcaciones seleccionadas. Por ejemplo, el buque que presente el mayor calado será utilizado para determinar la profundidad de las áreas de navegación.

Las autoridades portuarias, además de conocer el tipo de embarcación (buque portacontenedores, crucero, granelero, etc.), realizan una clasificación por peso, ya sea muerto o bruto, y por tipo de carga (de alta densidad o pesada, y de baja densidad asociada a un mayor volumen). Dentro de estas clasificaciones se encuentran combinaciones diferentes de manga y calado, las cuales deben ser consideradas para elegir el barco de diseño. Es indudable que en la actualidad la cantidad de variables que intervienen en esta selección es muy amplia, por lo que el uso de sistemas de cómputo es indispensable.

Como ya se mencionó anteriormente, para el proceso de diseño es necesario conocer las dimensiones principales de la embarcación de diseño. Si únicamente se conoce el peso muerto o el tonelaje bruto, estas magnitudes deben deducirse. Para hacer esto, ordinariamente es necesario hacer uso de gráficas que muestran la tendencia de las dimensiones de diferentes tipos de barcos con respecto a su tonelaje, extraídas de referencias confiables de índole internacional, como son: Lloyd's Register of Ships, Clarkson's Guides, Jane's Publications y Fairplay Publications entre otras. El PIANC elaboró una tabla que resume las dimensiones de las embarcaciones según su peso (muerto o bruto), y que se resume en la *Tabla 2.1.A* y en la *Tabla 2.1.B*.

Tabla 2.1.A – Dimensiones Típicas de las Embarcaciones (TPM)

TPM	DESPLAZAM. [ton]	ESLORA TOTAL [m]	ESLORA ENTRE PERPEND. [m]	MANGA [m]	CALADO [m]
<i>Buques – Tanque Petroleros</i>					
500,000	590,000	415.0	392.0	73.0	24.0
400,000	475,000	380.0	358.0	68.0	23.0
300,000	365,000	350.0	330.0	63.0	21.0
200,000	246,000	310.0	294.0	55.0	18.5
100,000	125,000	250.0	236.0	43.0	15.1
80,000	102,000	235.0	223.0	40.0	14.0
60,000	78,000	217.0	206.0	36.0	13.0

FUENTE: Resumen de la tabla "Typical Ship Dimensions"; extraída de: *Approach Channels, a Guide for Design, Appendix B, PIANC, 1997.*

Tabla 2.1.A – Dimensiones Típicas de las Embarcaciones (TPM)
(CONTINUACIÓN)

TPM	DESPLAZAM. [ton]	ESLORA TOTAL [m]	ESLORA ENTRE PERPEND. [m]	MANGA [m]	CALADO [m]
<i>Buques – Tanque para Químicos y Petroquímicos</i>					
50,000	66,000	210.0	200.0	32.2	12.6
30,000	42,000	188.0	178.0	28.0	10.8
10,000	15,000	145.0	137.0	19.0	7.8
<i>Buques Graneleros</i>					
400,000	464,000	375.0	356.0	62.5	24.0
300,000	350,000	350.0	333.0	56.0	21.8
200,000	236,000	315.0	300.0	48.5	19.0
100,000	121,000	255.0	242.0	39.0	15.3
80,000	98,000	240.0	228.0	36.5	14.0
40,000	50,000	195.0	185.0	29.0	11.5
10,000	13,000	130.0	124.0	18.0	7.5
<i>Barcos Portacontenedores (post – Panamax)</i>					
70,000	100,000	280.0	266.0	41.8	13.8
65,000	92,000	274.0	260.0	41.2	13.5
60,000	84,000	268.0	255.0	39.8	13.2
55,000	76,500	261.0	248.0	38.3	12.8
<i>Barcos Portacontenedores (Panamax)</i>					
60,000	83,000	290.0	275.0	32.2	13.2
50,000	68,000	267.0	253.0	32.2	12.5
40,000	54,000	237.0	225.0	32.2	11.7
30,000	40,500	210.0	200.0	30.0	10.7
20,000	27,000	174.0	165.0	26.2	9.2
10,000	13,500	130.0	124.0	21.2	7.3
<i>Buques Especializados Ro – Ro</i>					
50,000	87,500	287.0	273.0	32.2	12.4
40,000	72,000	260.0	247.0	32.2	11.4
30,000	54,000	231.0	219.0	32.0	10.2
20,000	28,000	197.0	187.0	28.6	9.1
10,000	18,400	153.0	145.0	23.4	7.4

FUENTE: Resumen de la tabla "Typical Ship Dimensions", extraída de: *Approach Channels, a Guide for Design*, Appendix B. PIANC, 1997.

Tabla 2.1.A – Dimensiones Típicas de las Embarcaciones (TPM)
(CONTINUACIÓN)

TPM	DESPLAZAM. [ton]	ESLORA TOTAL [m]	ESLORA ENTRE PERPEND. [m]	MANGA [m]	CALADO [m]
<i>Embarcaciones de Carga General</i>					
40,000	54,500	209.0	199.0	30.0	12.5
30,000	41,000	188.0	179.0	27.7	11.3
20,000	28,000	166.0	158.0	24.8	10.0
10,000	14,500	133.0	127.0	19.8	8.0
<i>Barcos para Vehículos</i>					
30,000	48,000	210.0	193.0	32.2	11.7
20,000	35,500	198.0	182.0	32.2	10.0
15,000	28,500	190.0	175.0	32.2	9.0

FUENTE: Resumen de la tabla "Typical Ship Dimensions", extraída de: Approach Channels, a Guide for Design, Appendix B. PIANC, 1997.

Tabla 2.1.B – Dimensiones Típicas de las Embarcaciones (Tonelaje Bruto)

TONELAJE BRUTO	DESPLAZAM. [ton]	ESLORA TOTAL [m]	ESLORA ENTRE PERPEND. [m]	MANGA [m]	CALADO [m]
<i>Ferries</i>					
50,000	25,000	197.0	183.0	30.6	7.1
40,000	21,000	187.0	174.0	28.7	6.7
30,000	17,000	175.0	163.0	26.5	6.3
20,000	13,000	164.0	152.0	24.1	5.9
<i>Cruceros</i>					
80,000	44,000	272.0	231.0	35.0	8.0
70,000	38,000	265.0	225.0	32.2	7.8
60,000	34,000	252.0	214.0	32.2	7.6
50,000	29,000	234.0	199.0	32.2	7.1
40,000	24,000	212.0	180.0	32.2	6.5
35,000	21,000	192.0	164.0	32.2	6.3

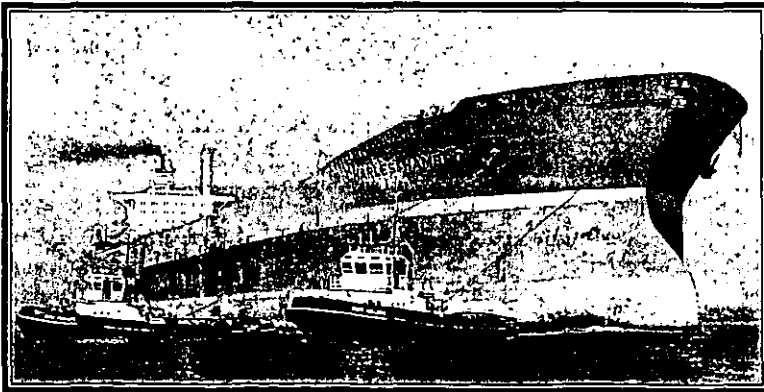
FUENTE: Resumen de la tabla "Typical Ship Dimensions", extraída de: Approach Channels, a Guide for Design, Appendix B. PIANC, 1997.

Es necesario, de igual forma, efectuar un análisis de las características presentes y futuras tanto del tráfico marítimo como de la flota mercante, con el fin de determinar el barco de diseño más adecuado para las expectativas actuales y a mediano y largo plazo del puerto. Por esto es de suma importancia conocer las tendencias de crecimiento de los buques y del comercio marítimo, así como los avances tecnológicos en este ámbito, antes de seleccionar la embarcación (o embarcaciones) que nos llevarán al dimensionamiento de las áreas de navegación.

2.1.2 EQUIPOS DE REMOLQUE

Los equipos de remolque, conocidos como remolcadores, constituyen un elemento de gran importancia para la operación portuaria en la actualidad, por lo que deben considerarse al momento de diseñar las áreas de navegación de un puerto. Conforme se ha ido incrementando el tamaño de las embarcaciones y por lo tanto dificultando su maniobrabilidad, el uso de remolcadores con una potencia y versatilidad de movimiento cada vez mayores se ha hecho imprescindible, al grado de desempeñar un papel relevante en la economía de los puertos. De hecho, un puerto que no tenga la capacidad necesaria para soportar y proveer el servicio de remolque a las embarcaciones resulta inviable en los tiempos actuales.

Figura 2.1.C – Remolcadores Asistiendo una Embarcación



FUENTE: Tug Use in Port. Captain Henk Hensen. The Nautical Institute – Port of Rotterdam, Inglaterra, 1997.

Cuando un buque es asistido por remolcadores, elementos como la experiencia, el trabajo en equipo, la comunicación y sobre todo el conocimiento profundo de las capacidades y limitaciones tanto de las embarcaciones como de los equipos de remolque son esenciales para un manejo seguro y efectivo del navío. Esto se aplica al capitán del remolcador y a su tripulación, así como al capitán y piloto del barco asistido, particularmente en épocas recientes en que los viejos remolcadores convencionales están siendo rápidamente reemplazados por modernos remolcadores que ofrecen un notable poder en sus máquinas y mayores capacidades de maniobra.

Como resultado de los avances en el desempeño de los equipos de remolque, el número de remolcadores requeridos para la asistencia en áreas portuarias está decreciendo. Esto provoca que los capitanes y pilotos maniobren bajo la presión de utilizar el menor número de remolcadores posible, principalmente por el ahorro que esto representa para las compañías navieras, que son las que pagan este servicio.

Asimismo, es necesario que las autoridades portuarias y las compañías que se encargan de la operación de los remolcadores conozcan los diferentes tipos de equipos de remolque que existen y sus características, con el fin de determinar cuál de éstos proveerá el servicio óptimo para el puerto con respecto a las condiciones locales, los factores ambientales, la profundidad de las áreas de navegación y el tipo de embarcaciones que hacen uso de la terminal. Sin embargo no todos los puertos pueden solventar el gasto que implica la adquisición del remolcador ideal, ya que esto conlleva, además de su costo de compra, el gasto en refacciones y en asistencia técnica para un cierto tipo de propulsión (considerando el costo que implica la distancia entre el centro de atención y el puerto). Otros factores que también influyen en la selección del tipo de equipo son la resistencia al daño, la confiabilidad mecánica, el mantenimiento, la simplicidad en el control y la facilidad de capacitación al operador. En la *Tabla 2.1.C* se presenta un panorama general de los factores que influyen en los requerimientos de operación de un remolcador. Los aspectos referentes a los tipos de remolcadores y a los métodos de asistencia (la forma en que los remolcadores de puerto auxilian a las embarcaciones) se discuten a continuación.

Tabla 2.1.C – Factores que Influyen en la Selección de un Remolcador

ZONA DE NAVEGACIÓN / ATRAQUE	CONDICIONES AMBIENTALES	TIPOS DE EMBARCACIÓN	OTROS SERVICIOS REQUERIDOS
Mar / Aproximación	Marejada	Embarcaciones de carga general	Material mar adentro
Ríos	Oleaje	Barcos portacontenedores	Barcazas
Canales	Viento	Buques Ro – Ro	Grúas Flotantes
Profundidad del agua	Corrientes	Buques – tanque / VLCC	Astilleros
Esclusas / Puentes	Hielo	Buques graneleros	Servicio de escolta
Posiciones de atraque mar adentro	Niebla	Ferries	
Posiciones de atraque en aguas protegidas		Barcos de pasajeros	
Dársenas del puerto			
Terminales			
Atraque en el margen de los ríos			
Boyas de amarre			
Botes de amarre			

FUENTE: *Tug Use in Port. Captain Henk Hensen. The Nautical Institute – Port of Rotterdam, Inglaterra, 1997.*

Tabla 2.1.C – Factores que Influyen en la Selección de un Remolcador
(CONTINUACIÓN)

MÉTODOS DE ASISTENCIA	REMOLCADORES EXISTENTES	EXPERIENCIA DISPONIBLE	SEGURIDAD DE LOS REMOLCADORES	ASPECTOS FINANCIEROS
Remolcando en línea	Remolcadores convencionales de un solo giro	Experiencia en el conocimiento, manejo y selección del tipo de remolcador	Tipo de remolcador	Presupuesto
Método Push – Pull	Remolcadores convencionales de doble giro		Regulaciones portuarias / del Estado	Precio del remolcador
Remolcando al costado		Experiencia en métodos de asistencia	Regulaciones de clasificación	Costo de operación y mantenimiento
Escoltando	Remolcadores tipo tractor VS		Condiciones Ambientales	
	Remolcadores tipo tractor azimut			
	Remolcadores ASD			
	Remolcadores tipo tractor en reversa			

FUENTE: *Tug Use in Port. Captain Henk Hensen. The Nautical Institute – Port of Rotterdam, Inglaterra, 1997.*

Las diversas clases de remolcadores se distinguen y nombran con base en sus diferentes características, como son el tipo, la manufactura o la posición de la propulsión, y el sistema de control. Dado que resulta un tanto confusa su identificación, lo más recomendable es clasificar a los remolcadores de acuerdo con la localización de la propulsión y el punto de conexión o punto de acoderamiento (en inglés "towing point"; es el punto de aplicación de la fuerza de remolque, el punto del cual el cabo parte en línea recta hacia el buque). De acuerdo con esta clasificación, se reconocen los siguientes grupos:

- a) Remolcadores con propulsión trasera y punto de conexión cercano a media eslora. Se conocen como remolcadores convencionales.
- b) Remolcadores con punto de conexión trasero y propulsión delante de media eslora. Estos son los remolcadores tipo tractor.

Dentro de los remolcadores convencionales, encontramos los remolcadores de un solo giro y los remolcadores de doble giro, los cuales son los más conocidos en el ámbito

de la operación portuaria. Para incrementar el poder de remolque de este tipo de remolcadores se les adapta un tubo alrededor de la propela conocido como "nozzle". Además pueden estar equipados con propelas de empuje fijas o variables y en algunas ocasiones se les instala un thruster controlable de 360° en la proa para incrementar, de igual forma, la fuerza de empuje (particularmente en los remolcadores de una hélice).

Los remolcadores tipo tractor tienen propelas bajo el cuerpo de la proa, las cuales pueden ser propelas tipo VS ("Voith Schneider propulsion", sistema compuesto por aletas de propulsión verticales, también llamado sistema de propulsión cicloidal) o propelas de azimut controlables de 360°. Los remolcadores con propelas de azimut traseras se asemejan a los remolcadores de dos hélices. No obstante, debido a que poseen thrusters controlables de 360°, son mucho más maniobrables.

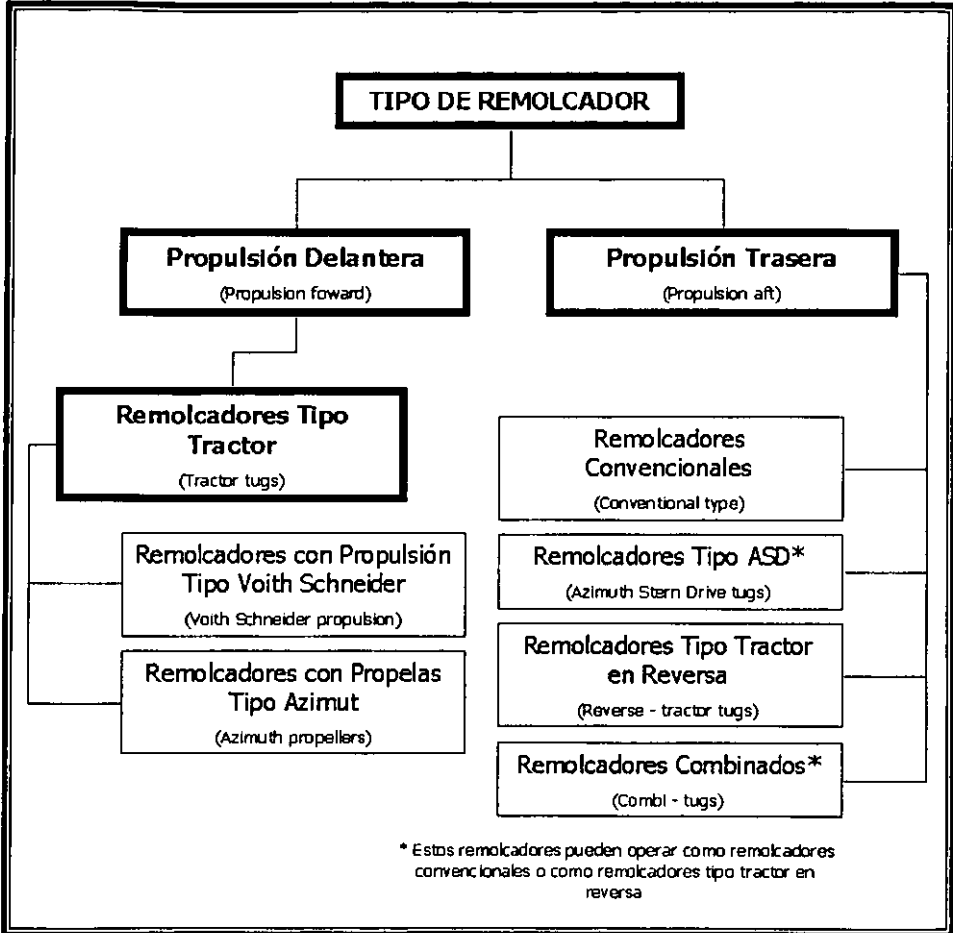
Existen además remolcadores que se consideran tanto convencionales como tipo tractor, dependiendo de la forma en que operen, como son los remolcadores tipo tractor en reversa o remolcadores de empuje, que son remolcadores con propelas de azimut traseras y punto de acoderamiento delantero, diseñados para operar principalmente sobre la proa del remolcador. Los remolcadores tipo tractor ordinario, en cambio, tienen punto de acoderamiento trasero (la popa del remolcador) y sus propelas se localizan cerca de la proa del remolcador. Ambos tipos trabajan con el punto de conexión próximo a la embarcación y sus propelas alejadas del buque, consecuentemente la tendencia del tractor en reversa es en dirección contraria al tractor ordinario.

También entran dentro de esta clasificación los remolcadores con propelas de azimut en la popa llamados ASD ("Azimuth Stern Drive"), los cuales pueden operar sobre la proa del remolcador como remolcadores tipo tractor en reversa, así como sobre la popa del remolcador como remolcadores convencionales. La mayoría de los remolcadores ASD poseen una manivela de remolque al frente y otra en la parte posterior, y otros simplemente poseen un gancho de remolque en lugar de la manivela trasera. Su nombre más apropiado es multi - remolcadores o "multi - tugs" dada su versatilidad de funciones.

Finalmente encontramos dentro de este grupo a los remolcadores combinados o "combi - tugs", que constituyen viejos remolcadores modificados con un thruster de proa retractable, equipados con un punto de acoderamiento adicional al final de la parte delantera del remolcador. Estos remolcadores pueden operar como equipos

convencionales o como tractores en reversa. La *Figura 2.1.D* presenta en forma resumida los diferentes tipos de equipos de remolque que existen.

Figura 2.1.D – Principales Tipos de Remolcadores



FUENTE: *Tug Use in Port. Captain Henk Hensen. The Nautical Institute – Port of Rotterdam, Inglaterra, 1997.*

Inclusive se entiende que hay múltiples diferencias en cuanto a la construcción, diseño del casco, propulsión y configuración del timón dentro de un mismo tipo de remolcadores, por lo que para elegir el equipo de remolque más adecuado a las

características y requerimientos de diseño para las áreas de navegación, se requiere de un amplio estudio llevado a cabo por personal técnico capacitado.

En cuanto a los métodos de asistencia, dependiendo de la experiencia local y de las circunstancias, generalmente se utiliza alguno de los siguientes métodos, o una combinación de éstos:

- a) Remolcando en línea.
- b) Remolcadores operando al lado del barco.

Cuando se remolca en línea, el remolcador se acodera atando cabos en la proa o en la popa de la embarcación asistida. Los equipos de remolque operan normalmente a una distancia de la proa y popa de los barcos de por lo menos una y media veces la longitud del remolcador. Por otro lado, dependiendo de la asistencia requerida, la situación específica y los tipos de remolcadores usados, la operación al costado del buque puede efectuarse con una, dos o tres líneas. Para esto se utilizan diferentes métodos, como el método "push – pull", por medio del cual el remolcador se amarra al barco de modo que pueda empujar y jalar indistintamente el costado de la nave. Otro método consiste en remolcar al costado del barco, donde los remolcadores están atados fuertemente a lo largo del lado del barco (o de ambos lados) con un mínimo de tres líneas. En el Capítulo III se profundiza en los aspectos de operación portuaria y métodos de asistencia con remolcadores.

La finalidad de dar a conocer, de manera general, las características y modos de operación de los diferentes tipos de remolcadores, es destacar la importancia de estos equipos en la operación portuaria moderna. Por lo tanto, para el dimensionamiento portuario resulta esencial considerar la asistencia de remolcadores a las embarcaciones ya que esto modifica las dimensiones de las áreas de navegación. Se debe buscar siempre que el espacio de maniobra que utilicen los remolcadores sea, dependiendo de la situación, lo más reducido posible, lo cual se logra con una maniobrabilidad eficiente del remolcador, dimensiones limitadas de éste y un equipo de remolque adecuado. Uno de los aspectos más importantes en el dimensionamiento portuario a considerar es la profundidad, ya que en aguas poco profundas se intensifica la succión del buque provocada por los bancos de material, se disminuye la capacidad de control del timón,

aumenta la longitud del radio de viraje requerida y se incrementa la distancia de frenado, tanto para la embarcación asistida como para el remolcador.

Obviamente es necesario efectuar un análisis de factibilidad económica y financiera para determinar la conveniencia del uso de un determinado número y tipo de remolcadores, comparado con la inversión requerida para construir y mantener áreas de navegación de mayor tamaño, así como los beneficios que conlleva el uso de equipos de remolque al permitir la entrada al puerto de buques de mayores dimensiones, dada la simplificación de sus maniobras.

2.1.3 AYUDAS A LA NAVEGACIÓN

Las ayudas a la navegación tienen como finalidad proporcionar a los navegantes los medios adecuados para que puedan seguir su desplazamiento de puerto a puerto por la ruta más conveniente, así como auxiliar y orientar a la embarcación en su entrada y salida de la terminal portuaria, coadyuvando en la eficiencia de las maniobras. Esta última parte es la que interesa en el ámbito del dimensionamiento portuario, ya que la aplicación y uso de ayudas a la navegación en las áreas de maniobras permite la optimización del diseño de éstas, contribuyendo a la disminución del costo de construcción y mantenimiento. Un área de navegación que cuente con una señalización eficaz y bien diseñada requerirá dimensiones menores que un área de navegación cuya señalización sea deficiente.

Al mismo tiempo, las ayudas a la navegación son un factor fundamental en la disminución de los riesgos marinos para los barcos. Su tipo, tamaño y posición deben ser determinados como parte esencial del diseño portuario; de hecho, se debe consultar a marinos, principalmente pilotos de puerto, para conocer sus puntos de vista sobre las ayudas a la navegación propuestas y su posicionamiento, haciendo uso de simuladores para su evaluación, si es posible.

El concepto de ayudas a la navegación abarca todas las ayudas artificiales externas al barco, como boyas, balizas de enfilación, balizas de posicionamiento, faros y ayudas electrónicas, entre otras. Las ayudas a la navegación propias del barco incluyen radar, ecosonda, compás, etc.

Durante la entrada del barco al puerto, se verifica su posición apoyándose en las ayudas tanto externas como las propias, con base en las cuales se hace la predicción de las posiciones y movimientos futuros; la existencia de las ayudas necesarias y su eficiencia, es un aspecto determinante para definir la trayectoria que tiene que seguir el buque y como consecuencia el trazado de los canales de navegación y dársenas de un puerto.

Las señales utilizadas como ayudas a la navegación se pueden clasificar en señales visuales, sonoras y radioeléctricas. En la actualidad se han desarrollado ayudas a la navegación que se basan en las telecomunicaciones vía satélite, en tecnología digital y en el uso de programas y equipos de cómputo avanzados, cuyo funcionamiento se explicará más adelante en forma detallada.

Las señales visuales constituyen el grupo más importante de las señales marítimas. Su función principal es indicar puntos de interés como diques, morros de escollera, eje del canal de navegación, etc. Éstas pueden estar provistas de luz o ser ciegas, y e caracterizan por sus particularidades de color, ritmos de destellos y alcance, siguiendo patrones y normas internacionales. Dentro de las señales visuales destacan los faros, las boyas y balizas (con o sin luz) y las luces de situación y enfilación.

Las señales sonoras, como su nombre lo indica, funcionan por medio de la generación de sonidos que se pueden identificar fácilmente por su timbre y duración, y se utilizan generalmente en zonas donde la visibilidad es deficiente. Ejemplos de este tipo de ayudas son los silbatos, las campanas, los vibradores y equipos electromagnéticos.

Las señales radioeléctricas abarcan los sistemas de posicionamiento de las embarcaciones. Este tipo de ayudas a la navegación utiliza la propagación, suma vectorial, reflexión y dirección de las ondas electromagnéticas, que transmitidas y recibidas por diferentes sistemas permiten al navegante conocer su posición ya sea en altamar o en las proximidades de la costa. Los sistemas radioeléctricos pueden clasificarse en sistemas de estación como radiofaros y radiobalizas, sistemas hiperbólicos y sistemas autónomos integrados como el radar, los satélites y los reflectores pasivos.

En cuanto a las nuevas tecnologías aplicadas en las ayudas a la navegación, destaca el uso de los sistemas inteligentes de transporte ITS ("Intelligent Transportation Systems"), que son componentes que integran tecnología de vanguardia de áreas como la

comunicación, computación e instrumentación con el fin de aumentar la eficiencia en el tránsito y la operación de las embarcaciones y de intensificar la seguridad tanto para la infraestructura portuaria como para los buques. Dentro de las tecnologías consideradas como sistemas ITS destacan la comunicación vía radiofrecuencia, el sistema de posicionamiento global (GPS, "Global Positioning System"), el sistema "Weight - in - motion" (peso en movimiento), sistemas de intercambio digital de datos y tecnologías de representación de imágenes, entre otros.

De estos sistemas, el sistema de posicionamiento global ha contribuido en gran medida a los avances actuales en el ámbito de la operación portuaria. El GPS es un sistema de navegación basado en 24 satélites, que proporcionan posiciones en tres dimensiones, velocidad y tiempo, las 24 horas del día, en cualquier parte del mundo y en todas las condiciones climáticas. Al no haber comunicación directa entre el usuario y los satélites, el GPS puede dar servicio a un número ilimitado de usuarios. El GPS está disponible en dos formas básicas: SPS, iniciales de "Standard Positioning Service" (Servicio de Posicionamiento Estándar) y PPS, siglas de "Precise Positioning Service" (Servicio de Posicionamiento Preciso). El SPS proporciona la posición absoluta de los puntos con una precisión de 100 m. El código PPS permite obtener precisiones superiores a los 20 m; este código es accesible sólo a los militares de Estados Unidos y sus aliados. Las técnicas de mejora, como el GPS diferencial (DGPS), permiten a los usuarios alcanzar hasta 3 m de precisión.

Los satélites GPS llevan relojes atómicos de alto grado de precisión. La información horaria se sitúa en los códigos de transmisión mediante los satélites, de forma que un receptor puede determinar en cada momento en cuánto tiempo se transmite la señal. Esta señal contiene datos que el receptor utiliza para calcular la ubicación de los satélites y realizar los ajustes necesarios para precisar las posiciones. El receptor utiliza la diferencia de tiempo entre el momento de la recepción de la señal y el tiempo de transmisión para calcular la distancia al satélite. El receptor tiene en cuenta los retrasos en la propagación de la señal debido a la ionosfera y a la troposfera. Con tres distancias a tres satélites y conociendo la ubicación del satélite desde donde se envió la señal, el receptor calcula su posición en tres dimensiones. Sin embargo, para calcular directamente las distancias, el usuario debe tener un reloj atómico sincronizado con el Sistema de Posicionamiento Global. Midiendo desde un satélite adicional se evita que el receptor necesite un reloj

atómico. El receptor utiliza cuatro satélites para calcular la latitud, la longitud, la altitud y el tiempo.

La aplicación e interacción de las tecnologías ITS ha llevado al desarrollo de otros sistemas de intercambio de información y control operativo y funcional del puerto, como son los sistemas VTS ("Vessel Traffic Services") y VTMS ("Vessel Traffic Management Systems"), estos últimos también conocidos como VTMS ("Vessel Traffic Management Information Systems").

El sistema VTS es un sistema colector de información, proveniente de una o varias estaciones sensoras remotas (normalmente radares) dispuestas en un área de cobertura denominada área VTS. Estas estaciones transmiten su información a un centro de control que la procesa, integra y verifica operativamente en tiempo real, proporcionando una imagen de la situación del tráfico marítimo en el área VTS. La información del VTS se presenta en una consola maestra, en donde pueden realizarse las funciones diversas del sistema, pero también puede transmitirse a las embarcaciones para que los responsables, capitanes y pilotos, la utilicen como auxilio en las operaciones de maniobrabilidad de embarcaciones. Las principales funciones de un sistema VTS son:

- a) Control, guía y monitoreo del tráfico marítimo.
- b) Construcción y mantenimiento de imágenes del tráfico marítimo a partir de información de las estaciones sensoras remotas.
- c) Prevención de conflictos y provisión de un subsistema de alerta y monitoreo de conflictos (CAM, "Conflict Alert Monitoring").
- d) Manejo más fluido del tráfico marítimo.
- e) Proporcionamiento de información para la navegación.
- f) Monitoreo y manejo operativo del fondeo.
- g) Investigación y recreación de accidentes.
- h) Integración de bases de datos de información histórica ("recording and replay").

Asimismo, de acuerdo con la IMO ("International Maritime Organization"), las funciones básicas del VTS son la seguridad del tráfico marítimo y su eficiencia, así como la protección del medio ambiente.

Otro uso del sistema VTS es el llamado pilotaje remoto, en el cual se maneja la embarcación desde un punto de control externo a ella. Esta aplicación es muy controversial, ya que los pilotos de puerto contribuyen de manera importante a la seguridad marítima con base en el conocimiento detallado y específico de las áreas de navegación, así como al conocimiento del comportamiento particular de los procesos oceanográficos.

El sistema VTMS (ó VTMS) tiene como base el empleo del sistema VTS y surge a partir de la visión de que para cumplir con sus funciones, el sistema VTS debe aprovechar al máximo el estado del arte y las ventajas en lo que respecta al software, hardware, interfaces y procesamiento de información en tiempo real, obteniendo múltiples beneficios. De esta forma, un sistema VTMS puede involucrar un conjunto de entidades responsables del manejo y procesamiento de información específica, pero puede también proporcionar esa información con disponibilidad para todas aquellas organizaciones o entidades que la requieran para su uso, almacenamiento o manejo, como se aprecia en la *Tabla 2.1.D*.

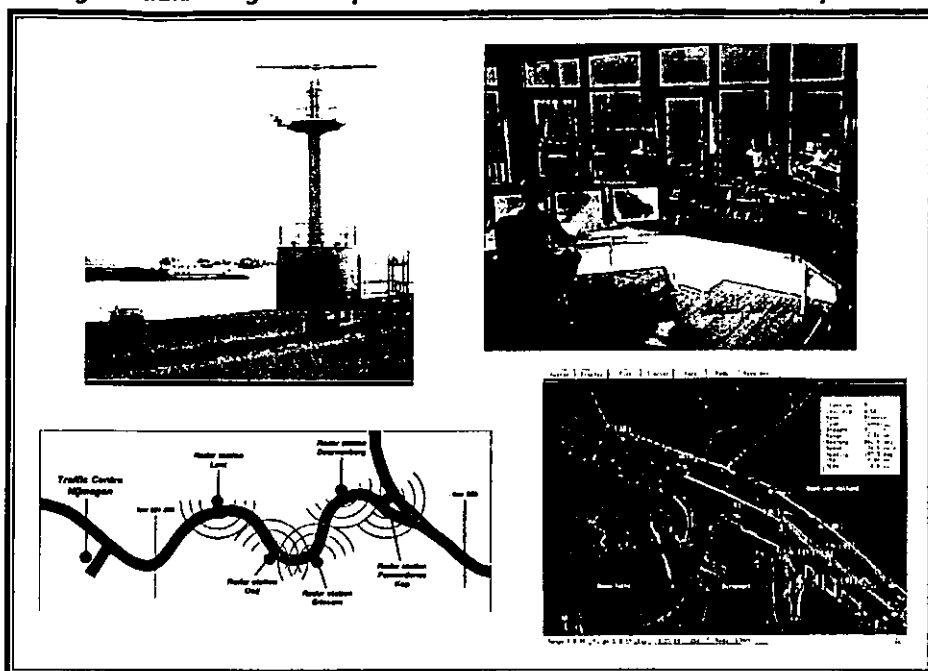
Cada compañía que se dedica al diseño y comercialización de este tipo de ayudas a la navegación, nombra sus productos y les da un enfoque particular en cuanto a su manejo, sin embargo, los principios de operación y la tecnología básica son los mismos. Esto conlleva a la disponibilidad de diversas modalidades de ayudas a la navegación que el diseñador deberá considerar al momento de dimensionar las áreas portuarias, tomando en cuenta que, dadas las tendencias actuales de globalización, se debe buscar siempre que los sistemas implementados sean compatibles con la mayoría de los programas y bases de datos utilizados en el ámbito internacional, para ofrecer las facilidades y la tecnología de punta que fomenten el uso del puerto por empresas navieras de todo el mundo.

Tabla 2.1.D – Requerimientos para el Diseño de un Sistema VTMS

REQUERIMIENTO DEL USUARIO	SATISFACCIÓN DEL REQUERIMIENTO POR MEDIO DE UN SISTEMA VTMS
Refuerzo de las reglas de seguridad en la navegación	Utiliza un sistema sencillo y especializado para vigilar y monitorear continuamente todas las reglas de seguridad en la navegación, y cuenta con alertas visuales y de audio que indican al operador la violación de dichas reglas.
Recolección y despliegue de la situación del tráfico en un avanzado modo visual	Integra los datos provenientes de todos los sitios del radar en una sola carta náutica de las zonas de navegación. Cada uno de los operadores del sistema puede ver en su monitor cualquier zona específica de navegación. El registro de cada embarcación realizado por los diversos radares se muestra en un registro único.
Intercambio de la base de datos de soporte	Permite fácilmente el intercambio, proporcionamiento y procesamiento de bases de datos electrónicos.
Organización con sistemas externos	Admite el intercambio de información, por ejemplo, de barco a puerto, mediante protocolos estándares TCP/IP y a través de Internet o redes privadas.
Integración de información para la seguridad y la operación	Recopila e ilustra datos de sistemas externos, en formatos personalizados y continuamente operativos bajo sistemas expertos, de tal manera que pueden aplicarse y monitorearse las reglas de tráfico marítimo.
Información auxiliar para toma de decisiones	Incorpora rutas alternas, futuros movimientos, predicciones y registros del tráfico de embarcaciones en las zonas de navegación.
Fusión de información	Proporciona dos pantallas por operador: una de ellas mostrando la situación del tráfico marítimo e información meteorológica, hidrológica y oceanográfica, y la otra con información que use los datos disponibles acerca del tráfico marítimo incluyendo detalles externos del movimiento de embarcaciones. Todos esto es almacenado internamente en una base de datos comercial de fácil acceso.

FUENTE: *Port Technology International, Twelfth Edition, 2000. Advanced Technology in VTMS. Stephen L. Ladd, Lockheed Martin Corporation, EU.*

Figura 2.1.E – Algunos Aspectos Ilustrativos de los Sistemas VTS y VTMS



FUENTE: Imágenes obtenidas de Diversas Páginas de Internet y Revistas Relacionadas con el Tema, 2001.

2.1.4 CONDICIONES AMBIENTALES

Cuando se hace una evaluación de las condiciones operacionales de un puerto, siempre se debe tener en mente que la maniobrabilidad de un barco que navega en aguas poco profundas y cerca de otros navíos, como ocurre en las áreas de navegación, es totalmente diferente a maniobrar un barco en mar abierto con aguas profundas, tráfico distante y poco frecuente. Por esta razón, en la planeación y evaluación de un sitio propuesto para establecer una terminal marítima, es indispensable conocer las condiciones ambientales físicas, hidrográficas y batimétricas del entorno para garantizar la seguridad de los buques mientras navegan y durante las maniobras de carga y descarga. Las condiciones ambientales físicas se refieren a datos del entorno como son el viento, oleaje, mareas, corrientes y visibilidad principalmente. En el contexto del dimensionamiento

portuario, a diferencia de otras áreas de la ingeniería civil, existe un mayor interés en las condiciones físicas frecuentes que en las extremas.

Por otra parte, en la actualidad el impacto ambiental de las obras marítimas debe ser ampliamente considerado en el diseño portuario, por lo que en este documento se hace una breve pero ilustrativa referencia al respecto.

A continuación se hace una descripción de los factores más importantes que intervienen en el diseño de las áreas de navegación, enfocándose primordialmente en el aspecto de la operación y maniobrabilidad de las embarcaciones, así como en su injerencia en el dimensionamiento portuario.

2.1.4.1 Viento

Cuando el viento pega directa y transversalmente en la superficie vélica, afecta el control de la embarcación sin importar la velocidad que ésta lleve, pero el efecto es mayor para velocidades moderadas. El viento causa que el barco sea arrastrado de costado o que adopte un ángulo de deriva, lo cual se traduce en la necesidad de un área de navegación más ancha para maniobrar.

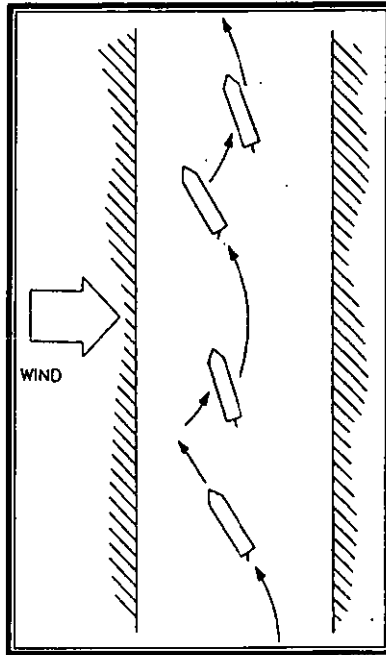
Una embarcación que navegue a velocidades lentas pocas veces podrá mantener un curso fijo bajo el efecto del viento transversal, para lo cual debe adoptar una posición que evite el choque totalmente ortogonal del viento con la superficie vélica, resultando una trayectoria ligeramente oscilatoria (*Figura 2.1.A*).

La magnitud de los efectos que provoca el viento sobre una embarcación depende de:

- a) La superficie vélica.
- b) La relación profundidad/calado (la resistencia de un barco al movimiento lateral varía conforme esta relación se acerca a la unidad). El viento causa menor arrastre lateral cuando la distancia entre la quilla y el fondo es más pequeña.
- c) La velocidad del viento y su dirección relativa con la del barco.

Debido a lo anterior, debe darse un margen de holgura a las dimensiones de las áreas de navegación con respecto a las esencialmente necesarias para realizar una maniobra.

**Figura 2.1.F – Navegación con Vientos Intensos
(efecto exagerado por claridad)**



FUENTE: *Approach Channels, a Guide for Design, Fig. 5.3. IANIG, 1997.*

2.1.4.2 Oleaje

Naturalmente, el oleaje influye en la determinación de la profundidad de las áreas de navegación, e inclusive si éste se desplaza transversalmente al curso de las embarcaciones, tendrá efectos en la maniobrabilidad y en las dimensiones horizontales como el ancho de un canal de navegación o el diámetro de una dársena de ciaboga.

El oleaje puede causar algunos efectos transitorios que afecten el comportamiento de las embarcaciones, como por ejemplo el giro de éstas en un plano horizontal alrededor del eje vertical que pasa por su centro geométrico. Este movimiento se conoce como guiñada, y es uno de los seis grados de movimiento que sufren los buques debido a fuerzas físicas externas, como se ilustra más adelante en la *Figura 2.1.G*. También es posible que el oleaje arrastre la nave en su dirección de propagación.

2.1.4.3 Mareas

Si la variación en los niveles de marea es notable en la zona en que se encuentran las áreas de navegación, es necesario decidir si se desea hacer uso de éstas en la totalidad del ciclo de mareas. Si no es así, se debe definir una "ventana de mareas" (rango en que el nivel de marea resulta operativo) adecuado considerando los efectos económicos que implica para el puerto cerrar una determinada zona de navegación. Esta ventana debe ser compatible con la profundidad, velocidad y squat (hundimiento de la popa debido a la velocidad) para los que fue diseñada la obra.

Es indispensable el acopio de información sobre el comportamiento de la marea en la región de interés, atendiendo particularmente al comportamiento de la marea a lo largo de una zona de agua prolongada, como es el caso de los canales de navegación. Usualmente se eligen ventanas de marea que permitan la navegación de los buques en marea creciente, pero esto no es siempre posible y en algunos casos la navegación ocurre en marea decreciente, por lo que se requerirá de una mayor profundidad en el canal.

2.1.4.4 Corrientes

Las corrientes transversales afectan la capacidad del barco para mantener su curso; las corrientes longitudinales influyen en la maniobrabilidad y la capacidad de frenado de la embarcación. Como se mencionará posteriormente, la maniobrabilidad de un barco cambia conforme la relación profundidad/calado se aproxima a la unidad. Por esto, la habilidad para hacer frente a las corrientes variará, de igual manera, con la reducción de la profundidad.

En algunos puertos las corrientes pueden ser tan fuertes en ciertos niveles de marea, que no permiten el uso seguro de las áreas de navegación para determinado tipo de barcos. Esto provoca que los arribos y partidas se efectúen en periodos restringidos (o "ventanas de corriente") en el ciclo de mareas. Lo anterior implica la existencia de lapsos en los que las áreas de navegación no están disponibles para estas embarcaciones, con las consecuencias económicas que esto conlleva que se deben considerar en el proceso de diseño.

2.1.4.5 Visibilidad

Las condiciones climáticas que pueden causar una visibilidad deficiente son la neblina, las lluvias de alta intensidad y la nieve. La niebla se define en Noruega como la condición climática en la que la visibilidad es menor a 1,000 m.

En general, una visibilidad entre 500 y 1,000 m resulta aceptable para la maniobrabilidad dentro de un puerto. Si la visibilidad es menor a 2,000 m la velocidad de los barcos debe reducirse a 6 nudos para embarcaciones con un peso mayor a 10,000 TPM. Para una visibilidad menor a 1,000 m es recomendable por razones de seguridad que los barcos de gran tamaño sean asistidos por remolcadores.

La combinación de lluvia intensa o nevada con vientos fuertes se considera de mayor dificultad de operación que la niebla, pues esta última generalmente ocurre en climas calmados por lo que los buques son fácilmente maniobrables.

Cuando la región en la que se establecerá una terminal portuaria presenta este tipo de condiciones climáticas de manera frecuente, las áreas de navegación deberán contemplar una posible holgura en sus dimensiones para asegurar la integridad de las embarcaciones. Obviamente este no es un factor que influya en el dimensionamiento portuario en países como México, donde el clima en las costas es cálido y únicamente en caso de tormentas extremas se ve afectada la visibilidad.

2.1.4.6 Impacto Ambiental

Aunque el análisis del impacto ambiental de las obras marítimas no es un factor físico que afecte la operación de las embarcaciones, en la actualidad los aspectos ecológicos poseen una relevancia a nivel mundial tal que, si el diseño de las áreas de navegación de un puerto afecta en un alto grado al medio ambiente, deberá ser modificado e incluso puede ser cancelado.

Para evaluar el impacto ambiental, las autoridades responsables de este tema de la mayoría de las naciones, e incluso organizaciones internacionales, solicitan la realización de un estudio de impacto ambiental a los responsables del diseño, ampliación y/o construcción de una terminal portuaria, en el que se especifique el daño que se causará a

la flora y fauna marinas locales, así como los cambios que la obra implica en cuanto al movimiento del agua y de los sedimentos en la zona, y su efecto en el hábitat marino.

Incluso se debe considerar la forma en que un puerto afectará el ambiente en tierra, como puede ser el impacto visual, el ruido y las emisiones (gases, humo, etc.) que se generarán durante la construcción y la operación del puerto, así como la afectación a la flora y fauna terrestres.

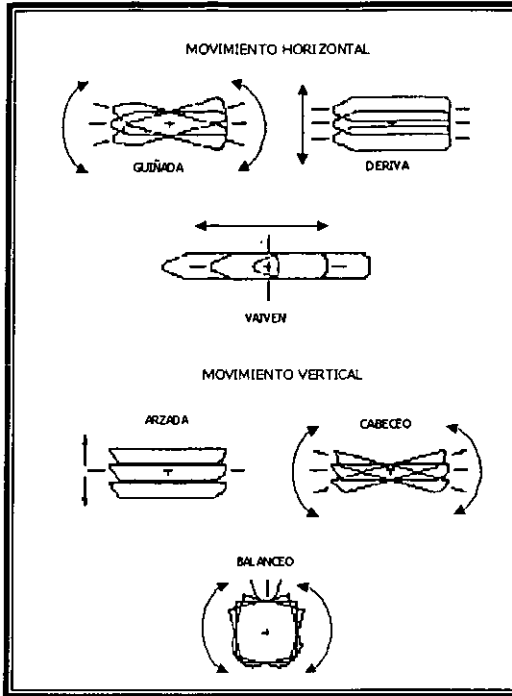
En cuanto al diseño de las áreas de navegación, que es el tema que concierne a este documento, se pueden mencionar como principales afectaciones ambientales aquellas provocadas por el dragado, que implican la excavación del fondo marino (en la cual se pueden ver afectadas especies como los corales) y el depósito del material de dragado ya sea en otra zona dentro del mar o en tierra. El aumento de la profundidad del mar de forma artificial modificará el patrón de comportamiento de las corrientes marinas, lo cual posiblemente afecte a los peces y otras especies de la zona. La maquinaria utilizada para la construcción de las áreas de navegación, así como el paso de las embarcaciones que hagan uso de éstas, propiciará el vertido de contaminantes al agua, como combustibles y lubricantes, cuyo impacto ambiental también debe ser evaluado.

De esta forma, el dimensionamiento de las áreas de navegación de un puerto debe estar sustentado por una evaluación del impacto ambiental que éstas conllevan, para justificar científicamente la viabilidad ecológica del proyecto.

En combinación con las condiciones ambientales físicas anteriormente descritas, existen algunos factores que es necesario tomar en cuenta al momento de diseñar las áreas de navegación. Por un lado, el impacto de las corrientes, el oleaje y las ráfagas de viento mantiene a los barcos en un continuo movimiento cuya magnitud depende de la intensidad y dirección de estos factores físicos. Existen seis grados de movimiento de las embarcaciones: la arzada, el cabeceo y el balanceo en el plano vertical, y el vaivén, la deriva y la guiñada en el plano horizontal (*Figura 2.1.G*), cuya consideración es fundamental para el dimensionamiento de las áreas de agua.

Por otro lado, factores como la relación profundidad/calado y el squat intervienen primordialmente en la determinación de la profundidad de los canales de navegación. En las secciones subsecuentes se explica ampliamente la influencia de estos tres elementos en el dimensionamiento portuario.

