



**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL**

**ANÁLISIS DE CRITERIOS LÍMITES PARA
OPERABILIDAD DE BARCOS PORTA-
CONTENEDORES**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

FELIPE ANTONIO DONOSO LILLO

**PROFESOR GUÍA:
CHARLES PIERRE FOURNIER**

**PROFESORES INTEGRANTES:
YARKO IVÁN NIÑO CAMPOS
EDGARDO EMILIO PEDRO COROMINAS ZAMORA**

**SANTIAGO - CHILE
OCTUBRE 2007**

RESUMEN DE LA MEMORIA
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL
POR: FELIPE DONOSO L.
FECHA: 06/11/2007
PROF. GUÍA: Sr. CHARLES P. FOURNIER

ANÁLISIS DE CRITERIOS LÍMITES PARA OPERABILIDAD DE BARCOS PORTA-CONTENEDORES

El mercado del transporte marítimo de carga mediante contenedores ha tenido un crecimiento sostenido desde su invención en los años 50. Los terminales chilenos se han ido especializando en el transporte de este tipo de carga, llegando casi a su límite operacional. Existe el interés de proyectar terminales de contenedores en bahías protegidas surgiendo dudas respecto de la operabilidad de éstos. Este trabajo de título basó su línea de estudio en la evaluación comparativa de diversas recomendaciones de diseño para terminales portuarios, en cuanto a características de oleaje incidente y desplazamientos máximos en operaciones de carga y descarga para barcos porta-contenedores.

En la evaluación y comparación de las recomendaciones de diseño se utilizaron dos barcos porta-contenedores de distintas capacidades de carga, cuyos comportamientos fueron modelados mediante el software Termsim II. Como input se utilizó una serie de parámetros característicos del oleaje (H_s , T_p y MWD), generando un total de 1.972 modelaciones (936 por cada embarcación). Estos datos permitieron obtener los movimientos peak para cada una de las series de tiempo estudiadas. Posterior a este proceso los datos fueron analizados comparándose los diferentes criterios seleccionados para este estudio. El primer análisis correspondió a los movimientos peak para una altura significativa $H_s=0,5$ m, mientras que el segundo a las condiciones límites de operación basados en las recomendaciones del Permanent International Association of Navigation Congresses (PIANC), los cuales fueron hechos para cada uno de los seis grados de libertad. Con este análisis se determinó para cada par de parámetros (H_s , T_p) qué grado de libertad dominaba el comportamiento de las embarcaciones según el ángulo de incidencia al cual se viesan afectadas.

De este estudio pudo concluirse que en caso de no existir estructuras de protección para terminales portuarios, tales como rompeolas o espigones, ambas embarcaciones estudiadas deben fondearse con dirección aproada al oleaje, la cual debe ser unidireccional en $\pm 15^\circ$. En el caso de embarcaciones de 2.000 [TEU]¹ la altura del oleaje incidente que permite operabilidad es considerablemente mayor que el caso de embarcaciones de 250 [TEU], por lo que los resultados obtenidos sugieren que estas últimas pueden operar al estar resguardados por estructuras de abrigo, mientras que las embarcaciones de 2.000 [TEU] pueden operar satisfactoriamente en bahías sin protección. Junto con esto se determinó qué grado de libertad era restrictivo según el ángulo de incidencia del oleaje.

Como recomendación, es necesario que los estudios que se realicen para nuevas zonas de emplazamiento de terminales portuarios, cuenten con un análisis acabado de clima de oleaje. Además, es necesario realizar estudios detallados sobre series de tiempo completas, determinando funciones que estimen preliminarmente el *downtime* operacional. Por último, se recomienda validar en estudios posteriores los resultados obtenidos por esta memoria de título.

¹ TEU: Twenty-foot Equivalent Units

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 GENERALIDADES	1
2. MOTIVACIÓN	6
3. OBJETIVOS	7
3.1 OBJETIVOS GENERALES	7
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	7
4. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	8
4.1 MECÁNICA DEL OLEAJE	8
4.1.1 <i>Oleaje Regular</i>	8
4.2 TEORÍA LINEAL DEL OLEAJE	9
4.2.1 <i>Enfoque de análisis</i>	9
4.2.2 <i>Conservación de Masa: Ecuación de Continuidad</i>	10
4.2.3 <i>Ecuaciones de Movimiento</i>	11
4.2.4 <i>Ecuaciones de Movimiento para Fluidos Irrotacionales</i>	11
4.2.5 <i>Formulación de Teoría Lineal del Oleaje</i>	13
4.2.6 <i>Condiciones de Borde</i>	13
4.3 ANÁLISIS DE OLEAJE.....	15
4.3.1 <i>Descripción Estadística del Oleaje</i>	15
4.3.2 <i>Descripción Espectral del Oleaje</i>	16
4.4 TEORÍA DE CUERPOS FLOTANTES.....	18
4.4.1 <i>Fuerzas de Olas Regulares</i>	18
4.4.2 <i>Fuerzas en Olas irregulares</i>	19
4.4.3 <i>Fuerza Media de Deriva por Oleaje</i>	19
4.4.4 <i>Dominio de Frecuencia</i>	20
4.4.5 <i>Fuerzas y Momentos</i>	21
4.4.6 <i>Cargas Hidrodinámicas</i>	21
5. DESCRIPCIÓN DE HERRAMIENTAS UTILIZADAS	23
5.1 TERMSIM II	23
5.2 DESCRIPCIÓN DE LA BASE DE DATOS	25
6. SIMULACIONES REALIZADAS	27
6.1 EMBARCACIÓN MODELADA	27
6.2 CONFIGURACIÓN SISTEMAS DE DEFENSA Y AMARRES	28
6.2.1 <i>Sistema de Defensa</i>	28
6.2.2 <i>Sistema de Amarre</i>	32
6.3 PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS	35
6.4 VARIABLES AMBIENTALES UTILIZADAS	37
6.5 DESARROLLO DE HERRAMIENTAS PARA OBTENCIÓN DE DATOS	40

7.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	42
7.1	MOVIMIENTOS HORIZONTALES.....	42
7.1.1	<i>Surge</i>	42
7.1.2	<i>Sway</i>	47
7.1.3	<i>Yaw</i>	52
7.2	MOVIMIENTOS VERTICALES.....	58
7.2.1	<i>Heave</i>	58
7.2.2	<i>Roll</i>	62
7.2.3	<i>Pitch</i>	66
7.3	CONDICIÓN MÁXIMA SEGÚN ÁNGULO DE INCIDENCIA DEL OLEAJE.....	70
8.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	78
9.	BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS	80

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Generalidades

El gran impulso dado al desarrollo marítimo durante el siglo XIX y XX se basó en la necesidad del intercambio comercial global. Con grandes distancias por cubrir dada la globalización y con cargas importantes a transportar, el incremento de este tipo de comercio ha sido sostenido a lo largo de este tiempo.

El transporte marítimo presenta claras ventajas en la reducción de costos de transporte en comparación con los otros medios comerciales, como el terrestre y el aéreo, definido por las economías de escala asociada a los desplazamientos de grandes volúmenes de carga. La Figura 1.1-1 muestra una curva comparativa de costos según el medio de transporte asociado a cada etapa de la cadena de suministro según la distancia recorrida, donde se puede apreciar el menor costo del transporte marítimo.

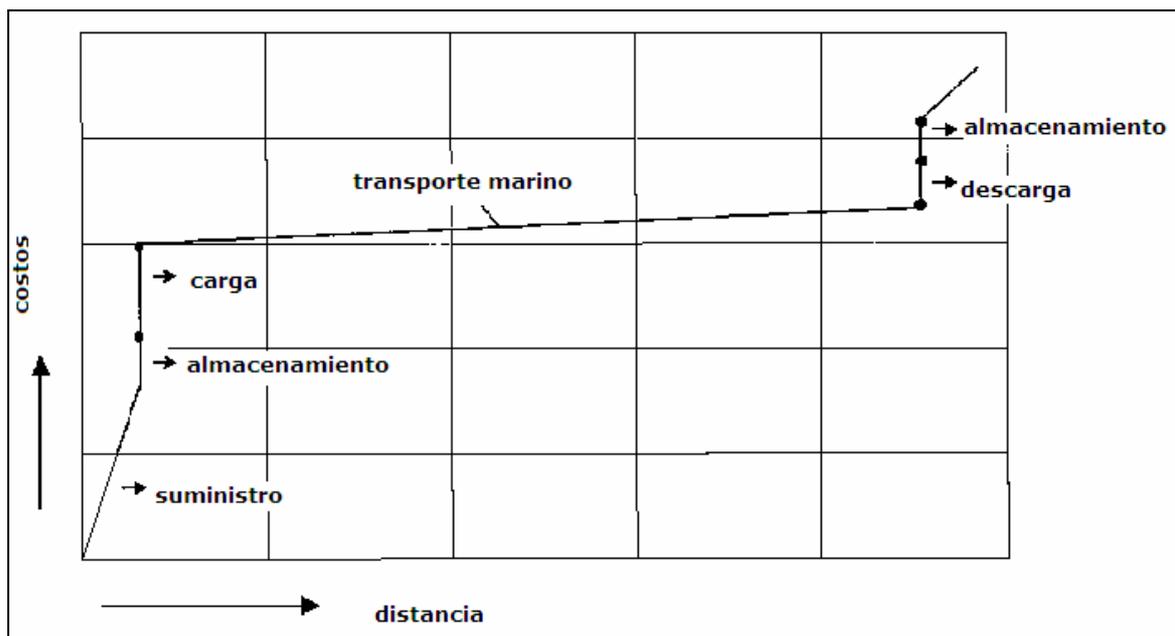


Figura 1.1-1: Curva Comparativa de Costos según Etapa de Transporte

Fuente: Referencia [9]

La necesidad de reducir costos en el transporte de bienes e insumos alrededor del mundo, llevó a la creación del contenedor como sistema de transporte. Este elemento de carga nace en 1956, desarrollado por el empresario camionero Malcom Malean, el cual dispuso de 58 contenedores dentro de un barco carguero y los transportó desde Newark hasta Houston. Lo innovador de esta idea radicó en la posibilidad de tener un medio de transporte que pudiese desplazarse sobre variados sistemas (aviones, camiones o barcos) y no tuviese que ser abierto y trasvasijado hasta su destino final, lo cual reducía considerablemente las maniobras de carga y descarga en puerto y tiempo total asociado de transporte entre el origen y el destino.

La introducción del contenedor produjo una revolución en los sistemas de transporte de carga, Hoy, casi el 90% del transporte de carga de bienes no a granel, es realizado mediante este sistema. En Chile, el transporte por este medio ha ido incrementándose a una tasa creciente a lo largo de los años. En el Gráfico 1.1-1 se muestra la evolución temporal de los volúmenes de carga transportados a través del Puerto de San Antonio, expresada en TEU's².

Gráfico 1.1-1

Evolución Temporal de la Carga para el Puerto de San Antonio, Chile



Fuente: <http://www.sanantonioport.cc.cl>

Ya que las necesidades de transporte se han ido incrementando a nivel mundial, la construcción de embarcaciones de mayor tamaño ha significado el desarrollo de rutas marítimas nuevas, las cuales están definidas por los grandes centros de producción y consumo, siendo los principales los mercados asiáticos, europeos y norteamericanos. Por ello las rutas de las grandes embarcaciones se desarrollan principalmente en el hemisferio norte.

A partir de la creación del contenedor comenzó un crecimiento sostenido en la utilización de este tipo de dispositivos para el transporte de carga, generando la apertura y utilización de rutas marítimas capaces de conectar los mercados antes mencionados. Es así, como los principales puertos de Asia se conectan a través del Océano Pacífico con los puertos en Norteamérica, mientras que los mercados europeos son abarcados mediante canales artificiales, como el Canal de Suez, a través de Medio Oriente. En la figura siguiente se muestra un esquema del transporte marítimo contenerizado a los distintos mercados.

² TEU es la unidad de medida de capacidad de transporte marítimo en contenedores. Originalmente es un acrónimo de la expresión inglesa "Twenty-foot Equivalent Unit", la que expresa el tamaño que se ha establecido como base para el transporte de carga en contenedores, tomando como unidad la capacidad de un contenedor de 20 pies.

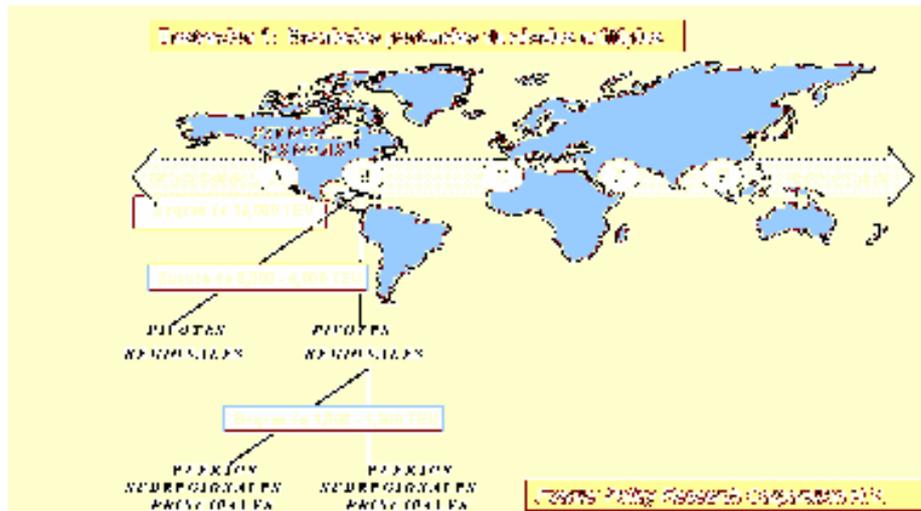


Figura 1.1-2: Esquema de Rutas para Transporte Transoceánico.

Como vemos en la Figura 1.1-2, el sistema de transporte de carga procede de la manera siguiente; Asia suministra insumos a los mercados norteamericanos y europeos a través de sus puertos (Singapur, Rotterdam, Los Angeles, entre otros) mediante grandes embarcaciones, como los denominados Suezmax, con capacidad para 12.000 [TEU], como se muestra en el Cuadro 1.1-1. Desde estos puertos son enviadas embarcaciones de menor tamaño, como los Post Panamax, a suministrar los puertos pivotes a nivel regional, los cuales tienen capacidad de carga y descarga para estas embarcaciones de tamaño medio.

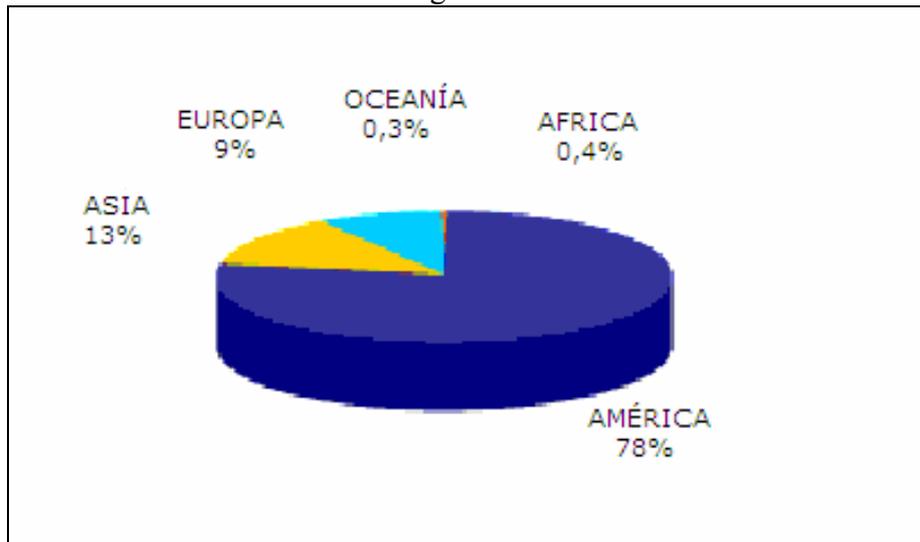
Cuadro 1.1-1
Características de Cargueros según Capacidad de Carga

Tipo	Dimensiones de Manga [m]	Capacidad [TEU]
Small Feeders	23.0	≈ 1.000
Feeders	23.0 - 30.0	≈ 1.000 - 2.500
Panamax	32.2	≈ 2.500 - 5.000
Post Panamax	más de 32.3	≈ 5.000 - 10.000
Suezmax	70.0	≈ 10.000 - 12.000
Post Suezmax		≈ 12.000 y más

Posteriormente, a partir de estas embarcaciones la carga es transportada en pequeños barcos cargueros, denominados *feeders*, cuyo destino son los centros de menor transferencia de carga, como es el caso del mercado nacional. En el gráfico siguiente se muestra la procedencia de la carga que llega al principal puerto de Chile, el Puerto de San Antonio.