Figura 2.1.G – Grados de Movimiento de las Embarcaciones



FUENTE: Ponencia – Diseño y Verificación de Áreas Portuarias de Navegación a través de Técnicas de Simulación de Tiempo Real. CYTSA, II Congreso Internacional de la AMIP, 1998.

Como se pudo observar, existen diversos parámetros de diseño que se deben considerar para lograr resultados óptimos en el dimensionamiento de las áreas de navegación de un puerto, y que comprenden aspectos relativos a las embarcaciones, factores tecnológicos, humanos y ambientales. Es muy complejo lograr la integración total de todos estos factores, sin embargo los estándares actuales de dimensionamiento demandan el estudio de la mayoría de ellos, con el fin de garantizar a los inversionistas la confiabilidad y seguridad tanto de las instalaciones y obras portuarias como de las embarcaciones y mercancías.

2.2 DIMENSIONAMIENTO DE CANALES DE NAVEGACIÓN. CRITERIOS PIANC

Esta sección tiene como objetivo describir los criterios actuales utilizados para el dimensionamiento del canal de navegación principal o canal de acceso de un puerto, que comprende la zona de navegación más importante ya que constituye el acceso al mismo, y en ella el barco aún en movimiento pasa de mar abierto a la zona protegida realizando además la maniobra de parada.

El dimensionamiento de un canal de navegación abarca un gran número de disciplinas incluyendo el manejo de las embarcaciones y la ingeniería marítima, con el fin de lograr un diseño que cumpla con los requerimientos de navegación y seguridad deseados. Para esto es necesaria la valoración de diversos elementos, como son el tamaño de la embarcación y su comportamiento, los factores humanos que intervienen en el manejo de los barcos y los efectos de las condiciones ambientales, entre otros.

En el proceso de diseño de un canal de acceso, es necesario proyectar la disposición y las dimensiones de esta primordial área de agua, en lo que se refiere a:

- a) El alineamiento (orientación y trazo) del canal.
- b) El ancho tanto del canal como de la entrada del puerto (conocida como bocana).
- c) La profundidad del canal.

La disposición y el dimensionamiento son de suma importancia, primeramente porque en la mayoría de los casos la creación de las áreas de agua y las estructuras de protección que éstas conllevan constituye por mucho la mayor inversión en infraestructura portuaria, y en segundo lugar porque factores como el ancho de la bocana, los espacios de maniobra y el alineamiento de los rompeolas o escolleras difícilmente podrán modificarse o readaptarse una vez que el puerto sea construido.

Para puertos con áreas de navegación profundas, capaces de recibir embarcaciones mayores a las 50,000 TPM, un importante problema por resolver es el hecho de que la trayectoria de estas naves se desvía considerablemente de la ideal, como consecuencia de una lenta respuesta a las acciones del timón y a los movimientos del motor. Por consiguiente se requiere la implantación de diferentes límites operacionales

para dichas embarcaciones en las áreas de aproximación y maniobra, dando como resultado que las previsiones para una navegación segura sean más rigurosas que en los puertos exclusivos para embarcaciones pequeñas.

Las consideraciones anteriores conducen a la necesidad de un proceso de diseño lógico y fundamentado técnica y científicamente que permita la determinación de las dimensiones horizontales y verticales de los canales de navegación de un puerto. Bajo esta perspectiva se crearon los criterios de diseño del PIANC en asociación con el IAPH ("International Association of Ports and Harbors"), presentados en la publicación *Approach Channels, a Guide for Design* (1997), y que se toman como base para el desarrollo de la presente sección.

2.2.1 ALINEAMIENTO DEL CANAL DE NAVEGACIÓN PRINCIPAL

De acuerdo con los criterios del PIANC, el alineamiento del canal de acceso debe tomar en cuenta las siguientes consideraciones:

- a) La longitud del canal debe ser lo más corta posible.
- b) La existencia de dársenas al final del canal, para las maniobras de los barcos.
- c) La necesidad de eludir obstáculos o áreas de asentamiento de sedimentos, cuya remoción es difícil o costosa, o que requieren excesivo mantenimiento de dragado.
- d) La dirección prevaleciente de vientos, corrientes y oleaje.
- e) La disposición geométrica sencilla, evitando curvas en el trazo del canal cerca de la entrada al puerto.
- f) El diseño de los bordes del canal debe evitar que se causen disturbios o daños a los barcos que naveguen a lo largo de éste.

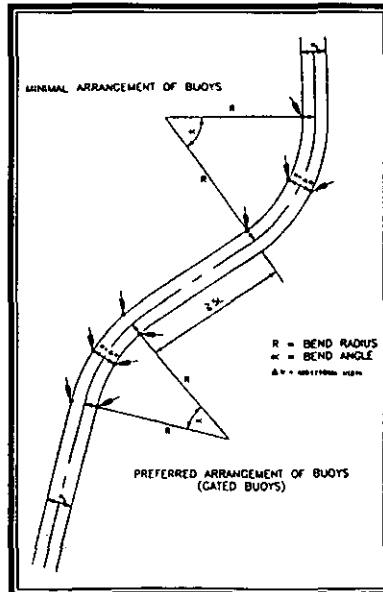
La orientación del canal debe ser preferentemente en la dirección de propagación más frecuente de la corriente para minimizar el efecto de las corrientes transversales. El mismo criterio se aplica para el viento y el oleaje, considerando que éstos pueden provenir de cualquier otra dirección. Usualmente la dirección prevaleciente del viento y del oleaje

rigen en el diseño, no sin antes analizar si la ocurrencia de vientos fuertes u oleajes intensos en otras direcciones es aceptable.

Asimismo, resulta prudente (e importante en el caso de los canales navegados por barcos que transportan carga peligrosa) que el canal sea alineado de modo que se prevenga el encauzamiento de la embarcación directamente hacia los muelles o las estructuras de atraque durante su aproximación. En caso de que la dirección del canal sea perpendicular al frente de atraque, se debe buscar que el alineamiento coincida con un extremo del muelle para que el buque tenga que virar para arribar, minimizando así el riesgo de un impacto directo contra el muelle en caso de que se pierda el control en la aproximación.

Es preferible que el trazo del canal sea recto en su mayoría, por lo que el diseñador debe procurar que el alineamiento consista en una serie de segmentos rectos conectados por curvas suaves y no por ángulos abruptos. De hecho, los segmentos del canal pueden tener un ancho y una profundidad diferentes, y ser navegados a distintas velocidades. Para mayores detalles referirse a la *Figura 2.2.A*.

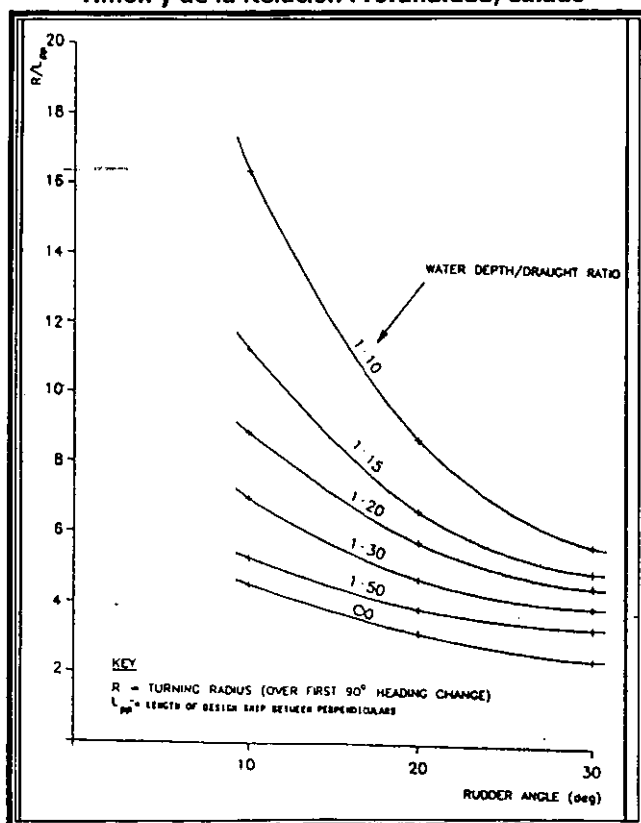
Figura 2.2.A – Elementos que Componen las Curvas de un Canal



FUENTE: *Approach Channels, a Guide for Design, Fig. 5.1. PIANC, 1997.*

Sin embargo, cuando el alineamiento del canal de navegación requiere el uso de curvas que conecten a los segmentos rectos, se debe tomar en cuenta la habilidad del barco para virar, sobre todo si, por el momento, se asume que las embarcaciones navegan sin la ayuda de remolcadores. En aguas calmadas y sin la acción del viento sobre el barco, una curva pronunciada podrá ser navegada por un buque de maniobrabilidad promedio a buena con un radio de giro de entre 2 y 3 veces la longitud de la eslora, incrementándose hasta 5 esloras o más cuando la relación profundidad/calado se aproxima al valor de 1.10 (Figura 2.2.B).

Figura 2.2.B – Determinación del Radio de Giro (R) en Función del Ángulo del Timón y de la Relación Profundidad/Calado

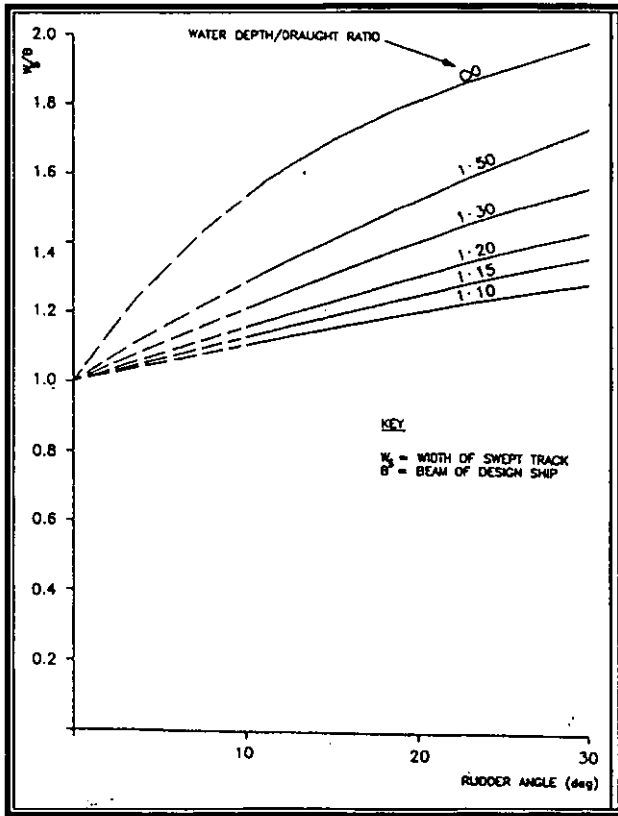


FUENTE: *Approach Channels, a Guide for Design*, Fig. 5.8. PIANC, 1997.

Además el barco se desliza lateralmente mientras vira, recorriendo un trazo más ancho que la longitud de su manga. Este exceso puede variar entre un 30% y 40% de la dimensión de la manga en áreas cuya relación profundidad/calado es de 1.10, y entre un 100% y 160% de esta longitud en aguas profundas.

Por lo tanto, el comportamiento de una embarcación al virar depende en gran medida de la relación profundidad/calado, la cual influye tanto en el radio de giro como en el ancho de la trayectoria de "barrido" (deslizamiento lateral), de manera que a menor relación profundidad/calado mayor será el radio de giro y menor será el ancho adicional de canal necesario, como se aprecia en la *Figura 2.2.B* y en la *Figura 2.2.C*.

Figura 2.2.C – Determinación del Ancho de la Trayectoria de Deslizamiento (w_s) en Función del Ángulo del Timón y de la Relación Profundidad/Calado



FUENTE: *Approach Channels, a Guide for Design, Fig. 5.9. IANAC, 1997.*

Por otro lado, en el dimensionamiento de las curvas del canal de acceso es poco recomendable un diseño que requiera virajes pronunciados que provoquen ángulos de giro extremos del timón, pues esto implica una muy limitada o incluso nula "reserva" de giro de éste para contrarrestar los efectos del viento, el oleaje o las corrientes, comprometiendo la seguridad de la embarcación. De este modo, para el diseño de los canales de navegación se debe considerar el radio de giro y el ancho de "barrido" que requiere el barco de diseño con un ángulo de giro del timón considerablemente menor al ángulo máximo respectivo. Comúnmente los pilotos prefieren usar entre el 15% y el 20% de la capacidad de giro del timón en una curva; mayores ángulos proveen márgenes muy reducidos de seguridad, y menores ángulos (lo cual se traduce en radios de giro mayores) hacen que la maniobra de giro se complique debido a la longitud del trazo y a los problemas de manejo que implica mantener la embarcación en el curso preciso dentro de una curva suave.

Mantener la posición de la embarcación en cualquier curva requiere que ésta cuente con el señalamiento adecuado, de lo contrario el piloto puede desorientarse (especialmente si la curva es larga) lo cual genera la necesidad de un ancho de canal mayor. De igual forma, las curvas que se encuentren sujetas a la acción de las corrientes, el viento y el oleaje necesitan un ancho de canal adicional.

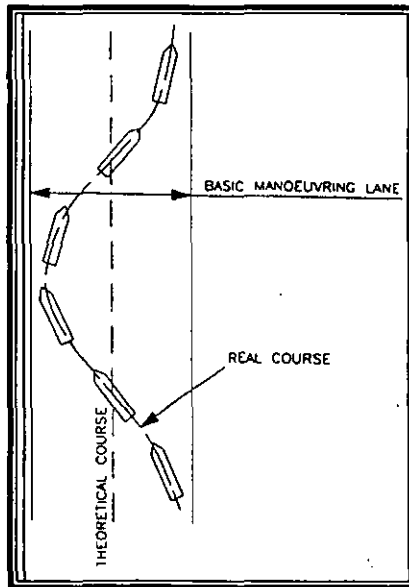
2.2.2 ANCHO DEL CANAL DE NAVEGACIÓN PRINCIPAL

Para el dimensionamiento del ancho de un canal de navegación, es necesario considerar la mayoría, si no es que la totalidad, de los aspectos que se mencionan a continuación:

- a) Maniobrabilidad básica de la embarcación.
- b) Factores ambientales.
- c) Ayudas a la navegación.
- d) Tipo de carga.
- e) Distancia de paso (para canales de doble vía).
- f) Margen debido a la presencia de bancos de sedimentos en el fondo.

El primero de estos puntos se refiere a que, cuando un barco es controlado manualmente (como generalmente ocurre en los canales de acceso), su movimiento es tal que el curso de la nave se desvía o "arrastra", en ausencia de toda perturbación externa provocada por el viento, oleaje, corrientes, etc. lo que genera un aumento del ancho de diseño del canal (*Figura 2.2.D*). Esto es debido a la velocidad de respuesta tanto del piloto de la embarcación al interpretar las señales visuales que indican su posición, como del buque mismo al momento de reaccionar a los movimientos del timón. Evidentemente la magnitud de la desviación del curso del barco, de la cual depende la línea básica de maniobra (ancho de la franja de maniobra), es función de varios factores como la maniobrabilidad inherente de la nave la cual varía con la relación profundidad/calado, la habilidad del piloto del buque, las señales visuales disponibles y la visibilidad con que se cuenta. De estos factores, los dos primeros son los de mayor importancia ya que dependen de las características de la embarcación y de la capacidad del piloto, mientras que los dos últimos se pueden enfrentar por medio de ayudas a la navegación externas (por ejemplo, la instalación de boyas) e internas al barco (por ejemplo, el uso del radar).

Figura 2.2.D – Ancho Real de la Línea de Maniobra



FUENTE: *Approach Channels, a Guide for Design, Fig. 5.2. PIANC, 1997.*

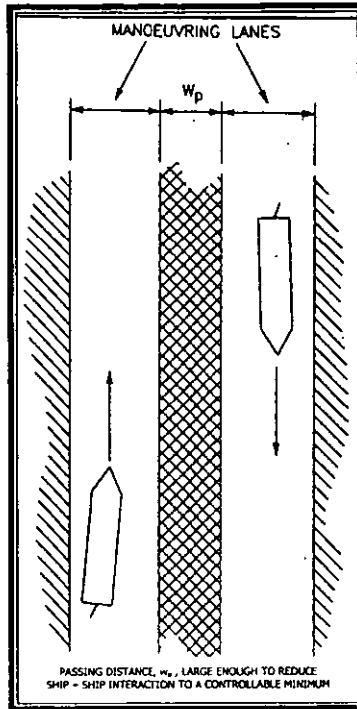
Por otra parte, las condiciones ambientales que imperen en la zona del proyecto serán de gran importancia para determinar las dimensiones del ancho del canal de navegación, principalmente porque constituyen un factor que repercute en la maniobrabilidad de las embarcaciones alterando su curso y afectando su posición, teóricamente ambos paralelos a los bordes del canal. De acuerdo con los criterios del PIANC, las tres principales condiciones ambientales que influyen en la determinación del ancho del canal son el viento transversal o cruzado, las corrientes y el oleaje, cuyos efectos se comentan en la Sección 2.1.4 del presente capítulo.

La importancia de las ayudas a la navegación radica en las señales que éstas proporcionan a los pilotos. Usualmente estas señales son visuales, aunque el uso de los radares es muy común, además del desarrollo de medios electrónicos que se basan en tecnologías como el sistema de posicionamiento global (GPS) y las telecomunicaciones, destacando ayudas a la navegación como son los sistemas VTS ("Vessel Traffic Services") y VTMS ("Vessel Traffic Management Systems") descritos en la Sección 2.1.3. No hay que olvidar que mientras más eficiente sea la señalización de un canal de navegación menor será el ancho requerido. Además es importante valorar la adecuación de las ayudas a la navegación disponibles de acuerdo con los requerimientos básicos del barco de diseño.

En cuanto al tipo de carga que transporten las embarcaciones, si ésta es peligrosa por naturaleza se requiere de un ancho de canal mayor para reducir el riesgo de encallar y para asegurar que la distancia con respecto a los demás usuarios de estas áreas de navegación sea la más adecuada.

Si el diseño contempla un canal de navegación con capacidad para dos embarcaciones navegando al mismo tiempo, se debe implementar un arreglo que permita el paso seguro de éstas. La distancia entre las líneas de maniobra debe asegurar que la interacción entre ambos barcos se reduzca a un mínimo aceptable, por lo cual se diseña una franja central conocida como distancia de paso, cuyo ancho se define como un múltiplo de la manga del barco de mayor tamaño (*Figura 2.2.E*). La distancia de paso depende también de la densidad del tráfico en ambas líneas de maniobra, ya que a mayor densidad mayor ancho de franja central requerido.

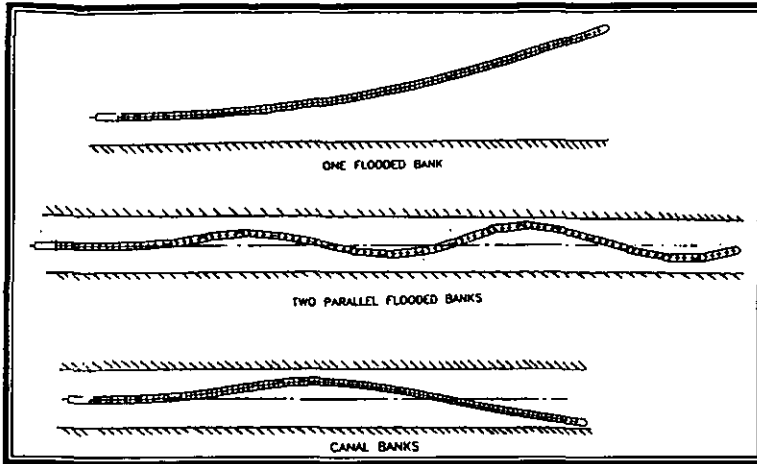
Figura 2.2.E – Distancia de Paso (w_p)



FUENTE: *Approach Channels, a Guide for Design*, Fig. 5.4. PIANC, 1997.

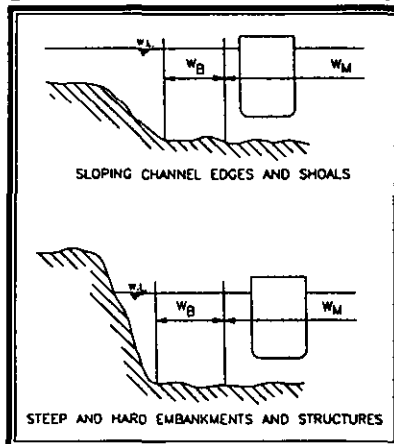
Además, la interacción de las embarcaciones con los bancos de sedimentos puede causar que éstas sufran una desviación difícilmente controlable (*Figura 2.2.F*) lo que implica la ampliación del ancho del canal fuera de las líneas de maniobra (*Figura 2.2.G*). La magnitud de esta distancia depende de la velocidad del barco (a mayor velocidad más acentuada será la interacción con el banco), de la altura del banco de sedimentos y de su pendiente, así como de la relación profundidad/calado.

Figura 2.2.F – Desviaciones de Curso Debido a la Presencia de Bancos



FUENTE: *Approach Channels, a Guide for Design, Fig. 5.5. PIANC, 1997.*

Figura 2.2.G – Distancia al Banco (w_b)



FUENTE: *Approach Channels, a Guide for Design, Fig. 5.6. PIANC, 1997.*

Tomando como base la información anterior, investigaciones realizadas por miembros del PIANC determinaron que la expresión para definir el ancho de los canales de navegación de una sola vía es la siguiente:

$$W = W_{BM} + \Sigma w_i + W_{Br} + W_{Bg}$$

y para canales de dos vías, se utiliza la expresión:

$$W = 2W_{BM} + 2\Sigma W_i + W_{Br} + W_{Bg} + \Sigma W_p$$

Donde (como se ilustra en la *Figura 2.2.H*):

w = Ancho total de diseño del canal de navegación

w_{BM} = Ancho básico de maniobra. Se define como un múltiplo de la manga del barco de diseño, como lo indica la *Tabla 2.2.A*

w_i = anchos adicionales de canal determinados con base en la *Tabla 2.2.B*

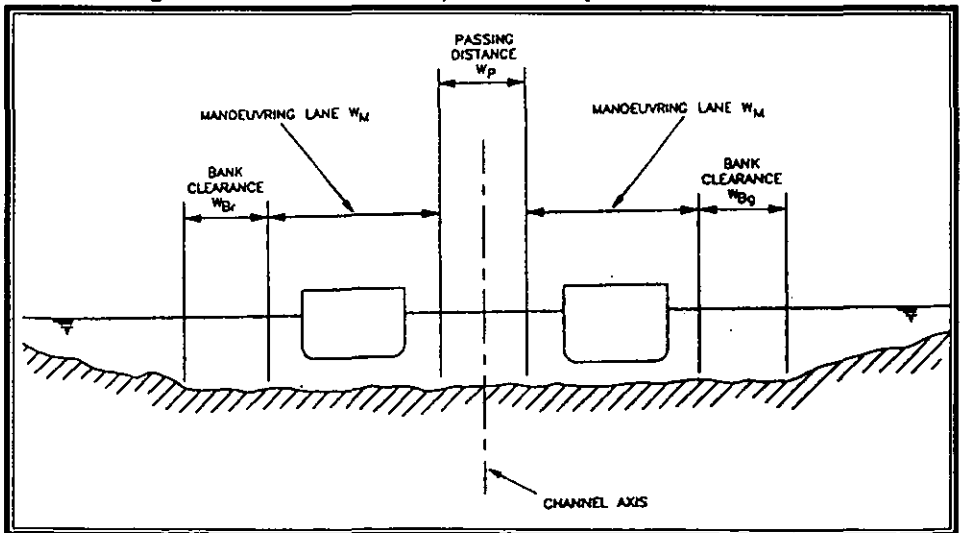
w_{Br} = Distancia al talud en la margen roja del canal

w_{Bg} = Distancia al talud en la margen verde del canal

(Cada una de las orillas del canal se distingue por medio de un color: rojo y verde, como norma internacional)

Σw_p = Distancia de paso; comprende la suma de una distancia de separación basada en la velocidad del barco y una distancia adicional basada en la densidad del tráfico

Figura 2.2.H – Elementos que Constituyen el Ancho de Canal



FUENTE: *Approach Channels, a Guide for Design, Fig. 5.11. PIANC, 1997.*

Como lo muestran las expresiones anteriores, el ancho básico de maniobra se debe complementar con anchos adicionales, obteniéndose así el ancho de la línea de maniobra (w_M). Estos anchos adicionales se proporcionan en la *Tabla 2.2.B* que se presenta más adelante.

El ancho básico de maniobra de un canal depende de la maniobrabilidad del barco de diseño (*Tabla 2.2.A*), cuya clasificación es un tanto subjetiva por lo que resulta difícil su determinación. En mar abierto, un buque con buena maniobrabilidad es aquel cuyo curso permanece estable navegando a la velocidad de servicio o de diseño, sin embargo esto no significa que la capacidad para efectuar maniobras rápidas y para navegar en curvas pronunciadas sea buena.

La maniobrabilidad de una embarcación en aguas profundas es muy diferente a la maniobrabilidad en aguas poco profundas. Cuando la relación profundidad/calado se acerca a valores entre 1.3 y 1.5, el barco se vuelve un poco menos direccionable y más inestable en su movimiento; en la medida en que esta relación se acerca a la unidad se incrementa la estabilidad direccional del buque pero su respuesta se vuelve más lenta, lo cual es favorable únicamente en canales rectos, pues de lo contrario se requiere de un mayor ancho de maniobra.

De manera general, para la clasificación de la maniobrabilidad de una embarcación se pueden seguir las siguientes recomendaciones:

- a) Los barcos más esbeltos (Eslora/Manga > 6.5) poseen mayor estabilidad direccional que los menos esbeltos (Eslora/Manga < 6); estos últimos permiten una mayor maniobrabilidad en curvas.
- b) En aguas poco profundas los barcos pierden capacidad de respuesta por lo que se vuelven menos maniobrables.
- c) La maniobrabilidad de una nave a baja velocidad será totalmente diferente a aquella que ocurre en la velocidad de servicio para la que fue diseñada la embarcación.
- d) El tipo de propulsión de la embarcación es determinante en su maniobrabilidad, por lo que debe ser considerada en el diseño del canal (por ejemplo, si se cuenta con propelas de uno o dos giros, timón sencillo o doble, thrusters o azipods).

Tabla 2.2.A – Ancho Básico de Maniobra

MANIOBRABILIDAD DEL BARCO	Buena	Moderada	Pobre
ANCHO BÁSICO DE MANIOBRA (w_{BM})	1.3 B	1.5 B	1.8 B

B.- Manga ("Beam").

FUENTE: *Approach Channels, a Guide for Design, Table 5.1. PIANC, 1997.*

Por otra parte, es importante reconocer la diferencia entre un canal de navegación exterior e interior, dado que ésta interviene en la determinación del ancho adicional de canal (Tabla 2.2.B). Un canal de navegación exterior se encuentra en zona de mar abierto por lo que está expuesto a la acción del oleaje, lo cual provoca importantes movimientos de las embarcaciones en el plano vertical: la arzada, el cabeceo y el balanceo, que pueden llegar a reducir en gran medida la distancia bajo la quilla. Un canal de navegación interior está ubicado en aguas protegidas por lo que la influencia del oleaje es mucho menor. El efecto de otras condiciones ambientales físicas como las corrientes y el viento también influye en la definición del ancho de canal.

Tabla 2.2.B – Ancho Adicional para Secciones de Canal Rectas

ANCHO (w_i)	VELOCIDAD DE LA EMBARCACIÓN	CANAL EXTERIOR EXPUESTO AL MAR ABIERTO	CANAL INTERIOR EN AGUAS PROTEGIDAS
Velocidad del barco [nudos] <ul style="list-style-type: none"> • Rápida: > 12 • Moderada: > 8 – 12 • Lenta: 5 – 8 		0.1 B 0.0 0.0	0.1 B 0.0 0.0
Viento transversal prevaleciente [nudos] <ul style="list-style-type: none"> • Calmado: ≤ 15 • Moderado: > 15 – 33 • Severo: > 33 – 48 	Todas Avante Medio Avante Lento Avante Avante Medio Avante Lento Avante	0.0 0.3 B 0.4 B 0.5 B 0.6 B 0.8 B 1.0 B	0.0 - 0.4 B 0.5 B - 0.8 B 1.0 B
Corriente transversal prevaleciente [nudos] <ul style="list-style-type: none"> • Insignificante: < 0.2 • Baja: 0.2 – 0.5 	Todas Avante Medio Avante Lento Avante	0.0 0.1 B 0.2 B 0.3 B	0.0 - 0.1 B 0.2 B

<ul style="list-style-type: none"> Moderada: $> 0.5 - 1.5$ Fuerte: $> 1.5 - 2.0$ 	Avante Medio Avante Lento Avante Avante Medio Avante Lento Avante	0.5 B 0.7 B 1.0 B 0.7 B 1.0 B 1.3 B	- 0.5 B 0.8 B - - -
Corriente longitudinal prevaeciente [nudos] <ul style="list-style-type: none"> Baja: ≤ 1.5 Moderada: $> 1.5 - 3$ Fuerte: > 3 	Todas Avante Medio Avante Lento Avante Avante Medio Avante Lento Avante	0.0 0.0 0.1 B 0.2 B 0.1 B 0.2 B 0.4 B	0.0 - 0.1 B 0.2 B - 0.2 B 0.4 B
Altura de ola significativa (H_s) y longitud (λ) [m] <ul style="list-style-type: none"> $H_s < 1$ y $\lambda \leq L$ $3 > H_s > 1$ y $\lambda = L$ $H_s > 3$ y $\lambda > L$ 	Todas Avante Medio Avante Lento Avante Avante Medio Avante Lento Avante	0.0 2.0 B 1.0 B 0.5 B 3.0 B 2.2 B 1.5 B	0.0 - - - - - -
Ayudas a la navegación <ul style="list-style-type: none"> Excelentes con control de tráfico en costa <ul style="list-style-type: none"> Buenas Moderadas con visibilidad pobre infrecuente Moderadas con visibilidad pobre frecuente 		0.0 0.1 B 0.2 B $\geq 0.5 B$	0.0 0.1 B 0.2 B $\geq 0.5 B$
Superficie del fondo <ul style="list-style-type: none"> Si la profundidad es $\geq 1.5T$ Si la profundidad es $< 1.5T$ y: <ul style="list-style-type: none"> Superficie lisa y suave Superficie lisa o fangosa y dura Superficie áspera y dura 		0.0 0.1 B 0.1 B 0.2 B	0.0 0.1 B 0.1 B 0.2 B
Profundidad del canal <ul style="list-style-type: none"> $\geq 1.5 T$ $1.5 T - 1.25 T$ (mar abierto); $1.5 T - 1.15 T$ (aguas protegidas) $< 1.25 T$ (mar abierto); $< 1.15 T$ (aguas protegidas) 		0.0 0.1 B 0.2 B	0.0 0.2 B 0.4 B
Nivel de riesgo de la carga <ul style="list-style-type: none"> Bajo Medio Alto 		0.0 0.5 B 1.0 B	0.0 0.4 B 0.8 B

B.- Manga ("Beam") L.- Eslora ("Length") T.- Calado ("Draught").

FUENTE: *Approach Channels, a Guide for Design, Table 5.2. PIANC, 1997.*

Además de las condiciones ambientales, en la tabla anterior se aprecia que hay otros factores que influyen en la designación del ancho adicional de canal, como la velocidad de la embarcación, las ayudas a la navegación disponibles, las características del fondo, la profundidad y la peligrosidad de la carga transportada. Este último aspecto se refiere al nivel de riesgo de la carga definido en términos de su toxicidad y su potencial explosivo, contaminante, corrosivo y de combustión. La *Tabla 2.2.C* resume la peligrosidad de los diferentes tipos de carga.

Tabla 2.2.C – Nivel de Riesgo de la Carga

NIVEL DE RIESGO	TIPO DE CARGA
Bajo	Graneles secos, carga contenerizada, pasajeros, carga general
Medio	Petróleo
Alto	Combustible, gases, productos químicos de todo tipo

FUENTE: *Approach Channels, a Guide for Design, Table 5.5. PIANC, 1997.*

En lo que respecta a la distancia de paso, la *Tabla 2.2.D* define sus dimensiones requeridas a partir de la velocidad y de la densidad del tráfico. Es importante señalar que se debe considerar la manga del buque más largo que haga uso del canal, a pesar de que éste no sea el barco de diseño. Los valores dados asumen que las embarcaciones navegan en direcciones opuestas al momento de encontrarse; cuando se trate de un "rebase" (ambas navegando en la misma dirección) la distancia de paso debe incrementarse en un 50% dado que se produce una mayor interacción entre las naves.

La densidad del tráfico se define conforme la *Tabla 2.2.E*, en donde las embarcaciones consideradas no incluyen los barcos pequeños como aquellos empleados para recreación o pesca.

Finalmente, la distancia al banco depende de la forma en que éste se una con el fondo, ya sea por medio de una pendiente o debido a una caída relativamente brusca, tal como se muestra en la (*Figura 2.2.G*). Esta distancia está definida en la *Tabla 2.2.F* de tal manera que, cuando un barco se aproxime al borde de línea de maniobra, los efectos debidos al banco se encuentren dentro de un rango controlable.

Tabla 2.2.D – Distancia de Paso en Canales de Doble Vía

ANCHO DE LA DISTANCIA DE PASO (w_p)	CANAL EXTERIOR EXPUESTO AL MAR ABIERTO	CANAL INTERIOR EN AGUAS PROTEGIDAS
Debido a la velocidad del buque [nudos]		
• Rápida	2.0 B	-
• Moderada	1.6 B	1.4 B
• Lenta	1.2 B	1.0 B
Debido a la densidad del tráfico		
• Tráfico ligero	0.0	0.0
• Tráfico moderado	0.2 B	0.2 B
• Tráfico pesado	0.5 B	0.4 B

B.- Manga ("Beam").

FUENTE: *Approach Channels, a Guide for Design, Table 5.3. PIANC, 1997.*

Tabla 2.2.E – Densidad del Tráfico

CLASIFICACIÓN	DENSIDAD DEL TRÁFICO [EMBARCACIONES/HORA]
Tráfico ligero	0 – 1.0
Tráfico moderado	> 1.0 – 3.0
Tráfico pesado	> 3.0

FUENTE: *Approach Channels, a Guide for Design, Table 5.6. PIANC, 1997.*

Tabla 2.2.F – Distancia al Banco

ANCHO DE LA DISTANCIA AL BANCO (w_{Br} , w_{Bq})	VELOCIDAD DE LA EMBARCACIÓN	CANAL EXTERIOR EXPUESTO AL MAR ABIERTO	CANAL INTERIOR EN AGUAS PROTEGIDAS
Bordes con pendiente	Rápida	0.7 B	-
	Moderada	0.5 B	0.5 B
	Lenta	0.3 B	0.3 B
Bordes con caída abrupta	Rápida	1.3B	-
	Moderada	1.0B	1.0B
	Lenta	0.5B	0.5B

B.- Manga ("Beam").

FUENTE: *Approach Channels, a Guide for Design, Table 5.4. PIANC, 1997.*

El análisis y la valoración detallada de estas dimensiones conllevan a la obtención del ancho total del canal de navegación, haciendo uso de las expresiones establecidas por el PIANC descritas en la presente sección, las cuales, a pesar de su sencillez matemática,

involucran un considerable número de variables cuyo estudio es de gran importancia para el diseño portuario.

2.2.3 PROFUNDIDAD DEL CANAL DE NAVEGACIÓN PRINCIPAL

La profundidad del canal de navegación principal se estima a partir de:

- a) El calado del barco de diseño (sin movimiento).
- b) La elevación de la marea a lo largo del canal.
- c) El squat.
- d) El movimiento inducido por el oleaje.
- e) Un margen que depende del tipo de material de fondo.
- f) La densidad del agua y su efecto en el calado.

Investigaciones realizadas en los últimos años por el PIANC indican que la relación profundidad/calado es un factor que interviene en diversas consideraciones que deben ser tomadas en cuenta para determinar la profundidad de los canales de navegación. Esta relación es un indicador sumamente utilizado, ya que el comportamiento de las embarcaciones ante diversos factores físicos como el viento y las corrientes depende de la distancia que exista entre la quilla del buque y el fondo marino. De esta manera, en varias partes del mundo se recomienda establecer un valor de esta relación entre 1.10 y 1.15 para garantizar la seguridad de los barcos considerando el squat, el calado y protuberancias no contempladas del fondo. Estos valores corresponden a aguas calmadas únicamente, por lo que es necesario aumentarlos si existe afectación del oleaje, recomendándose valores de 1.3 o mayores. La aproximación de la relación profundidad/calado a la unidad provoca la fijación del curso del barco, por lo que su respuesta se vuelve más lenta y se recomienda ampliar el ancho de las áreas de navegación.

Por otra parte, es necesario mencionar que la resistencia hidrodinámica al movimiento de un barco está determinada por el número de la profundidad de Froude (F_{nh} , "Froude depth number") el cual se puede definir de manera general como una

relación adimensional entre la velocidad y la profundidad. Se obtiene con la siguiente expresión:

$$F_{nh} = \frac{V}{\sqrt{gh}}$$

Donde: V = Velocidad de la embarcación [m/s]
 h = Profundidad para aguas calmadas [m]
 g = Aceleración de la gravedad [m/s²]

Cuando F_{nh} se aproxima o es igual a la unidad, la resistencia al movimiento alcanza valores tan altos que la potencia de la mayoría de los barcos resulta insuficiente. De hecho, algunas embarcaciones no son capaces de superar valores de F_{nh} de 0.6 a 0.7 (en un inicio los buques – tanque y en la actualidad también algunos buques portacontenedores) lo que se refleja en un obstáculo para el aumento de la velocidad. Por lo tanto, antes de decidir la velocidad de diseño del ancho del canal, se recomienda revisar que ésta resulte compatible con la profundidad considerada (una alternativa es obtener la profundidad mínima permisible a partir del número de Froude límite y de la velocidad de diseño elegida).

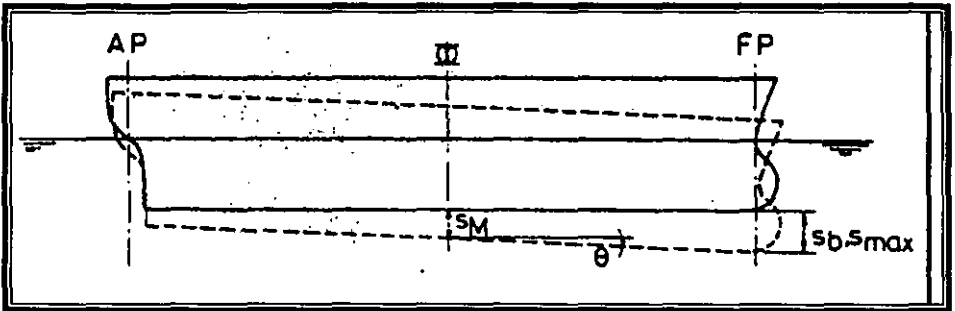
En caso de no contar con información suficiente para el dimensionamiento del canal, el valor de la relación profundidad/calado para un diseño preliminar debe ser de 1.10 en aguas protegidas, de 1.3 en zonas con oleaje de hasta un metro de altura y de 1.5 en zonas con oleaje de alturas mayores que presente un periodo y dirección desfavorables. El número de la profundidad de Froude debe considerarse menor a 0.7.

En cuanto al squat, éste ocurre cuando la popa de un barco se sumerge y la proa emerge debido a la velocidad de la embarcación, lo que provoca la reducción de la distancia entre la quilla y el fondo marino. El efecto del squat se produce debido a que el movimiento hacia adelante de una embarcación en aguas calmadas induce una velocidad relativa entre el barco y el agua, la cual varía dependiendo de la velocidad de éste y no es uniforme sobre toda su longitud. Esto genera un campo de velocidades que conlleva presiones hidrodinámicas en el casco, provocando una depresión en el nivel del agua a lo largo de la nave, así como una fuerza vertical aplicada en la parte trasera del buque y un

momento alrededor de un eje horizontal transversal, causando un desplazamiento de la embarcación en un plano longitudinal y vertical de simetría.

El squat comprende un movimiento vertical (hundimiento) del cuerpo del barco conocido como "sinkage", y una rotación llamada "trim". Usualmente para el dimensionamiento de los canales de navegación únicamente interesa el punto de squat máximo, que generalmente está ubicado en la popa, razón por la cual la mayoría de los autores han publicado expresiones para determinar el squat de popa (s_b , "squat at the bow"), como se ilustra en la *Figura 2.2.I*.

Figura 2.2.I – Efecto del Squat



FUENTE: *Approach Channels, a Guide for Design, Fig. C.1. PIANC, 1997.*

El squat se acentúa en zonas de navegación poco profundas, siendo inclusive un aspecto crítico a considerar en estas condiciones, por lo que se debe revisar que la profundidad de las áreas de navegación sea suficiente para permitir el paso de embarcaciones a la velocidad necesaria contemplando las condiciones de marea y manteniendo la maniobrabilidad.

Se han desarrollado una gran cantidad de expresiones para determinar el squat, las cuales se discuten ampliamente en la publicación *Approach Channels, a Guide for Design, Appendix C* del PIANC. Una forma sencilla de hacer una primera estimación es por medio de la ecuación del ICORELS, que es la siguiente:

$$Squat[m] = 2.4 \frac{\nabla}{L_{pp}^2} \frac{F_{nh}^2}{\sqrt{(1 - F_{nh}^2)}}$$

Donde: ∇ = Volumen de desplazamiento [m³] = C_B x L_{pp} x B x T
 L_{pp} = Eslora entre perpendiculares [m]
 B = Manga [m]
 T = Calado [m]
 C_B = Coeficiente, en inglés "block coefficient"
 F_{nh} = Número de Froude

La *Tabla 2.2.G* presenta el rango de valores que puede adoptar el coeficiente C_B dependiendo del tipo de embarcación que se trate.

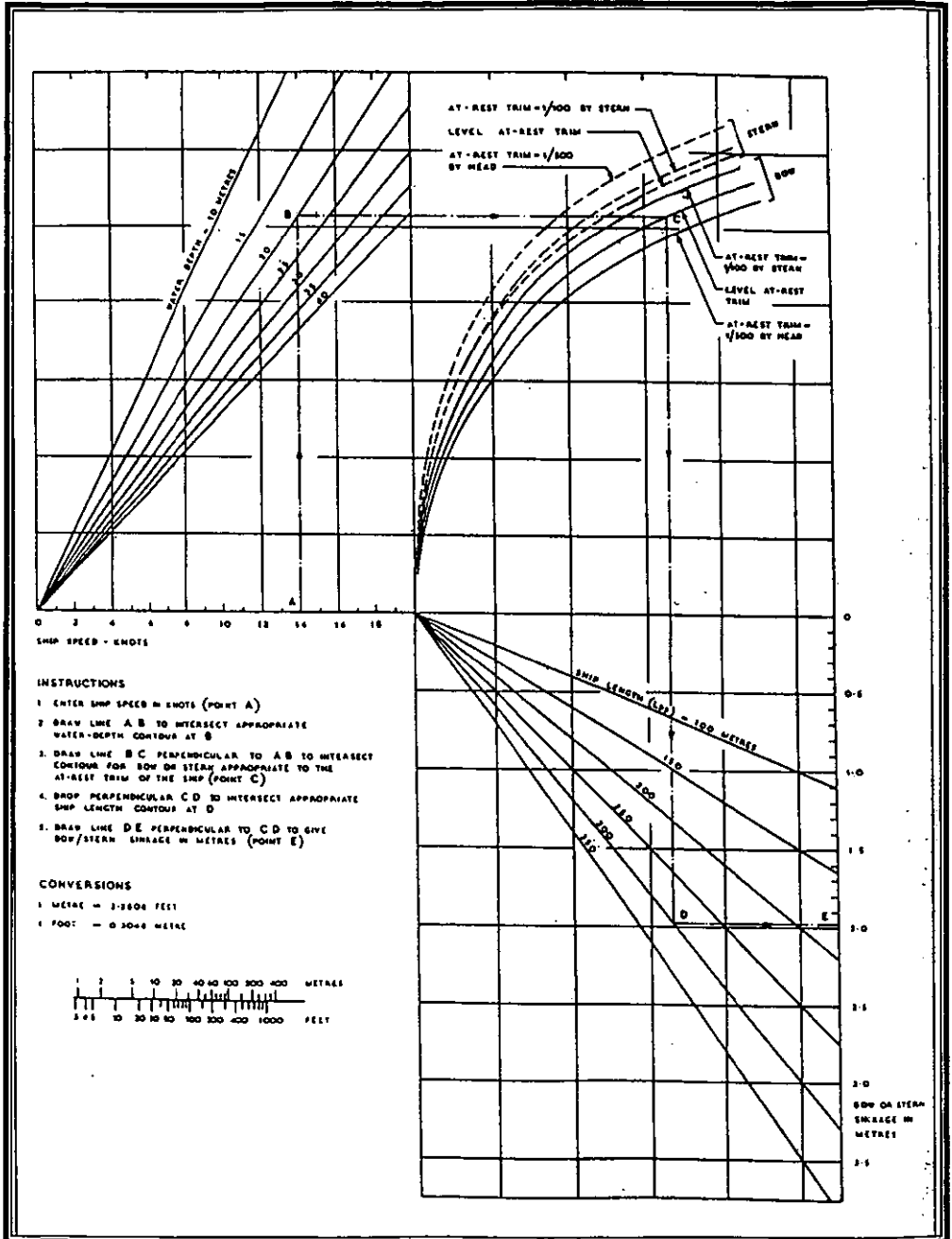
Tabla 2.2.G – Valores de C_B para diferentes tipos de embarcaciones

TIPO DE EMBARCACIÓN	C _B (BLOCK COEFFICIENT)*
Buques – Tanque Petroleros	0.81 – 0.86
Buques – Tanque para Químicos y Petroquím.	0.74 – 0.81
Buques Graneleros	0.78 – 0.87
Barcos Portacontenedores (post – Panamax)	0.63 – 0.65
Barcos Portacontenedores (Panamax)	0.63 – 0.71
Buques Especializados Ro – Ro	0.71 – 0.80
Embarcaciones de Carga General	0.71 – 0.77
Barcos para Vehículos	0.56 – 0.66
Ferries	0.57 – 0.63
Cruceros	0.63 – 0.68

FUENTE: Resumen de la tabla "Typical Ship Dimensions", extraída de: *Approach Channels, a Guide for Design, Appendix B. PIANC, 1997.*

Existe además un método gráfico para la determinación del squat, haciendo uso de la *Figura 2.2.J*.

Figura 2.2.J – Método Gráfico para Determinar el Squat



FUENTE: *Approach Channels, a Guide for Design, Fig. 5.7. PIANC, 1997.*

Por otro lado, se conocen algunos factores relativos a las embarcaciones, al área de navegación y a otros elementos externos que influyen en la magnitud del squat, como son:

- a) La velocidad operacional del barco: Para velocidades por debajo de los 6 nudos navegando en aguas con una profundidad suficiente generalmente no se presenta un squat significativo (menor a 30 cm). Un buen indicador es el número de Froude, cuyos valores menores a 0.3 implican un squat moderado. Para velocidades mayores a los 6 nudos el squat se incrementa rápidamente conforme aumenta la velocidad.
- b) La forma del barco: El squat es sensible a la forma del barco, dado que depende del C_b ("block coefficient"), el cual varía para cada tipo de embarcación.
- c) La relación profundidad/calado: Para relaciones cercanas a la unidad (en las que la distancia entre la quilla y el fondo es reducida) el squat se incrementa por encima de lo normal cuando el fondo es sólido. El caso de fondos fangosos se explica más adelante.
- d) La proximidad de los bancos: El squat se incrementa cuando los buques navegan próximos a los bancos de material de fondo.
- e) El cambio abrupto de la profundidad: En este caso se debe considerar el comportamiento dinámico de la embarcación, por ejemplo, al navegar sobre fosas o bancos.
- f) La existencia de un fondo fangoso: Cuando el fondo del canal es fangoso generalmente se reduce el squat, con excepción del caso en que el movimiento del barco sea tan rápido que "penetre" en la capa de lodo de baja densidad produciéndose un incremento del squat.
- g) El tráfico: Cuando en un canal de dos o más vías una embarcación pasa a otra o dos buques se cruzan, se incrementa el efecto del squat.
- h) El viento transversal: En canales propensos al efecto del viento transversal sobre los navíos, éstos deben navegar con mayores ángulos de deriva lo cual provoca el aumento del squat.

- i) Las curvas: El squat es más intenso cuando los barcos navegan a lo largo de las curvas de los canales, debido al deslizamiento lateral de la embarcación.

Debido a lo anterior, en un canal sujeto a la acción del oleaje es muy importante asegurar que la distancia entre la quilla del barco y el fondo es capaz de soportar el movimiento de la embarcación generado por el oleaje, ya que los tres movimientos verticales a los que está sujeta la nave (arzada, cabeceo y balanceo) en combinación con el efecto del squat, incrementan el riesgo de que alguna parte del barco haga contacto con el fondo del canal.

En la actualidad existen modelos matemáticos que, aplicados en programas de cómputo especializados, permiten estimar la respuesta de las embarcaciones ante la acción del oleaje, correlacionando los movimientos verticales de la nave con la altura, periodo y dirección del oleaje, para estimar la distancia entre la quilla y el fondo en diferentes circunstancias. Cuando no se cuenta con modelos de cómputo confiables es común recurrir a modelos físicos a escala, los cuales permiten conocer el comportamiento de la embarcación bajo los efectos del oleaje con gran precisión.

Finalmente, es común que los canales de navegación cuenten con un fondo cubierto por una capa de sedimento lodoso, caracterizado por su baja densidad ($1,050 - 1,300 \text{ kg/m}^3$) y su poca resistencia al esfuerzo cortante. En estas condiciones el fondo y la profundidad del canal no están bien definidos, debido a la imposibilidad del uso de plomadas o sondalezas (líneas con peso en el extremo) y ecosondas para su determinación. Además, a pesar de que la densidad del fango es mayor a la del agua, sus propiedades reológicas son comparables por lo que el casco de las embarcaciones no se daña cuando penetra en esta interfase, lo cual permite considerar la capa de fango como parte de la distancia entre la quilla y el fondo aceptándose incluso que el buque esté en contacto permanente con el lodo. Sin embargo, la seguridad a la navegación requiere que el piloto sea capaz de compensar los efectos del lodo en la maniobrabilidad del barco por sus propios medios o con ayudas externas como remolcadores.

Por esto, surgen los conceptos de fondo náutico y de calado náutico. El primero se define como el nivel donde las características físicas del fondo son tales que, al hacer contacto con alguna embarcación, le provocan daños o afectan su controlabilidad y

maniobrabilidad. El segundo se define como la distancia vertical entre un punto del fondo náutico y la superficie del agua en condiciones tranquilas.

Dado que las propiedades físicas del lodo cambian gradualmente conforme aumenta la profundidad de esta capa, hasta llegar a la superficie dura, la determinación del nivel del fondo náutico es particular para cada zona en estudio y depende de las características del fango establecidas como parámetros. Por medio de pruebas y datos estadísticos se ha encontrado que el fondo náutico se encuentra a una distancia aproximada de 0.3 metros a partir de la interfase agua – lodo.

2.2.4 LONGITUD DEL CANAL DE NAVEGACIÓN PRINCIPAL

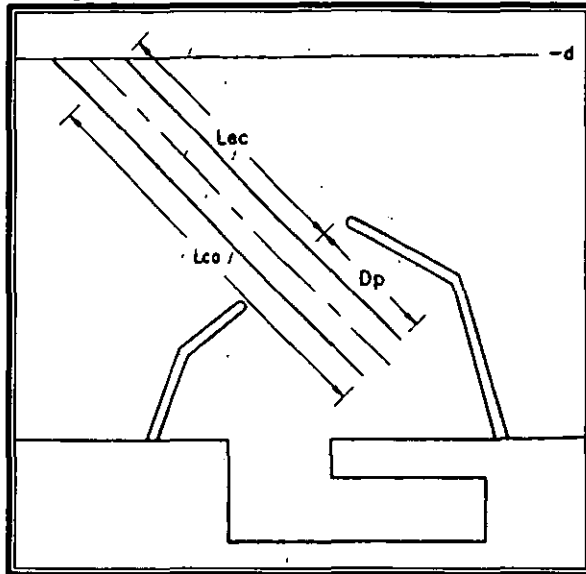
En cuanto al dimensionamiento de la longitud del canal de acceso (L_{ca}), básicamente se continúan aplicando los mismos criterios desde hace varios años. De acuerdo con el Manual de Dimensionamiento Portuario de Puertos Mexicanos, esta longitud está compuesta por una longitud exterior (L_{ec}) que depende de la pendiente natural del fondo marino, y por una distancia de parada (D_p), necesaria para la maniobra de frenado del barco (*Figura 2.2.K*). La distancia de parada se determina con la siguiente expresión:

$$D_p = 4E \frac{V^{3/4}}{2.5} + E$$

Donde: E = Eslora de la embarcación [m]
V = Velocidad de la embarcación [nudos]

Sin embargo, lo más recomendable para conocer la magnitud de la distancia de parada es contactar al armador de la nave seleccionada como barco de diseño, para conocer los datos técnicos referentes a esta longitud, tanto en aguas bajas como en aguas profundas.

Figura 2.2.K – Longitud del Canal de Acceso



FUENTE: *Manual de Dimensionamiento Portuario, Fig.5.14. Puertos Mexicanos, S.C.T., 1992.*

Estos son, a grandes rasgos, los criterios más relevantes determinados por el PIANC para el diseño del canal de navegación principal, referentes a su alineamiento y al dimensionamiento de su ancho y de su profundidad. Es indudable el avance que se ha experimentado en el estudio del comportamiento de las embarcaciones y su interacción con los factores ambientales, físicos y humanos que envuelven a la navegación, sobre todo en estos tiempos en que la optimización en el diseño de las áreas de navegación tiene cada vez más relevancia en el ámbito comercial y económico internacional.

De hecho, el diseño de los canales de acceso de las terminales marítimas es el aspecto que más ha evolucionado en lo que respecta al dimensionamiento portuario, ya que los criterios actuales resultan innovadores en relación con aquellos utilizados hasta finales de los años 1980's, debido principalmente a las investigaciones realizadas por expertos en el tema. El dimensionamiento de las áreas interiores de maniobras, como son las dársenas y los canales interiores de navegación, no ha sufrido grandes cambios en lo que respecta a los criterios de diseño, sin embargo, se ha hecho uso de nuevas tecnologías y métodos más precisos que conllevan un notable avance en la aplicación de estos criterios, como se refleja en la siguiente sección del presente capítulo.

2.3 DIMENSIONAMIENTO DE ÁREAS INTERIORES DE MANIOBRAS

Las áreas interiores de maniobras son los espacios de agua que se encuentran dentro del puerto destinados a las maniobras de desplazamiento, acomodo y atraque de las embarcaciones para efectuar la carga y descarga de las mercancías y el movimiento de personas (pasajeros y tripulación). A grandes rasgos se clasifican en tres grupos: dársenas de ciaboga, dársenas de atraque y canales interiores de navegación.

Los criterios de dimensionamiento de las áreas interiores de maniobras realmente no han cambiado en las últimas décadas, por lo que la finalidad de esta sección es recordar los criterios de diseño existentes, basándose esencialmente en el *Manual de Dimensionamiento Portuario* de Puertos Mexicanos (Secretaría de Comunicaciones y Transportes), y en algunas observaciones emitidas por el PIANC.

A pesar de lo anterior, el avance tecnológico en las comunicaciones y cómputo, reflejado principalmente en la simulación, ha permitido la optimización del diseño de estas áreas de maniobras, como se explica en la parte final de esta sección.

2.3.1 DÁRSENAS DE CIABOGA

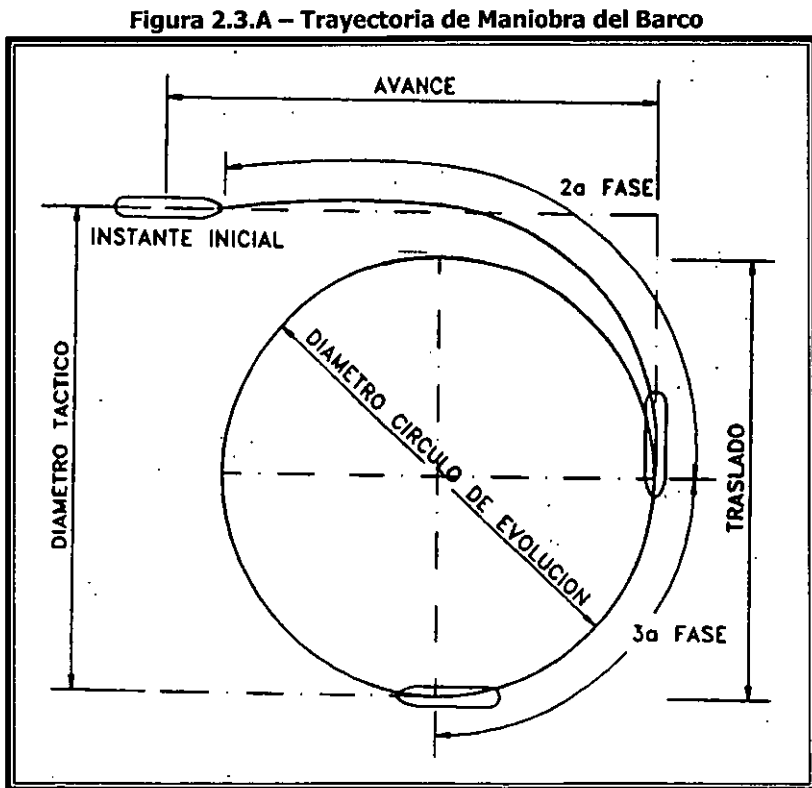
La dársena de ciaboga es el área marítima dentro del puerto donde los barcos hacen las maniobras de giro y revire, con el fin de enfilarse hacia las distintas zonas de éste; es la representación esquemática del círculo de evolución que sigue un barco en esta maniobra, y puede o no estar incluida la maniobra de parada.

De acuerdo a la frecuencia y tamaño de las embarcaciones, puede haber varias dársenas para atender a los diferentes buques que arriban al puerto. Dentro de las instalaciones portuarias es posible encontrar también dársenas de maniobras, que son las áreas destinadas a la preparación del buque para el acercamiento o despegue del muelle. Se requieren áreas para tal fin en cada grupo de atraque y dentro de éstas las maniobras generalmente se realizan con el auxilio de remolcadores, sin ayuda de los cuales resultan dársenas de grandes dimensiones.

**ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA**

Con base en lo anterior, la maniobra de ciaboga es la representación gráfica del círculo de evolución que sigue el barco en su maniobra de entrada al puerto, aún cuando se utiliza también para la salida. La velocidad inicial en el acceso es determinante para su dimensionamiento.

En la *Figura 2.3.A* se muestran las diferentes fases que comprende esta maniobra, que son la entrada, el avance, el traslado y la salida; para su dimensionamiento se presenta la *Tabla 2.3.A* que comprende un resumen de pruebas realizadas en un modelo hidráulico por medio de las cuales se determinó la facilidad y los requerimientos de maniobra para dársenas con diámetros de diferente magnitud.



FUENTE: *Manual de Dimensionamiento Portuario, Fig.5.22. Puertos Mexicanos, S.C.T., 1992.*

Tabla 2.3.A – Densidad del Tráfico

CLASIFICACIÓN DE LA DÁRSENA EN CUANTO A SUS DIMENSIONES	DIÁMETRO	OBSERVACIONES
Óptima	4 E	Maniobra fácil
Intermedia	2 E	Maniobra con cierta dificultad; toma más tiempo
Pequeña	> 1.2 E – 2 E	Maniobra difícil; requiere ayuda de remolcadores
Mínima	1.2 E	El buque necesita pivotear en el centro sobre un duque o ancla

FUENTE: Manual de Dimensionamiento Portuario, Tabla 5.4. Puertos Mexicanos, S.C.T., 1992.

Existen, además, otras recomendaciones para el dimensionamiento de las dársenas de ciaboga, de acuerdo con el tamaño de la embarcación y su velocidad, como lo muestra la *Tabla 2.3.B*.

Tabla 2.3.B – Dimensiones de Dársena de Ciaboga y Paradas de Emergencia para Diferentes Velocidades

T P M	PARADA DE EMERGENCIA MARCHA ATRÁS [m]	AVANCE [m]	DIÁMETRO [m]	TRASLADO [m]	TIEMPO [min]
<i>Velocidad inicial de 14 a 18 nudos ("Full Ahead")</i>					
48,000	3,965 (13 minutos)	976	1,098	610	10.50
65,000		915	915	427	10.00
79,000		976	1,342	732	9.75
120,000		1,007	1,129	580	12.75
150,000	5,338 (16 minutos)	1,037	1,190	641	13.50
206,000	5,643 (21 minutos)	1,129	1,311	732	15.50
<i>Velocidad inicial de 12 nudos ("Half Ahead")</i>					
48,000	2,623 (10 minutos)	976	976	519	14.00
65,000		854	915	427	13.00
79,000					
120,000					
150,000					
206,000					

FUENTE: Manual de Dimensionamiento Portuario, Tabla 5.5. Puertos Mexicanos, S.C.T., 1992.

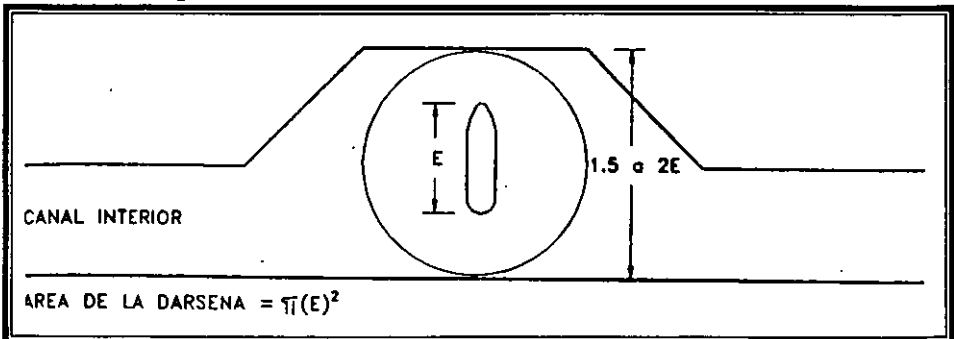
Tabla 2.3.B – Dimensiones de Dársena de Ciaboga y Paradas de Emergencia para Diferentes Velocidades (CONTINUACIÓN)

T P M	PARADA DE EMERGENCIA MARCHA ATRÁS [m]	AVANCE [m]	DIÁMETRO [m]	TRASLADO [m]	TIEMPO [min]
<i>Velocidad inicial de 4 a 8 nudos ("Low Ahead")</i>					
48,000	991 (7.6 minutos)	976	976	519	23.00
65,000			824		
79,000	3,950 (4.3 minutos)	915	855	427	21.00
120,000					
150,000					
206,000	1,312 (9 minutos)	1,098	855	488	24.00

FUENTE: *Manual de Dimensionamiento Portuario, Tabla 5.5. Puertos Mexicanos, S.C.T., 1992.*

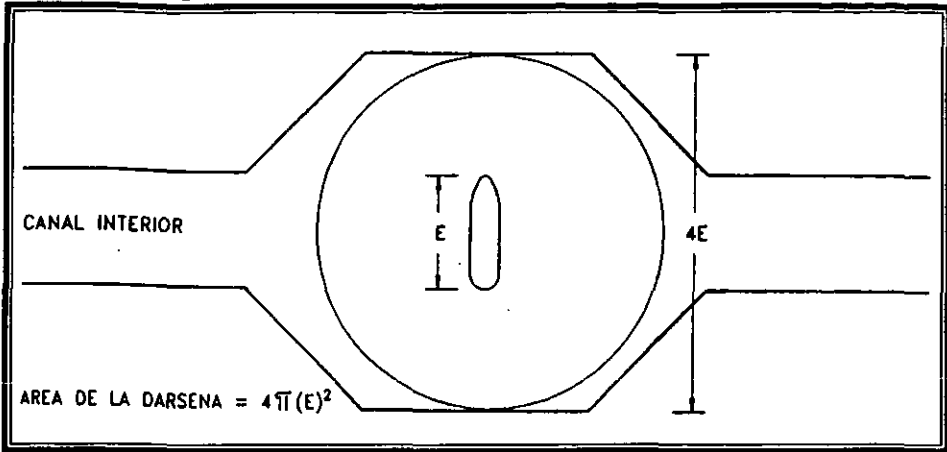
Por otra parte, el dimensionamiento de las dársenas de maniobras dependerá de la existencia de la ayuda de remolcadores, por lo que encontramos tres criterios básicos diferentes de diseño: con remolcadores (*Figura 2.3.B*), sin remolcadores (*Figura 2.3.C*) y el caso en que la embarcación manibre pivoteando en el atraque (*Figura 2.3.D*).

Figura 2.3.B – Dársena de Maniobras con Remolcadores



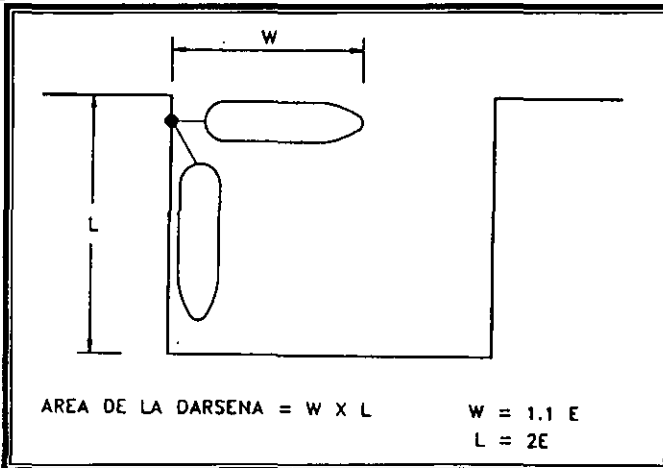
FUENTE: *Manual de Dimensionamiento Portuario, Fig.5.23. Puertos Mexicanos, S.C.T., 1992.*

Figura 2.3.C – Dársena de Maniobras sin Remolcadores



FUENTE: *Manual de Dimensionamiento Portuario, Fig.5.23. Puertos Mexicanos, S.C.T., 1992.*

Figura 2.3.D – Dársena de Maniobras Pivoteando en el Atraque



FUENTE: *Manual de Dimensionamiento Portuario, Fig.5.23. Puertos Mexicanos, S.C.T., 1992.*

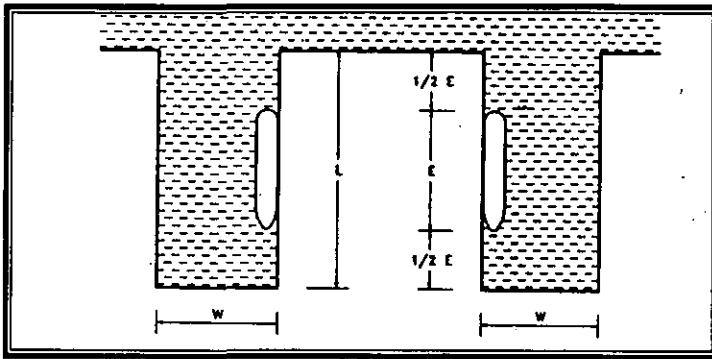
2.3.2 DÁRSENAS DE ATRAQUE

Las dársenas de atraque son las áreas de agua contiguas a los muelles, cuyas dimensiones normalmente dependen de la longitud del frente de atraque. El atraque puede llevarse a cabo por un solo lado (*Figura 2.3.E*), por ambos lados (*Figura 2.3.A*) o en

posiciones contiguas (*Figura 2.3.G*). Para los dos primeros casos, existen diversos criterios de dimensionamiento propuestos en su mayoría por compañías petroleras o por la marina estadounidense (U.S. Navy), como se indica en las figuras correspondientes.

De acuerdo con los criterios del PIANC, las áreas de ciaboga y atraque deben dimensionarse acorde con el tipo de maniobra que se llevará a cabo en cada una de éstas. Si estas maniobras comprenden el giro 180° de la embarcación, entonces las áreas de ciaboga se diseñarán de forma circular con un diámetro de entre 1.8 y 2 veces la longitud de la eslora del buque de diseño.

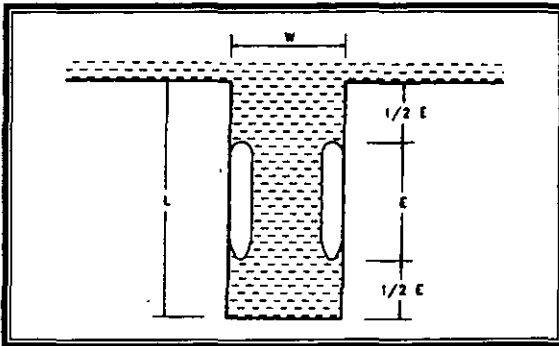
Figura 2.3.E – Atraque de un Solo Lado



FUENTE: *Manual de Dimensionamiento Portuario, Fig.5.25. Puertos Mexicanos, S.C.T., 1992.*

- Donde:
- $L = 1.25 E$ (U.S. Navy)
 - $L = 2.00 E$ (Exxon)
 - $W = 3.50 M$ (U.S. Navy)
 - $W = 2.5$ a $3.5 M$ (Sell) sin oleaje y corrientes
 - $W = 4.0$ a $5.0 M$ (Exxon) con cierta incidencia de oleaje y corrientes
 - $E =$ Eslora
 - $M =$ Manga

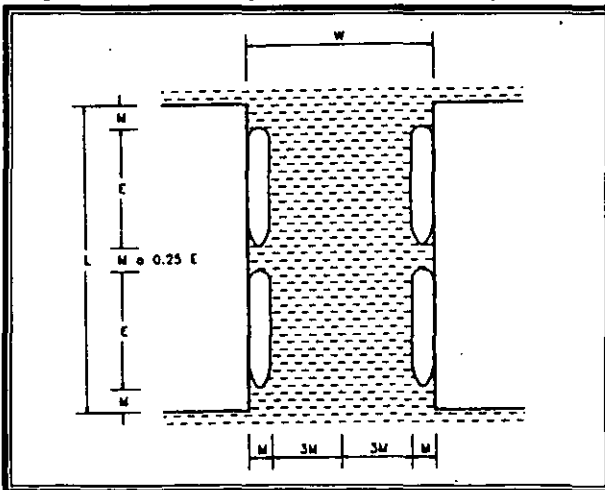
Figura 2.3.F – Atraque de ambos Lados



FUENTE: *Manual de Dimensionamiento Portuario, Fig.5.26. Puertos Mexicanos, S.C.T., 1992.*

- Donde:
- L = 2.40 E (U.S. Navy)
 - L = 2.00 E (Exxon)
 - W = 3.50 M (U.S. Navy)
 - W = 2.5 a 3.5 M (U.S. Navy)
 - W = 4.0 a 5.0 M (Exxon)
 - E = Eslora
 - M = Manga

Figura 2.3.G – Atraque de Ambos Lados y en Línea



FUENTE: *Manual de Dimensionamiento Portuario, Fig.5.26. Puertos Mexicanos, S.C.T., 1992.*

Donde: $L = 2.00 E + 3 M$
 $L = 2.25 E + 2 M$
 $W = 8.00 M$
 $E = \text{Eslora}$
 $M = \text{Manga}$

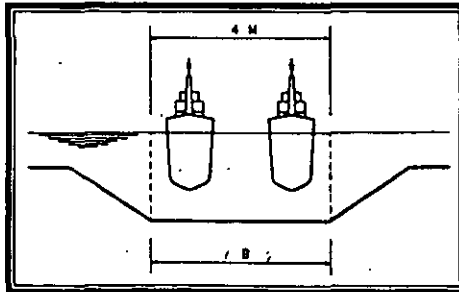
2.3.3 CANALES INTERIORES DE NAVEGACIÓN

Los canales interiores de navegación o canales secundarios son las vías navegables dentro del puerto que permiten a las embarcaciones realizar su rutina de entrada o salida, comunicando al canal de navegación principal con las distintas zonas que conforman el puerto.

Dado que estos canales se encuentran en la zona protegida del puerto, los efectos de los factores ambientales físicos como el oleaje, el viento y las corrientes generalmente son mínimos. Debido a esto, el dimensionamiento de los canales interiores de navegación involucra una menor cantidad de variables que el diseño de los canales de acceso.

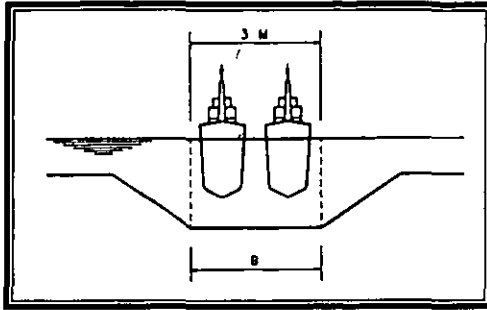
De este modo, el ancho para un canal secundario de doble vía sin restricción de velocidad tiene una magnitud igual a cuatro veces la manga del barco de diseño (*Figura 2.3.H*), para un canal de doble vía con restricción de velocidad en cuanto a rebases es de tres veces la manga de este buque (*Figura 2.3.I*), y para un canal de una vía de circulación es de dos veces el tamaño de la manga (*Figura 2.3.J*).

Figura 2.3.H – Doble Vía sin Restricción de Velocidad



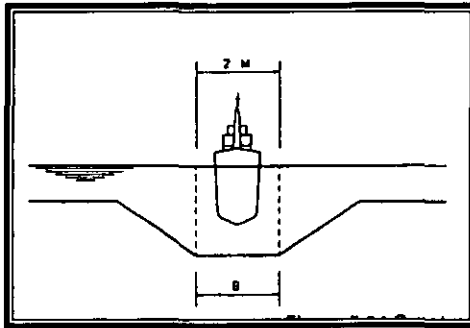
FUENTE: *Manual de Dimensionamiento Portuario, Fig.5.24. Puertos Mexicanos, S.C.T., 1992.*

Figura 2.3.I – Doble Vía con Restricción de Velocidad



FUENTE: *Manual de Dimensionamiento Portuario, Fig.5.24. Puertos Mexicanos, S.C.T., 1992.*

Figura 2.3.J – Una Vía de Circulación



FUENTE: *Manual de Dimensionamiento Portuario, Fig.5.24. Puertos Mexicanos, S.C.T., 1992.*

En cuanto a la determinación de la profundidad de los canales interiores, el *Manual de Dimensionamiento Portuario* propone el siguiente criterio, el cual considera el efecto de los movimientos verticales del barco:

$$P = C + Ar + Cb + Bl + Sq + F.S.$$

- Donde:
- P = Profundidad del canal secundario [m]
 - C = Calado de la embarcación de diseño [m]
 - Ar = Arzada = 0.02 C (de manera generalizada)
 - Cb = Cabeceo [m]
 - Bl = Balanceo = 0.0174 M [m] (de manera generalizada)
 - Sq = Squat = 0.0024 E [m] (de manera generalizada)

M = Manga de la embarcación de diseño [m]

E = Eslora de la embarcación de diseño [m]

F.S. = Factor de seguridad (0.6 m para fondo arenoso, 1.0 m para fondo rocoso)

Generalmente dentro de los canales interiores de navegación no se desarrolla oleaje, dado que se encuentran en la zona protegida del puerto. En este caso, la expresión anterior se simplifica como sigue:

$$P = C + Bl + Sq + F.S.$$

Finalmente, los canales interiores de navegación presentan un mayor número de cambios de dirección que el canal principal, por lo cual se busca que la curva entre dos tangentes no sea mayor de 30°, lo que equivale a un radio aproximado de 5 esloras. Por seguridad, lo recomendable para barcos mayores de 30,000 TPM es un radio de giro de 10 esloras. El ancho de la plantilla en las curvas del canal debe aumentar en un 30% con respecto a los tramos rectos.

Después de haber presentado los criterios más usuales de dimensionamiento de las áreas interiores de maniobras, corresponde analizar el tema de las nuevas tendencias para el diseño de estas áreas.

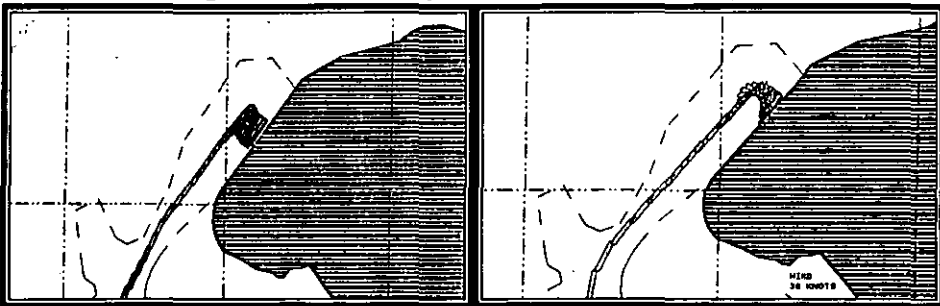
De hecho, probablemente es en el diseño de las áreas de atraque donde surge la simulación de tiempo rápido ("fast - time simulation") en un plano. En la simulación de tiempo real ("real - time simulation"), el campo de visión vertical y horizontal se encuentran un tanto restringidos, por lo que los últimos segundos antes del contacto del buque con las defensas no pueden ser observados. Sin embargo, estos segundos de vital importancia sí pueden observarse a través de gráficas de un plano en planta gracias a la simulación en tiempo rápido. En la Sección 2.4 se explica ampliamente el funcionamiento y las características de los métodos de simulación existentes.

Una simulación debe ser capaz de reproducir la gran variedad de maniobras de atraque y salida comúnmente aplicadas, con o sin la ayuda de remolcadores, que incluyen:

- a) La aproximación y la salida del muelle.
- b) La salida del muelle con giro.
- c) La aproximación y el giro.
- d) La permanencia en una posición de atraque bajo la acción de corrientes de gran intensidad.
- e) Técnicas con propulsión de doble giro.
- f) El uso de líneas de amarre (cabos).

La simulación de las maniobras debe llevarse a cabo en todas las condiciones, incluyendo las más desfavorables, con el fin de detectar las condiciones límite de operación para el dimensionamiento propuesto. Un ejemplo gráfico se ilustra en la *Figura 2.3.K*.

Figura 2.3.K – Dos Tipos de Maniobras de Atraque



FUENTE: *Approach Channels, a Guide for Design*, Fig. 6.12 y Fig. 6.13. PIANC, 1997.

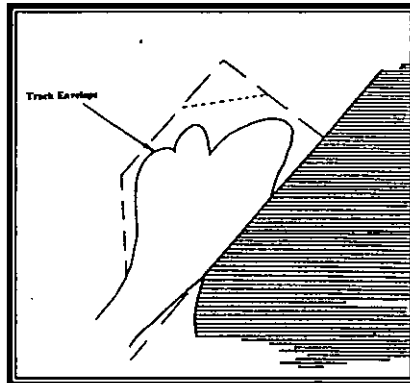
Si los límites de operación resultan muy desfavorables para el diseño en estudio, es necesario replantear el alineamiento del muelle, o proponer el uso de remolcadores más potentes. Es indispensable considerar también los movimientos del barco sujeto a la acción del oleaje durante el proceso de carga y descarga, así como los problemas vinculados a la experiencia y capacidad de los pilotos.

Idealmente, para realizar una maniobra de atraque segura, el muelle debe estar alineado aproximadamente a 30° de la dirección del viento prevaeciente, mientras que las

corrientes alineadas al muelle no deben ser mayores de 3 nudos y las perpendiculares al muelle no deben sobrepasar 0.75 nudos.

Posteriormente a la realización de una cantidad de simulaciones suficiente, en cuanto a condiciones de viento, corrientes, tamaño y tipo de embarcaciones, etc., se traza una envolvente que abarque el trazo de todas las corridas, para determinar el área de giro necesaria para las maniobras de ciaboga (*Figura 2.3.L*), la cual puede ser modificada tomando en cuenta aspectos como la estabilidad y la pendiente de los bancos, el material del fondo marino, y los costos de dragado iniciales y por mantenimiento.

Figura 2.3.L – Trazo de la Envolvente de Diversas Corridas



FUENTE: Approach Channels, a Guide for Design, Fig. 6.14. PIANC, 1997.

Como se aprecia en los párrafos anteriores, y se profundiza en la siguiente sección, las tendencias de dimensionamiento actuales se apoyan en gran medida en la simulación por computadora, para prevenir un gasto innecesario en caso de que las áreas de maniobra presenten dimensiones excesivas o "sobradas", o por el contrario, la inoperatividad recurrente de dichas áreas en caso de que sus dimensiones no sean suficientes.

2.4 OPTIMIZACIÓN DEL DISEÑO CONCEPTUAL CON EL USO DE SIMULADORES

Con la disponibilidad de sistemas de cómputo cada vez más potentes, el ser humano ha desarrollado modelos matemáticos muy complejos, los cuales han servido para simular con gran confiabilidad complejos fenómenos físicos y procesos operativos gobernados por él mismo. Tal es el caso de los simuladores de navegación, los cuales con el acoplamiento digital de técnicas de animación por computadora y modelos matemáticos de respuesta de embarcaciones sujetas a fuerzas físicas y comandos de dirección por parte del ser humano, permiten ensayar en una realidad virtual y sin poner en peligro la integridad de una embarcación real, maniobras operativas de navegación que conllevan a entender mejor los límites bajo los cuales ésta puede ser operada de manera segura.

El uso de técnicas de simulación puede brindar grandes beneficios a diseños de áreas de operación marítima en puertos, concebidos inicialmente a partir de recomendaciones de diseño como las expuestas en las secciones anteriores. Su aplicación conlleva no solo a verificar los espacios producidos por el diseño, sino también a evaluar las limitantes operativas que se pueden presentar por factores diversos como son: la habilidad de la tripulación y pilotos de puerto encargados de maniobrar la embarcación; la magnitud de las fuerzas físicas que influyen en la maniobrabilidad de un buque (viento, corrientes y oleaje); y la presencia de otros buques, márgenes de costa, muelles y demás obstáculos.

En la actualidad se trabaja con dos tipos de simuladores de navegación: los simuladores de tiempo rápido ("fast - time simulators") y los simuladores de tiempo real ("real - time simulators") también conocidos como simuladores de misión completa ("full - mission simulators"). Los primeros implican una rápida recolección de datos y resultados así como la realización de un mayor número de corridas en menos tiempo, por lo que generan una base estadística sólida para valorar la viabilidad del proyecto, sin embargo es una técnica cuyo realismo no es muy elevado. Los segundos son mucho más realistas, y consideran en mayor medida la influencia de factores humanos, aunque el número de corridas es menor debido al tiempo que conlleva la realización de cada una de éstas. A continuación se describen con mayor detalle estos métodos de simulación, con base en

información recabada del PIANC (1997), de la ponencia *Diseño y Verificación de Áreas Portuarias de Navegación a través de Técnicas de Simulación de Tiempo Real*, Yáñez et al, CYTSA (1998) y del artículo *Use of Fast – time and Real – time Simulation in Harbour Design*, Miguel A. Yáñez y Niels Arndal (1999), entre otras fuentes.

2.4.1 SIMULACIÓN DE TIEMPO RÁPIDO

En un simulador de tiempo rápido, las embarcaciones modeladas son controladas por medio de un navegador numérico, que básicamente es un programa de cómputo, y las corridas se efectúan tan rápido como lo permite la capacidad de la computadora, a diferencia de la simulación de misión completa donde las maniobras se llevan a cabo en tiempos reales.

El modelo de navegación numérico consta de cuatro módulos, que son los siguientes:

- a) Módulo de estimación de estado: Este módulo proporciona al navegador información referente a su posición y velocidad, en relación con la ruta o trayectoria preestablecida en el estudio.
- b) Módulo de planificación de la trayectoria: Este módulo está diseñado con la finalidad de copiar el proceso que seguiría un navegante humano. La planeación ejecutada por el navegante a bordo del barco consiste en trazar una ruta definiendo los puntos de partida y de llegada, la velocidad a lo largo de esta trayectoria, y la consideración de las condiciones ambientales como el viento y las corrientes. Este mismo proceso es planificado por el navegador numérico.
- c) Módulo de seguimiento de la trayectoria: La idea básica de este módulo es reflejar la forma en que el navegador cumple con el proceso planeado. El módulo de seguimiento debe ser capaz de controlar el barco siguiendo la trayectoria planeada y de mantener la embarcación a una distancia lo más reducida posible de esta trayectoria en caso de que no se introduzcan perturbaciones o errores en el módulo del navegador.

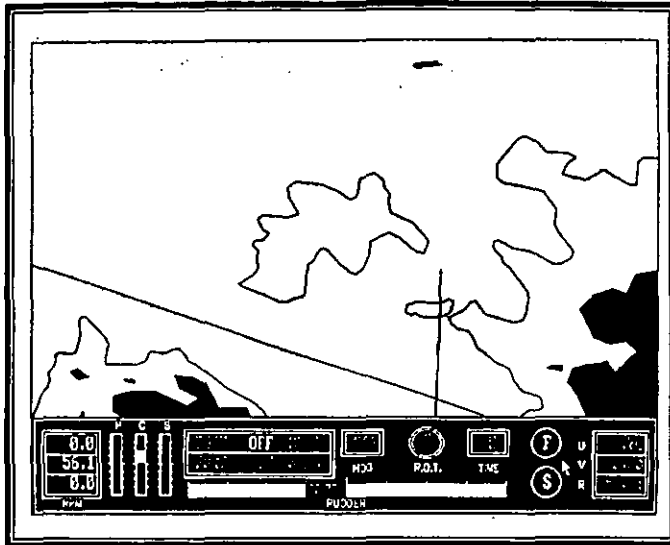
d) Módulo de decisión del navegador: Este es el módulo encargado de la toma de decisiones en el proceso de simulación, determinando qué, cuándo y cómo se efectuarán las respuestas del simulador a lo largo del modelo.

Durante las corridas del simulador, el observador debe determinar y evaluar las observaciones, acciones y comandos del navegador. Las observaciones son parámetros como la posición y velocidad del barco, las condiciones de manejo y el ángulo del timón. Las acciones son, principalmente, el cálculo de la posición relativa con la trayectoria definida, valorar si el error en la trayectoria es aceptable y corregirlo, o en su defecto, elaborar una nueva planificación de trayectoria. Los comandos son las órdenes ejecutadas por el piloto automático o por el navegador.

Por otra parte, existen varias técnicas de simulación de tiempo rápido, entre las que destacan las siguientes:

- a) Corridas múltiples: La simulación de tiempo rápido permite la ejecución de una gran cantidad de corridas en un lapso relativamente corto, lo cual representa una ventaja como herramienta de diseño. La técnica de corridas múltiples usualmente consiste en repetir una misma maniobra en varias ocasiones para posteriormente efectuar un análisis estadístico de los resultados.
- b) Corridas sencillas: La simulación de corridas con diferentes condiciones de viento, oleaje y corrientes es utilizada para juzgar la conveniencia del diseño de las áreas de navegación, apoyándose en experiencias de dimensionamiento anteriores. Por medio de este criterio se pueden definir también algunas recomendaciones de operación para diversas condiciones ambientales.
- c) Vista en planta o en perspectiva: La mayoría de los simuladores de tiempo rápido son capaces de desplegar la vista en planta del área en consideración, y algunos proporcionan una vista en perspectiva de una "ventana" del puente de mando (*Figura 2.4.A*). Aunque en general la simulación se lleva a cabo con una representación en planta, algunas corridas deben auxiliarse por una vista en perspectiva ya que, en áreas de navegación en las que los límites se indican por medio de señales visuales, es muy diferente observar estas señales en planta que desde otros ángulos.

Figura 2.4.A – Display Típico de un Simulador de Tiempo Rápido



FUENTE: *Approach Channels, a Guide for Design, Fig. 6.10. PIANC, 1997.*

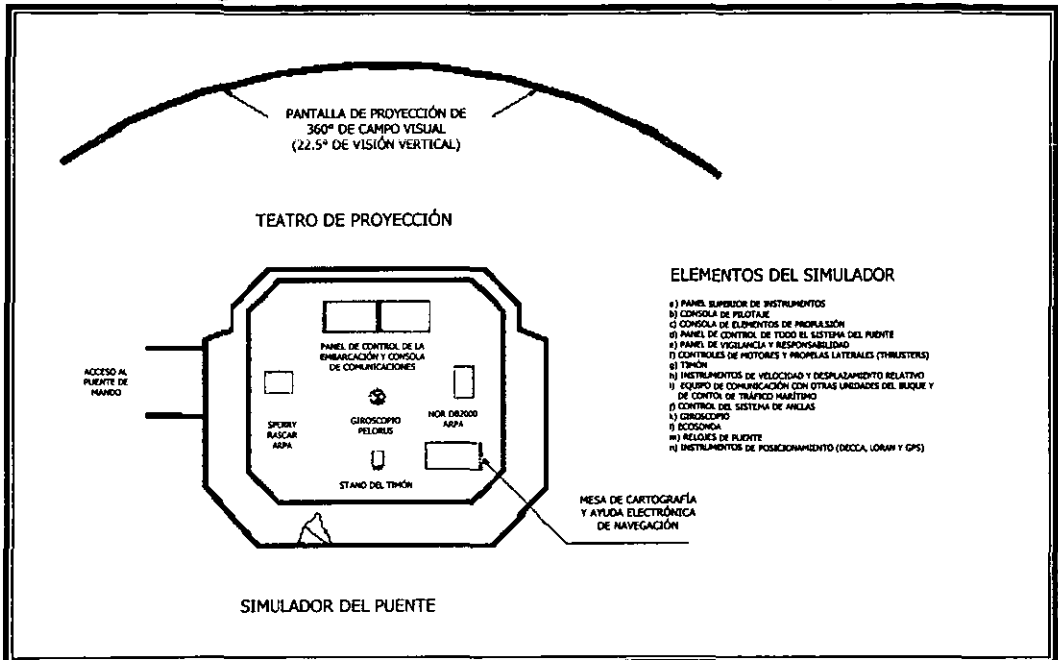
Finalmente, es conveniente apuntar que los simuladores de tiempo rápido son herramientas muy poderosas en el proceso de dimensionamiento de áreas de navegación en un proyecto a largo plazo, en el que aún no es necesario dimensionar con gran precisión las áreas de navegación y únicamente se busca evaluar un panorama en lo general del comportamiento de las embarcaciones bajo diferentes condiciones de operación.

2.4.2 SIMULACIÓN DE TIEMPO REAL O DE MISIÓN COMPLETA

Un simulador de misión completa se caracteriza por disponer de un modelo de puente prototipo, como el que encontramos en toda embarcación comercial (por ejemplo, en un buque portacontenedores, granelero, crucero, etc.). En el puente del simulador se encuentra toda la instrumentación de control y navegación que típicamente contiene un puente de mando verdadero (*Figura 2.4.B*). Se denomina simulador de tiempo real o de misión completa porque en el se puede simular sin necesidad de escalar el tiempo y manejar un tiempo virtual, la navegación de un buque en altamar, las maniobras de

aproximación y retiro, así como maniobras minuciosas de atraque y desatraque. El campo visual desde el puente de simulación es muy semejante a que se tiene en condiciones reales, proyectando una realidad virtual en una pantalla que cubre 360° en el plano horizontal y entre 22.5° y 27° en el plano vertical (*Figura 2.4.C*).

Figura 2.4.B – Puente de un Simulador de Misión Completa



FUENTE: Ponencia – Diseño y Verificación de Áreas Portuarias de Navegación a través de Técnicas de Simulación de Tiempo Real. CYTSA, II Congreso Internacional de la AMIP, 1998.

En este tipo de simuladores se pueden evaluar además, el manejo de los recursos del buque, las reglas básicas y avanzadas de navegación, respuestas de tripulaciones de mando durante emergencias, operaciones de asistencia con remolcadores e interacción buque disposición de instalaciones portuarias.

Figura 2.4.C – Vista Desde el Puesto de Mando de un Simulador



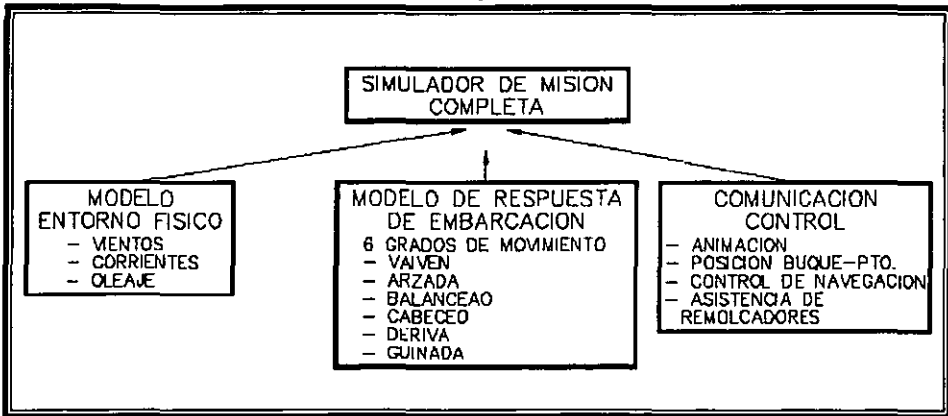
FUENTE: Centro de Simulación STAR Center, Florida, 2000.

A través de un sistema de control y comunicación digital, en un simulador de misión completa interactúan tres componentes de modelación: la modelación matemática del entorno físico (viento, oleaje y corrientes); la modelación matemática de las fuerzas dinámicas de respuesta de un buque; y la modelación del movimiento de la embarcación y de la dinámica del entorno a través de técnicas de animación visual, como lo muestra la *Figura 2.4.D*.

La primer componente de modelación permite superponer las fuerzas físicas a las cuales está sujeta una embarcación en un medio marino. El viento, especificado por el operador simulador, se representa como un campo uniforme de velocidad y dirección cuya magnitud corresponde típicamente a un valor medido a una altitud de 10 m sobre la superficie del terreno en una estación climatológica cercana a la zona en estudio; sin embargo, este valor es conservador ya que no corresponde a la distribución exponencial de velocidad típica que se presenta en la realidad. Por otra parte, el oleaje se especifica en

magnitud, dirección y periodo a través de un modelo de agitación en el cual incluso se pueden modelar condiciones de oleaje aleatorio, introduciendo espectros frecuenciales conocidos, como JONSWAP o Pearson – Moskowitch, aunque es difícil hasta hoy en día simular condiciones no uniformes en el espacio. Por último, las corrientes se dan a través de un modelo hidrodinámico de circulación de corrientes para establecer un patrón de corrientes permanentes por medio de modelos comerciales como MIKE 21 del Danish Hydraulics Institute. No esta por demás hacer notar que la confiabilidad con la que se simule el entorno físico, depende de una campaña previa de investigación y documentación de las condiciones físicas del medio en el que navegarán y operarán las embarcaciones en estudio.

Figura 2.4.D – Componentes de Modelación en un Simulador de Misión Completa



FUENTE: Ponencia – Diseño y Verificación de Áreas Portuarias de Navegación a través de Técnicas de Simulación de Tiempo Real. CYTSA, II Congreso Internacional de la AMIP, 1998.

Por otra parte, la segunda componente se refiere a las técnicas de modelación de la respuesta dinámica de los buques, como se describe en los párrafos siguientes. La tercera componente de modelación se ha dado gracias a los avances actuales en las técnicas de proyección y animación por computadora de realidades virtuales conformadas por la embarcación y el medio físico que la rodea. De hecho, es fácil incluso modelar otros objetos móviles típicamente encontrados en operaciones marítimas en puertos, como son los remolcadores y otras embarcaciones mercantes diversas.