Del Gráfico 1.1-2 podemos ver la para el puerto de San Antonio la condición de puerto menor en el contexto del mercado mundial de carga. La procedencia de carga se da principalmente desde los países latinoamericanos, siendo un porcentaje menor la carga proveniente de mercados mundiales, como son el asiático o europeo.

Gráfico 1.1-2
Procedencia de la Carga al Puerto de San Antonio



Fuente : <http://www.sanantonioport.cc.cl/>

Para el desarrollo de terminales portuarios de mayor tamaño y especializados en el transporte de contenedores, es necesario contar con aguas quietas en la poza o zona húmeda del puerto, lugar de atraque de embarcaciones. Esto implica millonarias inversiones en estructuras civiles mayores que permitan contar con condiciones adecuadas al interior de una dársena, conocidos como rompeolas.

En este sentido, los puertos que han incurrido en este tipo de inversiones se encuentran actualmente operando a su máxima capacidad, lo que ha llevado a que se realicen estudios de desarrollo para terminales de contenedores en zonas protegidas por accidentes naturales, como bahías y penínsulas, evitando la construcción de este tipo de estructuras.

Para el estudio de estos terminales es imprescindible determinar a priori el clima de oleaje predominante en las zonas de emplazamiento, y con esto los movimientos que podrían llegar a desarrollar las embarcaciones. Estos movimientos pueden ser causados por influencia de factores externos, entre los cuales se pueden mencionar el viento, las corrientes y el oleaje o la influencia de barcos en movimiento en las cercanías, entre otros, y pueden agruparse en movimientos horizontales y movimientos verticales, los cuales se diferencian porque estos últimos casi no dependen de las condiciones de atraque, mientras que los primeros son dependientes de las condiciones de carga del barco, de los sistemas de amarre y defensas, de la geometría del sistema, etc..

Es en los barcos porta-contenedores donde se centra el desarrollo de esta memoria de título, dentro de la cual se intentará ahondar en el comportamiento de estas embarcaciones frente a condiciones ambientales, como oleaje, así como variables geométricas, como son el tamaño del barco, la profundidad de la zona de puerto, tipo de terminal portuario y sistema de amarras, etc.

Existen variadas instituciones que han propuesto valores admisibles para los movimientos durante la etapa de carga y descarga de los barcos, con el fin de permitir una alta eficiencia en estos procesos, pero éstas son basadas en experiencias internacionales y sin considerar las condiciones regionales de cada uno de los puertos del globo. De este modo, se analizarán y compararán estas recomendaciones con los resultados obtenidos de las

modelaciones realizadas mediante modelos matemáticos de comportamiento de buques atracados en terminales afectos a condiciones de oleaje.

CAPÍTULO II

2. MOTIVACIÓN

La motivación central para el desarrollo de este tema está en la posibilidad de investigar y determinar funciones aplicables en estudios de prefactibilidad para el diseño de terminales portuarios. Contar con antecedentes para la estimación preliminar de movimientos en barcos atracados, tanto en los diseños como en la operabilidad de puertos, genera un beneficio directo en la calidad de la ingeniería de factibilidad.

De este modo, el desarrollo de esta memoria está enfocado a la obtención de herramientas que permitan estimar de forma preliminar y aproximada las condiciones de funcionamiento de los terminales portuarios, las cuales se ven determinadas directamente por la configuración de los puertos, por el clima de oleaje al cual se ven expuestos a las embarcaciones o por las diversas configuraciones de amarras a utilizar en las operaciones de carga y descarga.

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivos Generales

- Analizar y desarrollar funciones simples que permitan determinar condiciones de operabilidad en un terminal de porta-contenedores menores frente a variadas condiciones de oleaje.
- Analizar y discutir los criterios internacionales recomendados por el Permanent International Association of Navigation Congresses, PIANC, para las operaciones de carga y descarga, los cuales serán contrastados con los resultados obtenidos de las distintas modelaciones a realizar y comparados con las recomendaciones de otras instituciones internacionales.

3.2 Objetivos Específicos

Mediante la utilización de un modelo matemático para el comportamiento de buques denominado TERMSIM II y considerando dos embarcaciones porta-contenedores tipo de diferentes tamaños, se pretende realizar los siguientes puntos:

- Analizar en detalle el comportamiento dinámico de un barco porta-contenedores atracado.
- Determinar la dependencia de operación de carga y descarga en los terminales abiertos a distintas condiciones de oleaje.
- Determinar criterios límites de operabilidad según los parámetros del oleaje incidente, para cada uno de los grados de libertad asociados al movimiento de barcos
- Comparar el comportamiento de un buque porta-contenedores pequeño (250 [TEU]) con un buque porta-contenedores de mayor capacidad (2.000 [TEU]) basados en criterios internacionales de diseño de puertos, determinando la incidencia del tamaño de las embarcaciones para las operaciones de carga y descarga.
- Realizar una evaluación de los factores a considerar en nuevos estudios, con el fin de obtener resultados complementarios a los realizados por este trabajo.

CAPÍTULO IV

4. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

En este capítulo se presentan los principios fundamentales que gobiernan la mecánica del oleaje de primer orden, la teoría probabilística del oleaje y análisis de esfuerzos en cuerpos flotantes. Esta introducción al tema se basa en los textos “Offshore Hydromechanics” de J.M.J Journée (2001) y “Water Wave Mechanics for Engineers and Scientist” de Robert Dean, y R. Dalrymple (1991), correspondientes a las referencias [1] y [2] del capítulo IX Conclusiones y Recomendaciones.

4.1 Mecánica del Oleaje.

Dado que en este trabajo se investigó el efecto del oleaje sobre una embarcación porta-contenedores, se utilizó oleaje oceánico de periodo corto, es decir, olas que son generadas por la acción del viento y con periodos comprendidos entre los 5 y 30 segundos. Este tipo de oleaje puede ser caracterizado por variadas teorías de diversa complejidad, entre las cuales se encuentra la Teoría Lineal del Oleaje, la teoría más sencilla desarrollada para explicar la mecánica del oleaje

El conocimiento del oleaje y las fuerzas que genera es esencial para el diseño de obras costeras y de terminales portuarios. La simple observación de la superficie del mar, muestra que el oleaje es un fenómeno irregular y tridimensional, altamente complejo, lo que hace necesario realizar una serie de simplificaciones para acercarse a una representación que permita modelar la compleja mecánica del oleaje.

4.1.1 Oleaje Regular

El Oleaje Regular es una primera aproximación que permite conocer la mecánica del oleaje con una simple representación matemática, suponiendo un fenómeno bidimensional de pequeña amplitud, sinusoidal, progresivo y con influencia del fondo, el cual está definido por una altura de ola y un período asociado a la onda. Mediante esta simple representación será posible determinar movimiento, desplazamientos, cinemática y la dinámica del oleaje, proporcionando estimaciones de gran utilidad para el diseño de ingeniería.

La teoría desarrollada para el oleaje regular no permite representar el comportamiento aleatorio que tiene el oleaje, por lo que fue necesario contar con una descripción alternativa de las olas del mar. Es así como surgieron otros métodos que permiten, mediante el uso de teorías estadísticas y probabilísticas, caracterizar el Oleaje Irregular del mar. Una forma de abordar el problema por estos métodos es transformar la superficie del mar, usando la teoría de Fourier, en superposiciones lineales de ondas sinusoidales para luego definir las características del oleaje en términos de un espectro de energía asociado.

4.2 Teoría Lineal del Oleaje

Para poder determinar analíticamente el movimiento de la superficie de un cuerpo de agua, es necesario formular matemáticamente las leyes que rigen su comportamiento. Esta teoría fue descrita por Airy (1801-1892), y sus aplicaciones son de amplia utilidad en el desarrollo y solución de problemas de ingeniería, dado que su planteamiento es sencillo y sus aproximaciones son adecuadas para la mayoría de estos.

4.2.1 Enfoque de análisis

Para describir el movimiento de las partículas de fluido fue necesario determinar que tipo de sistema de referencia se utilizara para este fin. Es así como el análisis se llevo a cabo bajo el enfoque Euleriano, el cual describe el cambio ocurrido en el flujo desde un punto fijo (x,y,z) en el espacio, no considerando la historia de movimiento de la partícula, sino que solo asignándole una posición inicial a partir del momento del análisis. Este enfoque solo se centra en lo ocurrido en un punto del espacio, para lo cual se utiliza el sistema de referencia de la Figura 4.2-1.

Además, fue necesario definir los parámetros que forman parte de las ecuaciones desarrolladas en adelante. Estos son:

- h : Profundidad del agua, medida desde el fondo hasta el nivel de aguas quietas
- z : Elevación de un punto determinado de la superficie libre respecto de un sistema de coordenadas cuyo origen esta en el nivel de aguas quietas.
- p : Presión hidrostática.
- u : Velocidad horizontal
- w : Velocidad vertical
- L : Longitud de la ola
- η : Elevación de la superficie libre respecto del nivel de aguas quietas.
- H : Altura de la ola
- a : Amplitud de la ola
- c : Celeridad de la ola
- Φ : Velocidad potencial
- ρ : Densidad del agua
- g : aceleración de gravedad

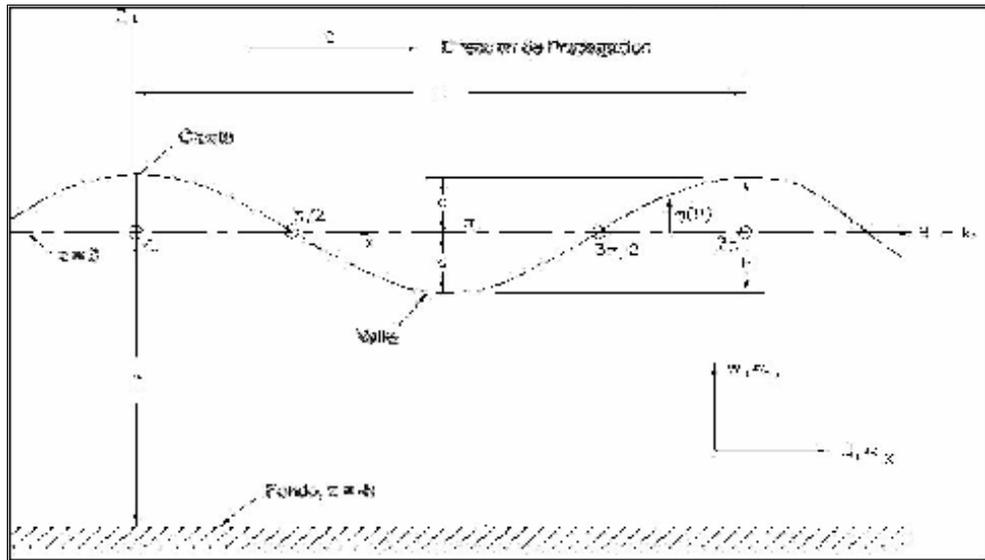


Figura 4.2-1. Esquema de una ola progresiva y sus parámetros asociados

4.2.2 Conservación de Masa: Ecuación de Continuidad

La ecuación de conservación de masa es derivada del hecho que la tasa de cambio de masa de un fluido, el cual ocupa un volumen fijo en el espacio, es igual al flujo de masa de fluido que ocurre a través de los bordes o límites del volumen mencionado.

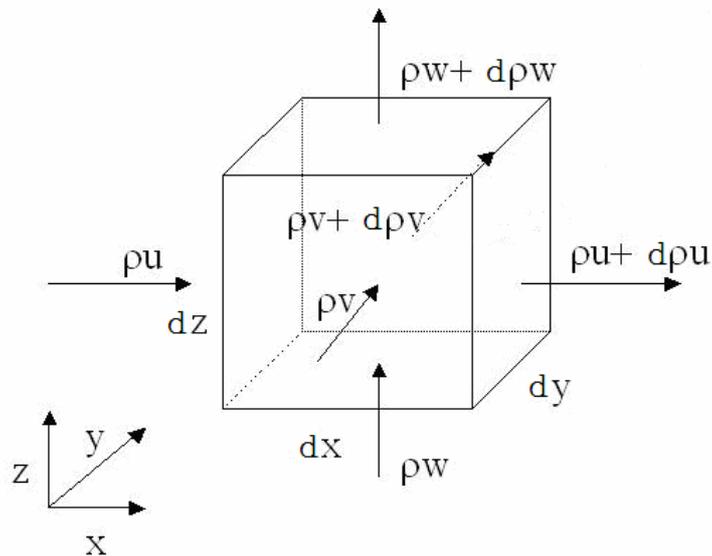


Figura 4.2-2: Volumen de Control

Igualando las expresiones de flujo neto de masa y la expresión de salida neta de masa debido a la advección, obteniendo

$$\boxed{\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \cdot \vec{u}) = 0} \quad (4.1)$$

Esta ecuación general de conservación de masa puede ser simplificada si el fluido es incompresible, lo que significa que

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad (4.2)$$

4.2.3 Ecuaciones de Movimiento

Las ecuaciones de movimiento de una partícula de fluido pueden ser descritas según la segunda ecuación de Newton;

$$\frac{d(m\vec{v})}{dt} = \sum F \quad (4.3)$$

Para el desarrollo de las ecuaciones de movimiento de una partícula de fluido, Euler realizó ciertos supuestos sobre el comportamiento de las partículas y de las fuerzas que actuaban sobre estas.

Hipótesis de Continuidad

El fluido se considera distribuido continuamente en el espacio. De este modo, las funciones matemáticas que describen el comportamiento de los fluidos son consideradas funciones continuas

Fluido no viscoso

Para el análisis se considero un comportamiento asociado a fluidos ideales; esto es que las fuerzas friccionales entre la columna y el fondo y entre la superficie libre la columna son considerados despreciables, así como también los esfuerzos friccionales internos.

Fluido Incompresible

Esto implica que la densidad del fluido (ρ) es considerada como constante. Esta suposición no es del todo cierta, pero para la mayoría de los fluidos esta aproximación es cercanamente valida.