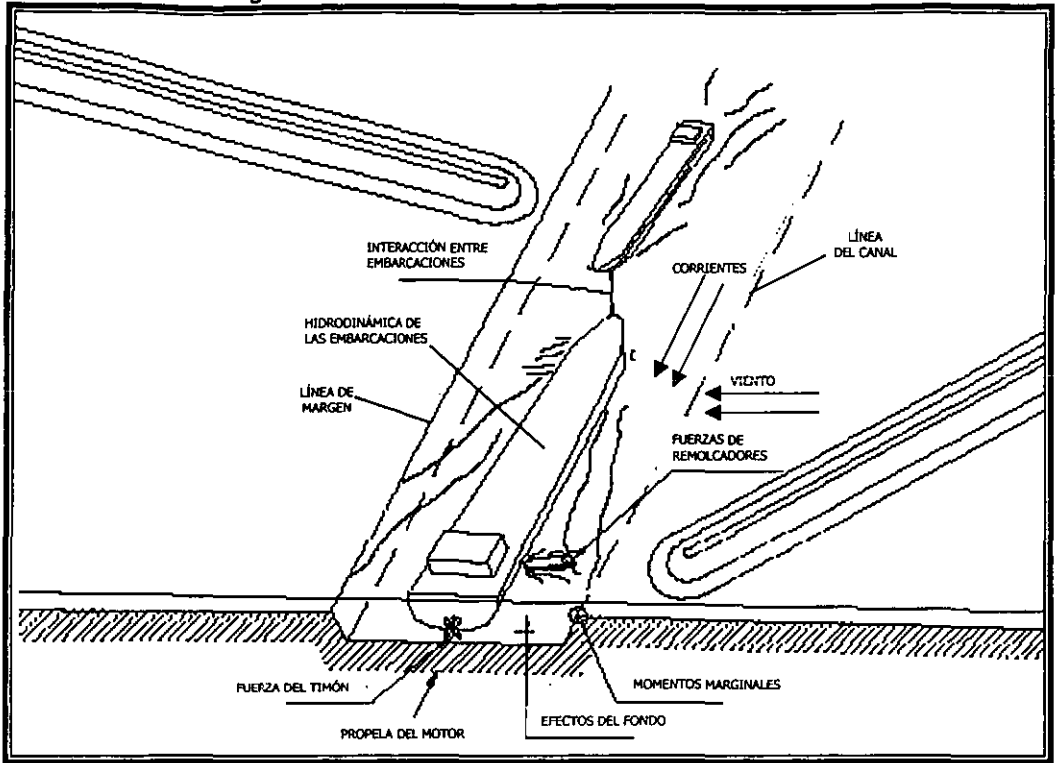
Como se mencionó anteriormente, parte importante de un simulador la constituyen los modelos de respuesta de las embarcaciones (*Figura 2.4.E*), los cuales, basados en el desarrollo y aplicación de un modelo hidrodinámico para un tipo determinado de embarcación, permiten:

- a) Calcular las fuerzas que actúan sobre la embarcación particular a la cual corresponde el modelo de respuesta. Estas fuerzas están asociadas a la interacción que la embarcación tiene con diversos factores, naturales o asociados a las mismas maniobras, tales como la inercia, el viento actuando sobre la superficie de exposición del barco, la dirección de incidencia y magnitud del oleaje y corrientes con respecto a los ejes principales del barco, la cercanía de otras embarcaciones, el fondo marino o fronteras de tierra, las fuerzas ejercidas por defensa, ganchos de amarre, etc.
- b) Determinar el efecto dinámico que tienen estas fuerza sobre la capacidad de maniobra y control de la embarcación.
- c) Reproducir de manera compatible las acciones que el capitán del barco debe desarrollar para controlar el movimiento del buque y maniobrar adecuadamente, tales como operación de máquinas, acción de propelas, timones y thrusters.
- d) Reproducir y simular las acciones externas, tales como la asistencia de remolcadores.

Los modelos de respuesta consideran la aplicación para cada intervalo de tiempo de la segunda ley de Newton en los ejes transversal y longitudinal de la embarcación, traduciéndose en movimientos lineares y angulares hasta en 6 grados de libertad (3 en el plano vertical: arzada, cabeceo y balanceo, y 3 en el plano horizontal: vaivén, deriva y guiñada), como se ilustra en la *Figura 2.1.G* de la Sección 2.1.4.

Cada modelo de respuesta es característico de un tipo de embarcación, ya que en la determinación de las fuerzas intervienen diversas variables que son función específica de las características particulares de la embarcación, tales como los coeficientes de arrastre, empuje, potencia de motores, capacidad angular de movimiento de timones, etc. Estas variables generalmente son determinadas mediante modelación física en túneles de viento, información particular del fabricante de equipos y máquinas, etc., y en el modelo de respuesta se hacen interactuar con respecto al tiempo mediante técnicas probabilísticas o de interpolación matemática de las funciones que definen su comportamiento.

Figura 2.4.E – Fuerzas Modeladas en un Simulador

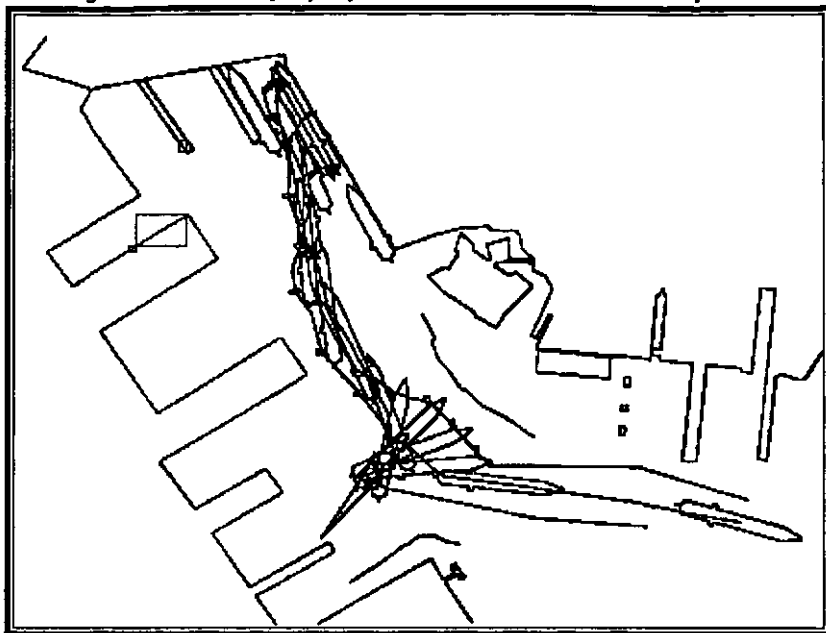


FUENTE: Ponencia – Diseño y Verificación de Áreas Portuarias de Navegación a través de Técnicas de Simulación de Tiempo Real. CYTSA, II Congreso Internacional de la AMIP, 1998.

Algunos simuladores permiten reproducir analítica y gráficamente hasta 22 efectos, que involucran más de 5,000 variables que se traducen en fuerzas actuantes y reactivas, mismas que pueden variar imperceptiblemente con respecto al tiempo o ser completamente sensibles a él.

Asimismo, como resultado de los modelos de respuesta de una embarcación en la simulación de una maniobra determinada, es posible obtener y monitorear el comportamiento de elementos tales como máquinas, timones, thrusters y remolcadores, proporcionando información valiosa para la evaluación objetiva de la maniobra y de sus ejecutores. La *Figura 2.4.F* muestra la forma en que, típicamente, son expresados gráficamente los resultados de una corrida de simulación en tiempo real.

Figura 2.4.F – Display Típico de un Simulador de Tiempo Real



FUENTE: Ponencia – Diseño y Verificación de Áreas Portuarias de Navegación a través de Técnicas de Simulación de Tiempo Real. CYTSA, II Congreso Internacional de la AMIP, 1998.

2.4.3 EXPERIENCIA DEL OPERADOR (PILOTO)

En el caso de los simuladores de tiempo rápido, la experiencia del operador en el campo de la navegación no es el factor más importante, ya que la diferencia entre una maniobra efectuada en tiempo real y su comportamiento en una simulación de tiempo rápido es muy amplia como para elaborar un juicio con base en esta experiencia. Por lo tanto, es común que los operadores de este tipo de simuladores sean profesionales con amplio criterio y conocimiento del funcionamiento y de los procesos matemáticos que implica la simulación de tiempo rápido, además de estar familiarizados con la ejecución de las maniobras (sin necesidad de ser expertos en navegación como son los pilotos).

En los simuladores de tiempo real, la experiencia del operador en la navegación es de suma importancia para el buen desempeño de las corridas, ya que el proceso de simulación implica la realización de maniobras tal y como se efectuarían en condiciones reales, bajo la influencia de factores ambientales (viento, corrientes, oleaje, etc.) y

humanos o artificiales (remolcadores, ayudas a la navegación, etc.). Por esto, la mayoría de las veces los encargados de operar los simuladores de misión completa son pilotos u oficiales experimentados en el manejo de embarcaciones y conocedores del puerto o zona en estudio, para que los resultados sean confiables y se acerquen lo más posible a la realidad.

2.4.4 INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Como se mencionó en la Sección 2.4.2, la interpretación de los resultados obtenidos a partir de una simulación de tiempo rápido se basa en el análisis estadístico de éstos. Además, es realmente importante tomar en cuenta que el operador humano percibe los movimientos de tiempo rápido de manera diferente a los movimientos de tiempo real, especialmente cuando los movimientos de tiempo real son exageradamente lentos (como cuando un buque – tanque comienza a girar), por lo que el operador debe tener amplia experiencia y juicio en el campo de la simulación de tiempo rápido.

Por lo tanto, lo ideal sería que todo diseño elaborado en simuladores de tiempo rápido sea complementado con simulaciones de tiempo real, y si esto no es posible, que los resultados de la simulación de tiempo rápido sean criticados constructivamente por pilotos con experiencia reciente en el área o en la embarcación en cuestión.

En el caso de los simuladores de tiempo real, la valoración de los resultados se basa en los comentarios que hagan los pilotos expertos sobre el modelo, al igual que en el éxito o la dificultad que conlleve la realización de una maniobra bajo ciertas condiciones ambientales, considerando las dimensiones (existentes o propuestas) del área de navegación en estudio, así como los obstáculos (muelles, escolleras, bancos, otras embarcaciones, etc.) que se propongan en el modelo.

Así concluye el presente capítulo, el más extenso del documento, debido a que las innovaciones referentes al dimensionamiento portuario son muchas, a pesar de que aún se puede profundizar en la mayoría de los temas descritos. Sin embargo, la información aquí presentada constituye una sólida base para comprender el proceso de dimensionamiento de las áreas de navegación que actualmente se utiliza en los puertos más importantes y desarrollados del mundo.

Como se pudo apreciar, el diseño de las áreas de navegación de un puerto es cada vez más complejo, y se requiere el uso de diversas herramientas que se apoyan en los avances tecnológicos para su óptima ejecución.

En el Capítulo III se analizan los avances referentes a la operación portuaria, que en realidad, constituyen un complemento del presente capítulo, ya que la mayoría de los criterios actualmente utilizados en el dimensionamiento portuario son los mismos, o muy similares, a los aplicados en el análisis y planeación de la operación en las terminales portuarias.

CAPÍTULO III

NUEVOS CRITERIOS PARA LA REVISIÓN DE LA OPERACIÓN MARÍTIMA EN LOS PUERTOS

Después de haber analizado los criterios modernos aplicados en el dimensionamiento de las áreas de navegación de un puerto, es conveniente estudiar los aspectos relacionados con la operación marítima, cuestión fundamental para mejorar el funcionamiento de las terminales portuarias existentes y que, en general, es un tema mucho más requerido y aplicado en el ámbito mundial debido a que las naciones prefieren optimizar la operación de sus puertos en vez de construir nuevas terminales, dado el costo que esto último implica.

La operatividad marítima de un puerto se refiere a la existencia de las condiciones ambientales propicias para que las maniobras de navegación en canales y dársenas puedan ejecutarse, así como al proporcionamiento de las facilidades necesarias a las embarcaciones para llevar a cabo dichas maniobras, como son los equipos de remolque y las ayudas a la navegación.

Normalmente se establece como meta de operatividad un porcentaje del tiempo anual en el cual se pretende que el puerto esté abierto y en condiciones favorables, tanto para la navegación como para poder realizar las operaciones de carga y descarga en los muelles. Los porcentajes de operatividad pretendidos por cualquier puerto o instalación marítima a nivel mundial están enfocados a alcanzar valores mayores del 95% del tiempo anual, en otras palabras, la tendencia es reducir al mínimo el porcentaje de inoperatividad de las terminales portuarias.

Debido a lo anterior, se han desarrollado nuevos criterios para la revisión de la operación marítima en los puertos, apoyados en los avances tecnológicos actuales, dentro de los que destacan los simuladores de navegación, con base en los cuales es posible establecer los criterios de operación de manera confiable, con la ventaja de que se pueden evaluar un amplio número de alternativas y de variables a un costo bajo en relación con la inversión que implicaría llevar a cabo mejoras o medidas correctivas que, si no son

valoradas con anticipación, pueden resultar inútiles y extremadamente costosas para el puerto.

En el presente capítulo se estudian los criterios de operación actuales, presentados en dos secciones. La primera profundiza los aspectos que intervienen en la operación y en la maniobrabilidad de las embarcaciones; la segunda está enfocada al uso de la simulación como herramienta para la revisión de la operación portuaria.

3.1 FACTORES QUE AFECTAN LA OPERACIÓN Y MANIOBRABILIDAD DE LOS BUQUES

La operación adecuada de las áreas de navegación de un puerto depende de una gran cantidad de factores que, en su conjunto, influyen en la maniobrabilidad de las embarcaciones que hacen uso de las instalaciones portuarias, como son el tamaño de los buques, los servicios de remolque ofrecidos por el puerto, las ayudas a la navegación con que se cuente, las condiciones ambientales de la zona y la experiencia de los pilotos del puerto principalmente. De esta forma, dado que los barcos son los usuarios de dichas áreas y por lo tanto los principales "clientes" del puerto, las autoridades deben procurar que las condiciones de navegación sean seguras la mayor parte del tiempo, para que la actividad del puerto sea continua y redituable económicamente.

Como ya se mencionó en el capítulo anterior, la mayoría de los adelantos aplicados en la evaluación de la operación de un puerto son similares a aquellos utilizados para el dimensionamiento portuario, sobre todo en lo que se refiere al análisis de los factores que influyen en la maniobrabilidad de las embarcaciones, tema primordial de esta sección y que se discute a continuación.

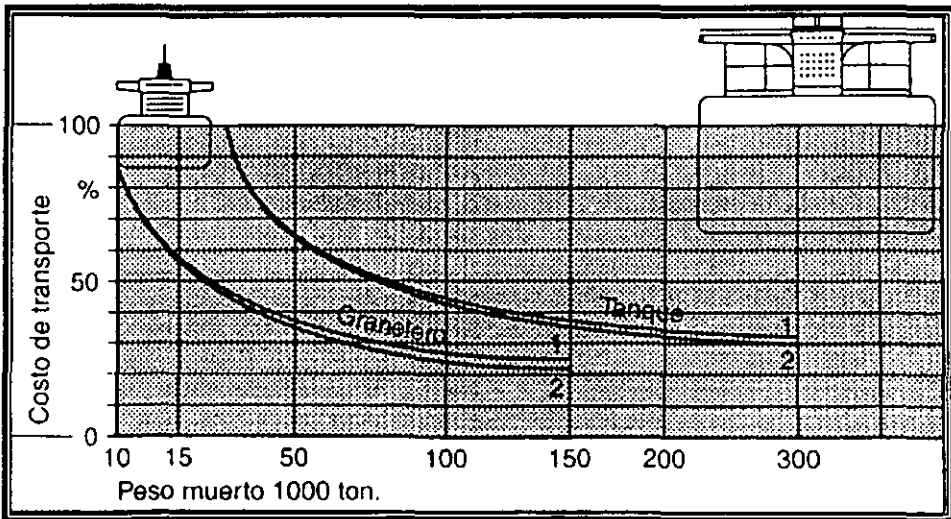
3.1.1 RESTRICCIONES DEBIDO AL CRECIMIENTO DE LAS EMBARCACIONES

Como consecuencia del proceso de globalización, de la eliminación de las barreras comerciales, de las políticas tarifarias del movimiento de carga y de la evolución mundial

de los centros concentradores de industrias, manufactura y consumo, el transporte marítimo de carga ha experimentado un importante crecimiento en los últimos años. En particular, el transporte especializado de carga contenerizada es el que posee mayores expectativas de desarrollo, ya que del total de la carga mundial, actualmente el 55% de ella se mueve a través de contenerización, y diversos estudios consideran que para el año 2010 el 90% de la carga será movida en contenedores. Además, en la última década la carga contenerizada creció en el ámbito mundial con una tasa anual del 9.5%.

Por lo anterior, cada vez es más intenso el tráfico de contenedores, como respuesta a los índices de crecimiento de carga. A la par de este crecimiento, la evolución del transporte marítimo propicia que el costo por tonelada de transporte o por TEU disminuya a medida que aumenta la capacidad de la embarcación, lo cual conlleva a la evolución de los barcos en cuanto a capacidad y tamaño, como lo ejemplifica la *Figura 3.1.A* para buques – tanque y graneleros.

Figura 3.1.A – Costo de Transporte por Tonelada de Carga como Función del Tamaño del Barco



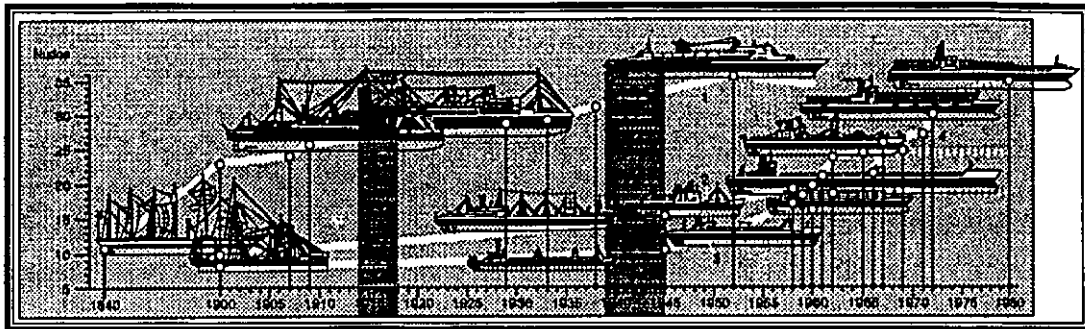
(1) 5,000 Millas náuticas de viaje (2) 25,000 Millas náuticas de viaje

FUENTE: *Operación, Administración y Planeación Portuarias*. Héctor López Gutiérrez, 1999.

De hecho, suponiendo que existe una adecuada infraestructura portuaria, para el año 2010 se estima que cerca del 33% de la carga general será transportada de manera

contenerizada en buques de más de 4,000 TEUs de capacidad. Para mover el importante volumen de carga contenerizada pronosticado, diversas líneas navieras han desarrollado la estrategia de construir embarcaciones cada vez mayores, con la expectativa de que el incremento en tamaño y velocidad reducirá el costo de transporte por TEU. La *Figura 3.1.B* presenta la evolución de la velocidad de los barcos con el paso del tiempo.

Figura 3.1.B – Evolución de la Velocidad de los Barcos



(1) Pasajeros (2) Carga general (3) Tanques (4) Portacontenedores

FUENTE: *Operación, Administración y Planeación Portuarias*. Héctor López Gutiérrez, 1999.

Sin embargo, también es importante señalar que, desde el punto de vista tecnológico, actualmente existen límites al crecimiento de las embarcaciones: a pesar de que éstas son técnicamente factibles manejando capacidades entre 7,000 y 9,000 TEUs, existen dificultades importantes para mantener la velocidad requerida para que el proceso sea rentable (24 nudos ó 44.5 km/h) y realmente se obtenga una reducción en los costos de transportación por TEU.

Los beneficios que representa el incremento en el tamaño de las embarcaciones a nivel de economía de escala, origina que la tendencia esté dirigida al incremento en el porcentaje de carga manejada por barcos de gran capacidad, siempre y cuando existan las condiciones apropiadas para el manejo y operación de este tipo de navíos.

Los párrafos precedentes, complementados y apoyados con la información del Capítulo I, confirman que las características físicas y operativas de las embarcaciones cambian al incrementar su capacidad. Es evidente que el crecimiento acelerado que han experimentado las embarcaciones en los últimos tiempos provoca que la maniobrabilidad dentro de las áreas de navegación de los puertos en funcionamiento, sobre todo en los de

mayor antigüedad, se complique e incluso se imposibilite. Este es un problema que la mayoría de los puertos debe evaluar tanto operacional como financieramente, para decidir si es conveniente realizar una modernización integral de sus zonas de agua, lo cual conlleva gastos de dragado para aumentar su profundidad, una probable ampliación de las posiciones de atraque (muelles) para dar cabida a buques de magnitudes mayores, las consecuentes transformaciones de las áreas de tierra como patios y bodegas, una mayor capacidad de carga y descarga (grúas, tractores, etc.) y el mejoramiento de las conexiones con el transporte terrestre.

Lo anterior debe compararse con los beneficios económicos, sociales (por ejemplo, creación de empleos) e incluso políticos que genera la ampliación de las áreas de navegación del puerto para permitir el acceso a embarcaciones de mayor tamaño, evaluando de este modo la factibilidad del proyecto.

De esta manera, el crecimiento de las embarcaciones implica una serie de restricciones en la operación y en la maniobrabilidad de los buques, dentro de las cuales destacan las siguientes:

- a) Un mayor calado de las embarcaciones significa la disminución de la relación profundidad/calado, que provoca el aumento en el radio de giro de las embarcaciones, tanto en las curvas de un canal de navegación como en las maniobras de diaboga, la disminución de la capacidad de respuesta de las naves con la consecuente fijación de su curso, el incremento del squat y finalmente la necesidad de ampliar la profundidad de las áreas de navegación asumiendo el costo de dragado correspondiente.
- b) El aumento en las dimensiones de la manga de los buques ocasiona que, en canales de doble vía, se restrinja la circulación a una sola embarcación en caso de que se excedan las dimensiones de diseño; para canales de una vía, el límite de seguridad se verá reducido. Si se exceden los límites de seguridad para las embarcaciones, se debe contemplar una ampliación de los márgenes de las áreas de navegación, la cual dependerá de las estructuras, posiciones de atraque y otros elementos que se encuentren en los extremos, así como de la magnitud de la inversión necesaria.
- c) Las dimensiones de la eslora son la base para determinar la magnitud de los radios de giro, la longitud de los canales de navegación y, obviamente, el tamaño de las posiciones de atraque. Por esto un aumento en la longitud de la eslora de los navíos

requerirá especial cuidado en las maniobras de ciaboga, así como en la maniobra de frenado debido a la necesidad de una distancia de parada más larga. Además, al aumentar el tamaño de la eslora, la superficie vélica y el área sumergida crecen, por lo que el efecto del viento y de las corrientes transversales sobre el barco es mucho mayor.

Las restricciones anteriores requieren que las medidas de seguridad y los límites operacionales para los buques de grandes dimensiones sean mucho más estrictas que para embarcaciones de menor tamaño, sobre todo en puertos que no contemplan en su diseño la operación de naves de tal magnitud (por lo general mayores a las 50,000 TPM).

Sin embargo existen nuevos sistemas de propulsión que, a pesar de las enormes dimensiones de los buques, facilitan su maniobrabilidad, como son las propelas laterales o "thrusters" y la propelas tipo "azipod", ambas descritas en la sección 2.1.1 del Capítulo II. Es por esto que para autorizar el ingreso de una embarcación al puerto, se debe considerar, en primer lugar, la magnitud de sus dimensiones principales, y en segundo lugar, el equipo con que cuente el barco para maniobrar, y con base en estos factores las autoridades portuarias decidirán si las condiciones de operación y la capacidad de las áreas de agua son suficientes para permitir una navegación segura y eficiente.

Finalmente, cuando las áreas de navegación son utilizadas por diferentes tipos de embarcaciones (portacontenedores, cruceros, graneleros, etc.), generalmente es necesario aplicar diferentes reglas y criterios de operación para cada clase de buque. Adicionalmente, las autoridades portuarias deben tomar en cuenta otro tipo de características de las embarcaciones, como por ejemplo su tonelaje, ya sea de peso muerto o bruto. De igual forma, los barcos deben clasificarse de acuerdo a la carga que transportan, en aquellos con carga de alta densidad (carga pesada) como los graneleros, y aquellos con carga de baja densidad (elevado volumen de carga) como los portacontenedores, cruceros o barcos especializados en transporte de gas. Los primeros se caracterizan por tener un calado profundo y una superficie vélica baja; los segundos por poseer un calado pequeño y una superficie vélica alta. El tonelaje de peso muerto es una medida razonable para los primeros; el tonelaje bruto para los segundos. Las autoridades portuarias podrán hacer una estimación de las dimensiones principales (calado, eslora y manga) del barco, así como del área vélica, con base en el tipo, peso y

carga de la embarcación, para determinar las reglas de operación necesarias y apoyar al piloto en las maniobras dentro del recinto portuario.

La presente sección, conjuntamente con la información referente a la evolución del transporte marítimo y a las tendencias de crecimiento de los buques contenida en los capítulos previos, proporciona un amplio panorama de la influencia que tiene actualmente el desarrollo de las embarcaciones en el dimensionamiento portuario, y de las restricciones que esto implica para una operación eficiente de las instalaciones portuarias, principalmente de las áreas de navegación.

3.1.2 EQUIPOS DE REMOLQUE

En el ámbito de la operación portuaria, el servicio de remolque tiene por objeto auxiliar a los barcos en las operaciones de fondeo (cuando el barco se detiene y permanece en espera de que se le autorice o haya muelle disponible para que atraque), a la entrada y salida del puerto hasta que atraque o a partir de que desatraque y salga, así como cuando, estando atracado, se requiere que el barco cambie de muelle por necesidades operativas o por disposición de la autoridad, todo lo anterior con objeto de garantizar la seguridad en la navegación dentro de los límites del puerto.

Normalmente la autoridad establece a partir de qué tonelaje de arqueo bruto será obligatorio el uso de remolcadores en el puerto. La operación de remolque requiere de una cierta potencia de los remolcadores, y básicamente se realiza jalando al barco o empujándolo. Quienes proporcionen el servicio de remolque también deberán auxiliar en casos de incendio y de salvamento.

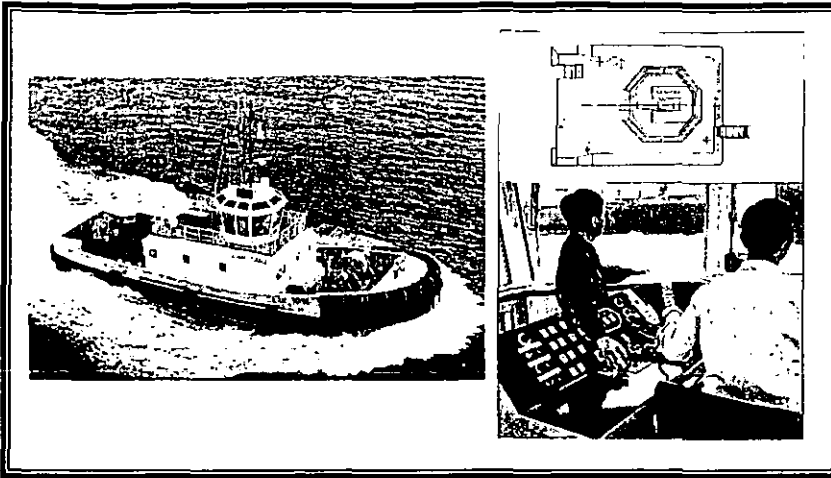
Existen algunos requerimientos generales para lograr una ejecución adecuada de las maniobras de remolque y garantizar la seguridad de los navíos y de los remolcadores, entre los que destacan los siguientes:

- a) Tiempo de respuesta: Es conveniente que los remolcadores posean un tiempo de respuesta corto, por lo que su maniobrabilidad debe ser tal que les permita reaccionar lo más pronto posible. Inclusive es necesario que las maniobras de amarre se efectúen rápidamente, ya que debido a la tendencia de disminución en el número de miembros

de la tripulación de los barcos, el tiempo requerido para el amarre está aumentando. Por esto se recomienda la instalación de equipos de conexión modernos y de fácil uso en los remolcadores.

- b) Efectividad y seguridad de las operaciones: Además de la maniobrabilidad, factores como la potencia de remolque (en inglés "bollard pull") y el diseño de la estructura sumergida son importantes para que un remolcador sea efectivo y por lo tanto adecuado para la realización del trabajo requerido. Por ejemplo, los buques portacontenedores de grandes dimensiones (con seis filas de contenedores de altura en cubierta) necesitan la asistencia de remolcadores muy potentes en caso de vientos fuertes. Cuando un barco navega a una cierta velocidad, la pérdida de la efectividad de los remolcadores debido a la velocidad de la embarcación y/o a la dirección de remolque debe ser la menor posible. La efectividad y la seguridad de los remolcadores se relacionan también con factores como la estabilidad y conveniencia de los equipos de remolque.
- c) Espacio de maniobra: Una maniobrabilidad adecuada, el uso del equipo de remolque correcto y la limitación en sus dimensiones permiten que el espacio de maniobra sea lo más reducido posible, lo cual es conveniente para disminuir las dimensiones necesarias para la operación en las áreas de navegación.
- d) Construcción y disposición del puente de mando: El puente de mando de los remolcadores, conocido como "wheelhouse", debe ser colocado y construido de tal forma que, desde su estación de maniobra, el capitán del remolcador pueda divisar los límites de la proa, de la popa y de los costados de su nave, y que tenga una vista adecuada de la línea y del equipo de remolque, de la cubierta de operaciones, del área de contacto entre el remolcador y el barco, de la embarcación asistida y de los otros remolcadores que llevan a cabo la asistencia. Lo anterior implica un campo de visión en la estación de maniobra de 360° con la menor obstrucción posible, y la existencia de pequeñas ventanillas en la parte superior de la cabina para observar las maniobras de amarre, dada la mayor altura de los barcos asistidos (*Figura 3.1.C*).

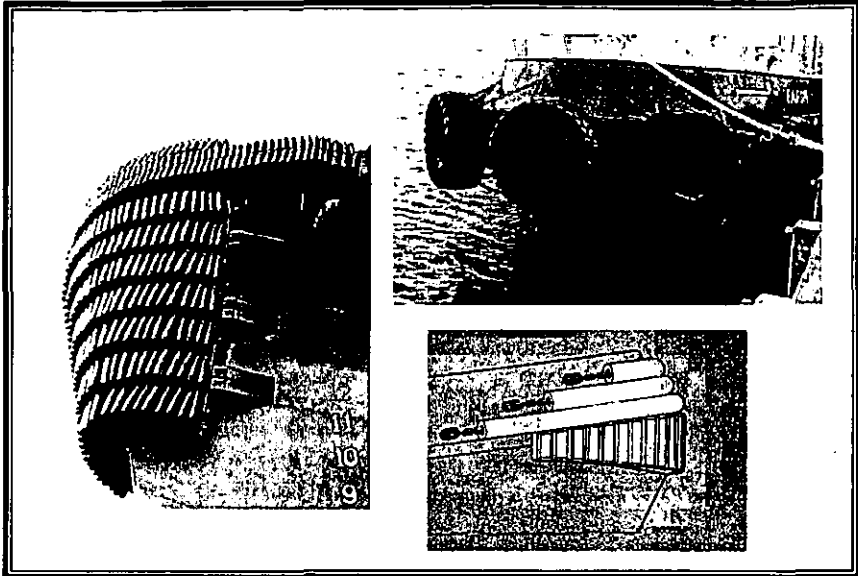
Figura 3.1.C – Vista del Punte de Mando de un Remolcador



FUENTE: *Tug Use in Port. Captain Henk Hensen. The Nautical Institute – Port of Rotterdam, Inglaterra, 1997.*

- e) Comunicación: Una buena cooperación entre el piloto de la embarcación y el capitán del remolcador es un requerimiento básico para la seguridad y eficiencia en las maniobras de asistencia con remolcadores. Dicha cooperación solamente es posible con procedimientos bien establecidos y con sistemas de comunicación eficientes, constituidos normalmente por sistemas de radiocomunicación.
- f) Diseño de la superestructura y de la estructura sumergida del remolcador: Dado que los remolcadores regularmente trabajan cerca de la proa o de la popa de las embarcaciones, es necesario que la superestructura se localice totalmente dentro de los límites de la cubierta para evitar daños causados por impactos con los barcos asistidos. La estructura sumergida debe diseñarse de tal manera que las unidades de propulsión no golpeen el casco de los buques al momento de efectuar las maniobras de asistencia.
- g) Defensas: Los remolcadores deben estar equipados con defensas eficientes, que funcionan como protección tanto para el barco asistido como para el remolcador. Las defensas están fabricadas de caucho u otros materiales sintéticos, y se diseñan tomando en cuenta las solicitudes de carga, las deformaciones, la absorción del impacto y los requerimientos estructurales de los navíos (*Figura 3.1.D*).

Figura 3.1.D – Ejemplos de Defensas en Remolcadores



FUENTE: *Tug Use in Port. Captain Henk Hensen. The Nautical Institute – Port of Rotterdam, Inglaterra, 1997.*

Por otro lado, dependiendo del puerto que se trate, el servicio a las embarcaciones puede consistir en la asistencia con remolcadores durante el tránsito hacia o desde un muelle, incluyendo operaciones de atraque y desatraque, o en la asistencia con remolcadores únicamente en las operaciones de atraque y desatraque.

Para definir hasta qué punto es necesaria la asistencia con remolcadores, se toma en cuenta el tipo de embarcación y su tamaño, incluyendo su calado, la relación eslora/manga, las condiciones de carga, el área vélica y su maniobrabilidad. También se consideran las características del área de atraque y de las áreas de navegación aledañas, incluyendo el tipo y tamaño del muelle, su alineamiento, el espacio de atraque y de las zonas contiguas, la dimensión de las dársenas, la profundidad, la influencia del viento y de las corrientes. Por último, es necesario analizar el ancho, longitud y profundidad del canal de navegación, así como su alineamiento (las curvas en la ruta), la velocidad máxima permisible, las expectativas de tráfico, las condiciones de rebase y la influencia de factores ambientales como las corrientes, el viento, el oleaje, las mareas y la existencia de bancos en el fondo.

La diferencia más importante entre la asistencia durante las maniobras de atraque y desatraque y la asistencia durante el tránsito radica en la velocidad de las embarcaciones, que es el factor de mayor relevancia para seleccionar el tipo de remolcador y el método de asistencia más apropiado. En la mayor parte de la ruta de tránsito la velocidad de las naves oscila entre 3 y 6 nudos (es una velocidad relativamente baja, aunque algunas veces llega a ser mayor) por lo que la influencia del viento, las corrientes y el oleaje es más pronunciada, aumentando el ángulo de deriva y disminuyendo la capacidad de respuesta del timón. Por el contrario, la velocidad durante las maniobras de atraque y desatraque normalmente tiende a ser nula y la operación de los remolcadores no se ve afectada por dicha velocidad, sin embargo se debe controlar el movimiento de la embarcación y la influencia de los factores ambientales.

En lo que concierne a los métodos de asistencia que se usan alrededor del mundo, principalmente se pueden mencionar dos: asistencia con remolcadores tirando en línea, y asistencia con remolcadores operando al costado del buque. En los puertos europeos generalmente se emplea el método de remolque en línea, mientras que en Estados Unidos y el Pacífico Oriental los puertos normalmente utilizan la operación al costado del barco, aunque esto depende de las condiciones locales y del tipo de remolcadores, llevándose a cabo incluso una combinación de ambos métodos. Estos métodos de asistencia habitualmente son aplicados de las siguientes maneras:

- a) Remolcadores al costado del buque durante la aproximación al muelle, y empujando o aplicando la técnica push – pull durante la maniobra de atraque.

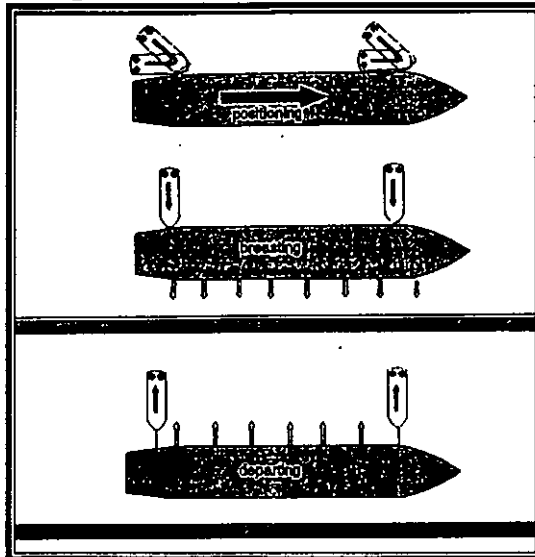
En cuanto al procedimiento de este método de asistencia, los remolcadores trabajan al costado del barco para posicionarlo paralelamente a zona de atraque, y posteriormente llevarlo al costado del muelle (*Figura 3.1.E*). Cabe resaltar que la técnica push – pull consiste en empujar y jalar a la embarcación para controlar su alineamiento.

Por otra parte, los remolcadores se amarran al costado de la nave con una, dos o tres líneas, dependiendo del tipo de equipo, la situación local y la asistencia requerida.

- b) Remolcador de proa al costado del barco y remolcador de popa tirando en línea durante la aproximación al muelle, y aplicando la técnica push – pull durante el atraque.

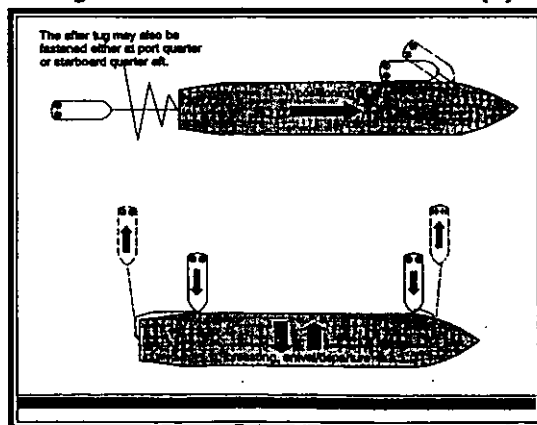
Este método no difiere mucho del anterior, ya que primero se posiciona la embarcación y después se acerca al puesto de atraque. El remolcador de popa se encarga de dirigir y controlar la velocidad del buque, y durante la maniobra de atraque los remolcadores cambian a la técnica push – pull (*Figura 3.1.F*).

Figura 3.1.E – Método de Asistencia (a)



FUENTE: *Tug Use in Port. Captain Henk Hensen. The Nautical Institute – Port of Rotterdam, Inglaterra, 1997.*

Figura 3.1.F – Método de Asistencia (b)

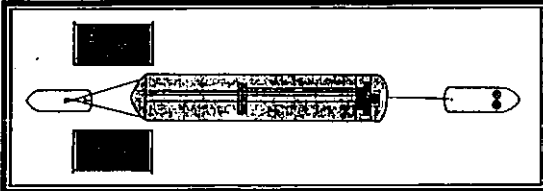


FUENTE: *Tug Use in Port. Captain Henk Hensen. The Nautical Institute – Port of Rotterdam, Inglaterra, 1997.*

c) Remolcadores tirando en línea durante la aproximación al muelle y durante el atraque.

Es el método más común cuando se cuenta con remolcadores convencionales en el puerto, y se utiliza en áreas de navegación con espacio limitado. También se utiliza en maniobras de paso a través de puentes, esclusas u otras áreas reducidas (*Figura 3.1.G*).

Figura 3.1.G – Método de Asistencia (c)

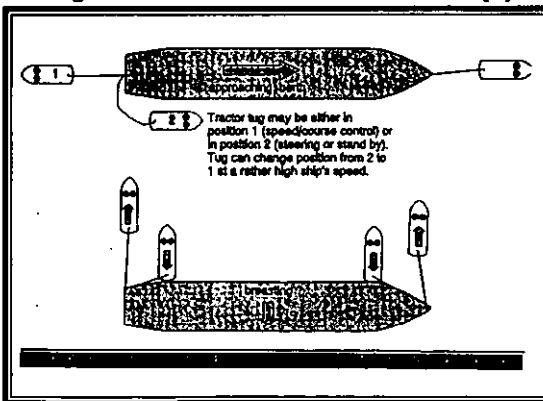


FUENTE: *Tug Use in Port. Captain Henk Hensen. The Nautical Institute – Port of Rotterdam, Inglaterra, 1997.*

d) Remolcadores tirando en línea durante la aproximación al muelle, y aplicando la técnica push – pull durante el atraque.

Este método es común en puertos que poseen equipos de remolque de alta maniobrabilidad, como remolcadores tipo tractor, tractor en reversa o ASD (*Figura 3.1.H*).

Figura 3.1.H – Método de Asistencia (d)

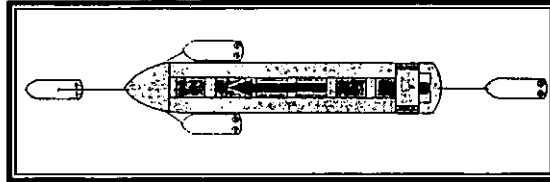


FUENTE: *Tug Use in Port. Captain Henk Hensen. The Nautical Institute – Port of Rotterdam, Inglaterra, 1997.*

e) Combinación de los sistemas descritos con anterioridad.

Cuando las embarcaciones son muy grandes, se requiere la asistencia de más de dos remolcadores, ya que las maniobras de entrada al puerto y de atraque se vuelven extremadamente complejas. Un ejemplo de un método combinado se muestra en la *Figura 3.1.I*.

Figura 3.1.I – Método de Asistencia (e)

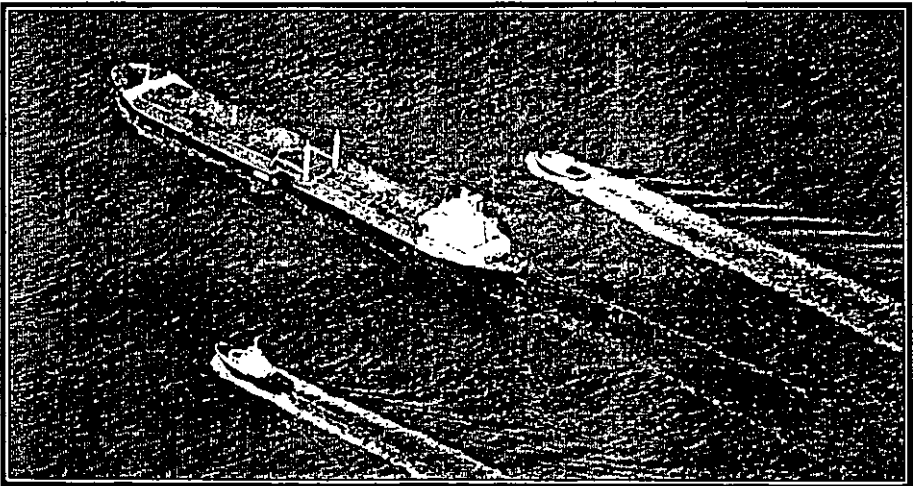


FUENTE: *Tug Use in Port. Captain Henk Hensen. The Nautical Institute – Port of Rotterdam, Inglaterra, 1997.*

f) Remolcadores escoltando.

Los remolcadores escoltan una embarcación particularmente cuando los puertos están situados a lo largo de ríos y canales o poseen sistemas de esclusas, cuando los buques poseen una maniobrabilidad limitada debido a problemas en las máquinas o el timón o en condiciones climáticas adversas (*Figura 3.1.J*).

Figura 3.1.J – Remolcadores Escoltando una Embarcación



FUENTE: *Tug Use in Port. Captain Henk Hensen. The Nautical Institute – Port of Rotterdam, Inglaterra, 1997.*

Como se aprecia, existe una relación estrecha entre el tipo de remolcador y el método de asistencia utilizado, ya que un factor esencial es la conveniencia de operar un remolcador al costado del barco, tirando en línea o ambos.

Por otro lado el número de remolcadores y la potencia de remolque total utilizada, normalmente se basa en la experiencia de los pilotos y varía dependiendo de las condiciones en el puerto y de las circunstancias, sin embargo, con el incremento en el tamaño de los navíos es cada vez más difícil determinar con precisión el tipo de asistencia necesaria para manejar un barco con seguridad. Para definir la potencia de remolque requerida, influyen factores como las particularidades del puerto y sus instalaciones, las características constructivas del muelle, el tipo de embarcación asistida y su propulsión, las condiciones ambientales y el método de remolque aplicado.

La obtención de la potencia de remolque necesaria en diferentes condiciones de viento, corrientes y oleaje se logra por medio de métodos numéricos y gráficos de cálculo, que relacionan factores como el área vélica, el área sumergida, la dimensión de la eslora, la relación profundidad/calado, etc. con las características ambientales (velocidad del viento, velocidad de las corrientes y altura de ola). Adicionalmente se debe tomar en cuenta el efecto de la masa del barco y de las características de los muelles, el cual depende de la velocidad de la embarcación, del desplazamiento y de la distancia de parada. Una explicación detallada de estos métodos puede consultarse en el libro *Tug Use in Port*, Capitán Henk Hensen, The Nautical Institute (1997), Londres.

Para finalizar esta sección, es importante hacer notar que, así como se han presentado desarrollos tecnológicos importantes en las embarcaciones de carga, del mismo modo los remolcadores han experimentado avances significativos en los sistemas de propulsión (los remolcadores con propulsión omnidireccional gradualmente están remplazando a las unidades convencionales), que se reflejan en el incremento de la potencia de remolque y, como consecuencia, en mangas de mayores dimensiones.

Con el desarrollo de los remolcadores y la posibilidad de representar su operación por medio de simuladores, la seguridad en las maniobras portuarias se ha convertido en un aspecto clave para la selección de los métodos de asistencia y los equipos de remolque adecuados.

3.1.3 AYUDAS A LA NAVEGACIÓN

Las ayudas a la navegación son todos aquellos elementos que, por medio de señales visuales o auditivas, apoyan al piloto de la embarcación para lograr la evolución correcta de las maniobras dentro de las áreas portuarias, así como en la conducción de la nave en mar abierto.

La tendencia actual en este campo es la aplicación de sistemas basados en el uso de programas de cómputo, de las telecomunicaciones y de la tecnología de posicionamiento vía satélite, como se menciona en el Capítulo II de este trabajo. Estos sistemas, genéricamente, se conocen como VTS ("Vessel Traffic Services"), y constituyen un servicio de consulta e información para los marinos de los barcos que pasan a través del área de cobertura del sistema (área VTS).

Las principales funciones de los sistemas VTS, de acuerdo con definiciones del IALA ("International Association of Lighthouse Authorities") son las siguientes:

- a) Información del tráfico: Este servicio incluye la transmisión de información relevante generada por las autoridades portuarias hacia los barcos.
- b) Organización del tráfico: Es un servicio que establece las reglas básicas para el tráfico de las embarcaciones dentro de un área determinada y que controla el tráfico acorde con estas reglas.
- c) Asistencia a la navegación: Consiste en proporcionar a los barcos las recomendaciones y consideraciones necesarias con respecto a la forma de navegar a través del área VTS.

Un requisito para el funcionamiento del sistema es el conocimiento del tráfico y de las condiciones marítimas. El tráfico se caracteriza por el movimiento de los buques que navegan en el área VTS, así como por los arribos y salidas inminentes; los aspectos ambientales incluyen el clima y las condiciones oceanográficas. Además es necesario que exista una comunicación eficiente con los barcos dentro del área VTS.

El monitoreo del tráfico marítimo se lleva a cabo en el centro VTS, lugar en el que se recibe y procesa la información proveniente de las naves, captada en zonas dentro del área VTS conocidas como puntos de reporte ("reporting in points") que son sistemas de

radar ubicados estratégicamente. Aún así, en caso de que no sea posible identificar a las embarcaciones por otros medios, la confirmación del nombre de los barcos se debe efectuar (si el clima lo permite) por medio de reconocimientos aéreos constantes.

En los sistemas de este tipo, el control total de la embarcación es responsabilidad del capitán a lo largo del recorrido (apoyado en su momento por el piloto de puerto), mientras que dentro de las instalaciones portuarias, el centro VTS requiere que el barco se adapte a ciertas condiciones para la operación segura del puerto, como por ejemplo adecuarse a los límites de velocidad, permanecer al costado de la zona de navegación cuando esté anclado, y no sobrepasar un punto dado hasta que se le asigne la distancia de tolerancia (distancia entre dos embarcaciones).

Como se mencionó anteriormente, en esta clase de ayudas a la navegación se aplica un control a los navíos por medio de sistemas de radar, con los cuales son etiquetados los buques en arribo a través de un identificador que permanece asignado al barco durante la totalidad de su estancia en el puerto. A menudo se genera una señal digital, que despliega visualmente en la pantalla VTS los movimientos de las embarcaciones cada determinado tiempo, por lo que se dispone de un monitoreo de todas las actividades y maniobras realizadas en las áreas de navegación.

Del mismo modo, un elevado número de barcos en la actualidad son rastreados por medio de sistemas de navegación satelitales (como el DGPS) que indican su posición con una gran precisión. En combinación con cartas de navegación electrónicas (ECS, ECDIS) es posible determinar con exactitud la situación de un navío en relación con el área de navegación cubierta, e incluso existen marcas electrónicas de apoyo (por ejemplo RACONS) que funcionan como una referencia fija para guiar a las embarcaciones.

La eficiencia de los sistemas VTS depende del alcance y la calidad del equipo, de la provisión de herramientas de soporte para analizar y administrar las diferentes situaciones del tráfico y de la facilidad para establecer una comunicación con los barcos y con otros elementos. Como resultado de una exhaustiva investigación en sitios de Internet relacionados con las herramientas complementarias para los sistemas VTS, se presentan a continuación algunos ejemplos ilustrativos de estas tecnologías.

En primer lugar, existen los sistemas de Identificación Automática (AIS, "Automatic Identification Systems"), que pueden actuar como un componente VTS independiente

para localizar embarcaciones en aguas costeras, en el cual la posición de la nave es determinada por un sistema GPS que emite una señal compuesta por una gran cantidad de datos, como por ejemplo la velocidad y el curso del buque. La identificación se lleva a cabo en intervalos de tiempo regulares, y se pueden transmitir otro tipo de datos y mensajes, que son recibidos por el VTS y pueden ser utilizados para identificar al barco automáticamente. Se tiene planeado que las estaciones VTS sean capaces de emitir mensajes relevantes para la seguridad de forma electrónica, que podrán ser recibidos y desplegados automáticamente a bordo de las embarcaciones.

Los sistemas AIS pueden convertirse en el único medio para localizar y dar seguimiento a los buques dentro del área VTS, lo cual quiere decir que solamente aquellos barcos que posean este sistema serán visibles. Por razones de seguridad, todos los elementos del tráfico marítimo deben ser visibles en un VTS, incluyendo las embarcaciones pequeñas, los barcos de pesca y los yates; sin embargo, este tipo de embarcaciones no satisfacen los requerimientos del AIS. Además, los navíos deben ser visibles incluso si el AIS falla, por lo tanto es recomendable contar con varios elementos de detección, por ejemplo una combinación de radar y AIS.

Otros adelantos en este campo son los Sistemas ATLAS VTS, diseñados para desplegar de forma más eficiente todos los servicios VTS actuales, ya sea para aplicaciones costeras, fluviales o portuarias. Los sistemas ATLAS son procesadores de señales compatibles con sistemas de radar, cámaras y sistemas ópticos infrarrojos, sistemas RDF ("Radio Dirección Finder Systems"), sistemas AIS, sistemas de radiocomunicación, sensores ambientales y sistemas de bases de datos.

También destacan los sistemas ARAMIS ("Advanced Radar Monitor and Information Systems"), que poseen algoritmos para predecir zonas de conflicto incrementando la seguridad en las operaciones del tráfico marítimo. Adicionalmente, estos sistemas permiten la identificación completa de las embarcaciones y de sus propietarios, proporcionan información de la salida y destino de la nave, de la composición de la carga y otros datos relevantes. Esta información puede ser distribuida a todos los servicios que intervienen en la operación portuaria, como las organizaciones de pilotos, los operadores en la costa, los clientes, etc. generando mayores niveles de seguridad y eficiencia.

El último ejemplo lo constituyen los sistemas "Navi - Sailor Office Systems", diseñados específicamente para el uso interno de compañías navieras y otros clientes, ya que su principal distintivo es que no se involucran con ningún sensor externo. Su propósito es revisar el curso que siguieron diversas embarcaciones que cuentan con este sistema y que grabaron su recorrido durante el viaje, para que los dueños de los buques puedan mantener un control sobre las rutas de sus naves y analizar el tráfico marítimo. Incluso estos sistemas se utilizan para recrear accidentes en tiempo real, lo cual resulta útil para deslindar responsabilidades, y para las compañías de seguros. Además tienen la capacidad de trabajar con cartas náuticas electrónicas en varios formatos.

Es importante aclarar que los nombres de los sistemas pueden variar dependiendo del fabricante, sin embargo las bases en su diseño, aplicación y funcionamiento son similares y para fines descriptivos no es necesario realizar un análisis más profundo.

Por otro lado, en el ámbito de las ayudas a la navegación se han generado modelos de control de las embarcaciones, entre los que destacan los Modelos de Separación del Tráfico (TSS, "Traffic Separation Schemes"), que disminuyen el riesgo en la operación portuaria por medio de la segregación del tráfico marítimo a través de la implementación de líneas de embarcaciones, todas moviéndose en la misma dirección, y con una zona de separación del tráfico entre las líneas. Además contempla la delimitación de zonas de navegación cercanas a la orilla para pequeñas embarcaciones que pueden prescindir del uso de las líneas de tráfico principales. El cruce de las zonas TSS se efectúa en puntos específicos, bajo un estricto control y siguiendo una serie de reglas operacionales.

La importancia de las ayudas a la navegación en el funcionamiento de las terminales portuarias radica en que la optimización en el tráfico y la operación de éstas incide directamente en la eficiencia del sistema total. Estudios realizados en la década pasada indican que los puertos podrían reducir (o aprovechar adicionalmente) el tamaño de sus terminales en un 30% aproximadamente, si la información del tráfico marítimo se manejara eficientemente.

Por esto en México es indispensable mantener las ayudas a la navegación existentes en constante mantenimiento para su correcto funcionamiento, e instalar

sistemas modernos que permitan a nuestros puertos formar parte del entorno automatizado y eficiente que envuelve a las terminales más desarrolladas a nivel mundial.

3.1.4 CONDICIONES AMBIENTALES

La evaluación de cualquier aspecto de maniobrabilidad y navegación de un buque en puerto o en altamar, requiere de un conocimiento previo del entorno físico en el que se encuentra dicha embarcación. Este conocimiento y entendimiento previos son de tal importancia que influyen ampliamente en la toma de decisiones sobre maniobras de respuesta y operación de máquinas de cualquier navío.

En particular la operación de cada puerto se encuentra influenciada por fenómenos físicos característicos como son: la configuración del fondo marino o batimetría, viento, oleaje y corrientes, que por su magnitud y efecto son de gran importancia para las embarcaciones que utilizan el puerto y para los pilotos que las maniobran.

Dentro de las condiciones ambientales físicas, uno de los fenómenos de mayor relevancia lo conforman los vientos, ya que por su intensidad (vientos dominantes) y por su frecuencia (vientos reinantes) el efecto que producen sobre las embarcaciones, desde el punto de vista de maniobrabilidad, se manifiesta en la deriva de éstas, principalmente bajo condiciones comunes de ocurrencia. Otro de los fenómenos de consideración importante es el oleaje, ya que provoca sobre los barcos efectos de oscilación periódica y, en condiciones de reposo o poca velocidad de navegación, puede provocar movimientos difíciles de controlar para el navegante. Por último, el fenómeno físico de las corrientes, acorde a las condiciones geográficas, puede afectar a los buques en forma similar al efecto ocasionado por el viento, produciendo una deriva en la trayectoria de la nave dependiendo de su magnitud. En la Sección 2.1.4 se analiza con mayor profundidad la influencia de los factores ambientales físicos sobre las embarcaciones.

Por lo anterior el manejo de las embarcaciones en aguas confinadas bajo cualquier condición climática y de mareas no siempre es posible, debido en parte a la reducida velocidad de los navíos asociada a la operación portuaria. Si la distancia bajo la quilla es pequeña, el oleaje presenta gran altura, las corrientes son muy intensas o la velocidad del viento es elevada, entonces los buques pueden estar en peligro. En estos casos el piloto

corre el riesgo de perder el control de la seguridad de la nave, y es probable que la operación de los equipos de remolque se vea comprometida o que las maniobras de atraque se imposibiliten.

Existen ciertas condiciones ambientales límite sobre las cuales la operación se vuelve insegura, por lo que resulta importante que las autoridades portuarias sean capaces de determinar estos parámetros. Cuando los límites de operatividad son particularmente restrictivos pueden implicar un impacto comercial en las operaciones del puerto; en ese caso se debe valorar la ampliación o modificación de las áreas de navegación y maniobras para permitir una mayor libertad de operación.

Ahora bien, las condiciones ambientales físicas más desfavorables son aquellas que se presentan cuando el puerto se encuentra aún abierto, pero que por su magnitud y acción ponen en peligro la seguridad marítima de las embarcaciones que a éste arriban. Estas condiciones no son necesariamente extremas ya que si así lo fueran, la navegación no podría tener lugar dado que el puerto estaría cerrado a la navegación.

Con esto en mente y habiendo estudiado todos los factores físicos de influencia, podemos acotar la evaluación de maniobras, considerando uno o varios factores relevantes. La magnitud y dirección de los factores ambientales que podrían considerarse como condición límite para garantizar la seguridad marítima, depende del tipo de embarcación a maniobrar.

De este modo, en la planeación de la operación general del puerto, es conveniente analizar las condiciones oceanográficas bajo las cuales se pueden realizar las maniobras de navegación, así como las condiciones adecuadas de carga y descarga en los muelles para cada tipo de carga transportada, con la finalidad de establecer un límite máximo hasta el cual es posible realizar las operaciones en forma ininterrumpida; después de sobrepasado este valor la suspensión de la operación es inevitable. Esta etapa se denomina condición de operatividad.

Cuando se interrumpe la operación del puerto el barco permanece atracado, sin embargo si continúan incrementándose las condiciones de agitación el barco ya no puede permanecer en el muelle, y tiene que salir a sortear el temporal en zonas más extensas para evitar dañar las estructuras de atraque. A esta segunda etapa se le conoce como

condición de permanencia y, al igual que en la anterior, se debe establecer un límite máximo después del cual el barco debe dejar el muelle.

Estas condiciones varían con el tipo y tamaño del barco, de acuerdo con el equipo usado para carga y descarga, y generalmente son producto de la experiencia adquirida al ver trabajar sistemas similares en otros puertos del mundo, como se presenta en la *Tabla 3.1.A*, resumen proporcionado por J. Stating del laboratorio de hidráulica de Delft, Holanda, en cuyo caso los límites de operatividad están enfocados a las condiciones de oleaje, pero lo mismo se puede aplicar para las corrientes y el viento dependiendo de las características del puerto en cuestión.

Tabla 3.1.A – Condiciones Permisibles de Operación

TIPO DE BARCO	TAMAÑO DEL BARCO [TPM]	ALTURA Y PERIODOS DE OLA MÁXIMA			
		CONDICIONES DE OPERATIVIDAD		CONDICIONES DE PERMANENCIA	
		ALTURA [m]	PERIODO [s]	ALTURA [m]	PERIODO [s]
Contenedores	< 20,000	0.3	< 6.0	0.75	< 7.0
Carga General	< 20,000	0.5	< 7.0	0.75	< 7.0
Roll on – Roll off	< 20,000	0.5	< 7.0	0.75	< 7.0
Granelero (descargando)	< 20,000	0.5	< 7.0	0.75	< 7.0
	20,000 – 60,000	0.75	< 8.0	1.0 – 1.5	< 8.0
	60,000 – 120,000	1.0	< 9.0	1.5 – 2.0	< 9.0
	> 120,000	1.25	< 9.0	2.0 – 2.5	< 10.0
Granelero (cargando)	< 20,000	0.5 – 0.75	< 7.0	0.5 – 0.75	< 7.0
	20,000 – 60,000	1.0 – 1.5	< 8.0	1.0 – 1.5	< 8.0
	60,000 – 120,000	1.5 – 2.0	< 9.0	1.5 – 2.0	< 9.0
	> 120,000	2.0 – 2.5	< 10.0	2.0 – 2.5	< 10.0
Graneles Líquidos	< 20,000	0.5 – 0.75	< 7.0	0.5 – 0.75	< 7.0
	20,000 – 60,000	1.0 – 1.5	< 8.0	1.0 – 1.5	< 8.0
	60,000 – 120,000	1.5 – 2.0	< 9.0	1.5 – 2.0	< 9.0
	> 120,000	2.0 – 2.5	< 10.0	2.0 – 2.5	< 10.0
Petroquímico LNG	130,000 m ³	1.7 – 2.5	< 8.5	1.7 – 2.5	< 8.5
		1.2 – 1.9	8.5 – 10.0	1.2 – 1.9	8.5 – 10.0
		0.6 – 1.2	10.0 – 12.0	0.7 – 1.2	10.0 – 12.0
		0.3 – 0.7	12.0 – 15.5	0.4 – 0.7	12.0 – 15.5
Pesqueros	---	0 – 0.3	< 6.0	0.5	< 7.0

FUENTE: *Manual de Dimensionamiento Portuario, Tabla 5.2. Puertos Mexicanos, S.C.T., 1992.*

Dentro del mismo contexto, los buques amarrados que se encuentran atracados a lo largo de un muelle están restringidos en sus movimientos transitorios (grados de movimiento), dependiendo de la técnica de carga y descarga que se emplee. Ejemplos de esto se presentan en las terminales petroleras y en los muelles para portacontenedores; en las primeras los brazos (sistemas de tuberías) de carga y descarga de petróleo requieren un movimiento limitado, mientras que en los segundos las grúas y las guías demandan la restricción del movimiento mientras se cargan y descargan los contenedores.

Estos límites operacionales ayudan a definir la velocidad y la separación de los barcos que transitan en las zonas de carga, para que los efectos de la interacción no causen movimientos restringidos en las naves atracadas. Los límites más usuales en el movimiento de las embarcaciones varadas, de acuerdo con el PIANC, se muestran en la *Tabla 3.1.B.*

Tabla 3.1.B – Movimientos Límite para Diferentes Embarcaciones

EMBARCACIÓN VARADA	GRADO DE MOVIMIENTO	TOLERANCIA
Buques – Tanque Petroleros	Vaivén	± 3 metros
	Deriva	± 3 metros
Barcos Portacontenedores	Vaivén	± 1 a 2 metros
	Deriva	± 0.6 a 1.2 metros
	Guiñada	± 1° a 1.5°
	Arzada	± 0.8 a 1.2 metros
	Cabeceo	± 1° a 2°
	Balanceo	± 3° a 6°
Buques Ro – Ro	Arzada en la Rampa	± 0.4 a 0.8 metros
	Vaivén en la Rampa	± 0.1 a 0.8 metros
	Deriva en la Rampa	± 0.6 metros
	Balanceo en la Rampa	± 1° a 4°

FUENTE: *Approach Channels, a Guide for Design, Pag. 49. PIANC, 1997.*

Por otra parte, los modelos matemáticos del comportamiento de los fenómenos físicos, correctamente aplicados, constituyen una valiosa herramienta para la planeación de la operación de un puerto. Las técnicas de modelación se aplican en la determinación del comportamiento de los procesos físicos, permitiendo la evaluación de eventos

normales y extremos. Con respecto a la operación de las áreas de navegación, su aplicación se enfoca a:

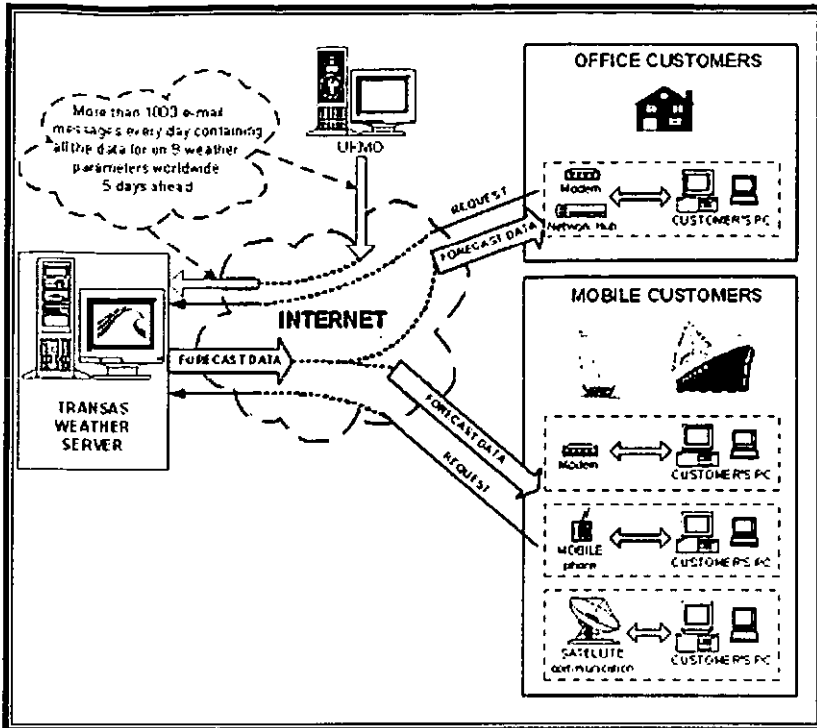
- a) La definición de los procesos hidrodinámicos, en los cuales interviene la mecánica de intercambio de masas de agua, la morfología del entorno y los eventos climatológicos y oceanográficos (tales como mareas astronómicas, mareas de tormenta, viento, gradientes de densidad, etc.), permitiendo obtener como resultado el comportamiento multidireccional de las corrientes superficiales asociadas, así como la variación de los niveles del agua. Proporcionan además la base de datos necesaria para vincular otros procesos, como son los de difusión y dispersión de contaminantes, potencial de transporte de sedimentos, etc.
- b) El proceso de propagación del oleaje, el cual una vez definido en condiciones de profundidad conocida, puede trasladarse hasta el sitio de ubicación de las zonas de interés, considerando los fenómenos de refracción, difracción y reflexión del oleaje, así como las corrientes inducidas a éste.

El uso de cualquier modelo analítico o físico que sea aplicado para reproducir los fenómenos físicos o un proceso operativo, requiere de una etapa de preparación y calibración para asegurar su confiabilidad. Por lo tanto, para la preparación del modelo es necesario contar con la suficiente información de las condiciones ambientales prevalecientes en la zona donde se desarrollan las operaciones de las embarcaciones.

Para concluir, es importante destacar el uso de nuevas tecnologías en comunicación y transferencia de datos para conocer las condiciones ambientales en cualquier parte del mundo. Estos sistemas se apoyan en la comunicación vía satélite y por Internet para presentar, en equipos de cómputo, los parámetros climáticos en forma de vectores, con la posibilidad de pronosticar estos factores para días posteriores (*Figura 3.1.K*).

Además estos dispositivos tienen la capacidad de presentar la ruta que sigue la embarcación al mismo tiempo que se despliegan los parámetros climáticos, calculando la velocidad de la nave con base en las corrientes de marea, las corrientes permanentes, el viento y el oleaje.

Figura 3.1.K – Nuevas Tecnologías de Información sobre el Clima



FUENTE: Imagen obtenida de Página de Internet Relacionada con el Tema, 2001.

3.1.5 EXPERIENCIA HUMANA

Es indudable que el control humano es un factor sumamente importante para la maniobrabilidad de los barcos, principalmente porque es muy variable bajo cualquier circunstancia, tanto externa a la persona (problemas en el buque, condiciones ambientales, comunicación con otros individuos, etc.) como en lo concerniente al individuo (estado de ánimo, cansancio, condición física, etc.) por lo que la experiencia y el reconocimiento de la calidad de los operadores de las embarcaciones son fundamentales para garantizar la seguridad de la nave.

La operación de los buques en aguas del puerto es responsabilidad de un determinado número de marinos pertenecientes a diferentes grupos, que incluyen a los pilotos de ferries, a los capitanes de remolcadores y a su respectiva tripulación, así como a

los operadores de otras embarcaciones más pequeñas. Sin embargo, la mayoría de los barcos transoceánicos son dirigidos dentro de las instalaciones portuarias por pilotos calificados que combinan la destreza en la conducción de navíos con el conocimiento de las condiciones locales en las áreas de navegación, además poseen conocimientos técnicos y están familiarizados con los requerimientos regulatorios del área del puerto.

Por lo anterior, es normal que en todos los puertos existan pilotos, personas que conocen las características físicas del puerto y los distintos factores de tipo oceanográfico y meteorológico que podrían afectar al barco en su entrada o salida del puerto, y que además de ser marinos de profesión, deben contar con un certificado de competencia, otorgado por la autoridad, referido a un determinado puerto.

No obstante que el capitán del barco puede conducirlo en dichas operaciones, generalmente el piloto es el encargado de realizar tales maniobras a fin de garantizar y preservar la seguridad de la nave y de las instalaciones, de manera que resultará responsable por los daños y perjuicios que cause a las embarcaciones e instalaciones portuarias, salvo caso fortuito o de fuerza mayor. A pesar de esto, la presencia del piloto de puerto a bordo de la embarcación no exime al capitán de responsabilidad, pues éste conserva toda la autoridad de mando, y tiene la obligación de atender las indicaciones del piloto de puerto si en su concepto no expone la seguridad del buque. En caso contrario, debe relevarlo de su cometido.

Cuando un barco se aproxima a la terminal portuaria y es abordado por el piloto de puerto, éste y el capitán tienen que tomar una serie de decisiones sobre el curso que se debe seguir para colocar la embarcación en su destino y posición final, lo cual implica definir el ángulo del timón, la potencia, la colocación de los remolcadores, la velocidad nominal, el punto de reducción de las revoluciones por minuto, las tácticas para rebase o encuentro con otros barcos, los puntos de inicio de cambio de dirección y otras muchas determinaciones que son responsabilidad, en su mayoría, del piloto de puerto y en segundo término del capitán del buque.

De tal forma, la controlabilidad del barco, definida como su capacidad para moverse a la velocidad deseada a lo largo de la trayectoria planeada, es función de la experiencia del piloto de la embarcación. En virtud de lo complejo de las operaciones y de la variedad de factores que intervienen en ellas, sólo es posible analizar la influencia del

aspecto humano mediante modelos de maniobrabilidad, como son los simuladores, donde el piloto realiza las maniobras de acceso y salida del puerto a través de su representación virtual.

En lo que respecta a estos modelos, cabe destacar que los pilotos, como cualquier ser humano, tienden a competir entre ellos para alcanzar un mayor prestigio y reconocimiento, lo cual provoca que algunos sean mejores que otros. La habilidad de los pilotos seleccionados para participar en simulaciones de maniobras debe estar dentro de un rango de experiencia tal que permita obtener resultados aplicables a la mayoría de las operaciones, para establecer criterios de operación que sirvan como guía a todos los pilotos del puerto.

Estadísticamente está demostrado que los pilotos que proporcionan mejores resultados en el proceso de simulación son los más experimentados y eficientes del puerto. La pregunta sobre cuán amplia debe ser la variación en la capacidad de los pilotos no es fácil de contestar, pero siempre es conveniente seleccionar pilotos con diferentes capacidades.

Algunos modelos de simulación de tiempo rápido están diseñados para detectar errores de percepción y posición de los pilotos, y pueden, en principio, aceptar variaciones en la experiencia de éstos. De igual manera, en modelos de simulación de tiempo real se debe permitir alguna variación arbitraria en la capacidad de los pilotos, o se debe utilizar un número de pilotos estadísticamente adecuado en el estudio.

Por otro lado, el capitán del buque, el piloto de puerto y los capitanes de los remolcadores deben conocer la capacidad de cada uno y sus limitaciones en lo que respecta a la maniobrabilidad del barco y de los remolcadores, ya que esta información es la base de una cooperación y un entendimiento adecuado entre ellos. Solamente así se logrará que las maniobras se lleven a cabo con tranquilidad y que el barco se conduzca con seguridad y eficiencia.

Cuando el piloto está maniobrando debe mantener a la vista los remolcadores que le asisten, tanto como sea posible, para dar seguimiento a la operación de éstos y poder actuar cuando considere que no están maniobrando adecuadamente, o cuando la seguridad de algún remolcador se encuentre en riesgo.

La experiencia del piloto y de los capitanes de los equipos de remolque se ve reflejada en una comunicación adecuada entre ambos, en la cual las órdenes que transmite el piloto a los remolcadores son claras y por ningún motivo deben mal interpretarse, ya que son confirmadas por los capitanes de los remolcadores. De hecho, en la actualidad se busca establecer un lenguaje estándar en el ámbito mundial para que la comunicación se simplifique (por lo general se utilizan vocablos en inglés, pero esto no es lo más adecuado en países en los que no se habla este idioma).

El contenido de la presente sección demuestra la importancia del factor humano en la maniobrabilidad de las embarcaciones, y resalta la necesidad de contar con personal capacitado y experimentado dentro de los puertos para disminuir riesgos y optimizar el funcionamiento de las áreas de navegación. No hay que olvidar que, a fin de cuentas, todo proceso llevado a cabo dentro de la operación portuaria depende, en mayor o menor medida, de la experiencia humana.

3.2 REVISIÓN Y MEJORA DE LOS CRITERIOS DE OPERACIÓN CON EL USO DE SIMULADORES

En la sección anterior se describen a detalle los factores que afectan la operación y maniobrabilidad de los buques, destacando que en la gran mayoría interviene la habilidad y la experiencia de pilotos, controladores o algún otro elemento humano. Por esto el uso de simuladores para optimizar los criterios de operación portuaria constituye una herramienta muy poderosa utilizada actualmente, gracias a la fiel representación de las condiciones que rodean las maniobras de los buques dentro del puerto, y a que permiten que los mismos pilotos sean los que realicen las pruebas de simulación, incluso resultando útiles como entrenamiento y práctica para ellos.

Asimismo, en el Capítulo II se presentan los dos métodos de simulación más utilizados: la simulación de tiempo rápido y la simulación de tiempo real, definiéndose sus principales componentes y explicándose su funcionamiento. Los principios aplicados tanto al dimensionamiento como a la operación portuaria son los mismos, con la diferencia de que en el primer caso las instalaciones del puerto aún no están construidas, y en el

segundo caso las áreas de navegación ya existen por lo que la modelación se aboca a la mejora de los criterios de operación, y si se requiere, proporciona sugerencias en cuanto a la remodelación, reconfiguración o ampliación de dichas áreas.

Previamente a analizar el tema de los modelos de simulación, es conveniente realizar una breve descripción sobre los aspectos que comprenden los criterios de operación en los puertos. Las reglas de operación consisten en el documento formulado por las autoridades portuarias en el que se establecen, de forma detallada y clara, diversos aspectos desarrollados con el funcionamiento y el desarrollo del puerto, buscando mantener las condiciones adecuadas de eficiencia y seguridad en la prestación de los servicios. En general, las reglas de operación abarcan la totalidad de las áreas del puerto, sin embargo este documento se limita al estudio de los criterios de operación en las áreas de navegación.

Por lo tanto, los criterios de operación para la navegación en el puerto son los lineamientos que las embarcaciones deben seguir para garantizar su seguridad y cumplir con los niveles establecidos de riesgo marítimo, conocidos también como límites operacionales. El concepto de riesgo en el mundo marítimo está relacionado con la frecuencia de los accidentes y su consecuencia, por lo que a fin de cuentas es una probabilidad de que ocurran percances como una colisión, que el barco encalle o que sufra un impacto, así como del riesgo que corre la vida humana en diferentes condiciones de operación.

El problema radica en especificar los criterios para encontrar los límites operacionales, ya que además existen criterios que no se basan exclusivamente en consideraciones de seguridad, por lo que es responsabilidad de las autoridades seleccionar e implementar los límites operativos dado que éstos determinan el momento en que las operaciones deben ser suspendidas o modificadas.

De este modo, los límites operacionales proveen las bases para la asistencia de los remolcadores, definen los escenarios de emergencia, evalúan los niveles de seguridad dependiendo del tipo de buque y de la zona navegada, y controlan las maniobras de atraque y desatraque, por lo que tienen una poderosa influencia en la operación de un puerto. Una vez que estos límites son conocidos, la aplicación de modelos de simulación de tiempo rápido o de misión completa ayudan a determinar si han sido excedidos o no.

Las reglas de operación se establecen no sólo para proteger a los navíos, sino para reducir los costos de operación. Por ejemplo, la restricción de las operaciones a ventanas de marea alta significa ahorros de mantenimiento en el dragado, sin embargo se refleja también en potenciales pérdidas debido a la imposibilidad de operación de las embarcaciones cuando la marea baja, por lo que ambos factores deben ser comparados y evaluados.

Al lapso en el cual la operación de los barcos no es posible se le conoce como "downtime", y además de ser causado por la variación de los niveles de marea se puede originar por los efectos de las corrientes, el viento, el oleaje o una visibilidad deficiente. Las pruebas en simuladores permiten determinar las condiciones de ocurrencia del downtime, para elaborar así los criterios de operación pertinentes y difundirlos entre los pilotos. Obviamente si estos intervalos de inoperatividad son muy largos las pérdidas en el puerto aumentan, siendo conveniente replantear la operación en las áreas de navegación por medio de una reestructuración de éstas, fundamentada y evaluada por medio de la simulación.

Por otro lado, el objetivo primordial de los pilotos, en lo que respecta a las limitaciones de las áreas de navegación y a la vulnerabilidad de las instalaciones portuarias, es asegurar un recorrido óptimo y consistente con la máxima seguridad de la embarcación a su cargo. Gracias a su entrenamiento, que incluye prácticas en modelos de simulación (por lo menos en puertos de elevado desarrollo), así como a su experiencia, el piloto reconoce los niveles de seguridad adecuados, por lo que es una fuente de información muy valiosa en los estudios de simulación. Incluso en algunos casos él es el único capaz de evaluar la seguridad, sobre todo si no existen otras formas de medición de dichos criterios.

Además de los modelos de simulación de tiempo rápido y de tiempo real, para la mejora de la operación en un puerto existen los modelos de simulación del tráfico de embarcaciones, cuyo propósito es revelar si las áreas de navegación, con sus reglas para la operación del tráfico y sus condiciones ambientales, tienen la capacidad de manejar el volumen de tráfico existente, y además definir el tiempo de espera y la capacidad máxima de las áreas en estudio.

La capacidad de las áreas de navegación está influenciada por el régimen de entrada al puerto, el cual se refiere a las condiciones para las cuales la entrada se considera segura o insegura para los buques, y depende de las ventanas de marea, los límites de operación para cada nave, los límites de operación para los remolcadores, etc. Por consiguiente, el lado marítimo de un puerto es un sistema complejo, y los modelos de simulación del tráfico son la única herramienta adecuada para la determinación detallada del impacto en la capacidad del puerto tanto del régimen de entrada, como de las reglas de la operación del tráfico.

Los avances en las técnicas de simulación por computadora han permitido desarrollos significantes en la modelación de los flujos del tráfico marítimo, los cuales comúnmente son considerados como parte de un proceso continuo, y consecuentemente en la actualidad se usa una técnica de descripción de este proceso. El método de descripción del proceso especifica el comportamiento dinámico del sistema mediante la descripción de los componentes vivos en el modelo, es decir, los componentes que están ejecutando alguna actividad. La sección dinámica del modelo contiene una descripción procesada de cada componente vivo y formula la interacción entre componentes.

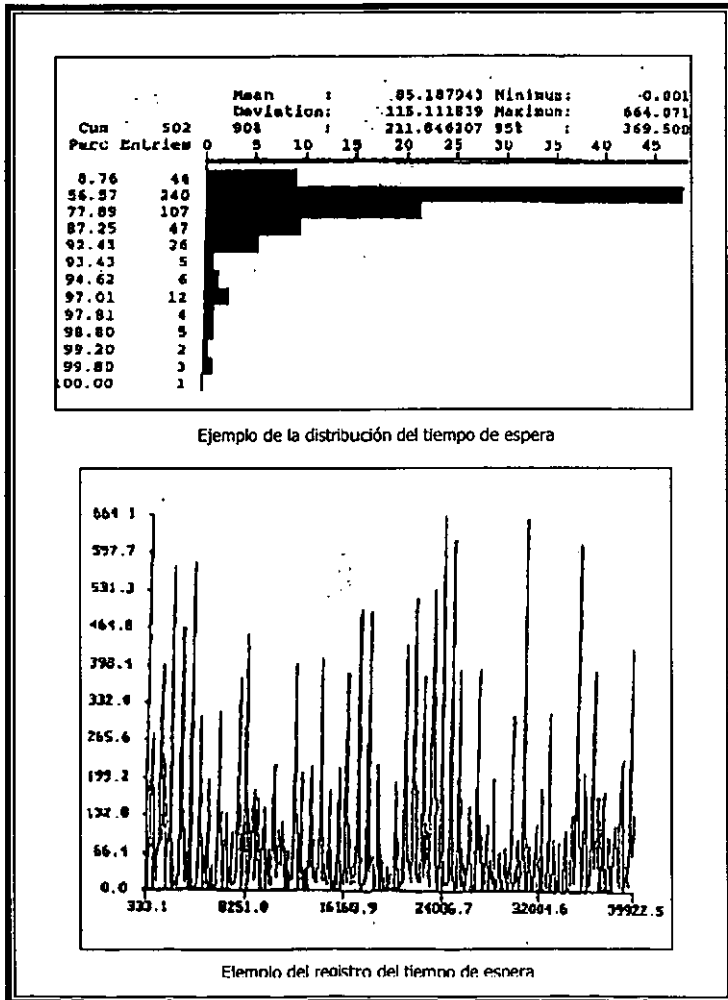
El modelo del sector marítimo de un puerto puede incluir, además, una descripción procesada del control del tráfico (manejo del tráfico de embarcaciones) así como la generación de los diferentes tipos de buques (crear las naves y sus arribos). Los componentes se especifican por medio del valor de sus atributos; por ejemplo, los atributos de un barco son las dimensiones de su eslora, manga y calado, su tipo o clasificación, las características de la carga, etc.

El despliegue o salida de los datos caracteriza el desempeño del programa, ya que cuando los datos de entrada muestran una variabilidad al azar, los resultados de la simulación también presentan una variabilidad de este tipo, y es necesario aplicar un análisis estadístico de los datos de salida. La *Figura 3.2.A* ejemplifica el despliegue de resultados en la simulación del tráfico en un puerto.

La evaluación de los resultados depende del objetivo del estudio. Si el fin del análisis es la eficiencia económica, entonces los resultados indican la forma de minimizar los costos o maximizar los beneficios; si el objetivo es la confiabilidad y la seguridad de la operación de las áreas de navegación, entonces la posibilidad de riesgo al maniobrar en

dichas áreas debe minimizarse. Como resultado de la segunda opción se formularán ventanas de marea más estrictas y aumentará la probabilidad de la suspensión de operaciones en condiciones ambientales desfavorables. En ambos casos, la relación entre las dimensiones de las áreas de navegación por un lado y los tiempos de espera asociados por el otro, debe ser estudiada con el fin de optimizar las dimensiones de estas instalaciones.

Figura 3.2.A – Resultados de Simulación del Tráfico Marítimo



FUENTE: *Approach Channels, a Guide for Design, Figs. 7.4 y 7.5. IANIG, 1997.*

La información presentada hasta este punto del documento es suficiente para que el ingeniero civil y cualquier otra persona interesada en la ingeniería portuaria comprenda la importancia, primero, de un dimensionamiento adecuado de las áreas de navegación, y segundo, de la optimización de la operación en éstas para garantizar la viabilidad económica del puerto y la seguridad en las maniobras de las embarcaciones.

Uno de los aspectos más importantes para lograr lo anterior es la aplicación de técnicas de simulación, debido a que en estas se pueden representar todos los aspectos que intervienen en la operación portuaria y que se describen en este trabajo, como son las características actuales de las embarcaciones, la asistencia de los equipos de remolque, los avances en las ayudas a la navegación, las condiciones ambientales y la experiencia humana.

Por esto los siguientes capítulos tienen la finalidad de presentar dos casos prácticos en los que se hace uso de modelos de simulación, en el primer ejemplo para el dimensionamiento portuario y en el segundo para la mejora en la operación. Ambos casos son reales y se realizaron en nuestro país.

CAPÍTULO IV

CASO PRÁCTICO DE DIMENSIONAMIENTO PORTUARIO

Con la finalidad de ejemplificar la aplicación de los criterios modernos de dimensionamiento portuario, en el presente capítulo se expone el proyecto por medio del cual se evaluó la factibilidad de la construcción de diversas alternativas de muelles en espigón en el Puerto de Veracruz, con el fin de agregar nuevas posiciones de atraque (Consultoría Yáñez - Taylor S.A. de C.V., 1998). En la actualidad la alternativa recomendada por el proyecto se encuentra completamente desarrollada y en operación.

4.1 EL PUERTO DE VERACRUZ

El Puerto de Veracruz es, sin duda alguna, el principal puerto de altura y comercial de nuestro país. Su operación requiere grandes esfuerzos para atender diariamente un enorme número de arribos de embarcaciones y su consecuente movimiento de carga, reflejo de la vasta área de influencia del puerto. Esta demanda operativa exige un crecimiento ordenado, racional y estratégico de la infraestructura portuaria, el cual se ve seriamente restringido en lo que respecta a la disponibilidad de zonas de agua.

Por lo anterior, como parte de las acciones estratégicas que las autoridades del puerto han realizado, en el año de 1998 se plantearon dos posibles alternativas de construcción de muelles en espigón en la zona que en ese entonces ocupaban las terminales de aluminio y cementos. Estas alternativas buscaban crear nuevas posiciones de atraque e influirían de manera significativa en la maniobrabilidad y operatividad de la zona norte del puerto y debían ser evaluadas para definir la factibilidad o imposibilidad de cualquiera de las opciones. La *Figura 4.1.A* muestra la zona del puerto en la que se desarrollaría el proyecto.

Ante esta situación, la Administración Portuaria Integral de Veracruz (APIVER) encomendó la realización de un estudio de maniobrabilidad, el cual se efectuó en un centro de estudio e investigación con capacidad técnica para desarrollar un modelo computarizado de simulación de maniobras en tiempo real, ubicado en Estados Unidos.

Figura 4.1.A – Zona de Proyecto en la parte Norte del Puerto de Veracruz



FUENTE: Consultoría Yáñez – Taylor S.A. de C.V., 1998.

Por medio de este estudio se evaluaron las restricciones a la navegación que podían presentarse y que ponían en peligro la operación tanto en los muelles existentes

en la zona norte del puerto, como en los nuevos muelles en espigón, fundamentándose en una revisión minuciosa de las condiciones climatológicas de la zona y de los lineamientos y criterios de dimensionamiento seguidos en ambos escenarios, así como en el análisis de las condiciones de maniobrabilidad mediante la aplicación del modelo de simulación.

4.1.1 ARREGLO DE LOS MUELLES EN ESPIGÓN

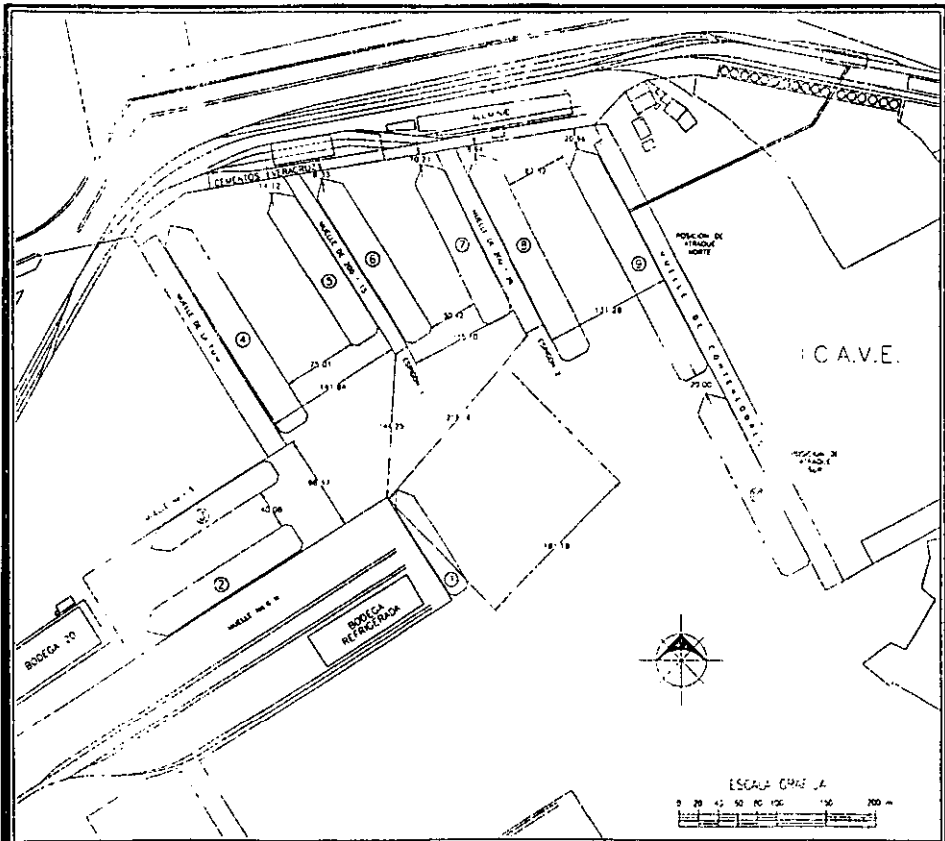
En un principio, el estudio contemplaba la posible implementación de dos escenarios (arreglos básicos) de muelles en espigón, los cuales presentaban las características a continuación descritas.

El Escenario No. 1 consideraba la construcción de dos muelles de espigón en la zona que en ese entonces ocupaban las terminales de aluminio y cemento, cada uno con una longitud de 200 m y con una orientación aproximada en sentido sureste – noroeste. El muelle en espigón No. 1 tenía su arranque en el muelle de cementos y poseía un ancho de 20 m. Su banda oeste pretendía alojar buques para fluidos, con dimensiones de 176 m de eslora y 32.25 m de manga, mientras que su banda de atraque este alojaría buques de cemento con 190 m y 30 m de eslora y manga, respectivamente. El muelle en espigón No. 2 partía de los límites de la terminal de aluminio y contaba con un ancho de 20 m. Su banda de atraque oeste pretendía alojar buques de graneles metálicos así como de fluidos, con dimensiones máximas de 176 m de longitud y 32.25 m de eslora, y su banda de atraque este alojaría una embarcación granelera de hasta 229 m de eslora y 32.2 m de manga, la cual sobrepasaría la longitud del muelle en una distancia aproximada de 40 m. En la *Figura 4.1.B* se ilustran las principales dimensiones y características de este arreglo.

El Escenario No. 2 consideraba la construcción de un solo muelle en espigón en la zona que ocupaba la terminal de aluminio, conservando una posición de atraque en la zona del muelle de cemento acorde con la orientación que tenía ese frente. La banda de atraque del muelle de cementos alojaría embarcaciones para cementos y fluidos con 190 m de eslora y 30 m de manga, las cuales ocuparían una posición con orientación oeste – este. La disponibilidad de espacio en esta posición de atraque se reducía a medida que la banda de atraque de la terminal de usos múltiples (TUM) y el muelle en espigón se aproximaban, originando que la maniobra de atraque de estas embarcaciones presentara

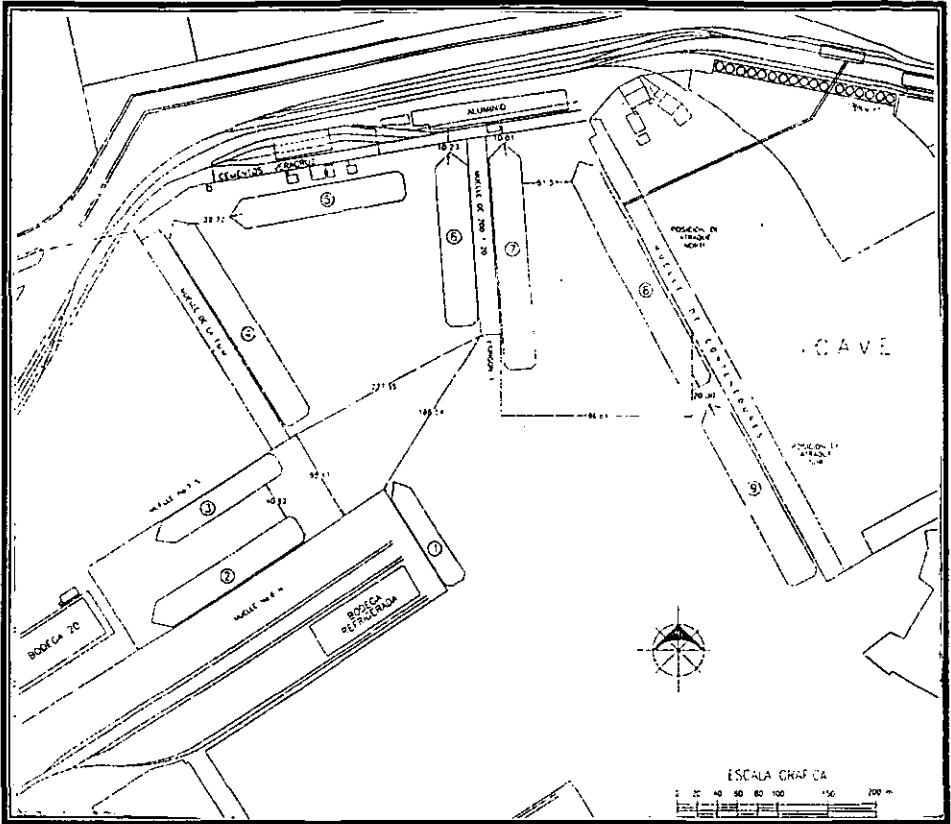
especial cuidado en función de los espacios que quedaban entre buques atracados. El muelle en espigón contaba con una longitud de 200 m y ancho de 20 m, y comenzaba en el muelle de aluminio. En sus bandas de atraque se planeaban alojar embarcaciones similares a las del muelle correspondiente en el Escenario No. 1, es decir, la banda oeste alojaría buques para fluidos con dimensiones de 176 m de eslora y 32.25 m de manga, mientras que su banda de atraque este alojaría una embarcación granelera de 229 m de eslora y 32.2 m de manga. Las características geométricas del Escenario No. 2 se muestran en la *Figura 4.1.C*.

Figura 4.1.B – Escenario No. 1 de Disposición de Muelles en Espigón



FUENTE: Consultoría Yáñez – Taylor S.A. de C.V., 1998.

Figura 4.1.C – Escenario No. 2 de Disposición de Muelles en Espigón



FUENTE: Consultoría Yáñez – Taylor S.A. de C.V., 1998.

En los arreglos presentados se han citado diversas embarcaciones que harían uso de los muelles, cuyas dimensiones corresponden a valores máximos acordes con las expectativas de crecimiento en el puerto. Las dimensiones medias y máximas de estas embarcaciones de diseño fueron proporcionadas por APIVER, de acuerdo con la *Tabla 4.1.A* y la *Tabla 4.1.B* respectivamente.