Dado todos estos supuestos, se pueden obtener las ecuaciones de movimiento por unidad de masa para los diferentes ejes del sistema de referencia. Según el enfoque Eurliano tenemos que

$$\begin{aligned} \frac{D\vec{u}}{dt} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \\ \frac{D\vec{v}}{dt} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} \\ \frac{D\vec{w}}{dt} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - g = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial z} (p + \rho g z) \end{aligned} \quad (4.4)$$

Donde x e y se desarrollan en el plano horizontal y el eje z corresponde a la vertical

4.2.4 Ecuaciones de Movimiento para Fluidos Irrotacionales

La teoría de flujo irrotacional resulta de un número de simplificaciones en las ecuaciones de Navier-Stokes, las cuales son de gran utilidad para obtener soluciones analíticas del problema. La ecuación de continuidad resultante para un flujo incompresible e irrotacional, es llamada ecuación de Laplace y es expresada como;

$$\boxed{\nabla^2 \phi = 0} \quad (4.5)$$

Para poder determinar una expresión que permita buscar una solución para la velocidad potencial, se comenzará utilizando la ecuación de conservación de momento expresada por Euler;

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \vec{u} = -\nabla \left(\frac{p}{\rho} + gz \right) \quad (4.6)$$

utilizando las relaciones existentes entre las derivadas parciales expresadas en la ecuación (4.4), la hipótesis de irrotacionalidad y escribiendo el término advectivo de la ecuación como

$$\vec{u} \cdot \nabla \vec{u} = u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \quad (4.7)$$

obtenemos que

$$\vec{u} \cdot \nabla \vec{u} = \nabla \left(\frac{1}{2} u^2 \right) \cdot \vec{u} \quad (4.8)$$

Una simplificación en esta expresión puede ser la utilización del gradiente escalar de velocidad potencial en la ecuación anterior, el cual para el término advectivo se expresa como;

$$\vec{u} \cdot \nabla \vec{u} = \nabla \left(\frac{1}{2} u^2 \right) = \nabla \left(\frac{1}{2} (\nabla \phi)^2 \right) \quad (4.9)$$

Gracias a esta simplificación y sabiendo que la función ϕ es continua con derivada continua, la expresión dada por la ecuación (4.5) puede ser escrita como;

$$\boxed{\nabla \left(\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{1}{2} (\nabla \phi)^2 + \frac{p}{\rho} + gz \right) = 0} \quad (4.10)$$

Como vemos, esta ecuación es independiente de los ejes x-y-z.. Procediendo con la integración en todos los ejes, se tiene que para cada uno de estos se tiene una constante distinta, pero por otro lado, el lado derecho de la ecuación es el mismo para todos los ejes. De este modo, la constante es única para el espacio y solo depende del tiempo.

Ya con este análisis realizado obtenemos que la ecuación de Bernoulli para fluido incompresible, no viscoso, irrotacional e impermanente esta dado por;

$$\boxed{\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{1}{2}(\nabla \phi)^2 + \frac{p}{\rho} + gz = C(t)} \quad (4.11)$$

4.2.5 Formulación de Teoría Lineal del Oleaje.

Para analizar el movimiento ondulatorio de una superficie libre, como es el caso de las olas, es necesario imponer las condiciones de borde que dominan y controlan el problema.

Para expresar matemáticamente el problema, se definirá la superficie libre mediante la relación $z = \eta(x, t)$ mientras que el fondo será definido como $z = -h(x)$. De este modo, el agua ocupa la región entre el fondo y la superficie libre o matemáticamente expresado, $-h(x) \leq z \leq \eta(x, t)$.

Para encontrar soluciones analíticas al problema se supuso, al igual que Euler, condiciones para el fluido de: continuidad, no viscosidad, incompresibilidad e irrotacionalidad. Junto con esto se considerará como campo de fuerzas sólo el campo gravitatorio. Otras consideraciones interesantes con respecto a las condiciones de borde son que no se considerará la tensión superficial como fuerza restauradora, la superficie del mar se considera como superficie libre ya que la acción del viento sobre esta se considerará despreciable y, por último, el fondo es completamente impermeable y fijo.

4.2.6 Condiciones de Borde

Como se mencionó anteriormente, las condiciones de borde se encuentran situadas sólo en el fondo y en la superficie, por lo que para encontrar una solución a las ecuaciones no lineales se debe diferenciar entre condiciones de borde cinemática, las cuales están asociadas al movimiento del fluido, y las condiciones de borde dinámicas, las cuales están asociadas a las fuerzas que actúan sobre este.

La primera condición de borde a mencionar es la que respecta al fondo, como base sólida y fija. Vemos que no existe flujo entre la columna y el fondo, lo que se traduce en que la velocidad normal a esta superficie es cero. Se puede expresar matemáticamente como;

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \quad \text{Para } z = -h \quad (4.12)$$

La siguiente condición de borde a determinar es la relativa a la superficie. Como sabemos, la superficie esta compuesta por partículas de fluido, lo cual nos hace ver que no existe flujo a través de esta. Para describir esto en forma matemática, se dirá que la velocidad de las partículas es solo tangencial a la superficie. Entonces dado lo anterior, tendremos una condición cinemática de la superficie,

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} - \frac{\partial \eta}{\partial t} = 0 \quad \text{Para } z = 0 \quad (4.13)$$

Por ultimo es importante agregar una condición dinámica al problema. Dado que suponemos que la superficie es libre, la presión relativa en este punto es igual a cero. Con

esto sin perder generalidad se ha supuesto que la constante de integración es nula, por lo que la ecuación de Bernoulli queda reducida a

$$\boxed{\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{1}{2}(\nabla \phi)^2 + gz = 0} \quad (4.14)$$

A partir de estos supuestos, solucionando las ecuaciones del flujo potencial bidimensional (ecuación de Laplace) y despreciando los términos de segundo orden, se llega a la solución del problema.

Para esto es necesario realizar algunos cambios de variables y suponer que la celeridad de la ona es constante ($C = cte$). Luego se define $k = \frac{2\pi}{L}$ como el número de ola y $\omega = \frac{2\pi}{T}$ como la frecuencia angular.

De las condiciones de borde se obtiene que la velocidad de fase está dada por:

$$c = \sqrt{\frac{g \cdot L}{2\pi} \cdot \tanh\left(\frac{2\pi \cdot h}{L}\right)} \quad (4.15)$$

Para pequeña amplitud $z = \eta \approx 0$, por lo que

$$\eta = a \cdot \cos \theta = \frac{H}{2} \cos(\omega t - kx) \quad (4.16)$$

Se resuelve entonces, la ecuación del flujo potencial:

$$\phi = -\frac{H \cdot c}{2} \frac{\cosh k(z+h)}{\sinh(kh)} \text{sen}(\omega t - kx) \quad (4.17)$$

Conocido θ , se conoce la mecánica del oleaje y para describirlo solo se requieren parámetros como h , H y T . La longitud del oleaje queda definida como

$$L = \frac{g \cdot T^2}{2\pi} \cdot \tanh\left(\frac{2\pi \cdot h}{L}\right) \quad (4.18)$$

Esta última ecuación tiene la dificultad que requiere una solución iterativa para converger al resultado, sin embargo con las herramientas computacionales actuales no presenta mayor complicación.

Aplicando los conceptos de la teoría lineal del oleaje se llega también a determinar expresiones para la velocidad y aceleración de las partículas de agua bajo una ola.

$$u = \frac{H}{2} \cdot \frac{g \cdot T}{L} \cdot \frac{\cosh\left[2\pi \cdot \frac{(z+h)}{L}\right]}{\cosh\left(\frac{2\pi \cdot h}{L}\right)} \cdot \cos \theta$$

$$w = \frac{H}{2} \cdot \frac{g \cdot T}{L} \cdot \frac{\sinh\left[2\pi \cdot \frac{(z+h)}{L}\right]}{\cosh\left(\frac{2\pi \cdot h}{L}\right)} \cdot \sin\theta \quad (4.19)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{g \cdot \pi \cdot H}{L} \cdot \frac{\cosh\left[2\pi \cdot \frac{(z+h)}{L}\right]}{\cosh\left(\frac{2\pi \cdot h}{L}\right)} \cdot \sin\theta$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -\frac{g \cdot \pi \cdot H}{L} \cdot \frac{\sinh\left[2\pi \cdot \frac{(z+h)}{L}\right]}{\cosh\left(\frac{2\pi \cdot h}{L}\right)} \cdot \cos\theta$$

Una descripción teórica más completa del oleaje puede ser obtenida a partir de las teorías no-lineales, donde los términos de segundo orden no se desprecian. Estas teorías se denominan de orden superior, sin embargo escapan a los alcances de este estudio.

4.3 Análisis de Oleaje

4.3.1 Descripción Estadística del Oleaje

Si bien la teoría lineal del oleaje permite encontrar resultados muy útiles para la ingeniería, no permite caracterizar adecuadamente el oleaje real, el cual tiene un comportamiento aleatorio. Para apreciar este fenómeno basta con observar la superficie del mar, donde se puede apreciar que hay olas de diferentes amplitudes, distintos períodos y desplazándose en distintas direcciones. En la Figura 4.3-1 se aprecia el registro de oleaje de una sonda que mide la elevación de la superficie libre en el tiempo.

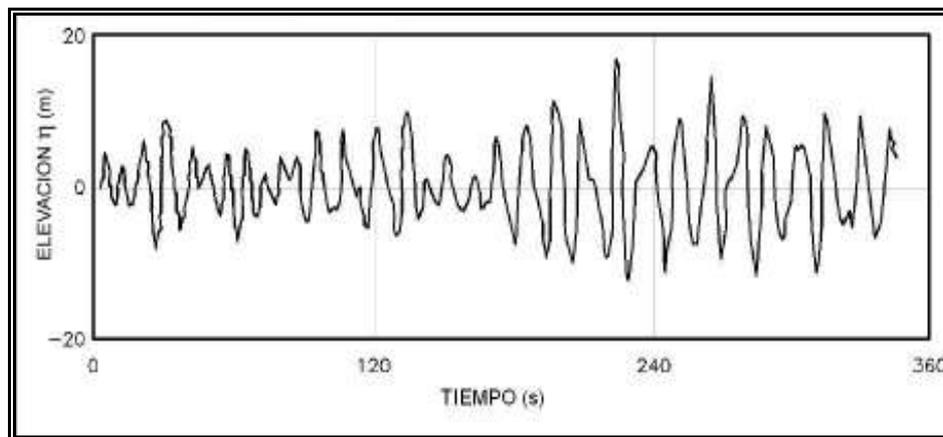


Figura 4.3-1: Registro de elevación de la superficie del mar.

Se hace necesario caracterizar el oleaje de alguna manera para poder cuantificar sus propiedades de onda. Se define el concepto de estado de mar, el cual corresponde a una caracterización del oleaje a corto plazo (~3 horas). Se considera que en este lapso de tiempo los estadígrafos del oleaje no cambiarían mayormente, lo que se ha demostrado para tormentas típicas.

A partir de estos registros se establece un comportamiento probabilístico del oleaje. Para un estado de mar, La oscilación vertical de la superficie, η , sigue una distribución normal de media cero, por lo que el oleaje queda descrito por su varianza.

Ahora se hace necesario determinar parámetros que permitan definir la estadística de los estados de mar. Dos de los más importantes parámetros necesarios para una adecuada cuantificación básica del oleaje son la altura significativa y período peak, H_s y T_p , respectivamente

De acuerdo a los estudios realizados, las alturas de ola siguen una distribución Rayleigh, la cual no presenta simetría a diferencia de la distribución Normal (Wilks, 1995). La probabilidad de esta distribución de oleaje está caracterizada por la varianza σ_η , tal que:

$$P(H) = \frac{H}{4\sigma_\eta^2} \cdot e^{-\left(\frac{H^2}{8\sigma_\eta^2}\right)} \quad (4.20)$$

De esta manera se puede estimar H_s mediante la varianza, $H_{1/3} = 4 \cdot \sigma_\eta$, donde $H_{1/3}$ representa la altura media del tercio mayor de todas las olas observadas en la serie de tiempo y es igual a la altura significativa. [ref. 8]

4.3.2 Descripción Espectral del Oleaje

Otra forma de describir un estado de mar es la descripción espectral, la cual podemos diferenciar en dos áreas; la descripción espectral teórica y la empírica. La primera de estas se basa en descomponer la superficie del mar mediante la transformada de Fourier. Esto considera la variación de la superficie libre en un punto determinado, permitiendo una descripción de la distribución de la varianza respecto a la frecuencia de la señal en el punto. Esta distribución se anota como $E(f)$ y se supone continua en el espacio de la frecuencia a pesar de que en la práctica las señales son discretas. Este $E(f)$ también es llamado *espectro de energía* ya que utilizando la teoría lineal del oleaje la energía del oleaje puede ser estimada mediante la multiplicación de $E(f)$ por ρg .

Las ventajas de una representación espectral del oleaje son que entrega directamente la frecuencia asociada a un peak de energía, lo que es muy práctico para aplicaciones de ingeniería.

El espectro de oleaje puede ser obtenido a partir de una serie de tiempo continua de la superficie $\eta(t)$ y el análisis de Fourier. A partir del análisis de Fourier, el perfil del oleaje puede ser representado por una serie infinita de funciones trigonométricas de amplitud A_n , frecuencia ω_n y fase relativa ε_n .

$$\eta(t) = \sum_{n=0}^{\infty} A_n \cos(\omega_n t - \varepsilon_n) \quad (4.21)$$

Luego el espectro de energía del oleaje queda dado por:

$$E(f) = \frac{1}{T_r} \left[\sum_{n=0}^N \eta(n\Delta t) \cdot e^{2\pi i f(n\Delta t)} \Delta t \right]^2 \quad (4.22)$$

Un parámetro muy útil del análisis espectral es el parámetro espectral escalar m_o que corresponde al momento cero del espectro y se define como:

$$m_o = \int_0^{\infty} E(f) df \quad (4.23)$$

Este valor se corresponde al área bajo el espectro y permite estimar σ_{η} , de esta manera se puede relacionar el área del espectro con la altura significativa H_s , por lo tanto $H_s = 4.004 \cdot \sqrt{m_o}$, pero se define como $H_{m_o} = 4 \cdot \sqrt{m_o} \approx H_s$.

A partir de la frecuencia asociada al peak de energía f_p , es posible obtener el período peak T_p , donde $T_p = \frac{1}{f_p}$.

Otro aspecto de interés dentro del análisis espectral del oleaje es relacionar densidades espectrales de la evolución temporal de las elevaciones del mar con funciones teórico empíricas. En este sentido dos de las funciones más utilizadas son: [ref. 8]

- Espectro Pierson – Moscowitz (1964), que se elaboró a partir de mediciones tomadas en buques oceanográficos en el atlántico norte. Este corresponde a un mar completamente desarrollado en aguas profundas y está basado en la teoría de similitud de Kitaigorodskii. Este espectro posee la siguiente forma.

$$S_{PM}(f) = \frac{\alpha \cdot g^2}{(2\pi)^2} f^{-5} \cdot e^{\left(-0.74 \cdot \left(\frac{g}{2\pi v f}\right)^4\right)} \quad (4.24)$$

Con $\alpha = 0.0081$, g aceleración de gravedad (m/s^2), v velocidad del viento (m/s) a 19,5 m sobre el n.m.m. y f la frecuencia en Hz. La energía del espectro S_{PM} , tiene unidades de m^2s .

- Espectro JONSWAP (1969): A partir del espectro PM se realizó una campaña para estimar un espectro para un mar no desarrollado completamente (limitado por fetch). Dicho espectro se denominó JONSWAP (Join North Sea Wave Project) y fue desarrollado durante los años 1968 y 1969. Está dado por la siguiente expresión:

$$S(f) = \frac{\alpha \cdot g^2}{(2\pi)^4} f^{-5} \cdot e^{\left(-1.25 \cdot \left(\frac{f}{f_p}\right)^4\right)} \cdot \gamma \exp\left(\frac{\frac{f}{f_p} - 1}{2\sigma^2}\right) \quad (4.25)$$

Donde

$$f_p = 3,5 \left[\frac{g^2 F}{U_{10}^3} \right]^{-1/3} \qquad \alpha = 0,076 \left[\frac{gF}{U_{10}^2} \right]^{-0,22}$$

$$1 \leq \gamma \leq 7 \text{ (3.3)}; \qquad \sigma = 0.07 \text{ para } f \leq f_p; \qquad \sigma = 0.09 \text{ para } f > f_p;$$

U_{10} velocidad del viento a 10 m sobre n.m.m. y γ factor de amplificación del peak. Las unidades de g , f , U_{10} y F son m/s^2 , Hz, m/s y m respectivamente. $S(f)$ tiene unidades de m^2/s .

En la Figura 4.3-2 se ilustra una comparación entre ambos espectros, apreciándose el aspecto que estos presentan.