Es importante hacer notar que, a continuación de cada embarcación, entre paréntesis, se indica el nombre de la empresa que opera la terminal donde atracan dichas naves, de acuerdo con las *Figuras 4.1.B* y *4.1.C* antes presentadas.

Tabla 4.1.A – Capacidad y Dimensiones Promedio de los Barcos de Diseño

BUQUE POR TIPO DE CARGA Y TERMINAL	TRB	EMBARQUE [ton]	ESLORA [m]	MANGA [m]	CALADO [m]
Contenedores (ICAVE)	30,971	20,000	202.00	32.20	11.50
Contenedores (TUM)	18,037	4,765	177.00	30.00	9.45
Granos (ALSUR)	26,000	25,000	188.00	30.00	9.45
Aluminios (ALUDER)	12,000	11,500	140.00	20.64	9.00
Cementos (APASCO)	20,000	16,500	160.00	25.00	9.15
Fluidos (CMT, LATEX, ASTRO)	15,000	10,000	114.32	20.00	9.00
Tubos y Chatarra (TAMSA)	9,009	3,700	140.55	23.00	9.74

FUENTE: Administración Portuaria Integral de Veracruz, 1998.

Tabla 4.1.B – Capacidad y Dimensiones Máximas de los Barcos de Diseño

BUQUE POR TIPO DE CARGA Y TERMINAL	TRB	EMBARQUE [ton]	ESLORA [m]	MANGA [m]	CALADO [m]
Contenedores (ICAVE)	39,132	22,000	259.00	32.28	11.50
Contenedores (TUM)	31,000	20,000	240.00	32.20	11.50
Granos (ALSUR)	37,168	30,000	229.62	32.20	12.67
Aluminios (ALUDER)	12,500	12,200	160.00	22.86	9.00
Cementos (APASCO)	26,000	19,500	190.00	30.00	9.76
Fluidos (CMT, LATEX, ASTRO)	25,000	22,000	176.80	32.25	9.50
Tubos y Chatarra (TAMSA)	22,211	21,400	182.00	30.00	11.00

FUENTE: Administración Portuaria Integral de Veracruz, 1998.

A pesar de las dimensiones de los buques mostradas en las tablas anteriores, esporádicamente llegan al Puerto de Veracruz embarcaciones portacontenedores de dimensiones mayores, cuya operación incluso está claramente acotada por cuestiones de calado, lo cual provoca que su acceso al puerto no pueda realizarse a plena carga.

Por otro lado, las maniobras que habrían de realizarse para este estudio debían ser asistidas por remolcadores, en virtud de la complejidad inherente y la restricción de espacios; en ese sentido, APIVER proporcionó las características de los remolcadores convencionales que en ese entonces auxiliaban en la realización de maniobras en el puerto, las cuales se muestran en la *Tabla 4.1.C*.

Tabla 4.1.C – Características Principales de los Remolcadores

NOMBRE	CARACTERÍSTICAS	
SAAM HUATECA (antes Puertos Mexicanos)	Potencia	4,300 HP
	Max. Eslora	32 m (105 ft)
	Max. Manga	9 m (29.5 ft)
	Max. Calado	3.75 m (12.3 ft)
	GRT	330.9 t
	Propelas	2 unidades
CARIBE	Potencia	2,450 HP
	Max. Eslora	30 m (98.4 ft)
	Max. Manga	8 m (26.2 ft)
	Max. Calado	3.30 m (10.8 ft)
	GRT	193 t
	Propelas	2 unidades
SAAM MEXICA	Potencia	4,200 HP
	Max. Eslora	30 m (98.4 ft)
	Max. Manga	8 m (26.2 ft)
	Max. Calado	4.05 m (13.3 ft)
	Propelas	2 unidades

FUENTE: Administración Portuaria Integral de Veracruz, 1998.

Los párrafos anteriores evidencian la importancia de la elección correcta de las embarcaciones de diseño, así como la influencia de los equipos de remolque en la asistencia a los buques, ambos factores determinantes para que la simulación se lleve a cabo con efectividad y se apegue a la realidad, conllevando a la elección del arreglo de muelles en espigón óptimo.

4.2 ANÁLISIS DE LOS PROCESOS FÍSICOS

La evaluación de cualquier aspecto de maniobrabilidad y navegación de una embarcación en puerto o en altamar, requiere de un conocimiento y entendimiento previos del entorno físico en el que se encuentra dicha embarcación, el cual influye

ampliamente en la toma de decisiones sobre maniobras de respuesta y operación de máquinas de los buques.

En particular, los escenarios de muelles que potencialmente podían ser construidos en el Puerto de Veracruz estaban influenciados por fenómenos físicos característicos, que por su magnitud y efecto eran de gran importancia para las embarcaciones que utilizarían el puerto y para los pilotos que las maniobraban, dadas las nuevas condiciones de disponibilidad de espacio. A continuación se describen los fenómenos y procesos costeros más relevantes en el puerto, y se presentan parámetros que cuantificaron la magnitud y relevancia de dichos procesos para que posteriormente se consideraran en la preparación del modelo de simulación de maniobras.

4.2.1 VIENTO

Uno de los fenómenos de mayor relevancia en la zona en estudio lo conforma el viento. Para la realización de su análisis, fue recopilada información proveniente de la Estación Climatológica Veracruz, dependiente de la Comisión Nacional del Agua. Esta información comprende el registro de los valores medios mensuales del viento reinante y dominante en el periodo 1960-1990.

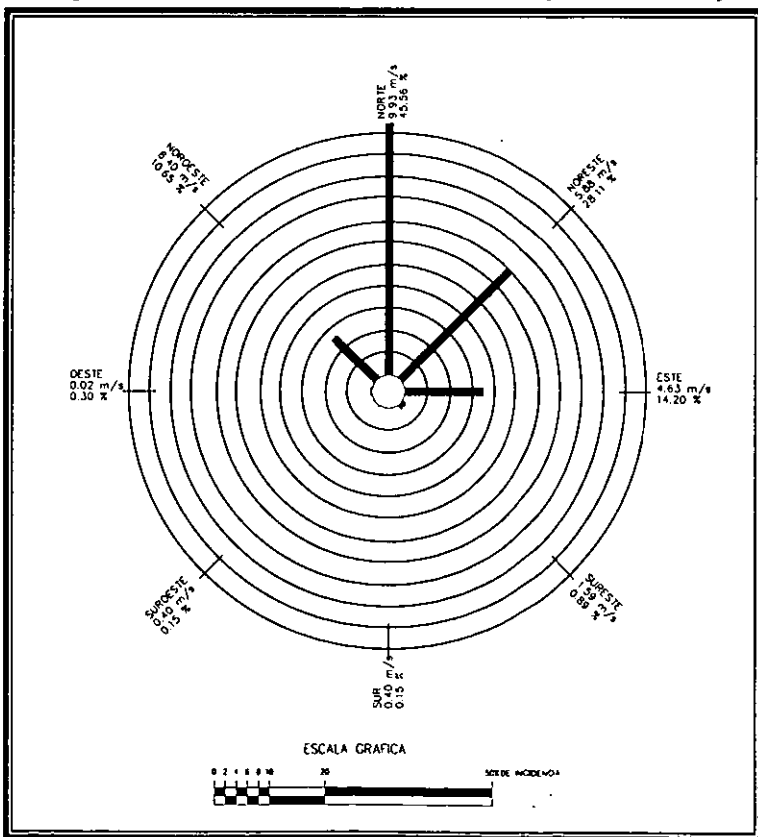
Resulta importante mencionar que a pesar de que la estación está relativamente cerca del puerto y en condiciones similares de exposición ante mar abierto, la urbanización de la zona provoca efectos locales en los registros, de tal forma que desde tiempo atrás es conocido que los datos de la estación Veracruz difieren en menos con respecto a los valores de viento que se presentan en la zona del puerto; es decir, los vientos registrados en el puerto son mayores que los que registra la estación climatológica. Personal de la estación Veracruz indicó que esta diferencia de magnitudes queda comprendida en un rango que va del 20% al 30%. Estos factores debieron considerarse para incrementar la magnitud de los registros de viento, aplicables fundamentalmente a rachas, al ser éstas de mayor repercusión y efecto en las operaciones de la zona norte.

Por esta razón, la información de vientos que se presenta considera un factor de incremento del 30%. A partir de esta información se llevó a cabo un procesamiento de

datos, que posteriormente se mostró gráficamente en rosas de vientos reinantes y dominantes.

Para el caso del viento reinante, es decir, aquel que se presenta con mayor frecuencia en la zona, fueron elaboradas las rosas de vientos en cuatro periodos estacionales y uno anual. Dado que los alcances del presente trabajo no contemplan profundizar demasiado en este aspecto, únicamente se presenta como ejemplo la rosa de vientos reinantes del periodo anual, a modo de ilustración, en la *Figura 4.2.A*. Igualmente, estas manifestaciones estacionales representadas en las tendencias anuales se muestran en la *Tabla 4.2.A*.

Figura 4.2.A – Rosa de Vientos Reinantes (Periodo Anual)



FUENTE: S.M.N. – Estación Veracruz. Registro Estacional: Periodo Anual. Vientos Reinantes. 1960-1990.

Tabla 4.2.A – Direcciones Significantes del Viento Reinante (Periodo Anual)

DIRECCIÓN	VELOCIDAD MEDIA			FRECUENCIA
	m/s	Nudos	Km/h	
Norte	9.9	19.8	35.6	45.56 %
Noreste	5.9	11.8	21.2	28.11 %
Este	4.6	9.2	16.6	14.20 %
Noroeste	8.4	16.8	30.2	10.65 %

FUENTE: S.M.N. – Estación Veracruz. Registro Estacional: Periodo Anual. Vientos Reinantes. 1960-1990.

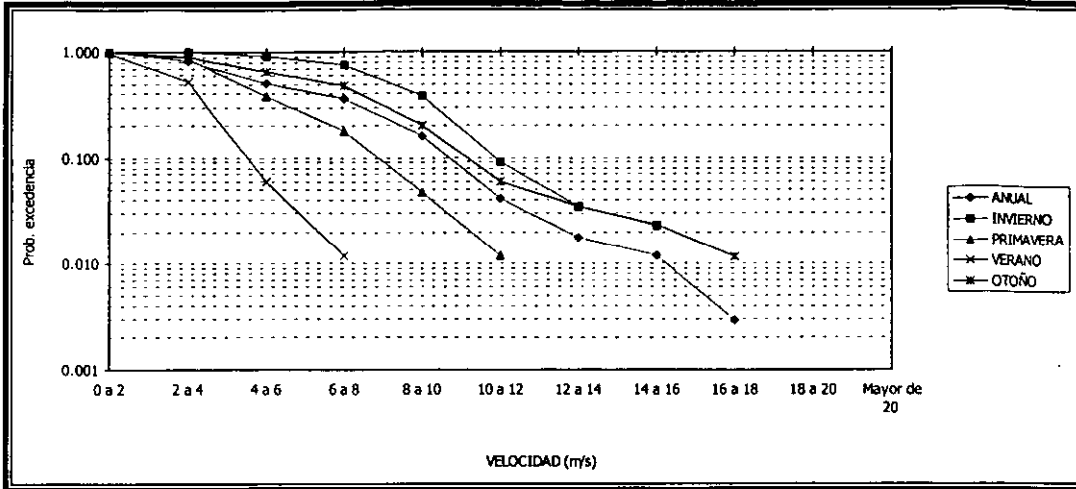
Como puede apreciarse, resulta predominante el viento proveniente del norte, tanto en magnitud como en frecuencia, seguido en orden de ocurrencia por los vientos provenientes del noreste y este, aunque con menor magnitud media (5.9 y 4.6 m/s respectivamente); la componente proveniente del noroeste, de menor ocurrencia, resulta mayor en magnitud (8.4 m/s).

Desde el punto de vista de la maniobrabilidad del barco, se consideraron importantes las cuatro direcciones ante la necesidad de la ciaboga y aproximación/salida de las embarcaciones para su atraque y desatraque. Tomando en cuenta la alineación tentativa de los muelles en espigón, el efecto de los vientos reinantes se manifestaría en la deriva de las embarcaciones, principalmente bajo condiciones comunes de ocurrencia (las direcciones noreste – suroeste y noroeste – sureste).

Por lo que se refiere a la intensidad máxima de los vientos, se elaboraron las rosas de viento dominantes para cada uno de los periodos estacionales así como para el anual. El régimen anual indica que los vientos más intensos corresponden a las direcciones noroeste, norte y noreste, con velocidades de 45.23, 38.46 y 31.49 m/s respectivamente (90.5, 76.9 y 63.0 nudos), mientras que para el resto de las direcciones la intensidad de los vientos dominantes es del orden de 15.0 m/s (30.0 nudos).

Por último, con el fin de pronosticar la probabilidad de ocurrencia del viento acorde a su intensidad y definir los límites de las condiciones operativas, se contempló la determinación de las curvas de probabilidad de excedencia para el caso del viento reinante, considerando que los datos de viento procesados corresponden a las situaciones prevalecientes normalmente en el puerto, y que estas condiciones sirven como base para inferir eventos de mayor magnitud a los que frecuentemente existen (*Figura 4.2.B*).

Figura 4.2.B – Curvas de Probabilidad de Excedencia (Vientos Reinantes)



FUENTE: Valores obtenidos del análisis de información recopilada.

4.2.2 OLEAJE

El oleaje es un fenómeno de consideración importante, ya que provoca sobre una embarcación efectos de oscilación periódica y en condiciones de reposo o poca velocidad de navegación puede provocar movimientos difíciles de controlar para el navegante. Haciendo referencia a este proceso costero, se consideraron fundamentalmente dos variantes, que son:

- a) El oleaje frecuente o normal, que es aquel que incide frecuentemente y bajo condiciones normales en la zona de interés. Para este caso, también deben identificarse dos fuentes generadoras de oleaje normal, es decir, el oleaje completamente desarrollado en alta mar ("swell"), generado por vientos lejanos que soplan sobre la superficie del mar, y el oleaje asociado a vientos locales, desarrollado dentro de un campo de generación limitado por distancia y como consecuencia de la existencia de barreras naturales contra el oleaje distante; estas barreras, para el caso de Veracruz, corresponden a los arrecifes circundantes.

b) El oleaje ciclónico, originado por perturbaciones atmosféricas de gran magnitud, como es el caso de los huracanes que frecuentemente siguen una trayectoria sobre el Golfo de México y actúan sobre el Puerto de Veracruz.

En cuanto al oleaje normal, para el caso de Veracruz existen diferentes fuentes de información sobre este factor, mismas que fueron analizadas con objeto de fundamentar con bases suficientemente sólidas el comportamiento del régimen de oleaje. Los datos obtenidos se procesaron para determinar las características del oleaje completamente desarrollado, formulándose la *Tabla 4.2.B*, que muestra una comparación de resultados referida a la altura de ola y periodo significativo para cada una de las direcciones de incidencia.

Tabla 4.2.B – Comparación de Datos de Oleaje Obtenidos de Diversas Fuentes

DIRECCIÓN	FUENTE						
	Ocean Wave Statistics		Oficina Oceanográfica de los Estados Unidos de América		Sea and Swell Oleaje Distante	Sea and Swell Oleaje Local	World Wave Atlas
	Altura de Ola [m]	Periodo [s]	Altura de Ola [m]	Periodo [s]	Altura de Ola [m]	Altura de Ola [m]	Altura de Ola [m]
Norte	2.15	8.11	2.16	8.58	3.28	1.96	1.33 *
N 30° E	2.40	8.60	-	-	-	-	
Noreste	2.26	8.67	1.98	7.94	2.26	1.62	
N 60° E	2.12	8.74	-	-	-	-	
Este	1.79	8.31	1.96	7.84	2.61	1.83	
S 60° E	1.98	7.97	-	-	-	-	
Sureste	1.88	8.83	1.97	7.74	2.08	1.7	
S 30° E	1.78	9.70	-	-	-	-	

* Resumen Anual, registros mensuales en un rango entre 0.8 m y 2.0 m

FUENTE: Datos obtenidos de las fuentes citadas en la tabla.

De la revisión de estas fuentes de datos pudo identificarse que la más completa en cuanto a información de oleajes corresponde a los datos de la Oficina Meteorológica de los Estados Unidos de América, dado que cuenta con la distribución de sus registros por

periodos, alturas y direcciones, además de concordar en términos generales con las frecuencias observadas en la zona en estudio y en otras fuentes tales como la del Ocean Wave Statistics.

Derivado de este análisis, se detectó que los oleajes provenientes de las direcciones noreste, este y sureste son los que influyen con mayor significado en la zona de estudio, por lo que estas direcciones fueron propuestas para el análisis de propagación del oleaje, acorde con los valores presentados en la *Tabla 4.2.C*. Cabe hacer mención que las condiciones mostradas son propias del oleaje en aguas profundas, por lo que su consideración en los escenarios de simulación debió tomar en cuenta el fenómeno de propagación del oleaje hacia aguas poco profundas así como en el interior del puerto, con el auxilio de técnicas de refracción y difracción.

Tabla 4.2.C – Oleaje Normal para Análisis de Agitación

DIRECCIÓN	$H_{1/3}$	T_s
NE	1.98	7.9
E	1.96	7.8
SE	1.97	7.7

FUENTE: Valores obtenidos del análisis de información recopilada.

Por otra parte, el oleaje local se genera dentro de una primera zona (zona de generación) que incluye el área donde está soplando el viento y transmitiendo su energía cinética por esfuerzos cortantes hacia la superficie del agua. Para la determinación de sus características resulta necesario considerar la zona de acción del viento en cuanto a extensión (fetch), tiempo durante el cual actúa (duración) y su velocidad, parámetros que influyen en el desarrollo de las olas. Con base en lo anterior, fueron elaborados los pronósticos de oleaje local para la zona de estudio, considerando un fetch variable entre 3 y 5 km, distancia aproximada entre la costa y los arrecifes existentes, mismos que proporcionan protección natural a la costa en la zona de estudio. Estos pronósticos se fundamentan en la aplicación del método de Sverdrup – Munk – Bretschneider (Shore Protection Manual, 1984), considerando la generación de oleaje tanto para viento reinante como para viento dominante.

Los resultados obtenidos mostraron que la altura y el período de las olas determinadas por la acción del viento reinante son notoriamente menores a las características definidas en el análisis de oleaje normal completamente desarrollado. Por lo que se refiere al oleaje generado por vientos dominantes, a pesar de que aumenta la magnitud de la altura de ola sus períodos son siempre menores a los obtenidos para el oleaje completamente desarrollado y por consiguiente, son oleajes de menor energía y no se consideraron para el análisis de propagación hacia el interior del puerto.

Por lo que respecta al oleaje extremal o ciclónico, este estudio comprendió el análisis de más de 30 tormentas y huracanes que se han presentado en la zona del Golfo de México, particularmente con influencia en Veracruz, en el período comprendido entre 1960 y 1996. Este análisis consistió en determinar las características del oleaje ciclónico (altura y período) y de su decaimiento, de acuerdo con la metodología propuesta en el Shore Protection Manual y que potencialmente puede afectar la operación del puerto.

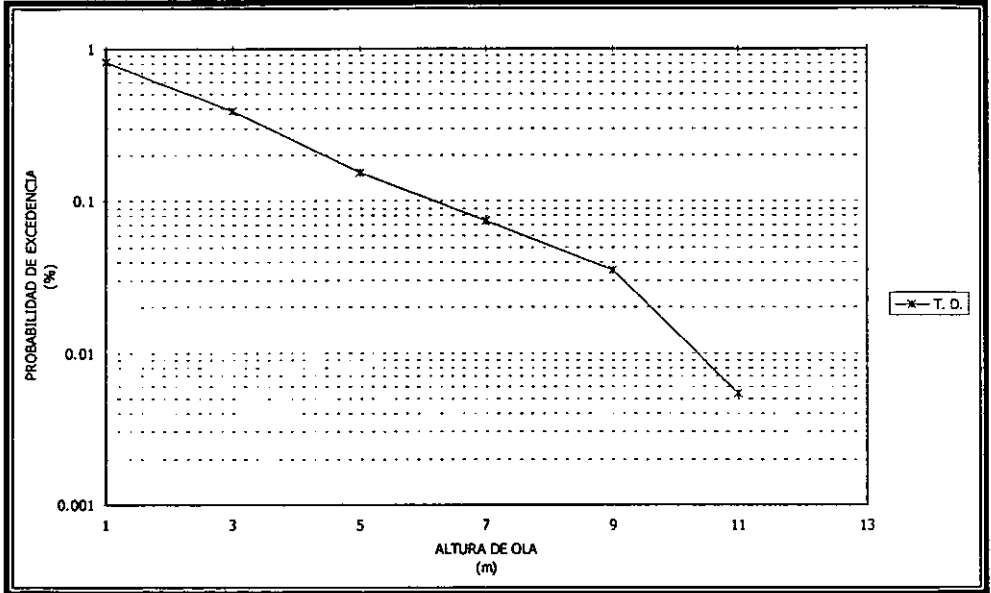
La investigación realizada permitió al consultor identificar 10 eventos extremos y sus oleajes asociados, de los cuales los huracanes que han tenido mayor influencia en el puerto son Roxanne (1995), Inga (1961) y Diana (1990). Analizando la totalidad de estos sucesos extraordinarios, se encontró que la altura de ola promedio fue de 9.8 m, y el período promedio presentó un valor de 12.1 s.

Además, con el fin de pronosticar la probabilidad de ocurrencia de oleajes de diversa magnitud, fueron definidas las curvas de probabilidad de excedencia para todas las direcciones de propagación, considerando como base el registro de oleaje normal. En estas curvas debe tomarse en cuenta que los datos de oleaje analizados representan condiciones normales y seguras para la navegación, y son estas condiciones las que se toman como base para inferir condiciones mayores a las que frecuentemente se presentan. La *Figura 4.2.C* presenta la curva de probabilidad de excedencia considerando todas las direcciones de manera conjunta.

Vale la pena mencionar que debido a que la batimetría de la región no es paralela a la costa, no era válido aplicar directamente la ley de Snell para determinar la deformación del oleaje en su viaje hacia aguas bajas, por lo que fue empleado un modelo de transformación de oleaje externo, denominado RCPWAVE, que permite determinar la propagación del oleaje sobre un área de batimetría irregular. Los resultados obtenidos

mostraron que el trayecto de los frentes de oleaje normal resulta influenciado en cierta medida por los arrecifes circundantes, mismos que proporcionan un grado de protección hacia el interior del puerto. De igual manera, el oleaje extremal también es afectado notoriamente por la acción protectora de los arrecifes, cuya profundidad provoca el rompimiento de la ola en una gran distancia previa antes de llegar a la bocana.

Figura 4.2.C – Curva de Probabilidad de Excedencia (Todas las Direcciones)



FUENTE: Valores obtenidos del análisis de información recopilada.

Finalmente, para llevar a cabo el análisis de propagación de oleaje a partir de la bocana, y hacia el interior del Puerto de Veracruz, se utilizó un modelo de refracción y difracción combinadas denominado REFDIF, cuyos resultados concluyeron que la penetración del oleaje hacia el interior del puerto no es significativa, ya que éste se disipa rápidamente en los primeros 1,200 m hacia el interior del puerto. Las condiciones máximas hacia el interior del puerto corresponden ambas al oleaje proveniente del este, el cual en la zona de la bocana es de 1.2 y 1.3 m (normal y ciclónico), disipándose rápidamente hasta valores de altura de ola comprendidos entre 0 y 0.30 m.

Como consecuencia de este análisis se concluyó que el oleaje no es un proceso significativo que afecte a la maniobrabilidad en el interior del puerto.

4.2.3 MAREAS

Los principales niveles de marea correspondientes a la zona se obtuvieron de las Tablas de Predicción de Mareas del Golfo de México, editadas por la Secretaría de Marina de la Armada de México. Del análisis de estas tablas se encontró que la marea en el Puerto de Veracruz es de tipo mixta diurna, con amplitud media de 0.51 m y amplitud máxima de 1.49 m. Los principales niveles de referencia de la marea están presentados en la *Tabla 4.2.D*.

Tabla 4.2.D – Niveles Principales de la Marea en el Puerto de Veracruz

NIVEL DE REFERENCIA	
Pleamar Máxima Registrada	1.005 m
Nivel de Pleamar Media	0.508 m
Nivel Medio del Mar	0.293 m
Nivel de Bajamar Media	0.000 m
Bajamar Mínima Registrada	- 0.487 m

FUENTE: *Tablas de Predicción de Mareas del Golfo de México. Secretaría de Marina, 1998.*

4.2.4 CORRIENTES

Otro de los fenómenos que actúan en la zona en estudio lo conforman las corrientes, las cuales provocan un efecto de arrastre y deriva de las embarcaciones similar al que pueden provocar los vientos, debido a la gran superficie de contacto que tienen los buques con las corrientes en su abra viva (parte sumergida del buque).

El análisis de corrientes en la zona, se basó en los datos del Atlas Oceanográfico del Golfo de México y Mar Caribe, en su sección I correspondiente a mareas y corrientes (Secretaría de Marina). Estos datos muestran el comportamiento zonal de las corrientes

oceánicas en una zona determinada durante períodos característicos, es decir, verano e invierno, como lo muestra la *Tabla 4.2.E*.

Tabla 4.2.E – Corrientes Superficiales, Periodos Verano e Invierno

VERANO				
DIRECCIÓN	VEL. MEDIA [nudos]	FRECUENCIA [%]		FRECUENCIA TOTAL [%]
		0.1 - 0.9	1.0 - 1.9	
SW	0.6	14.50	3	17.50
W	0.4	12.95	-	12.95
NW	0.5	18.13	0.75	18.88
N	0.5	11.91	-	11.91
NE	0.5	11.39	0.75	12.14
E	0.4	5.70	-	5.70
SE	0.4	5.70	0.75	6.45
S	0.5	6.73	0.75	7.48
Calma				7.00
Total				100

INVIERNO					
DIRECCIÓN	VEL. MEDIA [nudos]	FRECUENCIA [%]			FRECUENCIA TOTAL [%]
		0.1 - 0.9	1.0 - 1.9	2.0 - 2.9	
SW	0.7	13.13	3.11	-	16.24
W	0.6	12.61	1.78	-	14.39
NW	0.4	12.08	-	-	12.08
N	0.5	9.46	1.78	-	11.23
NE	0.5	10.51	0.44	-	10.95
E	0.5	11.03	0.44	-	11.48
SE	0.8	5.78	-	2.00	7.78
S	0.8	8.41	4.44	-	12.85
Calma					3.00
Total					100.00

FUENTE: *Atlas Oceanográfico del Golfo de México y Mar Caribe, Sección I. Secretaría de Marina, 1974.*

Con base en los datos de la distribución frecuencial de corrientes, y atendiendo a su magnitud, fueron elaboradas las rosas de corrientes para el verano y el invierno. Se observó que el comportamiento de las corrientes en ambos períodos resulta ser muy similar, ya que para el verano su magnitud fluctúa en un rango de 0.5 a 0.6 nudos, predominantemente en dirección noroeste, oeste y suroeste, mientras que en invierno la distribución se uniformiza en las mismas direcciones, con magnitudes entre 0.4 a 0.8 nudos. Estas corrientes superficiales no representaban un efecto de importancia en la zona de estudio.

4.3 REVISIÓN DE LOS ESCENARIOS PROPUESTOS

Esta sección contiene los resultados de la revisión efectuada a las alternativas propuestas que integran los Escenarios No. 1 y 2, la cual estuvo enfocada a determinar las ventajas y desventajas de cada opción de manera previa a la realización de las simulaciones, considerando fundamentalmente los siguientes aspectos: las condiciones climatológicas, los lineamientos de dimensionamiento portuario propuestos por instituciones reconocidas a nivel mundial y las condiciones de amarre.

4.3.1 REVISIÓN POR CONDICIONES CLIMATOLÓGICAS

De acuerdo con el estudio de las condiciones ambientales, el fenómeno físico de mayor influencia en la maniobrabilidad de las embarcaciones es sin duda alguna el viento, cuyos efectos dependen de su magnitud, dirección y duración, razón suficiente para que el dimensionamiento contemplara los efectos que tendrían los vientos sobre las naves durante el desarrollo de sus maniobras y aún estando atracadas.

Por lo que respecta a la revisión de la orientación de los muelles, se hizo referencia a las condiciones de viento significantes en la zona, cuyas direcciones de incidencia y valores promedio máximos por dirección se presentan en la sección anterior, con el fin de estimar cuantitativamente las ventajas y desventajas de la orientación de los muelles en

espigón, en función de la magnitud y frecuencia de las componentes de viento que generarían deriva en las embarcaciones atracadas en los muelles.

El Escenario No. 1 consideraba dos muelles orientados en sentido paralelo al frente de atraque contiguo. La orientación del eje del muelle en espigón No. 1 presentaba un azimut de 147.8° , sensiblemente paralelo al frente de atraque de la TUM, mientras que la orientación del eje del muelle en espigón No. 2 tenía un azimut de 152.8° , siendo paralelo al frente de atraque de la terminal especializada de contenedores. La orientación de los muelles apenas difería 5° entre ambos, razón por la cual el efecto del viento tendería a ser similar para los dos.

Es evidente que las condicionantes del viento influyen de manera decisiva las maniobras de aproximación de las embarcaciones, principalmente sobre los buques con gran superficie de exposición, debido a que al tratar de alcanzar una posición adecuada para su atraque y operación en muelle los vientos inciden de través a la embarcación, provocando una mayor deriva.

Para conocer el comportamiento de las embarcaciones estando atracadas, fue necesario analizar el alineamiento de los muelles en espigón, determinando el ángulo que formaban las direcciones de los vientos mas frecuentes con respecto al eje de los muelles y por consiguiente, con respecto a la superficie vélica de las embarcaciones que en ellos atracarían, como lo muestra la *Tabla 4.3.A*.

Tabla 4.3.A – Ángulos de Incidencia de los Vientos con Respecto a los Muelles (Escenario No. 1)

DIRECCIÓN DEL VIENTO	ÁNGULO CON RESPECTO AL EJE DEL MUELLE No. 1	ÁNGULO CON RESPECTO AL EJE DEL MUELLE No. 2
NW	12.8°	17.8°
N	32.2°	27.2°
NE	102.8°	107.8°
E	57.8°	62.8°
SE	12.8°	17.8°

FUENTE: Valores obtenidos del análisis de las alternativas propuestas.

Resulta claro que la acción del viento se torna más desfavorable al incidir de manera perpendicular a la embarcación, por lo cual los vientos provenientes del noreste y este eran los más desfavorables para la embarcación estando esta atracada, sin embargo, también debe considerarse la magnitud del evento para definir sus efectos en las embarcaciones.

La acción de los vientos sobre ambos espigones para el caso del Escenario No. 1 se manifestaría con una clara tendencia a la deriva en dirección oeste, siendo más relevante para el muelle No. 1 donde el viento proveniente del norte generaba la componente más significativa de la deriva, como consecuencia del ángulo con el cual incidía en la embarcación y de su magnitud. La componente del viento proveniente del noroeste generaba una deriva hacia el este, que debía considerarse en virtud de su magnitud apreciable y atendiendo a su distribución frecuencial.

Por lo anterior, se concluyó que la orientación propuesta en el Escenario No. 1 resultaba adecuada considerando específicamente el aspecto relativo a la orientación de los muelles en espigón y la influencia del viento, principal fenómeno físico de la zona, sin embargo, tiene implícita una reducida disponibilidad de espacios para las maniobras en la mayoría de las posiciones de atraque.

Por otra parte, el Escenario No. 2 consideraba un solo muelle en espigón cuyo eje poseía un alineamiento con un azimut de 176.25° , además de un frente de agua muy ajustado para permitir la maniobra de atraque y desatraque en la zona del muelle de cementos, que conservaría su alineamiento original, correspondiente a un azimut de 99.26° aproximadamente. Los ángulos que formaban las direcciones significantes del viento con respecto a la orientación de los muelles se presentan en la *Tabla 4.3.B*.

El efecto del viento en este muelle en espigón resultó similar al descrito para los muelles del Escenario No. 1, es decir, una vez atracado el buque su principal tendencia de deriva sería hacia el oeste a causa de las direcciones predominantes norte, noreste, este y sureste. Además, la posición de atraque en el muelle de cementos vería limitados los espacios requeridos para la maniobra de atraque y desatraque, debido a la disposición del muelle en espigón contiguo, siendo la situación más desfavorable la correspondiente a los vientos del norte.

Tabla 4.3.B – Ángulos de Incidencia de los Vientos con Respecto a los Muelles (Escenario No. 2)

DIRECCIÓN DEL VIENTO	ÁNGULO CON RESPECTO AL EJE DEL MUELLE EN ESPIGÓN	ÁNGULO CON RESPECTO AL EJE DEL MUELLE DE CEMENTOS
NW	41.25°	54.26°
N	3.75°	80.74°
NE	131.25°	35.74°
E	86.25°	9.26°
SE	-41.25°	54.26°

FUENTE: Valores obtenidos del análisis de las alternativas propuestas.

Bajo estas consideraciones, el arreglo del Escenario No. 2 representaba una opción más sensible a la acción de los vientos como consecuencia de su orientación y de la estrecha disponibilidad de espacios en el muelle de cementos, pero proporcionaba una superficie mayor de agua para las maniobras de las embarcaciones de mayor tamaño, en la zona de la terminal de contenedores y en el frente de atraque de graneles.

4.3.2 REVISIÓN POR CRITERIOS DE DIMENSIONAMIENTO

Se realizó una revisión de los espacios disponibles en los dos escenarios propuestos bajo los criterios y recomendaciones de dimensionamiento de entidades reconocidas, como son los criterios de diseño del PIANC y de la U.S. Navy, los criterios de dimensionamiento de EXXON y el Manual de Dimensionamiento Portuario de la SCT.

La revisión consideró las dimensiones de las embarcaciones de diseño, tanto en sus valores medios como máximos. El criterio de revisión consistió en determinar la magnitud de los espacios requeridos acorde con un criterio en particular y compararlo directamente con el espacio disponible en los escenarios 1 y 2, cuyas dimensiones se presentan en las *Figuras 4.1.B y 4.1.C* previamente mostradas y se resumen en la columna titulada "espacio disponible" dentro de la *Tabla 4.3.C*.

Para el proceso de revisión, se calcularon los valores recomendables de ancho (W) y largo (L) para cada terminal, haciendo uso de las expresiones establecidas por los diferentes criterios, tomando como base los valores de la manga (M) y eslora (E) de los

barcos de diseño, establecidos en las *Tablas 4.1.A y 4.1.B*. Posteriormente se compararon las dimensiones obtenidas con los espacios disponibles para cada escenario, dividiendo entre sí dichos valores, de manera tal que valores mayores de 1 en la columna de relación denominada "R" corresponden a los casos donde los criterios de dimensionamiento se satisficieron e incluso fueron rebasados al ser suficientes los espacios disponibles. La *Tabla 4.3.C* comprende los resultados de la revisión, para ambos escenarios y para las diferentes dimensiones, promedio y máximas, de las embarcaciones consideradas.

Tabla 4.3.C – Revisión del Dimensionamiento de las Areas de Agua para las Alternativas Propuestas

ESCENARIO No 1		
BARCO DE DISEÑO POR TIPO DE CARGA Y TERMINAL	ESPACIO DISPONIBLE	
	ANCHO [m]	LARGO [m]
Para Dimensiones Medias y Máximas de los Barcos de Diseño		
1. Contenedores (ICAVE)	131.28	490
2. Contenedores (TUM)	141.84	262
3. Granos (ALSUR)	131.28	200
4. Aluminios (ALUDER)	115.1	200
5. Cementos (APASCO)	115.1	200
6. Fluidos (CMT, LATEX, ASTRO)	141.84	200
7. Tubos y Chatarra (TAMSA)	98.17	304
Para Otras Embarcaciones Extremas		
1. M/V London Maersk	131.28	490
2. M/V Maersk Namhal	131.28	490

ESCENARIO No 1												
No. BARCO DE DISEÑO	CRITERIO DE REVISIÓN DEL ESPACIO DISPONIBLE											
	EXXON						U. S. NAVY					
	W=4M	R	W=5M	R	L=2E	R	W=2.5M	R	W=2.4M	R	L=2.4E	R
Para Dimensiones Medias de los Barcos de Diseño												
1	128.8	1.0	161	0.8	404	1.2	64.4	2.0	77.3	1.7	484.8	1.0
2	120	1.2	150	0.9	354	0.7	60	2.4	72	1.8	424.8	0.6
3	120	1.1	150	0.9	376	0.5	60	2.2	72	1.8	451.2	0.4
4	82.5	1.4	103.2	1.1	280	0.7	41.2	2.8	49.5	2.3	336	0.6
5	100	1.2	125	0.9	320	0.6	50	2.3	60	1.9	384	0.5

ESCENARIO No 1												
No. BARCO DE DISEÑO	CRITERIO DE REVISIÓN DEL ESPACIO DISPONIBLE											
	EXXON						U. S. NAVY					
	W=4M	R	W=5M	R	L=2E	R	W=2.5M	R	W=2.4M	R	L=2.4E	R
Para Dimensiones Medias de los Barcos de Diseño (continuación)												
6	80	1.8	100	1.4	228.6	0.9	40	3.6	48	2.9	274.4	0.7
7	92	1.1	115	0.9	281.1	1.1	46	2.1	55.2	1.8	337.3	0.9
Para Dimensiones Máximas de los Barcos de Diseño												
1	129.1	1.0	161.4	0.8	518	0.9	64.6	2.0	77.5	1.7	621.6	0.8
2	128.8	1.1	161	0.9	480	0.6	64.4	2.2	77.3	1.8	576	0.5
3	128.8	1.0	161	0.8	459.2	0.4	64.4	2.1	77.3	1.7	551.1	0.4
4	91.4	1.3	114.3	1.0	320	0.6	45.7	2.5	54.7	2.1	384	0.5
5	120	0.9	150	0.8	380	0.5	60	1.9	72	1.6	456	0.4
6	129	1.1	161.2	0.9	353.6	0.6	64.5	2.2	77.4	1.8	424.3	0.5
7	120	0.8	150	0.7	364	0.8	60	1.6	72	1.4	436.8	0.7
Para Otras Embarcaciones Extremas												
8	129.2	1.0	161.5	0.8	577	0.9	64.6	2.0	77.5	1.7	692.4	0.7
9	128.8	1.0	161	0.8	579	0.9	64.4	2.0	77.3	1.7	694.8	0.7

ESCENARIO No 1											
No. BARCO DE DISEÑO	CRITERIO DE REVISIÓN DEL ESPACIO DISPONIBLE										
	MANUAL S.C.T.					PIANC					
	W=1.1E	R	L=2E	R	W=5M	R	W=6.8M+40	R	L _{min} =E+15	R	
Para Dimensiones Medias de los Barcos de Diseño											
1	222.2	0.6	404	1.2	161	0.8	259	0.5	217	2.3	
2	194.7	0.7	354	0.7	150	0.9	244	0.6	192	1.4	
3	206.8	0.6	376	0.5	150	0.9	244	0.5	203	0.9	
4	154	0.8	280	0.7	103.2	1.1	180.4	0.6	155	1.3	
5	176	0.7	320	0.6	125	0.9	210	0.6	175	1.1	
6	125.8	1.1	228.6	0.9	100	1.4	176	0.8	129.3	1.6	
7	154.6	0.6	281.1	1.1	115	0.9	196.4	0.5	155.6	1.9	
Para Dimensiones Máximas de los Barcos de Diseño											
1	284.9	0.5	518	0.9	161.4	0.8	259.5	0.5	274	1.8	
2	264	0.5	480	0.6	161	0.9	259	0.6	255	1.0	
3	252.5	0.5	459.2	0.4	161	0.8	259	0.5	244.6	0.8	
4	176	0.7	320	0.6	114.3	1.0	195.4	0.6	175	1.1	
5	209	0.6	380	0.5	150	0.8	244	0.5	205	0.9	
6	194.5	0.7	353.6	0.6	161.3	0.9	259.3	0.6	191.8	1.0	
7	200.2	0.5	364	0.8	150	0.7	244	0.4	197	1.5	
Para Otras Embarcaciones Extremas											
8	317.4	0.4	577	0.9	161.5	0.8	259.6	0.5	303.5	1.6	
9	318.5	0.4	579	0.9	161	0.8	259	0.5	304.5	1.6	

ESCENARIO No 2		
BARCO DE DISEÑO POR TIPO DE CARGA Y TERMINAL	ESPACIO DISPONIBLE	
	ANCHO [m]	LARGO [m]
Para Dimensiones Medias y Máximas de los Barcos de Diseño		
1. Contenedores (ICAVE)	125.6	490
2. Contenedores (TUM)	67.72	262
3. Granos (ALSUR)	125.6	200
4. Aluminios (ALUDER)	65.4	200
5. Cementos (APASCO)	260	250
6. Fluidos (CMT, LATEX, ASTRO)	65.4	200
7. Tubos y Chatarra (TAMSA)	98.17	304
Para Otras Embarcaciones Extremas		
1. M/V London Maersk	125.65	490
2. M/V Maersk Namhal	125.65	490

ESCENARIO No 2												
No. BARCO DE DISEÑO	CRITERIO DE REVISIÓN DEL ESPACIO DISPONIBLE											
	EXXON						U. S. NAVY					
	W=4M	R	W=5M	R	L=2E	R	W=2.5M	R	W=2.4M	R	L=2.4E	R
Para Dimensiones Medias de los Barcos de Diseño												
1	128.8	0.9	161	0.8	404	1.2	64.4	1.9	77.3	1.6	484.8	1.0
2	120	0.6	150	0.5	354	0.7	60	1.1	72	0.9	424.8	0.6
3	120	1.1	150	0.8	376	0.5	60	2.1	72	1.7	451.2	0.4
4	82.6	0.8	103.2	0.6	280	0.7	41.3	1.6	49.5	1.3	336	0.6
5	100	2.6	125	2.1	320	0.8	50	5.2	60	4.3	384	0.7
6	80	0.8	100	0.7	228.6	0.9	40	1.6	48	1.4	274.4	0.7
7	92	1.1	115	0.9	281.1	1.1	46	2.1	55.2	1.8	337.3	0.9
Para Dimensiones Máximas de los Barcos de Diseño												
1	129.1	0.9	161.4	0.8	518	0.9	64.6	2.0	77.5	1.6	621.6	0.8
2	128.8	0.5	161	0.4	480	0.6	64.4	1.1	77.3	0.9	576	0.5
3	128.8	0.9	161	0.8	459.2	0.4	64.4	2.0	77.3	1.6	551.1	0.4
4	91.4	0.7	114.3	0.6	320	0.6	45.7	1.4	54.9	1.2	384	0.5
5	120	2.2	150	1.7	380	0.5	60	4.3	72	3.6	456	0.4
6	129	0.5	161.3	0.4	353.6	0.6	64.5	1.0	77.4	0.8	424.3	0.5
7	120	0.8	150	0.7	364	0.8	60	1.6	72	1.4	436.8	0.7
Para Otras Embarcaciones Extremas												
8	129.2	0.9	161.5	0.8	577	0.9	64.6	1.9	77.5	1.6	692.4	0.7
9	128.8	0.9	161	0.8	579	0.9	64.4	1.9	77.3	1.6	694.8	0.7

ESCENARIO No 2										
No. BARCO DE DISEÑO	CRITERIO DE REVISIÓN DEL ESPACIO DISPONIBLE									
	MANUAL S.C.T.				PIANC					
	W=1.1E	R	L=2E	R	W=5M	R	W=6.8M+40	R	L _{min} =E+15	R
Para Dimensiones Medias de los Barcos de Diseño										
1	222.2	0.6	404	1.2	161	0.8	259	0.5	217	2.3
2	194.7	0.4	354	0.7	150	0.5	244	0.3	192	1.4
3	206.8	0.6	376	0.5	150	0.8	244	0.5	203	0.9
4	154	0.4	280	0.7	103.2	0.6	180.4	0.4	155	1.3
5	176	1.5	320	0.8	125	2.1	210	1.2	175	1.4
6	125.8	0.5	228.6	0.9	100	0.7	176	0.4	129.3	1.6
7	154.6	0.6	281.1	1.1	115	0.9	196.4	0.5	155.6	2.0
Para Dimensiones Máximas de los Barcos de Diseño										
1	284.9	0.4	518	0.9	161.4	0.8	259.5	0.5	274	1.8
2	264	0.3	480	0.6	161	0.4	259	0.3	255	1.0
3	252.6	0.5	459.2	0.4	161	0.8	259	0.5	244.6	0.8
4	176	0.4	320	0.6	114.3	0.6	195.4	0.3	175	1.1
5	209	1.2	380	0.5	150	1.7	244	1.1	205	0.9
6	194.48	0.3	353.6	0.6	161.3	0.4	259.3	0.3	191.8	1.0
7	200.2	0.5	364	0.8	150	0.7	244	0.4	197	1.5
Para Otras Embarcaciones Extremas										
8	317.35	0.4	577	0.9	161.5	0.8	259.6	0.5	303.5	1.6
9	318.5	0.4	579	0.9	161	0.8	259	0.5	304.5	1.6

W.- Ancho L.- Largo E.- Estora M.- Manga R.- Relación de espacios: Disponible/Calculado

FUENTE: Valores obtenidos del análisis de las alternativas propuestas.

Con base en la tabla anterior, se concluyó que las condiciones del Escenario No. 1 implicaban mayores restricciones de espacio y consecuentemente una complejidad más elevada de las maniobras por realizar, pero con la ventaja de que contaba con una posición de atraque más y con una orientación aparentemente conveniente, por lo que hasta este punto no se contaba con información suficiente para desechar esta alternativa.

En ese mismo sentido, el Escenario No. 2 representaba una solución que proporcionaba mayor disponibilidad de espacio para las bandas de atraque de la zona este, con la consecuente reducción de una posición de atraque potencial en comparación con el Escenario No. 1, adicionalmente a una mayor complejidad en las maniobras de acceso, atraque, desatraque y salida en el muelle 6 norte, en el muelle de la TUM y en el de cementos. De manera similar, dadas las pocas variantes disponibles, serían otros factores los que permitirían aceptar o desechar este escenario.

Asimismo, la tabla muestra que los criterios de revisión no se satisfacen en un elevado número de terminales; sin embargo la necesidad del puerto de aumentar la cantidad de posiciones de atraque era ineludible ante el notable crecimiento de la demanda de los servicios del puerto. Por lo anterior, se decidió recurrir a un estudio de simulación de maniobras, ya que de esta manera se podía establecer si los pilotos de puerto, bajo la influencia de condiciones ambientales diversas, serían capaces de maniobrar con seguridad las embarcaciones en los escenarios propuestos.

4.3.3 REVISIÓN POR CONDICIONES DE AMARRE

La revisión efectuada contempló también las condiciones potenciales de amarre, asociadas con la longitud del muelle en espigón contiguo a la terminal de contenedores de ICAVE. Esta revisión fue necesaria debido a los 230 m de eslora que tendría el barco granelero que atracaría en dicho muelle, ya que esta dimensión sobrepasaría la longitud propuesta del muelle.

Definitivamente las condiciones teóricas de amarre no resultaban totalmente recomendables, sobre todo considerando la tendencia a la deriva que tendrán las embarcaciones en esa posición de atraque, a menos que se evitara alcanzar los valores máximos permisibles de esfuerzo en las amarras, así como las variaciones verticales y horizontales excesivas. Esto dependía, entre otras cosas, de la distribución de bitas en el muelle y de los dispositivos para amarre con que contara la embarcación.

4.4 SIMULACIÓN DE MANIOBRAS

Para la realización de la simulación de maniobras contempladas en este proyecto, se requirieron los servicios del laboratorio de enseñanza norteamericano RTM STAR Center, localizado en Dania, Florida, en el que se empleó un modelo de simulación de tiempo real denominado *Simulador de Puente Principal y Misión Completa*.

De manera general, las etapas desarrolladas para la aplicación del simulador fueron:

- a) Recopilación amplia de información sobre el entorno a simular.
- b) Implementación del esquema visual y selección de los modelos de respuesta de embarcaciones y remolcadores.
- c) Etapa de validación del modelo.
- d) Etapa de simulaciones.
- e) Análisis y evaluación de resultados.

Una vez recabada la información de importancia sobre el puerto, la cual fue realizada de acuerdo con los aspectos descritos en las secciones anteriores, personal especializado del centro de simulación se encargó de la implementación del modelo visual que reprodujera las características del puerto de Veracruz y de las embarcaciones que de él harían uso.

En un campo virtual fueron reproducidos los elementos más significantes en tierra (bodegas, edificios, grúas, etc.), ayudas a la navegación, rompeolas y todas las estructuras de importancia, construyendo un escenario visual que refleja fielmente las condiciones físicas del puerto. La implementación del esquema visual requirió de cartas, mapas y archivos fotográficos recabados durante la etapa de recopilación de información y en una visita realizada al puerto. Asimismo, sobre el esquema visual se adaptaron los diferentes arreglos de los muelles para conformar cada uno de los escenarios sujetos a la modelación.

Por otro lado, previo inicio de cualquier simulación, personal del STAR Center evaluó que los equipos de remolque disponibles en el Puerto de Veracruz contaran con suficiente capacidad para controlar embarcaciones de diversos tamaños bajo efectos extremos del viento, para posteriormente establecer los límites máximos permisibles de control para dichos remolcadores. Además se revisó la compatibilidad de los modelos matemáticos de remolcadores convencionales con que cuenta STAR Center con los equipos que actualmente existen en Veracruz.

El modelo de respuesta de las embarcaciones y remolcadores es una representación matemática del movimiento del barco simulado, el cual toma en cuenta las

fuerzas aerodinámicas e hidrodinámicas que actúan sobre la embarcación, las fuerzas de control asociadas a las propelas, thrusters y remolcadores, así como las fuerzas externas, tales como las inducidas por viento, corrientes, márgenes y otras embarcaciones. Asimismo, el modelo calcula la aceleración y el movimiento del barco, considerando estados variables de carga según sea el caso. Para este estudio se utilizaron seis modelos de respuesta, mismos que se enlistan en la *Tabla 4.4.A*, donde además se hace una comparación con los requerimientos originalmente impuestos por APIVER para la conducción de este proyecto.

Tabla 4.4.A – Modelos de Respuesta de Embarcaciones

EMBARCACIÓN Tipo	ESLORA [m]		MANGA [m]		CALADO [m]	
	API	Simulada	API	Simulada	API	Simulada
Granelero de 60,000 TPM en lastre	230	234	32.2	32.2	-	9.6
Granelero de 60,000 TPM a plena carga (ALSUR)	230	234	32.2	32.2	12.7	12.8
Portacontenedores (TUM) a plena carga	240	241	32.2	32.2	11.5	10.2
Portacontenedores (ICAIVE)	289.5	294	32.2	32.2	11.5	11.5
Carguero a plena carga (Cementos)	190	188	30	32.2	9.8	11.2
Tanquero a plena carga (Mineral-Chatarra)	182	180.5	30	32.3	11	10

FUENTE: Datos de APIVER y STAR Center referentes a la realización del proyecto.

Como todo modelo matemático, un simulador debe sujetarse a una fase de validación y calibración que permita evaluar su respuesta con respecto a la realidad que se pretende simular, por lo que esta etapa tiene especial importancia al revisar la implementación del modelo de manera que sus resultados sean confiables. Sin duda alguna, la participación del factor humano es igualmente trascendental en la validación, al permitir de manera mas completa la interrelación entre los factores que intervienen en la navegación y control de un barco, por lo que es de gran utilidad la participación de los pilotos de puerto.

La etapa de validación del modelo visual fue realizada en primera instancia por expertos en maniobrabilidad y navegación de RTM STAR Center, para posteriormente contar con la participación de los pilotos del Puerto de Veracruz, quienes revisaron el campo virtual del modelo y verificaron que las instalaciones, áreas de agua, señalizaciones y demás elementos contenidos en la animación fueran acordes con los realmente existentes en el puerto.

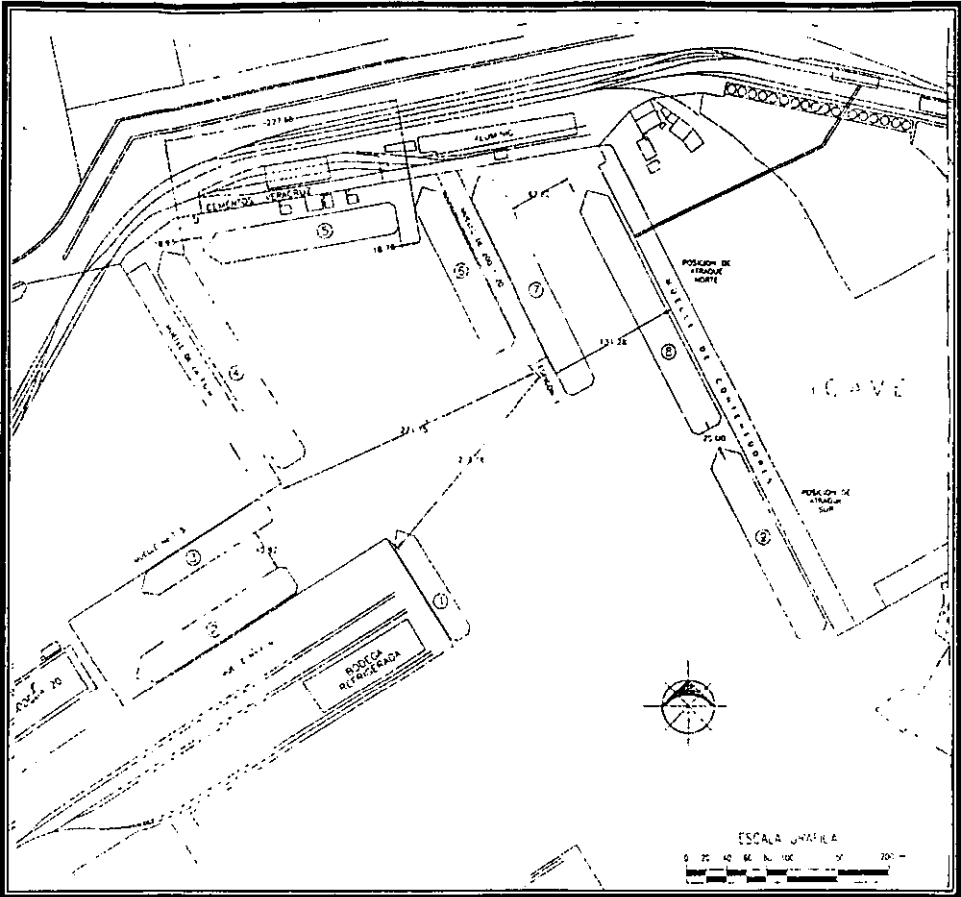
La etapa de simulación contó también con la participación de los pilotos, los cuales, con su experiencia, apoyaron el proyecto mediante la realización de las maniobras en los diversos escenarios evaluados, y cuyas observaciones particulares se analizaron por medio de una serie de cuestionarios de evaluación.

La simulación de las maniobras consideró cuatro escenarios diferentes, siendo éstos:

- a) El Escenario No. 1.
- b) El Escenario No. 2.
- c) El Escenario No. 3, que constituía una variante de los escenarios anteriores, según ilustra la *Figura 4.4.A*.
- d) El Escenario No. 4, propuesto en la misma etapa de simulación a la vista de los resultados de las maniobras, como lo muestra la *Figura 4.4.B*.

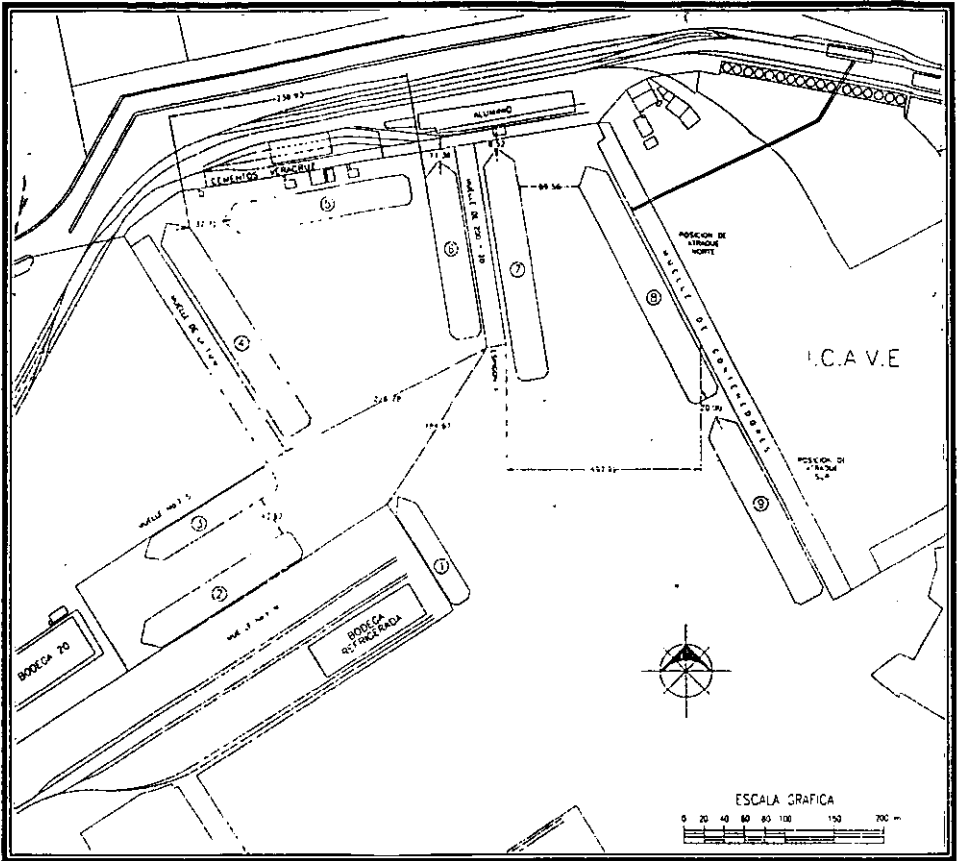
En total se realizaron dos maniobras en la etapa de validación y cincuenta y cuatro maniobras en la etapa de simulación, distribuidas de la siguiente forma: veintinueve maniobras correspondientes al Escenario No. 1, veinte maniobras correspondientes al Escenario No. 2, dos maniobras correspondientes al Escenario No. 3 y tres maniobras correspondientes al Escenario No. 4.

Figura 4.4.A – Escenario No. 3 de Disposición de Muelles en Espigón



FUENTE: Consultoría Yáñez – Taylor S.A. de C.V., 1998.

Figura 4.4.B – Escenario No. 4 de Disposición de Muelles en Espigón



FUENTE: Consultoría Yañez – Taylor S.A. de C.V., 1998.

Con la información obtenida de las corridas, se elaboraron una serie de resúmenes que presentaban las variables que distinguieron a cada una de las maniobras simuladas, definiendo si se trataba de una maniobra de entrada o de salida, la embarcación operada, las embarcaciones atracadas para cada maniobra en particular, el nombre del piloto que realizó la maniobra, el tiempo de duración y las observaciones particulares. Como ejemplo se presenta la *Tabla 4.4.B*, fragmento del resumen de las maniobras del Escenario No. 1.

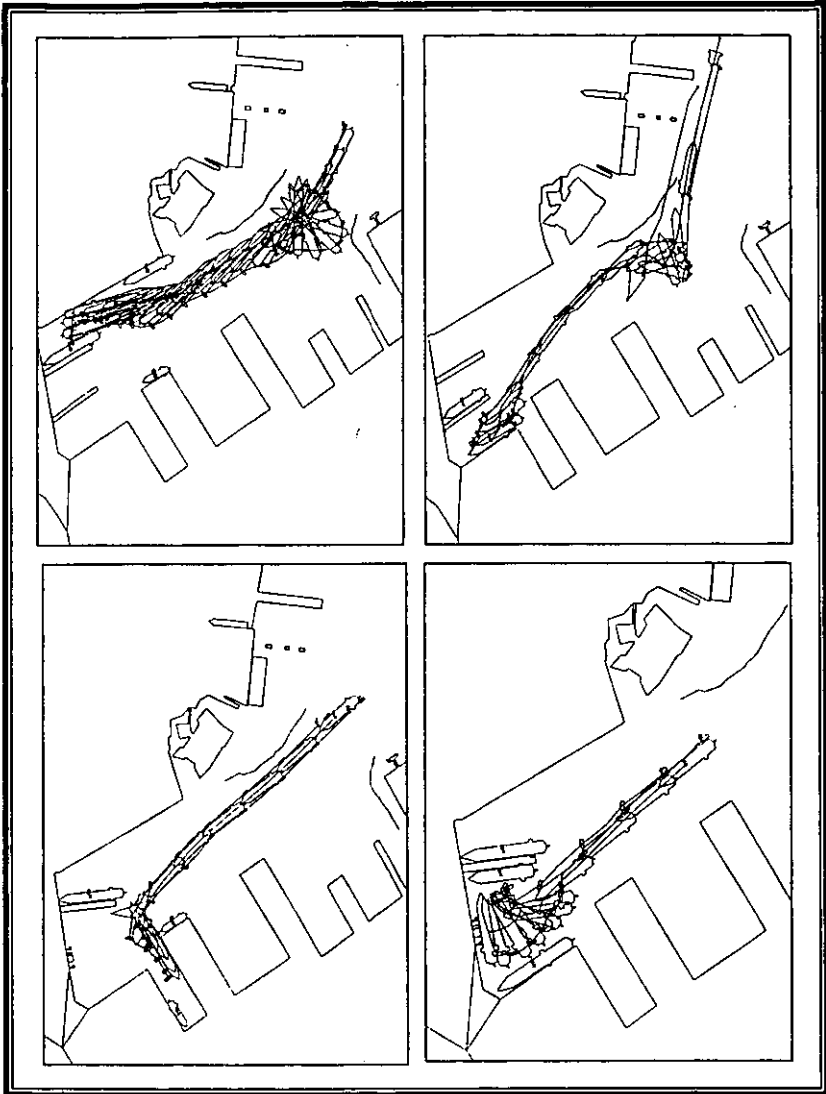
Tabla 4.4.B – Ejemplo de Relación de Maniobras Simuladas (Escenario No. 1)

No	TIPO DE MANIOBRA	VIENTO	EMBARCACIONES		CAPTN.	DUR.	OBSERVACIONES
			En Operación	Atracadas			
24	Salida del Muelle 6N	NW, 26 nudos	Mineral Chatarra 180.5	Tubos 119.9 – muelle 6E / Fluidos 180.5 – muelle 7S / Contenedores 241 – TUM / Fluidos 180.5 – banda W espigón 1 / Granelero 234 – banda E espigón 1 / Contenedores 198 – ICAVE Sur	Tuero	10 min.	Maniobra sin éxito, ya que impactó con la embarcación Granelera
25	Salida del Muelle 6N	NW, 26 nudos	Mineral Chatarra 180.5	Tubos 119.9 – muelle 6E / Fluidos 180.5 – muelle 7S / Contenedores 241 – TUM / Fluidos 180.5 – banda W espigón 1 / Granelero 234 – banda E espigón 1 / Contenedores 198 – ICAVE Sur	Tuero	18 min.	Maniobra con éxito
26	Salida del Muelle 6N	N, 25 nudos	Mineral Chatarra 180.5	Tubos 119.9 – muelle 6E / Fluidos 180.5 – muelle 7S / Contenedores 241 – TUM / Fluidos 180.5 – banda W espigón 1 / Granelero 234 – banda E espigón 1 / Contenedores 198 – ICAVE Sur	Cárdenas	21 min.	Maniobra con éxito
27	Salida	NW, 26 nudos	Contenedores 241 TUM	Mineral Chatarra 180.5 – muelle 6N / Fluidos 180.5 – muelle 7S / Fluidos 180.5 – banda W espigón 1	Tuero	5 min.	Maniobra sin éxito, impacto con la embarcación de Fluidos en la banda W del espigón 1.

FUENTE: Datos obtenidos a partir de la simulación.

Para cada una de las maniobras fue realizada una impresión gráfica de su evolución en intervalos de tiempo de 60 segundos, mostrando el arreglo del puerto sometido a análisis, las trayectorias de la embarcación en operación y de los remolcadores, así como la ocupación de otras posiciones de atraque que reducen los espacios para el buen desarrollo de la maniobra. Algunos ejemplos de estas gráficas se ilustran en la *Figura 4.4.C*.

Figura 4.4.C – Ejemplos de Gráficas de Simulación en Veracruz



FUENTE: Gráficas obtenidas a partir de la simulación.

El análisis cuidadoso de las maniobras simuladas permitió a los especialistas del centro de simulación y a los consultores desarrollar una evaluación de resultados, identificando las zonas con problemas asociados a la maniobrabilidad de los buques, con el fin de proporcionar elementos suficientes para tomar una decisión que considerara el

grado de seguridad de las maniobras asociadas a los nuevos espacios, las restricciones operativas asociadas a la ocupación de otros muelles y el manejo y distribución de carga en cada uno de los escenarios.

4.5 IMPACTOS OPERATIVOS DEBIDO A LA OPTIMIZACIÓN

En primer lugar, se llevó a cabo una evaluación por espacios mínimos, que se refiere al espacio con que debe contar una embarcación en movimiento para maniobrar de manera segura, traduciéndose ese requerimiento en la definición de una distancia mínima admisible con respecto a cualquier otra embarcación o estructura contra la cual pueda sufrir una colisión. En ese sentido, la graficación de las maniobras simuladas por RTM STAR Center permitió cuantificar la distancia mínima del buque simulado con respecto a puntos con peligro potencial de colisión durante cada maniobra, para posteriormente comparar esta distancia con los requerimientos mínimos establecidos en normas.

La distancia mínima considerada depende de las dimensiones de las embarcaciones, por lo que, de manera general y buscando cubrir los diversos tipos de barcos analizados, se tomó como requerimiento mínimo un espacio libre de aproximadamente 1.2 veces la manga de las naves de mayor tamaño. Considerando diversos criterios de dimensionamiento (PIANC, EXXON, U.S. Navy, etc.) se encontró un valor promedio de 35 m para las dimensiones de los buques en estudio. De este modo, al registrarse distancias inferiores a la mínima de 35 m, se consideraba que la maniobra representaba un riesgo, tanto a para las embarcaciones como para los muelles.

Por otro lado, se llevó a cabo una evaluación por el grado de complejidad de la maniobra, es decir, el grado de dificultad que tiene su realización, atendiendo diversos factores y parámetros que implica su desarrollo, como son el tiempo requerido para la maniobra, la deriva presentada por la embarcación y el requerimiento o uso de los remolcadores.

Nuevamente, las gráficas de las trayectorias de embarcaciones y remolcadores resultaron de gran utilidad, dado que la posición de la embarcación y remolcadores queda

plasmada cada 60 segundos, de manera que una gráfica densa representaba una maniobra complicada. Asimismo, la posición de los remolcadores y la evolución de la maniobra permitían estimar el grado de requerimiento de estos equipos, mientras que el tiempo total requerido para la culminación de la maniobra fue registrado para su análisis.

A cada uno de estos parámetros les fue asignada una calificación, partiendo de sistema de referencia los valores de 0, 5 y 10. Una vez evaluados los tres parámetros descritos, estos se conjuntaron y el valor promedio de las calificaciones atribuidas fue asignado como calificación final de la maniobra bajo análisis por grado de complejidad.

Sin duda alguna, los resultados de la simulación constituían un factor determinante de evaluación para determinar la factibilidad de un arreglo con muelles en espigón para el Puerto de Veracruz. Estos resultados mostraron que todos los escenarios analizados tenían asociada una compleja problemática con respecto a la reducción de espacios, sin embargo, también se pudo apreciar que el escenario No. 2 y en mayor medida, su variante plasmada en el escenario No. 4, presentaban menores restricciones a la maniobrabilidad, algunas de las cuales incluso podían solucionarse con determinadas acciones, y debían evaluarse desde el punto de vista operativo.

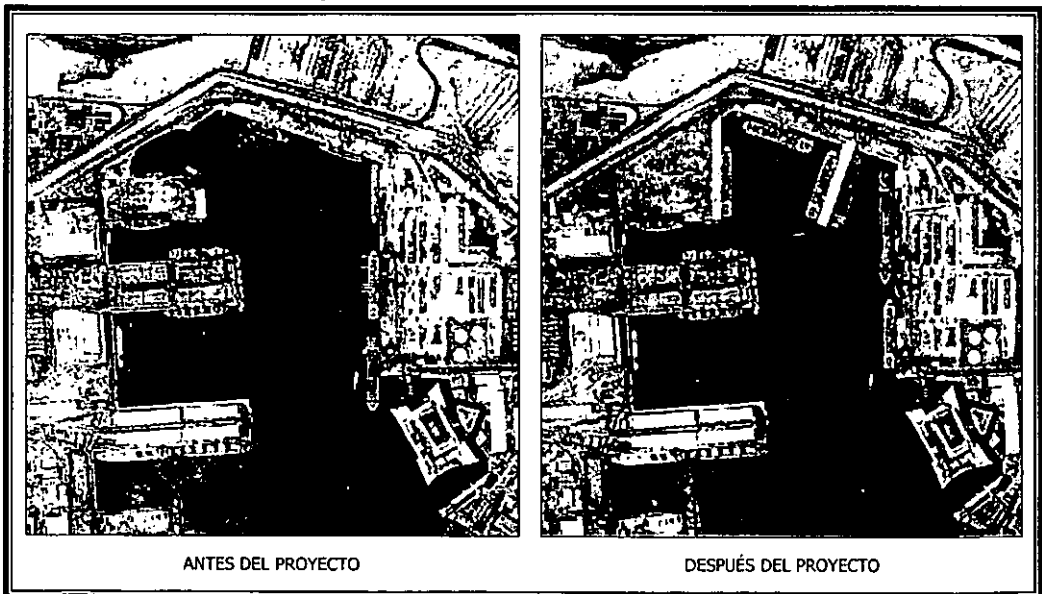
Considerando exclusivamente los aspectos asociados a la salvaguarda de la seguridad marítima, se concluyó lo siguiente:

- a) El factor mas desfavorable para la maniobrabilidad de las embarcaciones en el interior del Puerto de Veracruz resultó ser el viento. Las características naturales y artificiales de protección y abrigo permitirían que particularmente para la zona norte, el resto de los procesos físicos no influyeran en la operación de las embarcaciones.
- b) Por lo que se refiere a la operación del puerto, la navegación en el canal de acceso no se ve restringida con vientos menores de 25 nudos (45 Km/h) en cualquier dirección de incidencia y para embarcaciones de dimensiones como las simuladas, ya que la velocidad que presentaban las embarcaciones en el canal de acceso era de hasta 5 nudos, siendo suficiente para vencer las fuerzas de deriva que pudieran provocarse. Esta conclusión se corroboró al observar los resultados de todas las maniobras de ciaboga llevadas a cabo en el simulador, que indicaban que el más grande de los buques simulados (portacontenedores de 294 m de eslora), en un estado de reposo y controlado sólomente por medio de remolcadores, nunca tuvo efectos de deriva que

- pusieran en peligro a las embarcaciones.
- c) La problemática asociada a la maniobrabilidad bajo estas condiciones de viento dependía de los espacios en los muelles y no de las condiciones de aproximación.
 - d) Considerando el acceso al puerto de embarcaciones tan grandes como los portacontenedores que esperaría recibir ICAVE (con eslora mayor o igual a 294 m), debía contemplarse como restricción operativa la realización de sus maniobras con velocidades hasta de 15 nudos (27 Km/h), como consecuencia de que estos barcos no llegaban a plena carga y tenían por lo tanto mayor superficie vélica. Sin embargo, en el momento en que estas embarcaciones pudieran ingresar con condición de carga completa, esta restricción sería liberada y se consideraría como limitante para el ingreso vientos hasta de 25 nudos (45 Km/h).
 - e) Debido al ingreso de las embarcaciones anteriormente citadas, resultaría necesario evaluar las condiciones físicas del fondo del puerto y la cimentación de las estructuras existentes, para determinar la factibilidad de realizar dragados a la elevación -13.00 m, en el canal de acceso y en la dársena de servicio de ICAVE. Adicionalmente, esta situación implicaría la necesidad de aumentar hasta los límites que las estructuras de atraque existentes permitan, las dimensiones de la dársena de ciaboga.
 - f) El arreglo correspondiente al escenario No. 1 (dos muelles en espigón) resultó el menos factible, ya que restringía totalmente la operación de la TUM y los muelles 6 E y 6 N y obligaba movimientos operativos de importancia en la terminal especializada de ICAVE.
 - g) El escenario No. 2 presentaba limitaciones menos severas para la maniobrabilidad, correspondiendo éstas a las posiciones de atraque ubicadas entre la TUM y la banda oeste del muelle en espigón, quedando especialmente restringido el muelle de cementos. Estas restricciones desaparecerían cuando una de las embarcaciones no ocupe su posición de atraque, así como en toda maniobra de salida.
 - h) En el escenario No. 2 las maniobras para las posiciones de atraque de los muelles 6 N y 7 S también estarían parcialmente restringidas, fundamentalmente por la presencia del muelle en espigón; de igual manera, estas restricciones podrían eliminarse al no existir en el momento de la maniobra una embarcación tan grande atracada el muelle en espigón, o bien con remolcadores tipo tractor.

- i) El escenario No. 3 no mejoraría las restricciones de maniobrabilidad y condicionantes operativas presentadas en el escenario No. 1, además de que la maniobrabilidad en la zona comprendida entre la banda Norte de ICAVE y la banda Este del muelle en espigón quedaba supeditada a la ausencia de una embarcación en las posiciones de atraque posibles, siendo esta una restricción similar a la encontrada en el escenario No. 1.
- j) El escenario No. 4 presenta las mismas restricciones de maniobrabilidad que el escenario No. 2 para la zona comprendida entre la TUM y la banda oeste del muelle en espigón, sin embargo, proporciona mayor holgura para la banda de atraque norte de ICAVE. Por lo tanto, el Escenario No. 4 constituía la mejor opción al presentar menores restricciones a la maniobrabilidad. La *Figura 4.5.A* muestra dos fotografías aéreas de la zona del proyecto, antes y después de la implementación de este escenario.

Figura 4.5.A – Arreglo de Muelles Implementado en el Puerto de Veracruz



FUENTE: Consultoría Yáñez – Taylor S.A. de C.V., 1998.

- k) La disponibilidad de espacios para el arreglo seleccionado originaría la necesidad de que el puerto de Veracruz cuente equipos mas versátiles que los remolcadores

convencionales que actualmente prestan asistencia a las maniobras de embarcaciones. La versatilidad de dichos equipos se refiere a la posibilidad de desarrollar eficientemente empuje y tensión en espacios reducidos, lo cual podría lograrse con dos remolcadores tipo tractor o shottel, con una potencia de cuando menos 5,000 Hp.

Por lo que se refiere a las condiciones operativas generales del puerto, resultaba recomendable revisar los límites actualmente existentes de los valores máximos del viento que provocaban el cierre de éste. Para ese fin, sin duda alguna, los resultados y experiencias obtenidas mediante el uso del simulador resultaron de gran utilidad.

Es evidente que el caso práctico referente al Puerto de Veracruz constituye un ejemplo realmente ilustrativo sobre los nuevos criterios para el dimensionamiento portuario. A pesar de que el proyecto abarcó un análisis mucho más elaborado y profundo de los aspectos mencionados en este capítulo, los puntos presentados cumplen con el objetivo de dar a conocer un proyecto real, llevado a cabo en nuestro país, de diseño y evaluación de la factibilidad operativa de las instalaciones portuarias, haciendo uso de técnicas modernas aplicadas a nivel internacional.

CAPÍTULO V

CASO PRÁCTICO DE OPERACIÓN PORTUARIA

Con el objeto de complementar el ejemplo presentado en el Capítulo IV, que ilustra un caso práctico de dimensionamiento portuario, resulta conveniente mostrar otro caso práctico en el que se apliquen los criterios actuales para la optimización de la operación en un puerto.

Por lo anterior, este capítulo describe el proyecto que se realizó para generar un manual de operaciones marítimas en el Puerto de Coatzacoalcos (Consultoría Yáñez – Taylor S.A. de C.V., 2000), con base en un estudio de maniobrabilidad apoyado en simulaciones de tiempo real.

5.1 EL PUERTO DE COATZACOALCOS

Coatzacoalcos es un puerto industrial y comercial que, junto con el puerto de Pajaritos (localizado justo enfrente de Coatzacoalcos), forman un complejo portuario de gran capacidad para manejar prácticamente cualquier tipo de carga. La *Figura 5.1.A* muestra una fotografía panorámica del Puerto de Coatzacoalcos.

Coatzacoalcos se especializa en el manejo de graneles y carga general, además del manejo de petroquímicos. Pajaritos es básicamente un puerto petrolero operado casi por completo por PEMEX. Este estudio, sin embargo, se enfocó únicamente al área del muelle marginal de Coatzacoalcos, por lo que la zona de Pajaritos quedó excluida.

Debido al incremento de carga y de las actividades comerciales en el Puerto de Coatzacoalcos, la Administración Portuaria Integral (API) de Coatzacoalcos determinó una revisión de las necesidades de infraestructura y equipamiento que demandan las embarcaciones comerciales que arriban al puerto, así como de las políticas de operación

aplicadas para las maniobras de acceso, navegación interna, atraque y desatraque de las naves bajo condiciones ambientales típicas de la zona costera donde se ubica el puerto.

Figura 5.1.A – Vista Panorámica del Puerto de Coatzacoalcos



FUENTE: Página de Internet del Puerto de Coatzacoalcos, 2001.

Por esto se decidió realizar un estudio de maniobrabilidad, para lo cual se contrató a la empresa RTM STAR Center, organismo que cuenta con un simulador de puente de embarcaciones de misión completa y tiempo real. Trabajando en forma conjunta con los pilotos de puerto, el estudio buscó también que estos prestadores de servicios practicasen, en condiciones límite de seguridad, los procedimientos aplicados para la maniobrabilidad de las embarcaciones en las áreas de navegación, esperando con ello incrementar su habilidad marítima y dar lugar a propuestas para preservar y mejorar la seguridad de las maniobras en el puerto. Como resultado final de este estudio, se obtendrían las recomendaciones para establecer procedimientos normalizados para las operaciones marítimas que se presenten en el Puerto de Coatzacoalcos y sus terminales.

5.2 DETERMINACIÓN DE LAS CONDICIONES AMBIENTALES

Durante los arribos o salidas del puerto de Coatzacoalcos, los pilotos de puerto, los operadores de remolcadores y la capitania deben permanecer siempre alertas de la acción simultánea de los factores ambientales sobre las embarcaciones, con la finalidad de preservar la seguridad marítima.

La información de las variables físicas que rigen en el Puerto de Coatzacoalcos se extrajo de estudios previos proporcionados por la API, así como de documentos y publicaciones que tratan dichos aspectos. Además, la información recopilada se complementó con los comentarios que hicieron los pilotos de puerto.

Cabe mencionar que la información referente a las condiciones ambientales extremas (tormentas, inundaciones, etc.) resultaba de poco interés para el estudio de maniobrabilidad, ya que únicamente eran relevantes los datos representativos de las condiciones normales y límite en las cuales las embarcaciones pueden operar, los cuales se analizan a continuación.

5.2.1 VIENTO

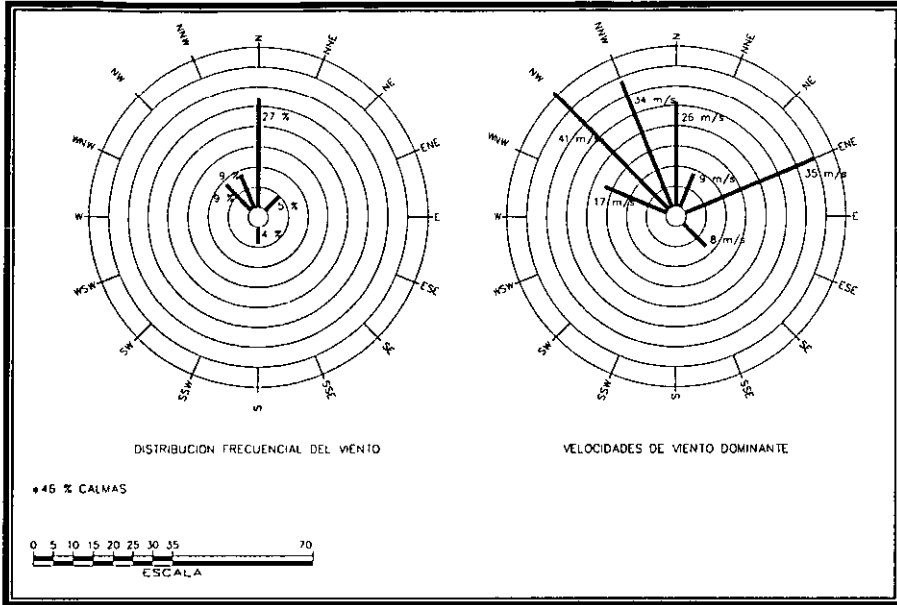
La velocidad y dirección del viento fueron proporcionadas por Puertos Mexicanos, con base en registros de estaciones climatológicas cercanas al puerto de Coatzacoalcos obtenidos durante varios años y que se consideran una fuente confiable de información.

La *Figura 5.2.A* muestra las rosas de viento dominante y reinante. A partir de ellas fue posible determinar la velocidad y dirección del viento. Particularmente, los vientos más frecuentes provienen del norte (el 27% del tiempo), con algunos vientos provenientes del NE, del NW y del NNW. Asimismo, la mayor parte del tiempo (46%) se tienen condiciones de calma.

De los vientos dominantes mostrados en la misma figura se puede apreciar que las rachas de viento más fuertes provienen del NW a 41 m/s, del ENE a 35 m/s y del NNW a 34 m/s (80, 68 y 66 nudos, respectivamente). De igual manera, del norte se tienen

vientos con velocidades importantes de 26 m/s (51 nudos). El resto de las direcciones no presentaba rachas de importancia.

Figura 5.2.A – Condiciones de Viento



FUENTE: Estaciones climatológicas de Puertos Mexicanos.

Los comentarios de los pilotos de puerto acerca de las condiciones de viento prevalecientes también fueron recopilados. Ellos afirmaban que de octubre a marzo, los vientos más fuertes provienen del NW a 60 km/h (32 nudos), mientras que el resto del año son del orden de 10 ó 15 nudos del NNE.

Por lo tanto, se pudo identificar que los vientos más fuertes provienen del sector N – NE y que las observaciones de los pilotos de puerto fueron muy similares a los registros disponibles. Adicionalmente, las condiciones más severas de viento para operaciones marítimas fluctúan alrededor de los 30 nudos. Por consiguiente, las simulaciones debían ser conducidas en un rango que oscilara entre 15 y 30 nudos, dependiendo de la maniobra.

5.2.2 OLEAJE

Tal vez el factor costero más importante para la navegación en mar abierto sea el oleaje. Esto se acentúa de manera particular en la zona de la bocana de puertos fluviales. Ante este fenómeno, las embarcaciones responden con un movimiento vertical.

La mejor fuente de información disponible sobre oleaje en esta zona del Golfo de México fue generada por el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos ("US Army Corps of Engineers") y es conocida como WIS ("Wave Information Studies"), la cual comprende un modelo matemático que calcula el oleaje a partir de datos de presión atmosférica obtenidos con fotogrametría satelital, calibrado por medio de mediciones de boyas colocadas en aguas profundas en diferentes lugares en el Golfo de México. Los resultados se proporcionan para determinadas estaciones que no son más que puntos específicos de una malla reticular creada para todo el Golfo de México, que han proporcionado la altura, periodo y dirección del oleaje cada tres horas, a lo largo de veinte años.

Con la enorme cantidad de información proporcionada por esta fuente de datos, se creó una rosa de oleaje que muestra las alturas de ola y otra que muestra los periodos de ola. Esta información reveló que la mayoría de las olas provienen del sector N – NE (87%); de hecho, la dirección noreste es la que impacta de manera más importante la zona de Coatzacoalcos (43%). Asimismo, se determinó que las olas más frecuentes son aquéllas con periodos de 4 a 6 segundos, de las cuales las olas con periodos mayores a 6 segundos solamente actúan el 8 % del tiempo. La *Tabla 5.2.A* muestra un resumen de las condiciones de oleaje por dirección, obtenidas de procesar los datos de la Estación WIS 108 en aguas profundas.

Tabla 5.2.A – Condiciones de Oleaje en Aguas Profundas (Estación WIS 108)

PARÁMETRO	DIRECCIÓN						
	WNW	NW	NNW	N	NNE	NE	ENE
Altura de Ola [m]	0.8	1.0	1.4	1.3	0.9	0.5	0.3
Periodo [s]	4.4	4.9	5.7	5.5	5.1	4.6	4.2
Frecuencia [%]	0.04	0.16	3.43	17.39	26.31	43.22	9.45

FUENTE: Estación WIS 108. US Army Corps of Engineers, 1999.

En este sentido, los pilotos de puerto comentaron que cuando se presentan trenes de oleaje provenientes del norte resulta muy difícil y riesgoso cruzar la zona de las escolleras en la embarcación de los pilotos, debido al encuentro de este oleaje con las corrientes salientes, y que por ende no era posible llegar hasta la embarcación. Por desgracia, este aspecto quedó fuera del alcance de este proyecto, pues en él se consideraban únicamente las maniobras de los buques y no de las embarcaciones de los pilotos.

Para propósitos de la simulación se recomendó emplear oleajes provenientes del norte y del noreste con alturas de ola no mayores a 1.5 m. La razón de esto es que oleajes mayores a esta magnitud medidos en aguas profundas, solamente ocurren el 8% del tiempo, lo que significa que son condiciones que están cerca del límite que actualmente rige las maniobras en el puerto.

5.2.3 MAREAS

Las mareas en la región costera de Coatzacoalcos son de tipo diurna con rangos mixtos de magnitud. Las mareas han sido registradas por más de 20 años por el Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Con base en estos registros, la Dirección General de Oceanografía Naval publica anualmente las Tablas Numéricas de Predicción de Mareas, que no son otra cosa que una serie de tiempo de los niveles de agua medidos con un mareógrafo en la desembocadura del Río Coatzacoalcos. La *Tabla 5.2.B* muestra los planos de marea para la zona en estudio.

Tabla 5.2.B – Planos de Marea para el Puerto de Coatzacoalcos

Nivel Máximo Registrado	3.570 ft	1.088 m
Nivel de Pleamar Media	1.575 ft	0.479 m
Nivel Medio del Mar	0.920 ft	0.280 m
Nivel de Bajamar Media	0.000 ft	0.000 m
Nivel Mínimo Registrado	-1.730 ft	-0.528 m

FUENTE: *Tablas de Mareas. Golfo de México y Caribe. Dir. Gral. de Oceanografía Naval, 2000.*

5.2.4 CORRIENTES

El puerto de Coatzacoalcos y las zonas acuáticas cercanas están influenciadas por diferentes tipos de corrientes. En la zona frente al muelle marginal, las corrientes producto de la descarga del río son las que predominan. En la zona de la bocana, donde se localiza el canal de acceso, tanto las corrientes fluviales como las inducidas por la marea son importantes. En la zona de mar abierto, en donde usualmente se localizan las monoboyas, sólo las corrientes oceanográficas y aquéllas inducidas por el oleaje pueden ser relevantes.

En mar abierto, durante la temporada de verano las velocidades promedio para casi todas las direcciones se encuentran alrededor de los 0.5 nudos, con condiciones de calma el 7% del tiempo. Menos del 2% de las observaciones se encuentran entre 1 y 1.9 nudos desde la dirección noreste, mientras que el resto de las direcciones presenta condiciones menores a 1 nudo. Las condiciones invernales son ligeramente más severas, mostrando corrientes de 1 a 1.9 nudos para las direcciones N, NE, E y W. El 3% del tiempo se registran calmas en la zona.

Por su parte, los pilotos de puerto afirmaron que las corrientes son normalmente de 1 nudo en el océano, provenientes del noroeste. Estas experiencias resultaron similares a los registros de corrientes, por lo que se obtuvo una referencia adecuada para la estimación de las corrientes que se emplearían en el simulador, las cuales debían tener diferentes direcciones con magnitudes de aproximadamente 1 nudo.

Por otro lado, las corrientes generadas en la descarga a la altura de las escolleras resultaban de particular importancia dado que los pilotos de puerto identificaron esta zona como un punto crítico, al encontrarse ahí las corrientes del río, del océano y los oleajes. El estudio incluyó la modelación de las corrientes empleando diferentes alturas de ola, periodos y direcciones. Las alturas de ola empleadas fueron 1.05 m, 3.5 m y 6.5 m, por lo que sólo la primera implicó algún interés para el estudio de maniobrabilidad.

Los resultados de la modelación de las corrientes mostraban que un oleaje de 1.05 metros podía generar corrientes en la zona de la descarga de 0.7 m/s (1.4 nudos) aproximadamente. No obstante, estas corrientes son solamente generadas en la zona cercana a las escolleras, lejos del canal de acceso, por lo que la navegación no se afecta demasiado.

Sin embargo, el factor físico más importante dentro del puerto lo constituyen las corrientes del río, que varían de acuerdo a la descarga del mismo. De hecho, las corrientes fluviales comprenderían un factor muy importante en las maniobras requeridas para atracar en la antigua terminal de ferrocarrilas.

Cornejo Velasco (1994) realizó un estudio hidrológico para comparar las descargas del río con los volúmenes de dragado en el área comercial de Coatzacoalcos. Como parte de este estudio se presentaron mediciones desde 1953 hasta 1981 para calcular los gastos máximos, mínimos y promedio, como se muestra en la *Tabla 5.2.C*

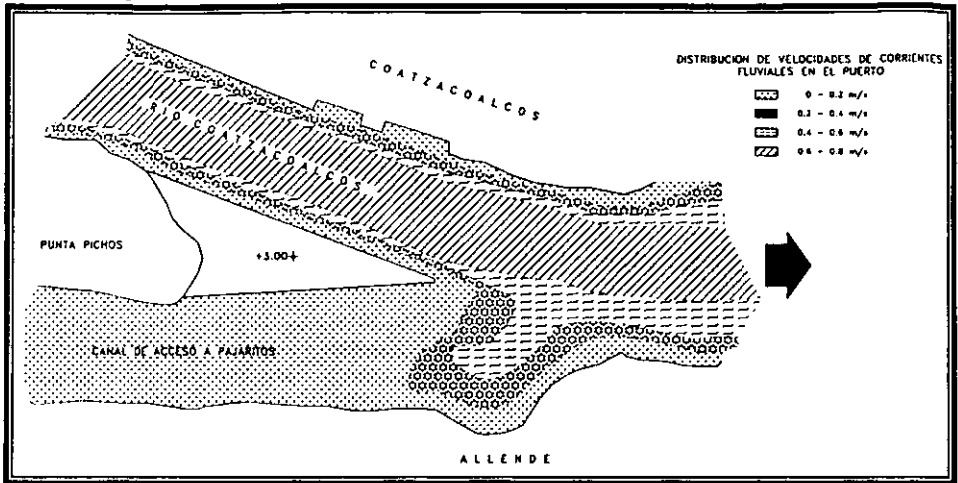
Parte de los resultados obtenidos en este estudio se muestran en la *Figura 5.2.B* que ilustra los valores de la corriente a lo largo del cauce frente al muelle marginal. Esta figura indica claramente que las corrientes máximas se presentan en el centro del cauce, por donde pasa el canal de navegación, y fluctúan entre 0.6 m/s y 0.8 m/s (de 1.2 a 1.6 nudos).

Tabla 5.2.C – Gastos de Descarga en el Río Coatzacoalcos

MES	GASTOS EXTREMOS				GASTO MEDIO [m ³ /s]
	MÁXIMO		MÍNIMO		
	Fecha	m ³ /s	Fecha	m ³ /s	
Enero	Ene/ 18 /1965	816.3	Ene/ 31 /1958	110.0	231.3
Febrero	Feb/ 27 /1974	878.0	Feb/ 28 /1971	61.0	181.0
Marzo	Mar/ 01 /1974	486.8	Mar/ 28 /1971	50.1	126.9
Abril	Abr/ 18 /1954	627.0	Abr/ 30 /1975	27.7	93.0
Mayo	May/ 27 /1956	955.0	May/ 07 /1975	18.0	77.2
Junio	Jun/ 30 /1981	2,242.0	Jun/ 01 /1975	24.0	203.2
Julio	Jul/ 15 /1955	3,220.0	Jul/ 02 /1975	70.1	724.0
Agosto	Ago/ 28 /1971	6,000.0	Ago/ 03 /1975	137.0	877.0
Septiembre	Sep/ 23 /1978	7,430.0	Sep/ 03 /1973	195.0	117.6
Octubre	Oct/ 10 / 1973	5,203.0	Oct/ 09 / 1959	228.0	732.9
Noviembre	Nov/ 07 /1961	4,240.0	Nov/ 29 /1967	179.0	418.4
Diciembre	Dic/ 07 /1980	1,720.0	Dic/ 31 /1976	42.0	307.7

FUENTE: Proceso azolve – dragado en el bajo Río Coatzacoalcos. Cornejo Velasco, 1994

Figura 5.2.B – Distribución de Velocidades de Corrientes Fluviales



FUENTE: Proceso azolve – dragado en el bajo Río Coatzacoalcos. Comejo Velasco, 1994

Con la finalidad de recopilar mayor información sobre las corrientes en el Río Coatzacoalcos, se calcularon las velocidades medias aprovechando los gastos de descarga de la tabla anterior y considerando diferentes secciones hidráulicas transversales a lo largo del río.

Con base en la condición de gasto medio máximo de $877 \text{ m}^3/\text{s}$ registrada en el mes de agosto, la velocidad media del flujo en el río resultó de 0.43 nudos; para una condición de gasto máximo promedio, la descarga es de $2,818 \text{ m}^3/\text{s}$ y la velocidad correspondiente fue de 1.40 nudos.

La experiencia de los pilotos también resultó importante, aunque debía ser considerada con cierta cautela, puesto que en ocasiones toman lecturas del velocímetro Dopler del barco, que también considera la velocidad del mismo. Esta velocidad es, por lo tanto, relativa a la velocidad del barco y no corresponde a la del río. En este caso, los pilotos mencionaron que las condiciones normales de corriente varían entre 3 y 4 nudos, y durante la época de lluvias alcanzan los 7 u 8 nudos.

Dada la importancia de las corrientes fluviales en el estudio de maniobrabilidad, fue necesario que los pilotos validaran el modelo. En este caso, las corrientes debían fluctuar entre los 3 y 4 nudos, ajustándose conforme la simulación avanzaba.

5.3 PREPARACIÓN DEL MODELO VISUAL DEL PUERTO

Una vez completada la recolección de información visual del puerto (mediante fotografías, video, planos, etc.) se procedió a elaborar el modelo visual del puerto. Esto consistió en crear el conjunto de imágenes que son proyectadas en el simulador conformando la visual del puerto desde el puente de mando de la embarcación. Como parte del modelo visual, se ingresan e identifican en el simulador las zonas de tierra, mismas que son mostradas en el radar del puente de mando.

Este modelo fue sometido a los comentarios de los pilotos para su validación. En este sentido, los pilotos pidieron que se colocaran referencias adicionales como son unas torres que se localizan en el puente río arriba, pues constituían una referencia importante para la navegación en el puerto.