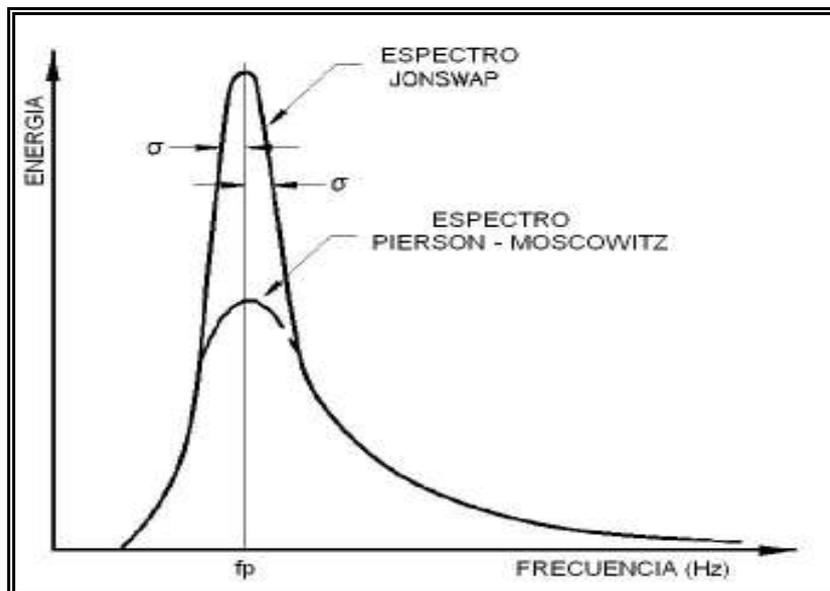


Figura 4.3-2. Comparación gráfica entre espectro JONSWAP y PM.

Además existen otros espectros teóricos que se acomodan a fenómenos combinados, pero su análisis se escapa de los alcances de este estudio.

4.4 Teoría de Cuerpos Flotantes

Para explicar los movimientos de sólidos flotando en un cuerpo de agua afecto a movimiento ondulatorio es necesario describir en forma cualitativa las distintas fuerzas involucradas que originan estos movimientos. Estas dependerán en que estado de mar se produzcan (oleaje regular o irregular) y se diferencian en olas de 1° y 2° orden, dependiendo de la frecuencia que las defina.

4.4.1 Fuerzas de Olas Regulares

Para determinar las fuerzas resultantes sobre estructuras rígidas debido a la acción de una serie de olas regulares, es necesario desarrollar ciertas hipótesis que permitan determinar en forma matemática las expresiones necesarias para evaluarlas. De este modo, como hipótesis se supone que las olas incidentes a la estructura son completamente reflejadas.

Con lo anterior, y utilizando la expresión general para fuerzas sobre cuerpos rígidos, dada por

$$\bar{F} = - \int_{-\infty}^{\xi} (\bar{p} \cdot \bar{n}) dS \quad (4.26)$$

donde ξ_a representa la amplitud de la ola. La presión sobre la estructura está dada por

$$p = -\rho g z - \rho \frac{\partial \Phi}{\partial t} - \frac{1}{2} \rho \left\{ \left(\frac{\partial \Phi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi}{\partial z} \right)^2 \right\} \quad (4.27)$$

de donde se obtiene que la fuerza por unidad de longitud debido al oleaje regular podemos expresarlo, después de un manejo algebraico, simplemente como

$$\bar{F} = -\frac{1}{2} \rho g \xi_a^2 \quad (4.28)$$

la cual es numéricamente igual a la expresión de la energía de olas incidentes por unidad de área.

4.4.2 Fuerzas en Olas irregulares

Para determinar las fuerzas debido a la incidencia de olas irregulares sobre un cuerpo, se utilizará la expresión del espectro de energía, de modo de representar de mejor forma la variación en la altura y periodo de cada una de las olas del grupo.

Como se sabe, la expresión para el espectro de energía esta dado por

$$S_{\xi}(w) dw = \frac{1}{2} \xi_a^2(w)$$

donde
$$m_{0z} = \int_0^{\infty} S_z(w) dw \quad (4.29)$$

Simplificando las expresiones antes expuestas y sabiendo que $H_{1/3} = 4\sigma$, obtenemos finalmente que la energía debido a la incidencia de olas irregulares viene dado por

$$\bar{F} = -\frac{1}{16} \rho g H_{1/3} \quad (4.30)$$

4.4.3 Fuerza Media de Deriva por Oleaje

El análisis anterior consideró como hipótesis el hecho de que las olas se reflejaban completamente en el cuerpo que incidían, lo cual no es completamente cierto pues generalmente estas reflejan sólo una parte de ellas, mientras que el resto es transmitido directamente al cuerpo flotante. Junto con esto el mismo cuerpo genera oleaje debido a su propio movimiento.

Las olas reflejadas poseen exactamente la misma frecuencia que las olas incidentes, por lo que se puede asumir que su espectro está dado por:

$$\xi_{ar} = R(\omega) \xi_a \quad (4.31)$$

Donde $R(\omega)$ representa el coeficiente de reflexión, el cual es función de la frecuencia de las olas. Dada la ecuación anterior, para las olas regulares podemos obtener directamente una expresión para la fuerza por unidad de largo, la cual está dada por:

$$\bar{F} = -\frac{1}{2} \rho g \{R(\omega) \xi_a\}^2 \quad (4.32)$$

4.4.4 Dominio de Frecuencia

Las relaciones hidrodinámicas de fuerza y momento pueden ser descritas mediante la utilización de formulas clásicas (Cummins, 1962). Estas se basan en la física clásica y explican el fenómeno a partir de ecuaciones básicas de movimiento.

Integrando la presión obtenida mediante la linealización de la ecuación de Bernoulli sobre la superficie del cuerpo, es posible obtener los esfuerzos a los cuales esta sometido este. Utilizando la expresión de la ecuación anterior y considerando esfuerzos lineales de restitución, $C \cdot x$, mediante la segunda ley de Newton tenemos que,

$$(M + A) \ddot{x} + \int_0^{\infty} B(\tau) \dot{x}(t - \tau) d\tau + C \cdot x(t) = X(t) \quad (4.33)$$

Donde

$\ddot{x}(t)$ = aceleración de traslación (ó rotación) en el tiempo (m / s^2)

$\dot{x}(t)$ = velocidad de traslación (ó rotación) en el tiempo (m / s)

$x(t)$ = desplazamiento (ó rotación) en el tiempo (m)

M = Masa del sólido ó momento de inercia (kg)

A = Coeficiente de masa adherida (kg)

$B(\tau)$ = Funciones de retardo (Ns / m)

C = Coeficiente de Spring dado por la geometría del barco (N / m)

$X(t)$ = Esfuerzo externo en el tiempo (N)

Esta ecuación es conocida como la “ecuación de Cummins” en honor a su trabajo. Para la determinación de los coeficientes A y B es necesario determinar las velocidades potenciales Ψ y χ , ya que estos coeficientes, por definición, dependen de estas velocidades directamente. Dada la complejidad de este cálculo, fue necesario determinar un método mas simple para la obtención de estos coeficientes, el cual fue desarrollado mediante el uso de datos de masa hidrodinámica y damping, obtenidos mediante softwares de dominios de frecuencia existentes, los cuales usaban la teoría potencial como principio teórico (Ogilvie, 1962)

Como hipótesis, se asumió que los objetos flotantes poseían una oscilación armónica con una amplitud unitaria.

$$x(t) = 1.0 \cos(\omega t)$$

la cual, al ser sustituida en la ecuación de Cummins antes desarrollada y comparándola con la descripción clásica de dominio de frecuencia para este tipo de movimientos, obtenemos que

$$\begin{aligned} a(\omega) &= A - \frac{1}{\omega} \int_0^{\infty} B(\tau) \sin(\omega\tau) d\tau \\ b(\omega) &= \int_0^{\infty} B(\tau) \cos(\omega\tau) d\tau \\ c &= C \end{aligned} \quad (4.34)$$

Mediante la utilización de una Transformada de Fourier inversa es posible obtener la función $B(\tau)$, la cual es llamada función de retardo.

$$\begin{aligned} B(\tau) &= \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} b(\omega) \cos(\omega\tau) d\omega \\ A &= a(\omega) \end{aligned} \quad (4.35)$$

4.4.5 Fuerzas y Momentos

Tanto las fuerzas F como los momentos M provienen de la integración de la presión, p , sobre la superficie sumergida del cuerpo, S .

$$\begin{aligned} \vec{F} &= - \iint_S (p \cdot \vec{n}) dS \\ \vec{M} &= - \iint_S p \cdot (\vec{r} \times \vec{n}) dS \end{aligned} \quad (4.36)$$

Donde \vec{n} representa el vector normal a la superficie dS y \vec{r} es el vector posición de la superficie dS . La presión p , mediante la ecuación linealizada de Bernoulli, es determinada a partir de la velocidad potencial como

$$p = -\rho \frac{\partial \Phi}{\partial t} - \rho g z = -\rho \left(\frac{\partial \Phi_r}{\partial t} + \frac{\partial \Phi_w}{\partial t} + \frac{\partial \Phi_d}{\partial t} + g z \right) \quad (4.37)$$

4.4.6 Cargas Hidrodinámicas

Las cargas hidrodinámicas son las fuerzas y momentos causados por el fluido sobre un objeto oscilando en un cuerpo de agua. La radiación potencial, Φ_r , asociada a la oscilación del cuerpo de agua, puede ser expresada en términos de los 6 grados de libertad que describen el comportamiento del cuerpo flotante.

$$\Phi_r(x, y, z, t) = \sum_{j=1}^6 \phi_j(x, y, z) v_j(t) \quad (4.38)$$

De esta expresión podemos deducir que el término debido a la radiación, tanto en las expresiones de fuerza como de momento hidrodinámico están dados por

$$\begin{aligned} \vec{F}_r &= \rho \iint_S \left(\frac{\partial}{\partial t} \sum_{j=1}^6 \phi_j v_j \right) \vec{n} dS \\ \vec{M}_r &= \rho \iint_S \left(\frac{\partial}{\partial t} \sum_{j=1}^6 \phi_j v_j \right) (\vec{r} \times \vec{n}) dS \end{aligned} \quad (4.39)$$

cuyos componentes de fuerza y momento están definidos por

$$\begin{aligned} \vec{F}_r &= (X_{r1}, X_{r2}, X_{r3}) \\ \vec{M}_r &= (X_{r4}, X_{r5}, X_{r6}) \end{aligned}$$

Ya que ninguno de los términos potenciales depende del tiempo, podemos expresar cada uno de estos en forma analítica. De este modo, tenemos que

$$\vec{X}_{rk} = \frac{dv_j}{dt} \rho \iint_S \phi_j \frac{\partial \phi_k}{\partial n} dS \quad (4.40)$$

Ecuación a la cual, si aplicamos el segundo teorema de Green, la condición de superficie libre considerando una función potencial $\Phi = \phi e^{-i\omega t}$ y la relación de dispersión $\omega^2 / g = k \tanh(kh)$, podemos reducir las ecuaciones integrales a tan solo

$$\iint_S \phi_j \frac{\partial \phi_k}{\partial n} dS = \iint_S \phi_k \frac{\partial \phi_j}{\partial n} dS \quad (4.41)$$

ecuación que permite aplicar simetría en las matrices de coeficientes respecto de sus diagonales, teniendo así que $M_{jk} = M_{kj}$ y $N_{jk} = N_{kj}$, donde los M_{jk} representan los coeficientes hidrodinámicos de masa y N_{jk} representa los coeficientes hidrodinámicos de damping.

CAPÍTULO V

5. DESCRIPCION DE HERRAMIENTAS UTILIZADAS

5.1 TERMSIM II

TERMSIM II (Terminal Simulation, por su denominación en inglés) es un software de simulación de series de tiempo que analiza el comportamiento de barcos atracados sujetos a esfuerzos externos, como vientos, corrientes y oleaje. Los sistemas portuarios que permite analizar este software corresponden a tres tipos: Mono Boya (SPM), Multi Boya (MBM) o los Muelles (Jetty), en los cuales se basaron los análisis. Este modelo matemático fue desarrollado por el Maritime Research Institute Netherlands (MARIN) y está basado en los estudios desarrollados por G. van Oortmerssen para su tesis doctoral, ref. [4].

TERMSIM II fue creado para modelar los comportamientos en barcos petroleros o *tankers*, sin embargo, tiene la capacidad de simular la respuesta dinámica de cualquier tipo de barco mediante la correcta definición de los coeficientes hidrodinámicos del casco y frente a diversas condiciones ambientales, entre las que pueden considerarse la profundidad media que posee la zona de puerto, el tipo de viento predominante, el oleaje incidente y las corrientes dominantes.

Las ecuaciones utilizadas para describir cada una de las variables que rigen el movimiento de un barco atracado a un muelle pueden describirse como:

$$\begin{aligned}
 m\ddot{x}_1 + \sum_{k=1}^6 a_{1k}\ddot{x}_k + \sum_{k=1}^6 \int_{-\infty}^t R_{1k}(t-\tau)\dot{x}_k(\tau)d\tau + b_{11}\dot{x}_1 &= F_1^{wind} + F_1^{hydr} + F_1^{wave} + F_1^{moor} \\
 m\ddot{x}_2 + \sum_{k=1}^6 a_{2k}\ddot{x}_k + \sum_{k=1}^6 \int_{-\infty}^t R_{2k}(t-\tau)\dot{x}_k(\tau)d\tau + b_{22}\dot{x}_2 &= F_2^{wind} + F_2^{hydr} + F_2^{wave} + F_2^{moor} \\
 m\ddot{x}_3 + \sum_{k=1}^6 a_{3k}\ddot{x}_k + \sum_{k=1}^6 \int_{-\infty}^t R_{3k}(t-\tau)\dot{x}_k(\tau)d\tau + c_{33}x_3 + c_{35}x_5 &= F_3^{wave} + F_3^{moor} \\
 I_{44}\ddot{x}_4 + \sum_{k=1}^6 a_{4k}\ddot{x}_k + \sum_{k=1}^6 \int_{-\infty}^t R_{4k}(t-\tau)\dot{x}_k(\tau)d\tau + c_{44}x_4 &= F_4^{wave} + F_4^{moor} + F_4^{wind} \\
 I_{55}\ddot{x}_5 + \sum_{k=1}^6 a_{5k}\ddot{x}_k + \sum_{k=1}^6 \int_{-\infty}^t R_{5k}(t-\tau)\dot{x}_k(\tau)d\tau + c_{53}x_3 + c_{55}x_5 &= F_5^{wave} + F_5^{moor} + F_5^{wind} \\
 I_{66}\ddot{x}_6 + \sum_{k=1}^6 a_{6k}\ddot{x}_k + \sum_{k=1}^6 \int_{-\infty}^t R_{6k}(t-\tau)\dot{x}_k(\tau)d\tau + b_{66}\dot{x}_6 &= F_6^{wind} + F_6^{hydr} + F_6^{wave} + F_6^{moor}
 \end{aligned} \tag{5.1}$$

donde

- m, I = masa y momento de inercia del barco
- a_{ij} = coeficiente de masa adicional (independiente de la frecuencia)
- b_{ij} = coeficiente de damping
- R_{ij} = funciones de retardo
- c_{ij} = fuerzas hidrodinámicas de restitución
- F_i^{wind} = fuerza del viento en la dirección i (1, 2 y 6)
- F_i^{hydr} = fuerza de reacción hidrodinámica en la dirección i (1, 2 y 6)
- F_i^{wave} = fuerza del oleaje en la dirección i (1 y 6)
- F_i^{moor} = fuerza de las líneas de amarre en la dirección i (1 y 6)

Como vemos de las ecuaciones anteriores, el lado derecho de cada una de las expresiones está determinado por componentes de fuerzas debido a viento, oleaje, reacciones hidrodinámicas y esfuerzos de amarre y defensas. Todos los grados de libertad dependen directamente de la fuerza del oleaje y de amarre; sin embargo, son sólo los movimientos horizontales los que dependen directamente del conjunto de condiciones de amarres y defensa, pues los movimientos verticales sólo contienen fuerzas debido al roce de los elementos de defensa, y no a los esfuerzos de los elementos de amarre.

TERMSIM II contiene una base de datos con los coeficientes hidrodinámicos, en los cuales se especifican los coeficientes de masa adherida y los coeficientes de damping descritos en la ecuación.

Para modelar el oleaje, el *software* usa una función de densidad espectral de olas junto con una fase aleatoria. De este modo, considera la elevación de una ola irregular usando una serie de Fourier,

$$\xi(t) = \sum \xi_i \cos(\omega_i t + \varepsilon_i) \quad (i = 1, \dots, N) \quad (5.2)$$

La amplitud de los componentes de la ola pueden ser descritos como

$$\xi_i = (2 S_\xi(\omega_i) \Delta\omega_i)^{0.5} \quad (i = 1, \dots, N) \quad (5.3)$$

donde

$S_\xi(\omega_i)$ = densidad espectral del oleaje

$\Delta\omega_i$ = intervalo de frecuencia

Identificadas las funciones de retardo y las oscilaciones de las olas en la zona del terminal, es necesario determinar las fuerzas que inducen los movimientos del barco. De acuerdo a las ecuaciones descritas en la expresión (5.1), se identifican las fuerzas de oleaje, la fuerza del viento y de corrientes, las fuerzas de reacción hidrodinámica y las fuerzas de restitución debido al sistema de amarras y defensas.

La fuerza ejercida por el oleaje es obtenida utilizando la técnica de suma directa de frecuencias, la cual obtiene resultados similares a la técnica de Respuesta de Impulsos o la de Formulación de Series de Volterra (Volterra, 1887).

Con respecto a las fuerzas ejercidas por vientos y corrientes, no ahondaremos en su método de modelación, ya que para todos los análisis a realizar estas fueron nulas con el fin de simplificar el estudio y centrarse en el comportamiento de los barcos atracados bajo la influencia de la dirección de incidencia del oleaje.

La tercera de las fuerzas involucradas, la de reacción hidrodinámica, es quizás dentro de las características del software una de las más importantes, ya que es en la obtención de los parámetros que la definen donde se centra el desarrollo del modelo numérico. Dado lo difícil de determinar cada uno de los coeficientes hidrodinámicos que gobiernan el comportamiento de un cuerpo flotante, el Maritime Research Institute of Netherlands (MARIN) generó una base de datos con una serie de modelos físicos de dimensiones conocidas en los cuales calculó empíricamente cada uno de los coeficientes asociados.

5.2 Descripción de la Base de Datos

Para determinar los coeficientes hidrodinámicos a utilizar por la embarcación a modelar, se utilizan las Leyes de Escalamiento de Froude, para lo cual se determina la relación entre los desplazamientos de cada uno de los barcos, de la siguiente forma

$$\lambda : (\text{Desplazamiento}_{\text{requerido}} / \text{Desplazamiento}_{\text{base de datos}})^{1/3}$$

Las características restantes, como eslora, manga y calado, entre otras, son escaladas a partir de diferentes ponderaciones de esta relación, las cuales se muestran y detallan en la referencia [4]. Para los casos en estudio, no fue necesario aplicar Leyes de Escalamiento, pues ambas embarcaciones cuentan con archivos hidrodinámicos especialmente creados para ellas.

Para determinar en forma precisa que coeficientes hidrodinámicos correspondientes a cada embarcación a simular, fue necesario crear un método que aproximara el comportamiento de los modelos estudiados. De este modo, se adoptaron criterios geométricos, ambientales y de carga con el fin de agrupar y asignar, según estos, el archivo más representativo de coeficientes hidrodinámicos al caso en estudio. En base a relaciones entre las características geométricas de la embarcación y del tipo de carga que desea modelarse, se obtiene un cuadro esquemático para la selección de coeficientes hidrodinámicos según sea el caso, como muestra la Figura 5.2-1: Esquema para Selección de Coeficientes Hidrodinámicos..

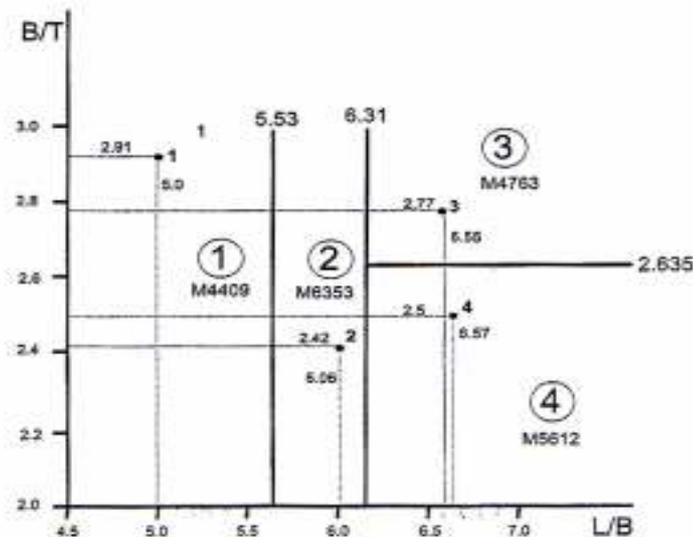


Figura 5.2-1: Esquema para Selección de Coeficientes Hidrodinámicos.

Otro punto importante es la caracterización de las propiedades mecánicas de las líneas de amarre (*chains, mooring legs, ropes, steel wire*) y defensa del muelle (*fenders*). Cada uno de estos elementos ha sido modelado según su curva de tensión-deformación no lineal, la cual considera rigidez variable según sea el tipo de material y geometría de estos.

El modelo de simulación de dominios de tiempo TERMSIM está basado en la técnica de impulso-respuesta para seis grados de libertad. Este programa ha sido validado exitosamente con testeo de modelo (van Oortmerssen et al. 1986) así como el modelo requerido para los archivos de dominios de frecuencia hidrodinámicos (van Oortmerssen 1976; Pinkster 1980; Wichers 1988). Los coeficientes hidrodinámicos junto con las

funciones de respuesta de primer y segundo orden fueron obtenidas de los modelos de dominios de frecuencia para difracción de oleaje basados en la teoría potencial lineal en 3-D. (ref. [5]). Estos resultados fueron comparados con los movimientos obtenidos en barcos de carga, los cuales mostraron una buena correspondencia.

En la Figura 5.2-2: Esquema de Funcionamiento TERMSIM II, se muestra un diagrama esquemático del funcionamiento del software y sus diferentes pasos de cálculo y análisis.

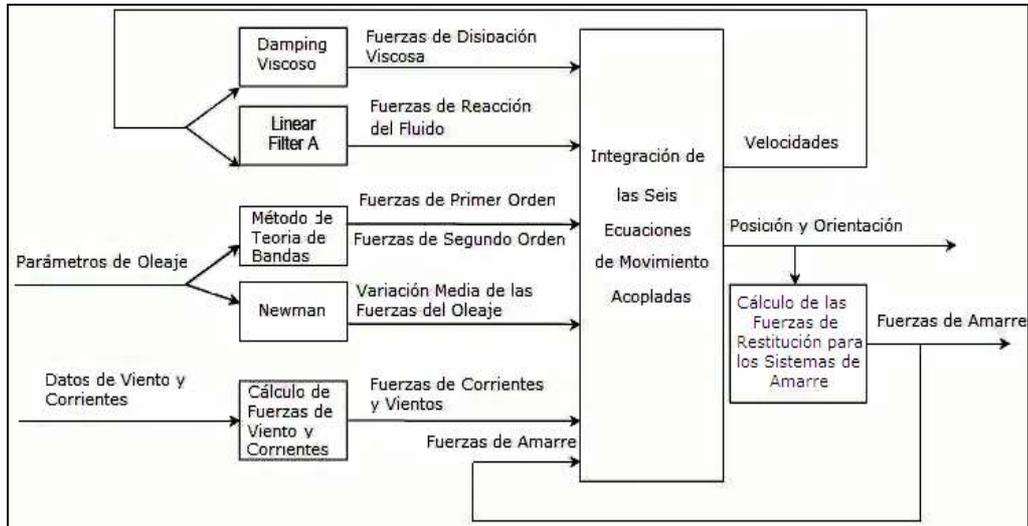


Figura 5.2-2: Esquema de Funcionamiento TERMSIM II

Fuente : referencia [5]

CAPÍTULO VI

6. SIMULACIONES REALIZADAS

6.1 Embarcación Modelada

Se utilizaron dos porta-contenedores tipo; un barco tipo *feeders* CostaRican Star de 12.000 DWT, el cual es equivalente, según el Cuadro III-1 del Anexo III, a un porta-contenedores con capacidad de 250 [TEU]. La segunda embarcación corresponde a un porta-contenedores tipo Panamax de 2.000 [TEU]. Las características de ambas embarcaciones se muestran en el Cuadro 6.1-1.

La elección de este tipo de embarcaciones para los estudios de esta memoria de título se debió principalmente al interés que han mostrado algunas empresas navieras nacionales por la utilización de los porta-contenedores menores, mientras que la segunda embarcación es ampliamente utilizada en nuestro país, permitiendo así una comparación aplicable a las costas de nuestro país.

Cuadro 6.1-1
Cuadro de Características para las Embarcaciones Modeladas

Característica	Valor	Valor	Unidad
Tipo	Porta-Contenedor	Porta-Contenedor	-
Capacidad	250	2.000	TEU
Tipo de Proa	Convencional	Convencional	-
Largo entre Perpendiculares	146	255	m
Manga	20	31,8	m
Calado	7,2	11,7	m
Volumen Desplazado	14.150	49.756	m ³
Masa del Carguero	14504	51.000	t
Condición de Carga	50	50	%
Profundidad del Agua	25	15.8	m
Área Lateral Proyectada sobre la Línea de Agua	2076	4.400	m ²
Área Frontal Proyectada sobre la Línea de Agua	425	900	m ²
Área Plana sobre el Agua	2550	6.008	m ²

Las Figura 6.1-1 y Figura 6.1-2 muestran las dimensiones principales para las embarcaciones CostaRican Star de 250 [TEU] y del Panamax de 2.000 [TEU]. Se puede apreciar el Largo entre Perpendiculares (Lpp), la Manga (*breath*) y el Calado (*draft*).

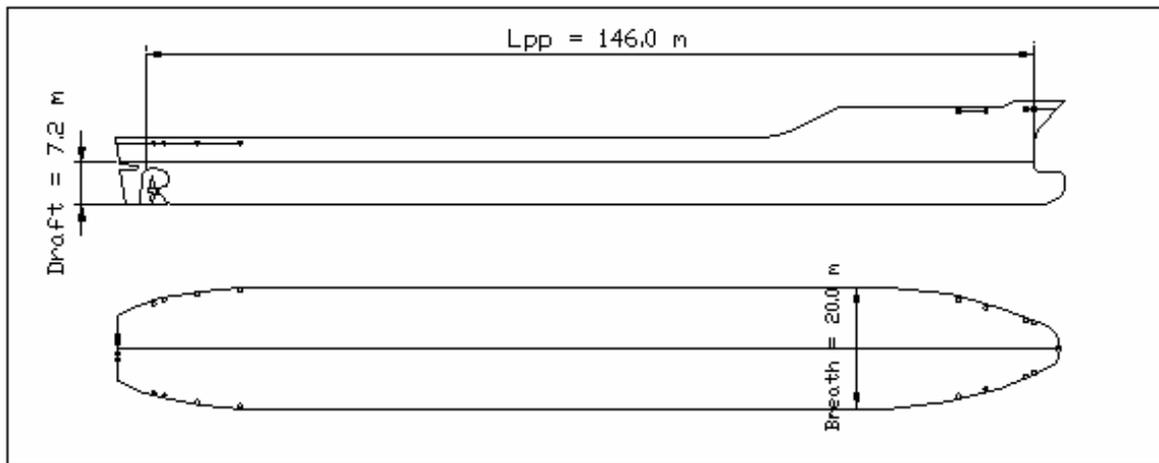


Figura 6.1-1: Costa Rican Star de 250 [TEU], Longitudes Principales

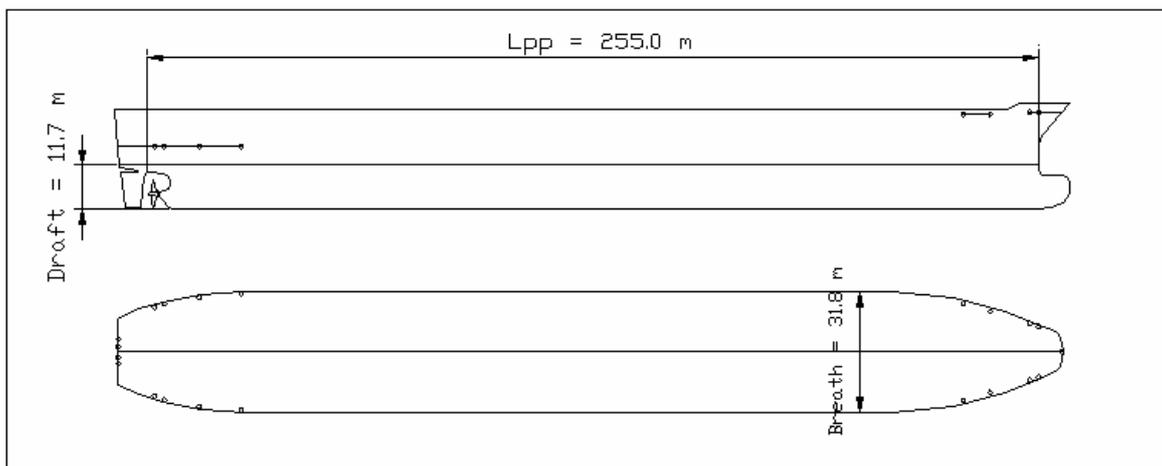


Figura 6.1-2: Panamax de 2.000 [TEU], Longitudes Principales

Hay que notar que la profundidad de agua en la zona de modelación es distinta para ambos casos, lo que se debió a las características del archivo de coeficientes hidrodinámicos con el que se contó para el estudio. El efecto de esta diferencia afecta solo a las longitudes de ola, ya que estas son dependientes de la profundidad en zonas bajas.

6.2 Configuración Sistemas de Defensa y Amarres

6.2.1 Sistema de Defensa

El sistema de defensas [ref. 11] es utilizado por una o más de las siguientes razones:

- Absorber la energía de impacto debida al atraque del buque.
- Evitar que el casco del buque impacten con la superestructura del muelle durante las operaciones de carga y descarga.
- Evitar o reducir los movimientos del buque mientras permanece amarrado.

Sin lugar a dudas la finalidad más importante de las defensas es absorber la energía del buque en el momento de su atraque, evitando que sufran daños tanto su casco como la propia estructura del muelle. Está claramente demostrada la eficacia de la instalación de

defensas en los muelles, sobre todo en la medida que el tamaño de las embarcaciones aumenta, justificado plenamente la inversión realizada ya que se ahorra en el diseño de las obras de las superestructuras de atraque y en los bajos costos de mantención debido al despreciable número de colisiones de las embarcaciones en las maniobras de atraque.

Otro aspecto a tener en cuenta en el diseño del sistema de defensas es su capacidad de reducir los movimientos del buque atracado. En efecto el buque, con su sistema de amarras y defensas, constituye un sistema con un periodo natural de oscilación. Cuando este periodo está próximo al de las olas o grupos de olas que alcanzan al muelle, el sistema puede entrar en resonancia dificultando las operaciones de carga o descarga. Con el sistema de amarras y defensas es posible cambiar el periodo de oscilación del barco y mejorar sus condiciones de operatividad.

El sistema portuario en el cual se basa el estudio, cuenta con un sistema de defensas compuesto por quince (15) elementos de defensa, denominados *fenders*, los cuales están constituidos de materiales flexibles y son del tipo *cell fenders*. Un esquema de ubicación de muestra a continuación en la Figura 6.2-1, el cual corresponde a configuraciones utilizadas en los terminales portuarios para este tipo de embarcaciones.