Por otra parte, los modelos matemáticos de respuesta de embarcaciones han sido desarrollados directamente por el STAR Center y corresponden a prototipos actualmente en funcionamiento. Estos modelos matemáticos fueron conformados con base en información de los constructores navales, ensayos de prueba en prototipos e información propia de la base de datos del STAR Center. El tipo de modelos de respuesta utilizados en el estudio se resumen en la *Tabla 5.3.A* y se muestran en la *Figura 5.3.A* (con excepción del barco Taku Ferry, que no se encuentra disponible gráficamente).

Tabla 5.3.A – Modelos de Respuesta de Embarcaciones

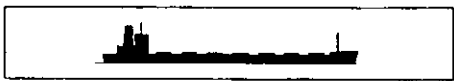
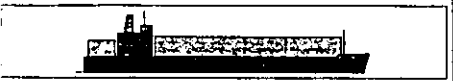


MODELO	TIPO DE EMBARCACIÓN	ESLORA [m]	MANGA [m]	CALADO [m]
Dania Exporter	Contenedores	198	32.2	9.5
Gulf Star	Granelero	234	32.2	7.6 / 9.6
Colon Princess	Ferry de pasajeros	152	23.1	5.1
Taku Ferry	Ferry de pasajeros	107	No disp.	No disp.

FUENTE: Modelos de simulación del STAR Center.

Con respecto a las embarcaciones empleadas, las primeras dos (el de contenedores y el granelero) formaron la parte más importante del estudio, puesto que con ellas se

probaron las condiciones límite de maniobra. Las dos embarcaciones restantes fueron empleadas para realizar maniobras en la terminal de ferrocarriles. En este caso no fue posible, dados los alcances contratados del estudio, contar con el barco que se tenía esperado arribara a esta posición de atraque. En su lugar se empleó el modelo del barco Colon Princess, el más similar al barco que ocuparía esta posición (denominado Bali Sea), disponible en la base de datos del STAR Center.

Figura 5.3.A – Modelos de Buques Empleados para la Simulación

OWNSHIP PARTICULARS		OWNSHIP PARTICULARS	
Vessel Name: GULF STAR		Vessel Name: DAMA EXPORTER	
Type: Bulk Carrier	60,000	Type: Containership	34,390
Call Sign: TEU:	<input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Call Sign: WCTD	TEU: 2300
LOA: 767.8 ft 234.0 m	LBP: 718.5 ft 219.0 m	LOA: 648.6 ft 198.0 m	LBP: 622.4 ft 190.0 m
Beam: 106.6 ft 32.2 m	Depth: ft m	Beam: 106.6 ft 32.2 m	Depth: ft m
Load Condition: Ballasted	Draft: AFT 31.5 ft FWD 24.3 ft	Load Condition: Loaded	Draft: AFT 31.2 ft FWD 31.2 ft
	9.8 m 7.8 m		9.6 m 9.5 m
Eyeport distance from the Bow: 633.2 ft 193.0 m	Height of Eye above the Water: 82.0 ft 25.0 m	Eyeport distance from the Bow: -411.6 ft -156.0 m	Height of Eye above the Water: 75.5 ft 23.0 m
Radar antenna offset from the Eyeport: -18.9 ft -5.5 m	Radar antenna height above the Water: 116.5 ft 35.6 m	Radar antenna offset from the Eyeport: ft 0.0 m	Radar antenna height above the Water: 88.4 ft 27.0 m
			
Propulsion: SLOW SPEED DIESEL	HP: 6,706	Propulsion: DIESEL	HP: 12,946
No. of Propellers: 1CW	Pitch: <input checked="" type="checkbox"/> Fixed <input type="checkbox"/> Variable	No. of Propellers: 1CW	Pitch: <input checked="" type="checkbox"/> Fixed <input type="checkbox"/> Variable
No. of Rudders: 1	Max. Rudder Angle: 35 Degrees	No. of Rudders: 1	Max. Rudder Angle: 35 Degrees
Thrusters: <input type="checkbox"/> Stern HP <input type="checkbox"/> Bow HP		Thrusters: <input type="checkbox"/> Stern HP <input checked="" type="checkbox"/> Bow 1475 HP	
OWNSHIP PARTICULARS		OWNSHIP PARTICULARS	
Vessel Name: COLON PRINCESS		Vessel Name: COLON PRINCESS	
Type: Passenger Ferry	10,015	Type: Passenger Ferry	10,015
Call Sign: EHWW	TEU:	Call Sign: EHWW	TEU:
LOA: 498.7 ft 152.0 m	LBP: 469.8 ft 143.2 m	LOA: 498.7 ft 152.0 m	LBP: 469.8 ft 143.2 m
Beam: 78.8 ft 23.1 m	Depth: 45.9 ft 14 m	Beam: 78.8 ft 23.1 m	Depth: 45.9 ft 14 m
Load Condition: Service	Draft: AFT 16.7 ft FWD 16.7 ft	Load Condition: Service	Draft: AFT 16.7 ft FWD 16.7 ft
	8.1 m 8.1 m		8.1 m 8.1 m
Eyeport distance from the Bow: 602.6 ft 183.2 m	Height of Eye above the Water: 47.6 ft 14.5 m	Eyeport distance from the Bow: 602.6 ft 183.2 m	Height of Eye above the Water: 47.6 ft 14.5 m
Radar antenna offset from the Eyeport: 29.9 ft 9.0 m	Radar antenna height above the Water: 100.1 ft 30.8 m	Radar antenna offset from the Eyeport: 29.9 ft 9.0 m	Radar antenna height above the Water: 100.1 ft 30.8 m
			
Propulsion: DIESEL	HP: 25,104	Propulsion: DIESEL	HP: 25,104
No. of Propellers: 2inward Turning	Pitch: <input type="checkbox"/> Fixed <input checked="" type="checkbox"/> Variable	No. of Propellers: 2inward Turning	Pitch: <input type="checkbox"/> Fixed <input checked="" type="checkbox"/> Variable
No. of Rudders: 2	Max. Rudder Angle: 35 Degrees	No. of Rudders: 2	Max. Rudder Angle: 35 Degrees
Thrusters: <input type="checkbox"/> Stern HP <input checked="" type="checkbox"/> Bow 987 HP		Thrusters: <input type="checkbox"/> Stern HP <input checked="" type="checkbox"/> Bow 987 HP	

FUENTE: Modelos de simulación del STAR Center.

Finalmente vale la pena mencionar que todo modelo matemático que sea aplicado para reproducir algún fenómeno físico o proceso operativo, como es el caso del utilizado para este estudio por el STAR Center, requiere de una etapa de preparación y calibración para asegurar su confiabilidad. En este caso, la etapa de preparación inició con la captura, directamente en campo, de imágenes del sitio en estudio y la observación directa de maniobras de llegada y salida de las embarcaciones. Posteriormente se capturaron los datos y parámetros que documentaban las condiciones físicas del lugar, la climatología o entorno físico bajo el cual operan rutinariamente las embarcaciones y por último, las características geométricas y dinámicas de las embarcaciones a simular.

Capturada toda la información de interés, el simulador debió ser sometido a una etapa de verificación y ajuste para poder hacer los cambios o modificaciones que fuesen necesarios, hasta llegar a reproducir las condiciones reales observadas en campo.

El modelo visual desarrollado del puerto de Coatzacoalcos mostraba detalladamente los muelles conforme a observaciones e información disponible en planos de proyecto. El modelo también incluía detalles sobre la morfología de la línea de costa, las ayudas a la navegación y las demás características distintivas de la zona del proyecto para asegurar un alto nivel de exactitud durante los ejercicios de simulación.

5.4 CAMPAÑA DE SIMULACIÓN

Se diseñó una campaña de simulación de cuatro días que tuvo como finalidad estudiar las condiciones de maniobrabilidad en el puerto bajo condiciones extremas e inusuales para los pilotos del puerto. Por otra parte, se estudiarían también las maniobras en la nueva posición de atraque, conocida actualmente como terminal de ferrocarriles, y que la API de Coatzacoalcos deseaba comenzar a operar como terminal de ferry – buques.

Una vez planeada la campaña de simulación, se trasladó a los pilotos de puerto a la ciudad de Dania, Florida, para la validación del simulador. En el estudio participaron cuatro pilotos. La *Tabla 5.4.A* resume los ensayos de la campaña de simulación desarrollada; se llevó a cabo una campaña de 28 simulaciones con cuatro embarcaciones.

Tabla 5.4.A – Listado de Maniobras Simuladas

ORDEN DE LA CORRIDA	DIRECCIÓN DE LA MANIOBRA	MODELO DE EMBARCACIÓN	VIENTO [nudos]	CORRIENTE [nudos]	PILOTO No.
1	Entrada/Atraque	Contenedores	0	3	2
2	NO REALIZADA				
3	Entrada/Atraque	Contenedores	ENE 15	3	3
4	Entrada/Atraque	Contenedores	NW 15	3	4
5	Salida/Desatraque	Contenedores	NW 15	3	1
6	Salida/Desatraque	Contenedores	NW 15	3	1
7	Entrada/Atraque	Contenedores	ENE 20	3	2
8	Salida/Desatraque	Contenedores	NW 20	3	3
9	Entrada/Atraque	Granelero	ENE 20	3	4
10	Salida/Desatraque	Granelero	NW 20	3	1
11	Salida/Desatraque	Contenedores	ENE 20	3	2
12	Entrada/Atraque	Granelero	NW 20	3	3
13	Salida/Desatraque	Granelero	ENE 25	3	4
14	Salida/Desatraque	Granelero	NW 25	3	1
15	Entrada/Atraque	Contenedores	NW 30	3	2
16	Salida/Desatraque	Granelero	ENE 20	3	3
17	Salida/Desatraque	Granelero	NW 30	5	4
18	Entrada/Atraque	Granelero	NW 25	3	1
19	Salida/Desatraque	Contenedores	ENE 30	7	2
20	Entrada/Atraque	Granelero	ENE 30	5	3
21	Entrada/Atraque	Contenedores	NW 25	5	4
22	Entrada/Atraque	Ferry grande	NW 15	3	2
23	Entrada/Atraque	Ferry grande	ENE 15	3	1
24	Salida/Desatraque	Granelero	ENE 30	3	3
25	Entrada/Atraque	Contenedores	NW 30	5	4
26	Entrada/Atraque	Granelero	NW 30	5	1
27	Entrada/Atraque	Ferry pequeño	NW 15	3	3
28	Entrada/Atraque	Ferry grande	ENE 15	3	4
29	Salida/Desatraque	Contenedores	NW 30	5	1

FUENTE: Consultoría Yáñez – Taylor S.A. de C.V., 2000.

La dirección de las maniobras estuvo comprendida básicamente por entrada y atraque, así como por salida y desatraque. La primera se inició en mar abierto y enfilado hacia el canal de acceso, continuando su camino hasta arribar al muelle en cuestión y atracar. La segunda consistió en ir en sentido opuesto, es decir, iniciando con un barco atracado, se procedió a desatracar, tomar el canal de navegación y salir del puerto. En este último caso las corridas finalizaron al nivel de las escolleras. Cada uno de los pilotos se alternó para dirigir la maniobra, por lo que se efectuaron aproximadamente 7 maniobras por persona.

Actuando sobre las embarcaciones, se simularon vientos provenientes del E – NE y del NW con velocidades variando de 15 a 30 nudos. En el caso del buque portacontenedores, este factor resultó ser de gran importancia tal y como se esperaba, pues cuenta con un área vélica muy grande. Al contrario, el buque granelero no percibió este factor de manera tan fuerte, al contar con un área vélica mucho menor que el anterior.

Inicialmente, la corriente del río fue planteada de 3 nudos para todas las corridas, bajo el entendido de que dicha velocidad ya es una condición extrema, tal y como los estudios y cálculos previos lo demostraron. A pesar de esto y debido al aparente éxito en las maniobras, se decidió incrementar la corriente hasta 5 nudos y en una ocasión hasta 7 nudos. Es importante mencionar que la velocidad de la corriente corresponde a una velocidad media, distribuida uniformemente en toda la sección transversal del río y por lo tanto es diferente a aquella que se aprecia a simple vista o a la que se lee en el medidor Dopler de los barcos. De presentarse corrientes de 5 y 7 nudos en la realidad, se tendrían gastos en el Río Coatzacoalcos que, de acuerdo a los registros disponibles, jamás se han presentado.

Por lo anterior se recomendó al puerto la instalación de un sistema de medición de corrientes, para determinar este valor y posteriormente compararlo con los resultados de las simulaciones. De esta forma sería posible eliminar ambigüedades en cuanto a la verdadera velocidad de las corrientes en el río.

Por último, se puede decir que el estudio se dividió en dos grandes partes. Por un lado, las maniobras para el muelle marginal y por otro las de la terminal de ferrocarriles. En el primer caso el objetivo fue hallar los límites de operatividad marítima bajo diferentes

circunstancias climáticas; en el segundo caso, fue proporcionar a los pilotos de puerto una alternativa para intentar estrategias de aproximación y ataque a la terminal y proponer mejoras.

Al final de cada maniobra, el STAR Center aplicó al piloto en turno un cuestionario sobre la experiencia de la maniobra recién realizada. De esta forma, los pilotos plasmaron su opinión, considerándose el factor humano, muy importante en este tipo de estudios. Adicionalmente, al final de la maniobra se obtuvo una impresión gráfica de la posición de la embarcación para diferentes instantes (estas gráficas son del mismo tipo que las mostradas en la *Figura 4.1.H* del caso del Puerto de Veracruz).

5.4.1 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El análisis de los resultados que se obtuvieron durante la campaña de simulación generó las siguientes conclusiones y recomendaciones del estudio.

- a) Las embarcaciones seleccionadas representaron el tamaño máximo que se esperaba cubrir en un mediano plazo. La selección de las mismas se realizó en conjunto con la API de Coatzacoalcos, verificando la disponibilidad de modelos de embarcaciones en el STAR Center.
- b) Durante las simulaciones se utilizaron remolcadores similares a los existentes en el puerto, que asistieron al barco según las necesidades e instrucciones del piloto en turno. Los remolcadores empleados fueron del tipo convencional de 4000 HP de potencia.
- c) Con excepción de las maniobras en la terminal de ferrobrazas, fueron empleados dos remolcadores en todo momento, tal y como se emplean actualmente en el puerto de Coatzacoalcos. En dicha terminal se emplearon hasta dos remolcadores para realizar maniobras de ciaboga, pero maniobrando con un solo remolcador al momento de ingresar el buque a la terminal. Esto debido a que el espacio no permitía el uso de dos remolcadores y el único que se usó tenía la finalidad de contrarrestar la fuerza de la corriente del río para mantener el buque en posición.

- d) Un problema que se presentó durante la simulación fue la lentitud con la que los remolcadores asistían la maniobra. Este es un defecto intrínseco del programa de simulación debido a que no es posible controlar la velocidad ni la trayectoria que siguen los remolcadores para colocarse en posición. Si bien no se trató de un problema que se repitiera constantemente, sí influyó en algunas corridas complicando la maniobra.
- e) Ante la posibilidad de recibir embarcaciones de mayor eslora, se recomendó mejorar el señalamiento marítimo en el canal de navegación. Esto se debió a que al realizar la maniobra de ciaboga, los pilotos contaban con pocos recursos para identificar el tamaño real de la plantilla. El mejoramiento en el señalamiento marítimo se puede llevar a cabo mediante la colocación de boyas adicionales de demarcación, aunque es más recomendable proporcionar equipo adicional al piloto, como se menciona más adelante.
- f) Las dimensiones de profundidad y ancho de la plantilla del canal de navegación probaron ser apropiadas, sin que esto represente un margen de seguridad amplio para maniobrar, especialmente, bajo condiciones climáticas extremas.
- g) Con la finalidad de proporcionar mayor seguridad a las maniobras de ciaboga, se recomendó construir una dársena que cuente con dimensiones mayores al actual ancho del canal de acceso. Se recomendó también que la ubicación de esta dársena sea frente a la terminal de ferrocarriles ya que de ubicarse frente al muelle marginal se podría poner en riesgo la seguridad de la maniobra al disminuir considerablemente el espacio para la ciaboga. Adicionalmente, se permitiría tener una salida más sencilla y segura al poder desatracar de forma paralela al muelle sin tener que girar inmediatamente.
- h) Una dársena de estas características, aumentaría la seguridad en la maniobra de ciaboga que probó ser la más complicada y disminuiría la necesidad de contar con el actual ancho de plantilla del canal de navegación disminuyendo el dragado de mantenimiento a lo largo del mismo. Además, la dársena funcionaría como una trampa de sedimentos, haciendo más rápido el dragado de mantenimiento.
- i) Para incrementar la seguridad en las maniobras de atraque y desatraque se recomendó la adquisición del siguiente equipo:

Un sistema fijo GPS con un equipo móvil portátil (computadora personal) para su uso por los pilotos haciendo referencia a una carta electrónica del puerto, la cual deberá ser continuamente actualizada.

Una estación meteorológica instalada en la Capitanía de Puerto que reporte velocidad y dirección del viento en tiempo real a los pilotos del puerto. En caso de existir un puesto de control o VTS en el puerto de Pajaritos (aun cuando sea operado por PEMEX), se podría pensar en reportar directamente a este punto con la finalidad de concentrar la información y administrarla más eficientemente, para hacerla llegar en todo momento a los pilotos del puerto.

Una estación de aforo de en algún punto cercano aguas arriba del puerto, para medir en tiempo real el gasto del Río Coatzacoalcos, reportando de ser posible a la estación meteorológica y pilotos de puerto.

- j) Todo muelle que espere recibir embarcaciones de mayores dimensiones a las actuales debería contar con las defensas apropiadas para dichos barcos; en particular, la actual terminal de ferrobarcas requeriría de instalar defensas nuevas apropiadas para las nuevas embarcaciones.
- k) Cuando existan dos remolcadores asistiendo una embarcación y muelles contiguos ocupados, no debe haber restricción de ocupación alguna.
- l) Los márgenes de operatividad marítima recomendados se presentan en la *Tabla 5.4.B*. La propuesta no incluía la operación en la terminal de ferrobarcas ya que el objetivo de estas maniobras fue el proporcionar a los pilotos de puerto una oportunidad para intentar estrategias de aproximación y atraque.

Tabla 5.4.B - Propuesta de Límites de Maniobrabilidad para el Puerto de Coatzacoalcos

MUELLE	LLEGADA / SALIDA	TIPO DE EMBARCACIÓN	ESLORA TOTAL	CONDICION DE CARGA	VEL. VIENTO <i>Máxima Permisible</i>	No. DE REMOLCADOR	PROPELAS LATERALES	COMENTARIOS
Fiscal	Lleg. / Sal.	Granelero	<=120 m	Cargado / Lastre	16 m/s (30 nudos) cualquier dirección	1	0 ó 1	BB y CC
Fiscal	Lleg. / Sal.	Granelero	120 m - 180 m	Cargado / Lastre	16 m/s (30 nudos) cualquier dirección	2	0 ó 1	BB y CC
Fiscal	Llegada	Granelero	180 m - 235 m	Cargado	16 m/s (30 nudos) N, NW	2	0 ó 1	AA, BB y CC
					14 m/s (25 nudos) NE	2	0 ó 1	AA, BB y CC
				Lastre	14 m/s (25 nudos) cualquier dirección	2	0 ó 1	AA, BB y CC
Fiscal	Salida	Granelero	180 m - 235 m	Cargado	14 m/s (25 nudos) N, NE	2	0 ó 1	AA, BB y CC
					12 m/s (22 nudos) NW	2	0 ó 1	AA, BB y CC
				Lastre	11 m/s (20 nudos) cualquier dirección	2	0 ó 1	AA, BB y CC
Fiscal	Lleg. / Sal.	Convencional / Perecederos	<=120 m	Cargado / Lastre	16 m/s (30 nudos) cualquier dirección	1	0 ó 1	BB y CC
Fiscal	Lleg. / Sal.	Convencional / Perecederos	120 m - 180 m	Cargado / Lastre	16 m/s (30 nudos) cualquier dirección	2	0 ó 1	BB y CC
Fiscal	Llegada	Contenedores	110 m - 235 m	Cargado	16 m/s (30 nudos) N, NW	2	0 ó 1	AA, BB y CC
					14 m/s (25 nudos) NE	2	0 ó 1	AA, BB y CC
Fiscal	Salida	Contenedores	110 m - 235 m	Cargado	14 m/s (25 nudos) N, NE	2	0 ó 1	AA, BB, CC y DD
					11 m/s (20 nudos) NW	2	0 ó 1	AA, BB, CC y DD
Ferro - barcazas	El estudio no brindó suficientes datos para recomendar límites de operación							

Comentarios:

- AA** Por seguridad en la maniobrabilidad de embarcaciones mayores a los 200 m de eslora total, la dársena de daboga deberá tener un sobredragado de 0.6 m y un ancho en exceso igual al 30% de la eslora total del barco de diseño. Por ejemplo, si la eslora total del barco de diseño es de 230 m, el ancho de la dársena deberá ser de cuando menos 300 m. Esta deberá preferentemente estar localizada aguas arriba del muelle fiscal.
- BB** Cuando existan posiciones de atraque adyacentes debe existir una banda libre de atraque igual a la eslora total del barco en cuestión mas 1.5 su manga. Por lo tanto si una embarcación tiene una eslora total de 180 m y una manga de 30 m, el espacio libre y seguro para el atraque debe ser cuando menos de 225 m.
- CC** Las recomendaciones establecidas en este Manual son válidas para corrientes fluviales de hasta 4.0 nudos (2.2 m/s); si las corrientes rebasan este límite, dos remolcadores deberán utilizarse en todo momento, aunque los pilotos deberán juzgar si las condiciones del río son seguras para efectuar maniobras.
- DD** Buques portacontenedores operan en un esquema de ruta fija o línea regular con carga abordo todo el tiempo.

Tabla 5.4.B – Propuesta de Límites de Maniobrabilidad para el Puerto de Coatzacoalcos (RESUMEN)

LLEGADA / SALIDA	TIPO DE BUQUE	ESLORA MÁXIMA	CONDICIÓN DE CARGA	CONDICIÓN MÁXIMA DE VIENTO*
Llegada	Contenedores	198 m	Cargado	25 nudos
Llegada	Granelero	234 m	Cargado	25 nudos
Salida	Contenedores	198 m	Cargado	20 nudos
Salida	Granelero	234 m	Lastrado	20 nudos

LLEGADA / SALIDA	TIPO DE BUQUE	CONDICIÓN MÁXIMA DE CORRIENTE**	No. DE REMOLCADORES	THRUSTERS
Llegada	Contenedores	3 nudos	2	0 ó 1
Llegada	Granelero	3 nudos	2	0 ó 1
Salida	Contenedores	3 nudos	2	0 ó 1
Salida	Granelero	3 nudos	2	0 ó 1

* Velocidad de vientos sostenidos en cualquier dirección.

**Velocidad media de la corriente en la sección del canal.

FUENTE: Datos obtenidos a partir de la simulación. Consultoría Yáñez – Taylor S..A. de C.V., 2000.

5.5 IMPACTOS ECONÓMICOS DEBIDO A LA REVISIÓN DE OPERACIÓN

El hecho de revisar y mejorar los criterios de operación de un puerto generalmente produce beneficios económicos al mismo, ya que se definen con mucho mayor precisión los valores límite de las condiciones ambientales por debajo de los cuales el puerto puede operar, con lo que el tiempo de operación anual aumenta y se brinda servicio a un mayor número de embarcaciones.

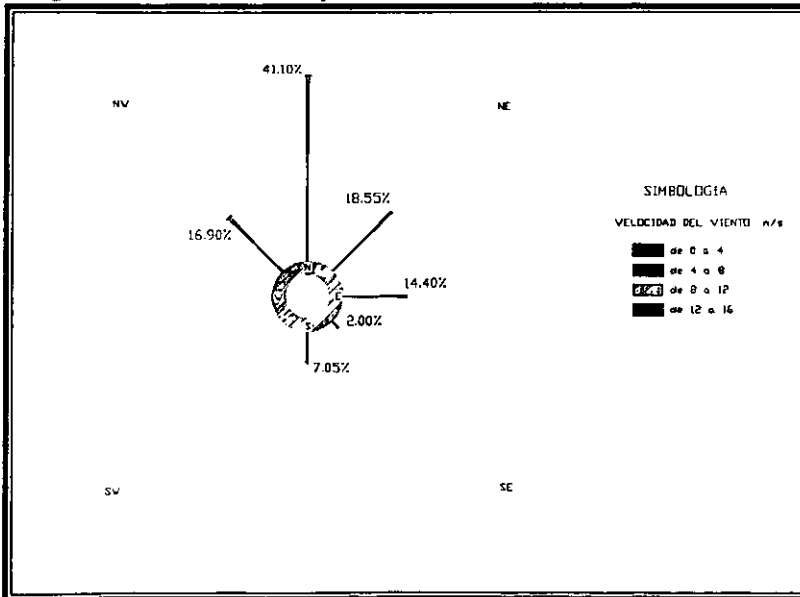
Debido a esto, existía un particular interés por parte de la API de Coatzacoalcos en revisar la operatividad del puerto dado que solamente se tenía una operación del 88% en el año (es decir, el puerto debía cerrar a la navegación marítima alrededor del 12% del tiempo cada año), afectándose el aspecto comercial de manera considerable.

A pesar de que los alcances del proyecto elaborado por Consultoría Yáñez – Taylor no contemplaban la valoración de los impactos económicos debido a la revisión de la

operación en Coatzacoalcos, en el presente trabajo sí se efectuó dicha evaluación, para lo cual se requirió recabar información concerniente a las condiciones de viento, así como a los aspectos operativos del puerto.

En primer término se estableció el periodo en el cual el puerto debe cerrar, de acuerdo con las condiciones de viento en la zona. Dado que los datos del proyecto no presentaban la velocidad con que actúa el viento en diferentes direcciones a lo largo del año, resultó necesario consultar otras fuentes de información, obteniéndose una rosa de vientos que plasma su velocidad y frecuencia (*Figura 5.5.A*). Dicha rosa presenta porcentajes con respecto al total del tiempo de vientos en el año (sin considerar calmas), por lo que estos datos se extrapolaron a la totalidad del año, considerándose el 46% de calmas, como lo indica el proyecto (la *Tabla 5.5.A* refleja los porcentajes de ocurrencia bajo ambos enfoques). Aunque los datos de viento obtenidos no son idénticos a los del proyecto, se determinó que la variación era mínima, por lo que ambos son válidos.

Figura 5.5.A – Velocidad y Frecuencia del Viento en Coatzacoalcos



FUENTE: Programa Director de los Puertos de Coatzacoalcos, Laguna del Ostión y Dos Bocas, Tomo I. Dirección General de Obras Marítimas, 1986.

Tabla 5.5.A – Velocidad y Frecuencia del Viento en Coatzacoalcos

% Respecto al total de tiempo de vientos en el año (sin considerar calmas)					
DIRECCIÓN	VELOCIDAD DEL VIENTO [m/s]				Total
	0 a 4	4 a 8	8 a 12	12 a 16	
N	23.35%	15.55%	1.90%	0.30%	41.10%
NE	12.37%	5.59%	0.59%	0%	18.55%
E	11.52%	2.88%	0%	0%	14.40%
SE	1.57%	0.43%	0%	0%	2.00%
S	6.27%	0.78%	0%	0%	7.05%
SW	0%	0%	0%	0%	0%
W	0%	0%	0%	0%	0%
NW	9.25%	5.65%	1.46%	0.54%	16.90%
<i>Todas</i>	<i>64.33%</i>	<i>30.88%</i>	<i>3.95%</i>	<i>0.84%</i>	<i>100%</i>
% Respecto al total del año (considerando 46% de calmas)					
DIRECCIÓN	VELOCIDAD DEL VIENTO [m/s]				Total
	0 a 4	4 a 8	8 a 12	12 a 16	
N	12.61%	8.40%	1.03%	0.16%	22.19%
NE	6.68%	3.02%	0.32%	0%	10.02%
E	6.22%	1.56%	0%	0%	7.78%
SE	0.85%	0.23%	0%	0%	1.08%
S	3.39%	0.42%	0%	0%	3.81%
SW	0%	0%	0%	0%	0%
W	0%	0%	0%	0%	0%
NW	5.00%	3.05%	0.79%	0.29%	9.13%
<i>Todas</i>	<i>34.74%</i>	<i>16.68%</i>	<i>2.13%</i>	<i>0.45%</i>	<i>54%</i>

FUENTE: Datos obtenidos a partir de la Figura 5.2.A. Programa Director de los Puertos de Coatzacoalcos, Laguna del Ostión y Dos Bocas, Tomo I. Dirección General de Obras Marítimas, 1986.

De acuerdo con los límites de operatividad propuestos por el proyecto (Tabla 5.1.F) la velocidad del viento máxima permisible varía entre 11 y 16 m/s dependiendo del tipo de buque y de su condición de carga. Tomando en cuenta la manera en que se presentan los datos de viento en la tabla anterior, se definió el intervalo de 8 a 16 m/s como condición de cierre del puerto, que constituye el 2.58% del tiempo anual en comparación con el 12% establecido por la API.

Es importante señalar que las condiciones de corriente en todo el año siempre son

menores a los 3 nudos, límite propuesto por el proyecto, por lo que no influyen en el análisis efectuado en la presente sección. Además, el fenómeno del oleaje no se tomó en cuenta en el proyecto debido a limitantes del equipo de simulación, por lo que no se hizo ninguna recomendación al respecto; sin embargo, este factor también influye en la operación del puerto. Aún así, para fines ilustrativos no es necesario realizar un estudio tan riguroso, pues el objetivo primordial de esta sección es mostrar las ventajas económicas que genera la aplicación de los criterios actuales de operación portuaria.

Por otro lado, para el año de 1999, de acuerdo con el *Programa Maestro de Desarrollo del Puerto de Coatzacoalcos, Veracruz, 2000 – 2005* elaborado por la API de dicho puerto, el número de buques que arribaron al puerto fue de 458 (para una operación del 88% del año). Si se aplican los límites propuestos, esta cifra asciende a 507 naves (para una operación del 97.42% del año), es decir, 49 arribos más que representan un aumento del 10.7%.

Con el objeto de determinar el impacto económico que esto significa para la administración de Coatzacoalcos, se consultaron las tarifas vigentes en el puerto (para mayo del 2001), las cuales se muestran en la *Tabla 5.5.B*.

Tabla 5.5.B – Tarifas del Puerto de Coatzacoalcos en Pesos (Mayo 2001)

PUERTO PARA EMBARCACIONES COMERCIALES	
Cuota fija por buque	\$10,635.20
Cuota variable por unidad de arqueado bruto	\$2.21
Cuota diaria por buque	\$65.92
ATRAQUE PARA EMBARCACIONES EN MUELLES POR METRO DE ESLORA POR HORA O FRACCIÓN	
Muelles no especializados	\$4.24
Muelles especializados para contenedores	\$0.00
Embarcación abarloada, arrejorada o acoderada	50%
Muellaje por tonelada de carga	\$7.30

* Sin considerar tarifas de almacenaje.

FUENTE: *Programa Maestro de Desarrollo del Puerto de Coatzacoalcos, Ver. 2000 – 2005. API Coatzacoalcos.*

Para poder aplicar estas tarifas, resultó necesario elegir una serie de características promedio de las embarcaciones que arriban a Coatzacoalcos, con base en los datos de la

operación del puerto. De este modo, la carga transportada por buque se determinó dividiendo la carga movilizada en 1999 (equivalente a 2,450,300 toneladas) entre el número de barcos atendidos ese año; la eslora promedio se estimó con base en la longitud de los diferentes muelles del puerto; el arqueo bruto se obtuvo a través de una serie de relaciones estadísticas generadas con base en las *Tablas 2.1.A y 2.1.B* referentes a las dimensiones típicas de las embarcaciones; y el tiempo de estadía en puerto y en muelle se supuso de acuerdo con tiempos realistas. La Tabla 5.5.C presenta las consideraciones promedio por buque.

Tabla 5.5.C – Consideraciones Promedio por Buque

Arqueo bruto [TRB]	30,000
Días en puerto	2
Eslora [m]	200
Estadía en muelle [hr]	20
Carga [ton]	5,350

FUENTE: Análisis de diversos datos de operación en Coatzacoalcos y de otros datos estadísticos.

Posteriormente se aplicaron las tarifas correspondientes al buque estandarizado, obteniéndose el costo promedio por navío, tal y como lo indica la *Tabla 5.5.D*.

Tabla 5.5.D – Costo Promedio por Buque

Cuota fija por buque	-	\$10,635.20
Cuota variable por unidad de arqueo bruto	\$2.21 x 30,000 TRB	\$66,300.00
Cuota diaria por buque	\$65.92 x 2 días	\$131.84
Muelles no especializados	\$4.24 x 200 m x 20 hr	\$16,960.00
Muelles especializados para contenedores	-	\$0.00
Embarcación abarloada, arrejerada o acoderada	no se consideró	\$0.00
Muellaje por tonelada de carga	\$7.30 x 5,350 ton	\$39,055.00
COSTO TOTAL PROMEDIO (Pesos)		\$133,082.04

FUENTE: Valores obtenidos de la aplicación de las tarifas del Puerto de Coatzacoalcos.

Por último, se multiplicó el número de embarcaciones por el costo promedio,

obteniéndose una ganancia aproximada de 6.5 millones de pesos cada año (*Tabla 5.5.E*), en comparación con un costo de simulación cercano a los 45 mil dólares (450 mil pesos suponiendo un tipo de cambio de 10 pesos/dólar) que incluye cuatro días de uso de simulador (10 mil dólares/día) y los gastos por traslado y viáticos del personal del puerto.

Tabla 5.5.E – Ganancia Anual

En 1999	Puerto cerrado 12% tiempo anual	458 buques	\$60,951,574.32
Aplicando los límites propuestos	Puerto cerrado 2.58% tiempo anual	507 buques	\$67,476,163.30
<i>GANANCIA (Pesos)</i>			<i>\$6,524,588.98</i>

FUENTE: Valores obtenidos de la aplicación de las tarifas del Puerto de Coatzacoalcos.

Vale la pena destacar que las ganancias para el puerto por cada embarcación, además de las contempladas en el análisis, deben incluir también el pago a los pilotos, las tarifas que cada terminal aplique por uso de equipo especializado y las tarifas de almacenaje de la carga entre otras, por lo que a fin de cuentas los beneficios económicos resultan de mayor magnitud.

Obviamente, mientras mayor sea la capacidad del puerto en cuanto a sus áreas de navegación, instalaciones y número de embarcaciones atendidas, resulta más redituable la aplicación de un estudio de simulación, pues el costo de dicho estudio impactará en menor escala la economía del puerto y las ganancias generadas al aumentar la cantidad de arribos será más significativa.

Como se aprecia en este capítulo y el anterior, los casos prácticos referentes a los puertos de Veracruz y Coatzacoalcos constituyen una muestra de las ventajas operativas y económicas que significa la aplicación de los nuevos criterios para el dimensionamiento y la operación portuaria, enfocándose principalmente al uso de simuladores de misión completa, los cuales son capaces de representar fielmente las maniobras realizadas por los buques en las áreas de navegación y todos los factores que a éstas afectan.

Con ambos ejemplos concluye el presente documento, cuyo objetivo principal es plasmar los avances tecnológicos y científicos que han surgido para la optimización de la actividad portuaria, e ilustrar de manera integral y comprensible, por medio de casos

reales, la forma en que se pueden aplicar estos avances.

Se espera que este trabajo resulte útil para los profesionistas, especialmente ingenieros civiles, interesados en el ámbito portuario nacional e internacional, ya que cuenta con información actualizada que, si se estudia y desarrolla con mayor profundidad, puede servir como base para la implementación y mejora de las terminales portuarias.

CONCLUSIONES

En esta tesis se conjunta y sintetiza material de gran valor para todas aquellas personas inmersas en el ambiente portuario, que requieran consultar información actualizada sobre los nuevos criterios, métodos y avances tecnológicos empleados para el dimensionamiento portuario y para la mejora de la operación en los puertos.

Es importante señalar que, aunque los temas que trata el documento se discuten con profundidad, existen aspectos que pueden ampliarse o complementarse a través de fuentes especializadas, como las que se mencionan en la bibliografía, en caso que se requiera.

A continuación se presentan las conclusiones que generó la realización del presente trabajo, el cual constituyó una gran oportunidad para visualizar los adelantos que han surgido en la búsqueda de la optimización del diseño y funcionamiento de las terminales portuarias.

1. El crecimiento constante de la producción mundial se ve reflejado directamente en el impulso del comercio marítimo internacional, ya que cada vez se demanda una mayor capacidad de captación y manejo de mercancías en los puertos.
2. Los puertos se han visto obligados a desarrollarse debido al aumento en las dimensiones y capacidad de las embarcaciones, lo cual fomenta el abaratamiento en los costos del transporte, fenómeno conocido como economía de escala.
3. El incremento en el tamaño de los buques implica que los puertos amplíen la magnitud de sus áreas de navegación, así como de sus espacios de tierra y de su infraestructura operativa, que modernicen sus equipos y que mejoren la logística de carga, descarga y almacenamiento.

4. Las nuevas tendencias para el movimiento de la carga por vía marítima están dirigidas al uso de contenedores, con el fin de estandarizar y unificar los criterios de empaque y transporte de las mercancías.
5. El acelerado desarrollo en los barcos portacontenedores se traduce en la operación de barcos con capacidad de 5,000 TEU's o mayor, conocidos como portacontenedores de quinta generación; en apenas cuarenta años la capacidad de estas naves creció entre 400% y 600% en promedio, y existen órdenes de armado solicitando buques de hasta 9,000 TEU's de capacidad.
6. El transporte de crudo y sus derivados continúa siendo el más importante, con un 35.5% de la capacidad total de la flota mundial referida a toneladas de peso muerto, seguido por el transporte de graneles. Con seguridad, mientras el petróleo siga siendo el combustible más utilizado en el mundo, esta distribución se mantendrá.
7. De acuerdo con los requerimientos actuales de infraestructura, existen importantes carencias en el sistema portuario nacional, pues ningún puerto mexicano es capaz de recibir mega – buques de más de 5,000 TEU's, debido a restricciones de profundidad, dimensiones de las áreas de maniobra y longitud de atraque. Otro factor importante, aunque fuera de los alcances de la tesis, corresponde a la suficiencia del transporte terrestre que debe complementar la operación de un puerto, ya que en nuestro país la infraestructura carretera y ferroviaria no es adecuada para respaldar la creación de puertos logísticos.
8. En el entorno de la globalización y del auge en el comercio marítimo internacional, la necesidad de eficientar los puertos en nuestro país es ineludible, dada la creación de tratados comerciales con naciones sumamente industrializadas, que constituyen potencias comerciales a nivel mundial, muchas de ellas con infraestructura portuaria y cabida en su flota mercante que supera con creces la capacidad de los puertos del país.

-
9. Como consecuencia de las necesidades de crecimiento en los puertos, se han desarrollado diversos criterios y tecnologías enfocados a optimizar el diseño y la operación portuarias, con el fin de garantizar la seguridad de las embarcaciones y buscar que la inversión requerida para la construcción o modernización de las terminales se minimice.

 10. Para aplicar los criterios de dimensionamiento y operación adecuadamente, se requiere definir ciertos parámetros de diseño, principalmente: la embarcación de diseño, los equipos de remolque que asisten a los barcos, las ayudas a la navegación que posee el puerto, las condiciones ambientales de la zona y la experiencia humana.

 11. En lo que respecta a las embarcaciones, han surgido diversos adelantos tecnológicos en cuanto a los sistemas de propulsión, que permiten efectuar las maniobras con mayor facilidad. A su vez, el aumento en sus dimensiones restringe estas maniobras, por lo que se deben evaluar ambos factores al momento de efectuar el diseño de las áreas de navegación.

 12. Los remolcadores han desarrollado mayor potencia y cuentan con innovaciones tecnológicas que los hacen más ágiles al momento de asistir a los navíos. Las técnicas de asistencia se han perfeccionado, y han surgido métodos muy precisos para el cálculo de la fuerza necesaria para el remolque.

 13. Gracias a las telecomunicaciones, los sistemas de cómputo y la tecnología satelital, las ayudas a la navegación modernas constituyen un elemento de gran importancia para la operación de los puertos, pues coadyuvan a la realización de maniobras en condiciones ambientales adversas, y guían a los barcos en la mayor parte de su ruta.

 14. Los factores ambientales son determinantes ya que con base en ellos se establecen los límites operativos y el cierre del puerto. Actualmente existen métodos que, apoyados

en la tecnología satelital, ayudan a predecir las condiciones climáticas para optimizar la operación del puerto.

15. El factor humano interviene en diversos aspectos, que incluyen el control de los buques, la asistencia de los equipos de remolque, el control del tráfico en el puerto, entre otros. Por lo anterior, se han desarrollado equipos de simulación de tiempo real en los cuales los pilotos realizan diferentes maniobras bajo la influencia de condiciones ambientales diversas, con el fin de determinar las restricciones operativas y la influencia de la experiencia humana.

16. Para el dimensionamiento de los canales de navegación, el PIANC desarrolló una serie de criterios que contemplan aspectos como la relación profundidad/calado, la maniobrabilidad del barco, las condiciones ambientales, la peligrosidad de la carga y la densidad del tráfico para definir las diferentes dimensiones del canal. Esto aumenta la seguridad de los barcos, pues el espectro de factores adversos considerados es muy amplio.

17. A pesar de que se siguen utilizando los mismos criterios que hace algunos años para el dimensionamiento de las áreas interiores de maniobras, han surgido algunas recomendaciones basadas en los avances tecnológicos vigentes, principalmente en la simulación, que contribuyen a la optimización de su diseño.

18. Como se mencionó anteriormente, los modelos de simulación de tiempo rápido y de misión completa son una herramienta clave en la optimización del diseño conceptual y en la revisión y mejora de los criterios de operación de los puertos. La capacidad que tienen estos modelos para representar con exactitud el entorno visual, las condiciones climáticas, los grados de movimiento de las embarcaciones, la respuesta de las máquinas, la asistencia de los remolcadores y la injerencia de los pilotos significa un ahorro o una mayor ganancia de recursos, pues no es necesario implementar diseños

- sobrados o medidas de operación conservadoras para garantizar la seguridad de los buques.
19. El ejemplo del Puerto de Veracruz ilustra las ventajas operativas que representa la optimización del diseño portuario. En este caso, se eligió un arreglo de muelles con base en revisiones por condiciones climatológicas, criterios de dimensionamiento y condiciones de amarre, analizando la dificultad para la realización de diferentes maniobras. Gracias al uso de un modelo de simulación se pudo seleccionar el escenario que constituía mayores ventajas para el puerto.
20. En el caso del Puerto de Coatzacoalcos, son indiscutibles las ventajas económicas que genera la aplicación de técnicas de simulación para mejorar los criterios de operación del puerto. En este ejemplo, lo importante es valorar la inversión que representa hacer uso de un simulador, y compararlo con los beneficios económicos que esto implica para el puerto; generalmente cuando la operación del puerto es deficiente lo mejor es recurrir a la simulación, a menos que el puerto sea tan limitado en cuanto a infraestructura que no sea posible aumentar el número de buques atendidos por éste.
21. Los casos prácticos presentados en este trabajo, son un claro ejemplo de las oportunidades y beneficios que conlleva la aplicación de los criterios modernos para el dimensionamiento y la operación portuaria. En México es fundamental hacer uso de estos métodos y adelantos tecnológicos, para generar terminales competitivas y seguras, que atraigan a las principales líneas navieras del mundo. Esta es la única manera de impulsar el desarrollo de los puertos nacionales.

Estas ideas resumen la esencia de esta tesis, cuyo fin último es aportar a la ingeniería portuaria de este país un documento de consulta, útil y práctico, que refleje el esfuerzo y la dedicación invertidos en su realización, y la confianza en que la ingeniería mexicana es capaz de hacer progresar al país, particularmente en lo que a sus puertos se refiere. México tiene un gran potencial por desarrollar, y no puede desperdiciarlo.

BIBLIOGRAFÍA

- Review of Maritime Transport 1999. United Nations Conference on Trade and Development (UNCTAD). 1999.
- Review of Maritime Transport 2000. United Nations Conference on Trade and Development (UNCTAD). 2000.
- The Impacts of Changes in Ship Design on Transportation Infrastructure and Operations. U.S. Department of Transportation, Office of Intermodalism. EUA, 1998.
- Guillermo Macdonel Martínez, Julio Pindter Vega, Luis Herrejón de la Torre, Juan Pizá Ortiz, Héctor López Gutiérrez. Ingeniería Marítima y Portuaria. Alfaomega Grupo Editor. México, 1999.
- Héctor López Gutiérrez. Operación, Administración y Planeación Portuarias. Asociación Mexicana de Ingeniería Portuaria, Marítima y Costera A.C. (AMIP). México, 1999.
- Per Bruun. Port Engineering. Vol. 1 – Harbor Planning, Breakwaters, and Marine Terminals. 4ª edición. Gulf Publishing Company. Houston, EUA, 1989.
- Carl A. Thoresen. Port Design, Guidelines and Recommendations. Tapir Publishers. Noruega, 1988.
- Los Puertos Mexicanos en Cifras 1993 – 1999. 4ª edición. Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Coordinación General de Puertos y Marina Mercante. México, 2000.

-
- Cuauhtémoc Anda Gutiérrez. Los Nuevos Puertos Mexicanos. Anda. México, 1999.
 - Port Technology International, the Eleventh Edition. ICG Publishing Limited. Londres, Inglaterra, 2000.
 - Port Technology International, the Twelfth Edition. ICG Publishing Limited. Londres, Inglaterra, 2000.
 - Approach Channels, a Guide for Design. Permanent International Association of Navigation Congresses (PIANC) – International Association of Ports and Harbors (IAPH). Working Group II – 30, 1997.
 - Manual de Dimensionamiento Portuario. Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Puertos Mexicanos. México, 1992.
 - Captain Henk Hensen FNI. Tug Use in Port, a Practical Guide. The Nautical Institute – Port of Rotterdam. Londres, Inglaterra, 1997.
 - Miguel A. Yáñez Monroy, Jesús G. Huidobro González, Javier Gutiérrez Reynoso. Diseño y Verificación de Áreas Portuarias de Navegación a través de Técnicas de Simulación de Tiempo Real. CYTSA, II Congreso Internacional AMIP. México, 1998.
 - Miguel A. Yáñez Monroy, Niels Arndal. Use of Fast – time and Real – time Simulation in Harbour Design. The Dos Bocas Case. México – Dinamarca, 1999.
 - Dennis W. Webb. Navigation Channel Design Using Real – time Marine Simulator. ASCE. EUA, 1993.

-
- Estudio de Maniobrabilidad de Muelles en Espigón para el Puerto de Veracruz. CYTSA. México, 1998.

 - Coordinación, Planeación y Supervisión del Estudio de Maniobrabilidad para Generar un Manual de Operaciones Marítimas en el Puerto de Coatzacoalcos. CYTSA. México, 2000.

 - Programa Maestro de Desarrollo del Puerto de Coatzacoalcos 2000 – 2005. Administración portuaria Integral de Coatzacoalcos. México, 2000.

 - Programa Director de los Puertos de Coatzacoalcos, Laguna del Ostión y Dos Bocas. Tomo I. Dirección General de Obras Marítimas. México, 1986.

 - Principales sitios de Internet consultados:
 - Instituto Mexicano del Transporte. www.imt.mx
 - www.infoport.com.mx
 - Journal of Commerce. www.joc.com
 - Periódico Excelsior. www.excelsior.com.mx
 - Liga Marítima de Chile. www.ligamar.cv.cl
 - www.containershipping.com
 - www.worldshipowner.com
 - Líneas Navieras: www.kline.co, www.maersksealand.com, www.hanjin.com.
 - Propulsión de buques: www.ship-technology.com.
 - Ayudas a la Navegación: www.transas.com, www.stn-atlas.de, www.hitt.nl.
 - Otros sitios relacionados con el tema.