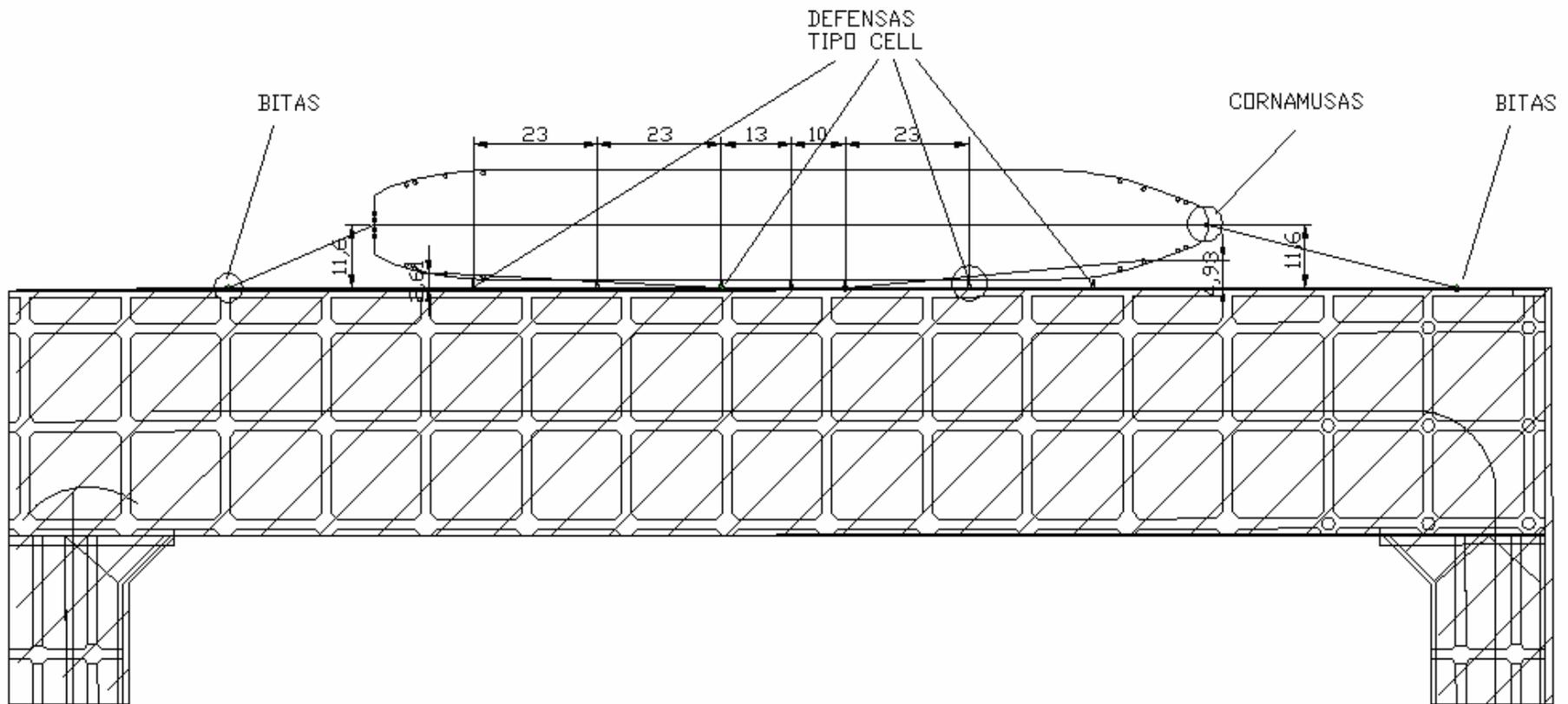


Figura 6.2-1 : Ubicación Espacial del Sistema de Atraque

Estos elementos poseen una sección cilíndrica con un marco de placas de acero, los cuales están adheridos en su extremo de contacto. Bajo acción de carga, la sección cilíndrica se deforma radialmente, lo que controlado, permite una combinación óptima entre la dispersión multidireccional de energía y la alta eficiencia de absorción de la columna de torsión, generando una configuración geométrica estable frente a las variables formas de carga que sufre los sistemas de defensa portuarias en las maniobras de atraque, carga y descarga.

En la Figura 6.2-2 se muestra una imagen correspondiente a los sistemas de defensa utilizados, donde puede se puede apreciar su configuración y materialidad.



Figura 6.2-2: Sistemas de defensa Cell Fenders, Bridgestone

Para el barco de 250 [TEU] modelado, se utilizó una configuración de seis (6) elementos de defensa efectivos, distribuidos simétricamente respecto del origen del sistema de referencia utilizado para el análisis. Como se mencionó, estos sistemas de defensa corresponden a dispositivos *cell fenders* de altura 1,0 m y fuerza de reacción máxima 697 [kN]. El coeficiente de fricción de estos elementos es $\mu=0,2$.

En el cuadro II-1 del anexo II se muestra la disposición espacial de cada uno de esos elementos de defensa, junto con la curva tensión-deformación de este material mostrada en la Figura III-1. Como se ve de esta curva, el comportamiento no-lineal que controla a este tipo de sistemas de defensa conlleva esfuerzos del mismo tipo actuando sobre las embarcaciones durante las operaciones de carga y descarga, generando de esta forma un comportamiento no-lineal frente a los diversos escenarios de oleaje.

Para el barco de 2.000 [TEU], dadas las dimensiones del barco porta-contenedores, fue necesaria la utilización de un mayor número de dispositivos, alcanzando los quince (15) elementos, distribuidos en forma simétrica respecto del origen del sistema de referencia. Al igual que en el primer caso, los sistemas de defensa corresponden a *cell fenders*, cuyas características difieren sutilmente de los elementos utilizados para el porta-contenedores menor, ya que en este caso los dispositivos tiene una longitud de 1,45 m y una fuerza de reacción máxima de 1.269 [kN]. En el cuadro II-2 del anexo II se muestra la disposición espacial de cada uno de esos elementos de defensa, junto con la curva tensión-deformación de este material.

6.2.2 Sistema de Amarre

Su principal finalidad consiste en que el barco permanezca fijo en el sitio de atraque. Con el sistema de amarre elegido pueden controlarse los movimientos máximos del barco, haciendo compatible el sistema con las operaciones de carga y descarga. [ref. 11]

Aunque el estudio del sistema de amarre desde el punto de vista del control de movimientos del barco es un problema complejo, existen unas reglas generales para el diseño que conviene respetar:

- a) El sistema de amarre debe ser simétrico.
- b) Los "*Spring*" (amarras en sentido longitudinal al eje longitudinal del barco) deben ajustarse al sentido longitudinal del barco tanto como sea posible, con el fin de evitar los movimientos horizontales asociados al Surge.
- c) Los "Traveses" (amarras en sentido ortogonal al eje longitudinal del barco) deben disponerse lo más perpendiculares posibles al barco. Normalmente se disponen 4 puntos de amarre, 2 en la zona de proa y otros dos en la zona de popa en barcos porta-contenedores.
- d) Los amarres largos de proa y popa en general no son necesarios para asegurar un buen amarre del barco. En caso de utilizarse deben formar con la línea proa-popa un ángulo inferior a 45°.
- e) El ángulo de los amarres con la vertical debe ser tan pequeño como sea posible y nunca exceder los 30°.

Como se mencionó en el capítulo anterior, TERMSIM II cuenta con una base de datos de distintos materiales para los sistemas de amarre. Los materiales incluidos corresponden a poliéster, Nylon, Dyneema® y Polipropileno. Este último material ha sido seleccionado como elemento de amarre para las modelaciones realizadas.

Los materiales utilizados para las amarras de las embarcaciones corresponden al grupo de sogas sintéticas y sus denominaciones técnicas son Polypropylene 8-strand para el porta-contenedores de 250 [TEU] y el Polypropylene 3-strand, para la embarcación de 2.000 [TEU]. La denominación 8-Strand y 3-Strand refieren al número de hebras que componen el elemento de amarre, y sus características son principalmente una muy buena resistencia química, una muy baja absorción de agua, una alta resistencia a la abrasión y una vida útil bastante prolongada en comparación con las sogas naturales, además de una alta resistencia a la acción de los rayos UV. Algunas de sus características técnicas se muestran en el Cuadro 6.2-1. En la Figura 6.2-3 y Figura 6.2-4 podemos apreciar las características de cada una de las amarras seleccionadas.

Cuadro 6.2-1
Características Técnicas de las Amarras

Denominación	Φ [mm]	Masa Nominal [Kg/100m]	Resistencia Mínima [KN]	Pre-Tensión [KN]
Polypropylene 8-strand	64	185,0	457,15	100,0
Polypropylene 3-strand	105,1	480,7	1177,2	235,0



Figura 6.2-3: Polypropylene 8-strand



Figura 6.2-4: Polypropylene 3-strand

Para llevar a cabo las amarras, se requieren dos elementos conectores de la soga. El punto en tierra es llamado Bitá, y corresponde a cada uno de los elementos de hormigón o acero situados en la superestructura de atraque, cuya función es amarrar las espías. Estas son diseñadas para los esfuerzos máximos de corte esperados, aproximadamente de 100 ton/m^2 .



Figura 6.2-5: Bita

Para el amarre de las líneas al barco, estas son conducidas a través de las cornamusas, las cuales finalizan en un huinche en cubierta, situados fuera de la línea de maniobras del barco. Dadas las condiciones operacionales para la carga y descarga de contenedores, estas embarcaciones no presentan elementos de amarre ni en babor ni en estribor, evitando con esto interferencias en las líneas de movimiento de la grúas del puerto. Este hecho conlleva grandes dificultades para las operaciones de las embarcaciones, ya que no existen actualmente sistemas de amarres de alta eficiencia para las embarcaciones porta-contenedores que no se vean sometidas a las interferencias de los movimientos de las grúas.

Para el caso en estudio se dispuso de una geometría un sistema de amarre compuesto por 4 líneas de amarre; dos spring (proa y popa) y 2 traveses (costado de estribor). En el cuadro II-3 del Anexo II se muestra la distribución espacial de los elementos de amarre, mientras que la representación gráfica se ve en la Figura 6.2-1.

6.3 Procedimiento de Análisis

Como primer punto, es importante esquematizar el caso de estudio, para lo cual se ha propuesto un modelo conceptual, el que puede apreciarse en la Figura 6.3-1 donde se muestra un esquema simplificado del caso.

En la primera zona, denominada *near shore*, podemos ubicar el oleaje incidente y los parámetros que lo caracterizan. En esta etapa del análisis debemos situar la serie de tiempo del oleaje obtenida a partir de los parámetros de resumen del oleaje (T_p , H_s y MWD). Posteriormente se requiere la identificación del archivo de coeficientes hidrodinámicos a utilizar, así como las curvas tensión-deformación para los sistemas de amarre.

La segunda zona corresponde al terminal portuario y al barco en cuestión. Con los datos introducidos, el software es capaz de determinar los esfuerzos generados por el oleaje incidente en cada uno de los elementos de defensa y de amarre, además de entregar el resultado de respuesta del barco para cada uno de los grados de libertad.

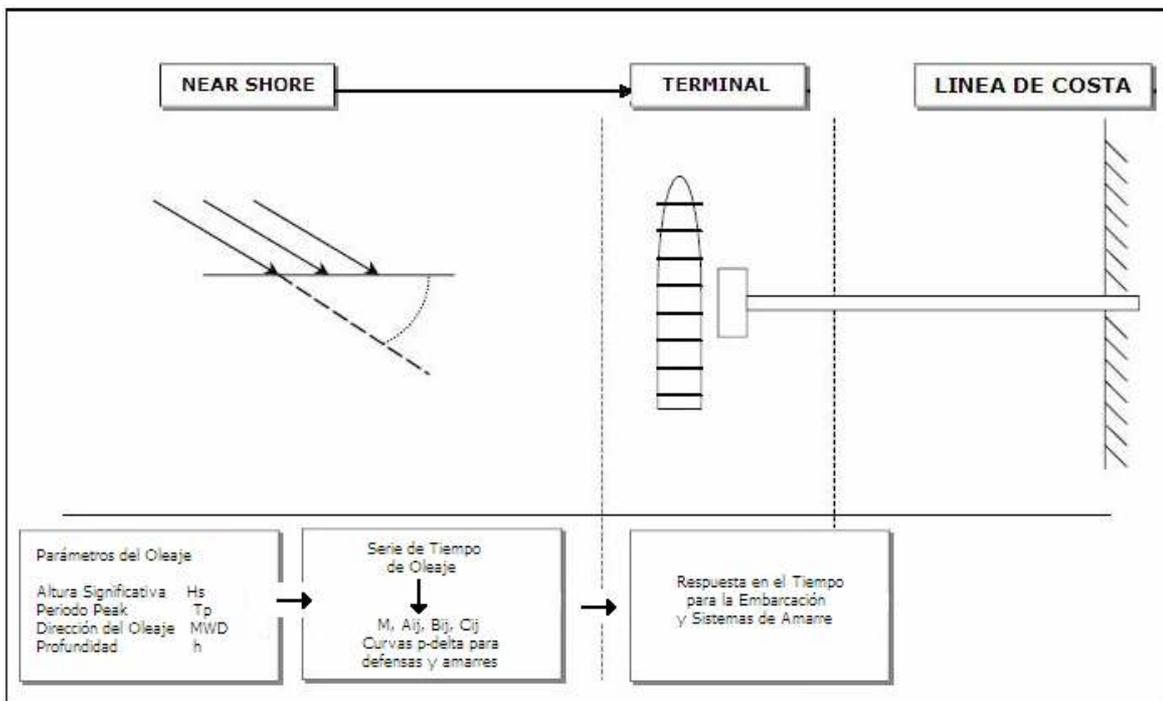


Figura 6.3-1: Esquema de Caso en Estudio

Se utilizaron dos Sistemas de Referencia – $S(x,y,z)$ y $S(x_0, y_0, z_0)$ – el primero de los cuales es absoluto y describe las características del terminal (defensas y bitas). El plano (x,y) corresponde a la superficie libre, siendo el eje x paralelo a la línea de costa, el eje y perpendicular a este y positivo en la dirección de aguas profundas. El eje z es ortogonal a estos ejes y positivo hacia arriba.

El segundo sistema de referencia está situado sobre la embarcación y tiene como origen el punto correspondiente al CoG (centro de gravedad) de ésta. El plano (x_0, y_0) es coincidente con la superficie del barco, donde el eje x_0 está en dirección de proa y el eje y_0 en dirección de estribor. En la Figura 6.3-2 se muestra el esquema de los sistemas de referencia utilizados.

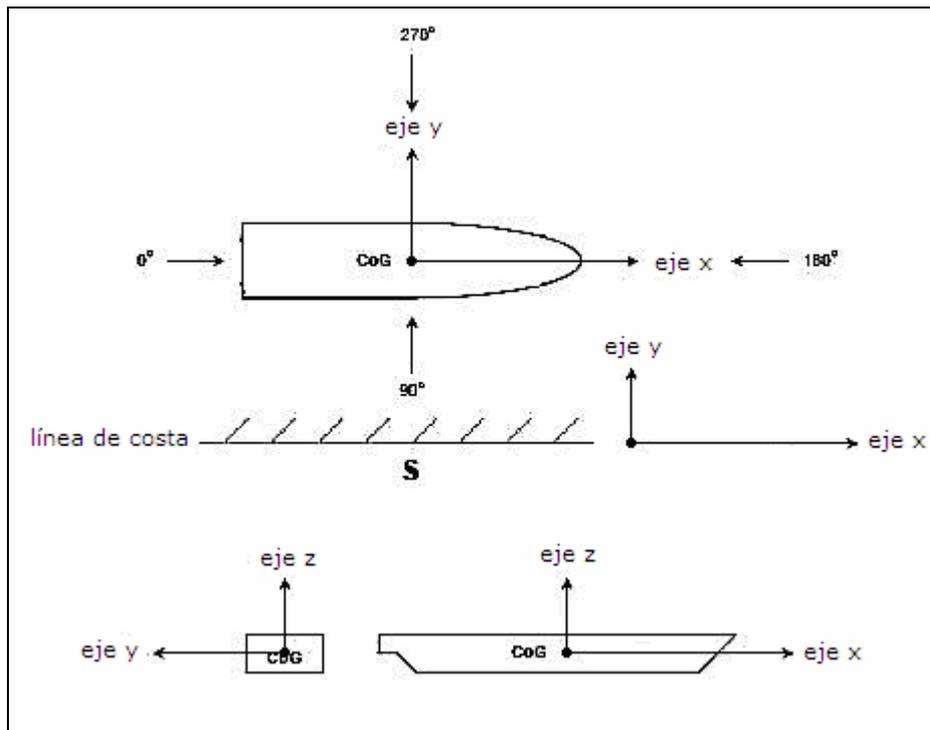


Figura 6.3-2: Sistema de Referencia Utilizado

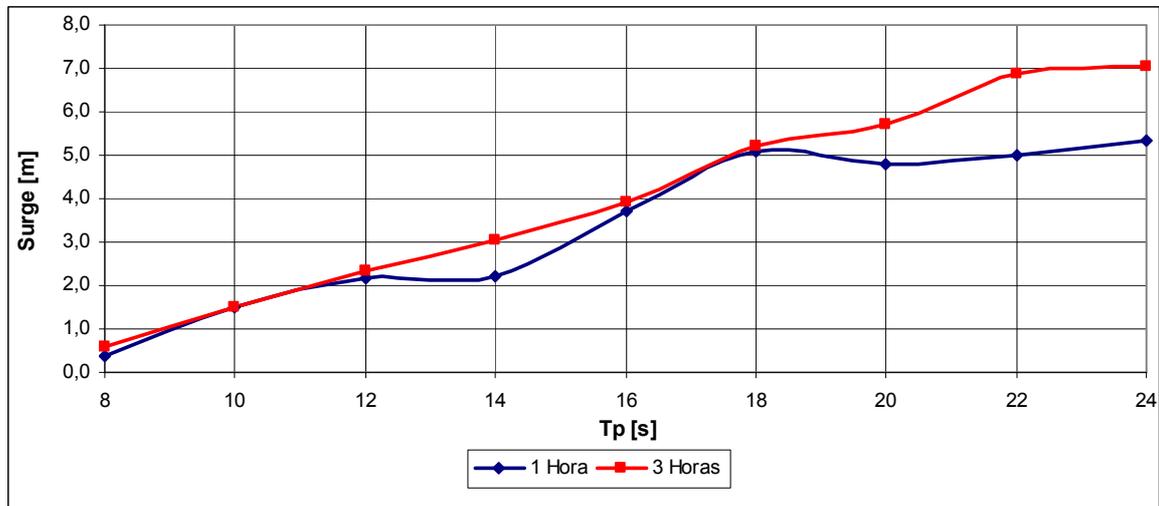
Para el oleaje incidente, se utilizaron distintas combinaciones entre sus parámetros de resumen, con lo que fue posible generar un conjunto de configuraciones definidas por la altura significativa (H_s), la dirección del oleaje (MWD) y el periodo peak (T_p).

Con el fin de evaluar la correlación de los datos con los resultados esperados, se determinaron las diferencias entre los resultados obtenidos de modelar series de tiempo de una hora y de tres horas. En el Gráfico 6.3-1 se muestran los resultados obtenidos en ambos casos para los valores peak de movimiento para el grado de libertad *Surge* (desplazamientos en el eje longitudinal del barco, x), con un oleaje incidente de 210° y una altura significativa $H_s = 0,8$ m, los cuales fueron seleccionados ya que mostraban las diferencias obtenidas para cada una de las series de tiempo modeladas.

En el caso de la serie de tiempo de una hora, los resultados obtenidos para las magnitudes de movimiento de la embarcación no fueron crecientes con el periodo peak (T_p) según lo esperado, mostrando un comportamiento aleatorio. En cambio, para la serie de tiempo de 3 horas, estas oscilaciones aleatorias en los valores peak decrecen para dar lugar a resultados más estables. Los resultados de las combinaciones modeladas, tanto para *Surge* como para los demás grados de libertad, mostraron comportamientos similares, siendo siempre las relaciones asociadas a la serie de tiempo de 3 horas tendientes a los valores esperados. De este modo, para todos los análisis y cálculos realizados se utilizaron modelaciones de series de tiempo de 3 horas.

Se generaron 1872 casos en total (936 para cada embarcación) de oleaje incidente, donde la dirección del oleaje se considera en dirección del plano cartesiano, coincidente con el sistema de referencia utilizado por el software, para determinar las oscilaciones de cada uno de los grados de libertad.

Gráfico 6.3-1
 Comparación de Resultados para Series de Tiempo de 1 y 3 horas
 Desplazamiento Peak para Surge (MWD = 210°, Hs = 0,8 m)



6.4 Variables Ambientales Utilizadas

Las olas que típicamente llegan a la costa de Chile pueden ser generadas por mecanismos de origen local y/o remoto. En el primer caso, los vientos locales generan olas en la zona inmediata, denominadas “seas” en la literatura especializada, con períodos típicos del orden de 4 a 8 segundos. En el caso de las olas de origen remoto, denominadas “swell”, éstas pueden provenir desde cualquier región de la cuenca del océano Pacífico, con períodos típicos del orden de 10 a 25 segundos. Las bahías orientadas hacia el norte o noroeste en nuestro país son particularmente sensibles al oleaje de origen remoto proveniente desde el hemisferio norte.

Cuadro 6.4-1 Respecto de las alturas significativas, el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile (SHOA), en su norma 3201, recomienda que la determinación de olas para el borde costero se deberá realizar mediante el análisis de transferencia espectral direccional desde aguas profundas hacia el sitio de interés, aislando y transfiriendo los componentes del espectro mediante modelos numéricos de propagación de olas, o mediante cualquier otro método que permita tomar en cuenta distintas direcciones de incidencia del oleaje en el rango de períodos de 2 a 30 segundos. Los métodos anteriores también deberán considerar los principales efectos de la batimetría y de la línea de costa, tales como, la reducción de fondo, la refracción y la difracción, entre otros. [ref. 12]. Sin embargo, el oleaje para las diversas modelaciones fue elegido en base a la experiencia de profesionales del área, los cuales concordaron que alturas comprendidas entre los 0,2 m y los 1,6 m y periodos entre los 8 s y 24 s representaban de buena forma el oleaje presente en los sitios aptas para el fondeo de naves. Las direcciones son relativas al barco, dado que se puede fondear en cualquier dirección

En el Cuadro 6.4-1 se muestran los valores que tomaron cada una de las variables que caracterizan el oleaje. El número total de casos estudiados corresponde a la combinatoria entre todos estos valores.

Cuadro 6.4-1
Parámetros Resumen del Oleaje

Dirección del Oleaje [°]	Periodo Peak [s]	Altura Significativa [m]
90	8	0,2
105	10	0,4
120	12	0,6
135	14	0,8
150	16	1,0
165	18	1,2
180	20	1,4
195	22	1,6
210	24	
225		
240		
255		
270		

La Figura 6.4-1 esquematiza las condiciones de oleaje modeladas, en la cual se aprecia la dirección del oleaje y la longitud de olas, la cual está definida por el periodo peak (T_p) y la profundidad de la zona de ataque, como menciona la relación (4.18). La nomenclatura seleccionada para la definición de la dirección del oleaje incidente corresponde a la nomenclatura cartesiana.

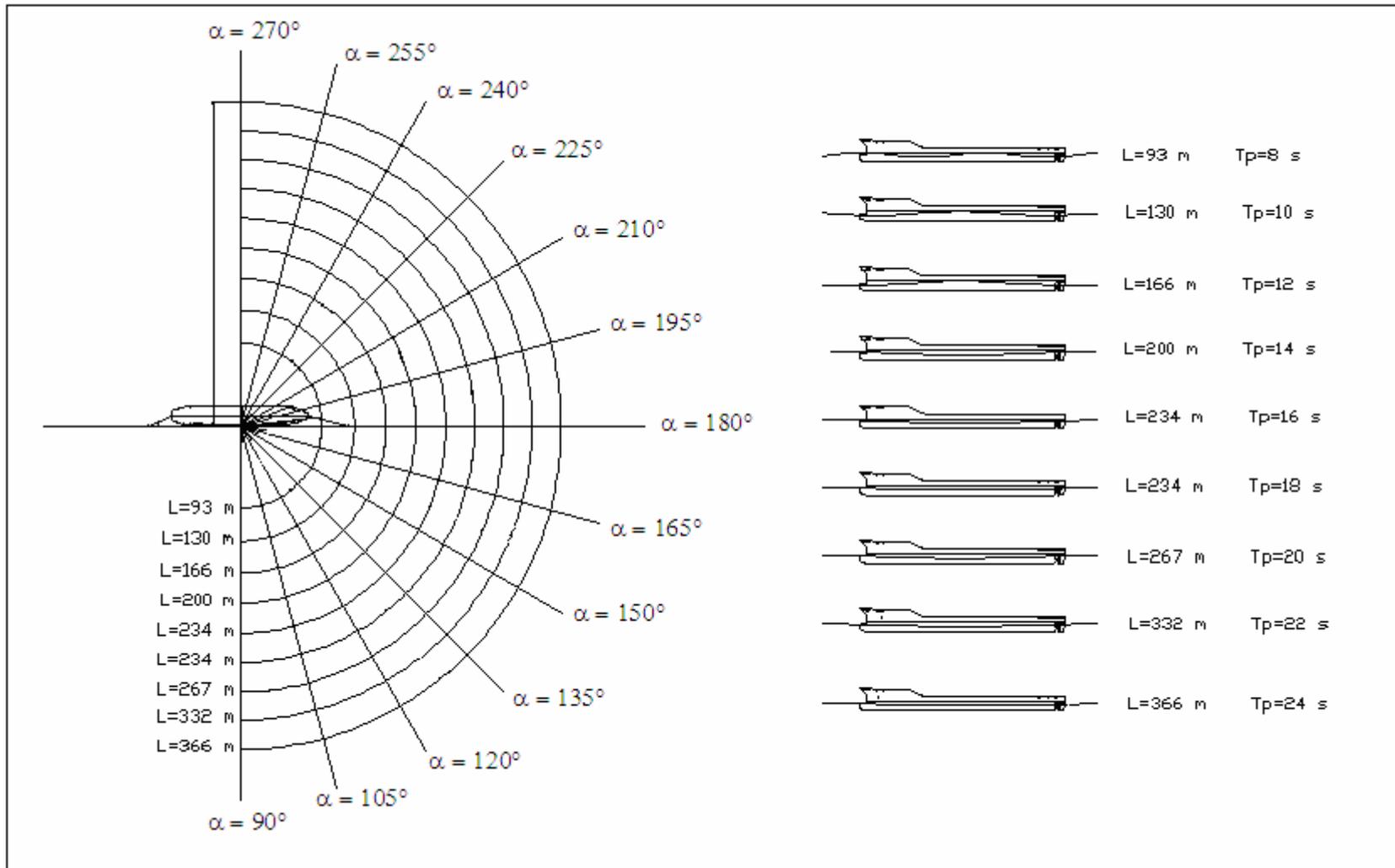


Figura 6.4-1: Características de Oleaje Incidente (MWD, Tp y Longitud de Ola)

6.5 Desarrollo de Herramientas para Obtención de Datos

Para cada uno de los escenarios, el software entrega un archivo con la descripción del caso modelado y con los parámetros estadísticos de uno de los grados de libertad (*Surge, Sway, Heave, Roll, Pitch y Yaw*) y el resultado de fuerzas en cada uno de los elementos estructurales del sistema, como defensas y amarras.

Cada uno de estos archivos posee una extensión .OUT, la cual puede visualizarse sin inconvenientes en cualquier procesador de texto. Un archivo tipo se adjunta en el Anexo I del presente informe. Ya que para cada una de las configuraciones modeladas el software entrega un archivo de texto, el cual contiene una descripción completa del proyecto así como de los resultados obtenidos, fue necesario el desarrollo de algunas herramientas capaces de obtener solo los datos de interés para los diversos análisis realizados.

Con los datos de 2.000 archivos de salida, se generó una planilla madre que tuviese como input los datos obtenidos para cada una de las direcciones incidentes. Con estos datos se generaron una serie de matrices de 8 x 9 (Periodo Peak x Hs) que contienen las diferencias máximas entre peak positivo y peak negativo de toda la serie de tiempo, los valores medios, valores significativos y el cumplimiento o no cumplimiento de las restricciones de operación estipuladas por el PIANC, esto para cada uno de los grados de libertad.

Estas recomendaciones están basadas en experiencias internacionales para operación de terminales portuarios, en las cuales para cada uno de los grados de libertad se establecen restricciones de desplazamiento o rotación con el fin de permitir condiciones de operación adecuadas para las maniobras de carga y descarga. Los desplazamientos aceptables fueron determinados basados en entrevistas con tripulaciones de diferentes tipos de embarcaciones así como operadores de puerto (Jensen et al., 1990) y se muestran en el Cuadro 6.5-1.

Cuadro 6.5-1
Recomendaciones de Movimiento para Operaciones
de Carga y Descarga según tipo de Embarcación

Tipo de Barco	Equipamiento para Manejo de Carga	Surge [m]	Sway [m]	Heave [m]	Yaw [°]	Pitch [°]	Roll [°]
Cargueros de Petróleo	Brazos de Carga	3,0	3,0	-	-	-	-
Cargueros de Gas	Brazos de Carga	2,0	2,0		2	2	2
Porta-Contenedores	100% Eficiencia	1,0	0,6	0,8	1	1	3
	50% Eficiencia	2,0	1,2	1,2	2	2	6
Cargo General	-	2,0	1,5	1,0	3	2	5

Fuente: Permanent International Association of Navigation Congress

Puesto que una de los objetivos de esta memoria de título era la obtención de funciones simplificadas para operabilidad portuaria, fue necesaria la elaboración de gráficos que pudiesen mostrar la evolución de movimientos límites frente a los diferentes escenarios de oleaje incidente estudiados. Es así, como se determinó a partir de las recomendaciones impuestas por el PIANC, curvas definidas por los pares ordenados (Hs, Tp) cuya característica consistía en ser el punto límite para la cual estas condiciones dejaban de cumplirse. De este modo, El par ordenado corresponde a la altura significativa Hs del

oleaje incidente que genera desplazamientos en la embarcación iguales o mayores a las recomendaciones mencionadas anteriormente, para cada uno de los periodos estudiados. Cada una de estas gráficas fue hecha para las embarcaciones de 250 [TEU] y 2.000 [TEU] y para cada uno de los ángulos de incidencia considerados en el análisis.

Las eficiencias definidas para las operaciones de carga y descarga en las embarcaciones porta-contenedores están dadas por el downtime asociado a las grúas ubicadas en las zonas de atraque de los terminales portuarios. De este modo, para tener operativo estos instrumentos de carga el 100% del tiempo, las restricciones de movimiento de las embarcaciones deben ser más acotadas que las correspondientes a tiempos de operación menores, tal como se muestra en el Cuadro 6.5-1.

Ya obtenidas los puntos, las curvas fueron aproximadas por polinomios de tercer grado, ya que eran las de mejor ajuste a los diversos comportamientos, presentando factores de correlaciones muy cercanos a uno. Sin embargo, estas aproximaciones fueron solo referenciales y es necesaria su comprobación con datos de modelos físicos o de campo, con el fin de validarlos y considerarlos como válidos.

CAPÍTULO VII

7. ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación se procederá a un análisis cualitativo de cada uno de los grados de libertad estudiados. En este análisis se hará hincapié en identificar el origen de los datos obtenidos además de la identificación de posibles elementos dentro de la modelación que podrían haber causado errores o incongruencia en los datos.

Los grados de libertad se pueden agrupar según sea el plano sobre el cual describan su movimiento. Es así, como tenemos los *movimientos horizontales* (surge, sway y yaw) los cuales se desarrollan dentro del plano x-y, y los *movimientos verticales* (heave, roll, pitch), en los cuales uno de sus componentes corresponde al eje vertical de referencia. A continuación se describirán cada uno de estos grupos. En la Figura 7.1-1 se muestra un esquema de los grados de libertad de un barco.

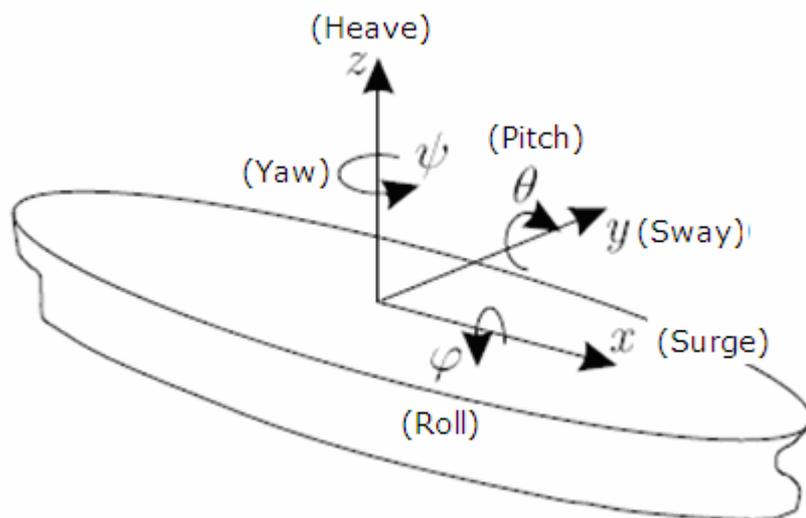


Figura 7.1-2: Seis Grados de Libertad para Barcos en Movimiento

7.1 Movimientos Horizontales

7.1.1 Surge

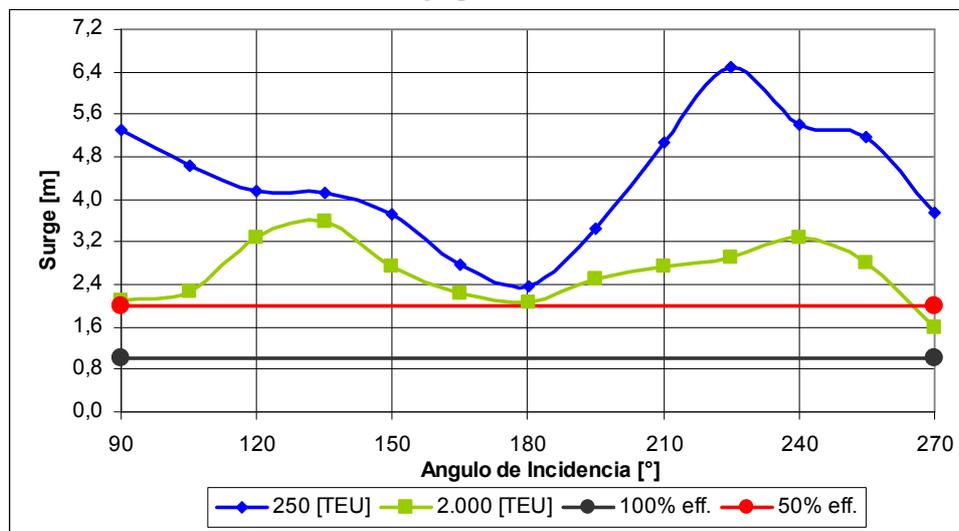
Para las maniobras de carga y descarga, Puertos del Estado de España (ROM, 2000), propone como criterio de diseño para los puertos de porta-contenedores alturas máximas de oleaje con el fin de permitir maniobras seguras en las operaciones de carga y descarga. Se recomienda como altura límite para generar una paralización de las operaciones normales, considerando incidencia del oleaje en forma longitudinal, una altura significativa $H_s = 0,5$ m para barcos porta-contenedores, mientras que para oleaje

incidente en forma transversal la altura significativa que podría paralizar las operaciones de carga y descarga corresponde a $H_s = 0,3$ m. Por esta razón, y basados en la necesidad de determinar condiciones límites de operación de barcos porta-contenedores, no se hará diferencia en el sentido del oleaje (longitudinal o transversal) y su consiguiente diferenciación en los límites de desplazamiento, sino que solo se determinarán las oscilaciones para una altura significativa $H_s = 0,5$ m cuyas magnitudes serán más restrictivas que la condición de oleaje incidente en forma transversal.

Para este grado de libertad, se muestran las oscilaciones máximas en cada caso modelado, para $H_s = 0,5$ m y diferentes periodos peak y direcciones de incidencia de oleaje. En este sentido, para el grado de libertad *Surge* se obtuvieron comportamientos asimétricos en magnitud respecto del ángulo de incidencia del oleaje, los que se muestran a continuación en el Gráfico 7.1-1. La curva de movimientos máximos para $H_s = 0,5$ se obtuvieron mediante la interpolación lineal de los resultados obtenidos para $H_s = 0,4$ m y $H_s = 0,6$ m.

El Overseas Coastal Area Development (OCAD), Institute of Japan, en los cuales se diferencia entre la influencia de cada una de las variables (vientos, corrientes y altura de oleaje) sobre el barco, ya sea longitudinal o transversal a este recomienda una altura significativa de diseño, coincidente con los criterios de la ROM, $H_s = 0,5$ m.

Gráfico 7.1-1
Desplazamiento para Surge según Ángulo de Incidencia del Oleaje para $H_s = 0,5$ m



Podemos apreciar del Gráfico 7.1-1 que las oscilaciones para ambas embarcaciones superan las limitantes propuestas por el PIANC, tanto para la condición de eficiencia de 50% como de 100% (2,0 m y 1,0 m respectivamente). Por otro lado, la embarcación de 2.000 [TEU] muestra un comportamiento similar al porta-contenedores de 250 [TEU] en el rango de incidencia comprendido entre los 135° y los 270° , mientras que para los ángulos de incidencia 90° , 105° y 120° completamente opuesto.

Los desplazamientos máximos se dan para los ángulos 225° en el caso del porta-contenedores de 250 [TEU], mientras que para el porta-contenedores de 2.000 [TEU] este desplazamiento máximo se alcanza para un ángulo de incidencia de 135° , ambos a 45° del oleaje a proa. Por otro lado, el menor desplazamiento se da para el ángulo de incidencia

de 180° en ambos casos, lo cual podemos explicar dado que el área de incidencia efectiva de incidencia del oleaje en el barco es menor y a que la rigidez de los *spring* es efectiva en esta dirección.

La presencia de sistemas de defensa cilíndricos con placas frontales permite una disminución en las oscilaciones del barco puesto que éstas, al poseer coeficientes de roce distintos de cero y un sistema eficiente de absorción de energía, generan fuerzas resistentes al movimiento las cuales al actuar en conjunto con los sistemas de amarre propios del barco son capaces de generar condiciones favorables de operación para las maniobras de carga y descarga del barco para ángulos de incidencia cercanos a los 180°.

Se aprecia que al considerar el criterio de agitación $H_s = 0,5$ m propuesto por la ROM y por la OCAD, los movimientos resultantes para cada uno de los escenarios presentan magnitudes mayores a los propuestos por el PIANC, lo que permite concluir que optar por uno u otro método conlleva grandes diferencias.

Junto con las curvas antes expuestas, para todos los casos estudiados se determinaron curvas parametrizadas en base a los datos estadísticos obtenidos, las cuales muestran el comportamiento límite en cuanto a magnitud de las embarcaciones en cada uno de los escenarios modelados. Estas curvas fueron hechas basadas en el criterio de cumplimiento de las restricciones recomendadas por el PIANC para cada uno de los grados de libertad. Estas curvas cumplen con la descripción realizada en el numeral 6.5 “Desarrollo de Herramientas para Obtención de Datos”.

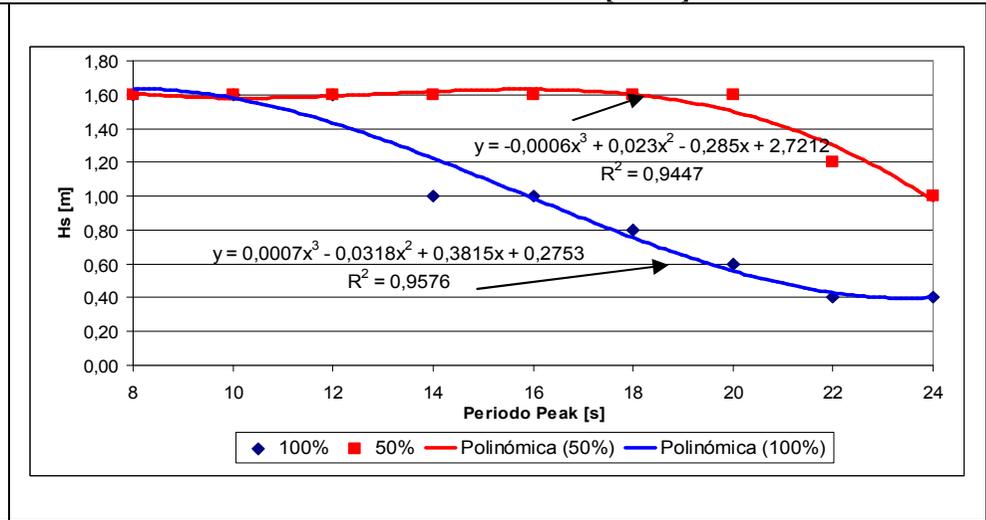
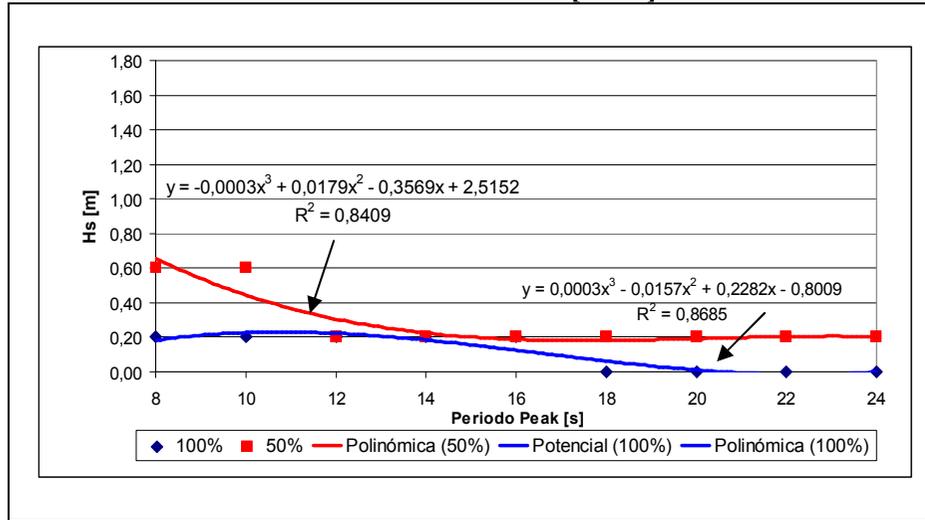
Ya que generalmente las embarcaciones y la disposición de estas son hechas para enfrentar de forma ortogonal a los frentes de olas incidentes, se muestra un set de gráficos correspondientes a las direcciones de oleaje 90°, 120°, 150° y 180°, situación normal para el diseño de terminales portuarios.

Gráfico 7.1-2

Desplazamiento Máximo para Surge según Ángulo de Incidencia. Comparación para Barco 250 [TEU] y 2.000 [TEU]

$\alpha = 90^\circ$ Barco 250 [TEU]

$\alpha = 90^\circ$ Barco 2.000 [TEU]



$\alpha = 120^\circ$ Barco 250 [TEU]

$\alpha = 120^\circ$ Barco 2.000 [TEU]

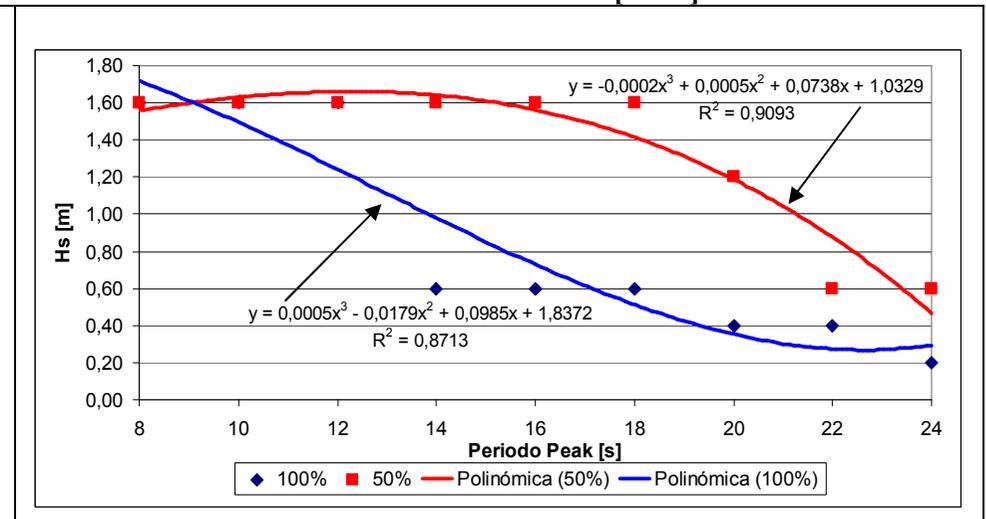
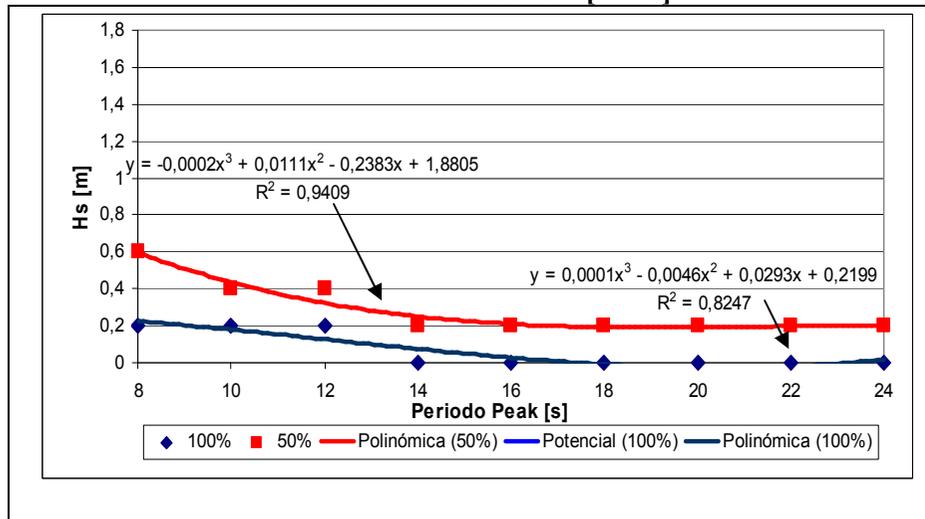
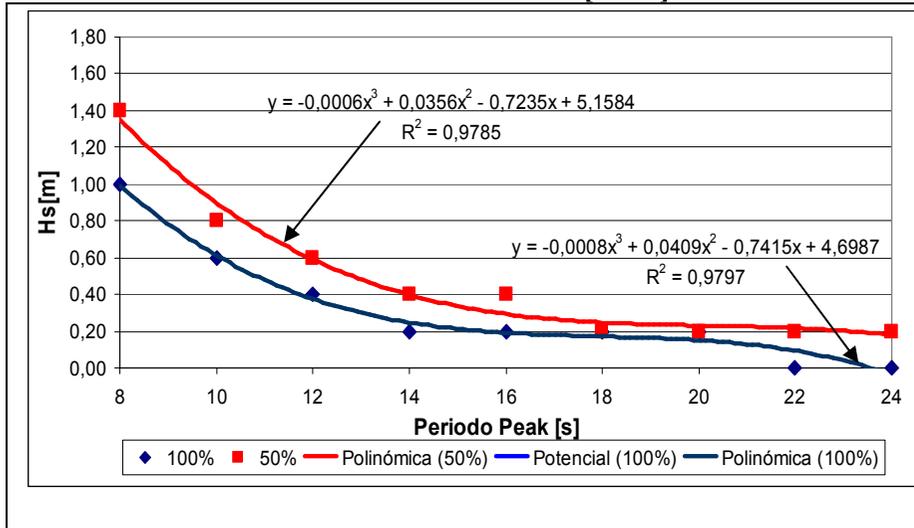


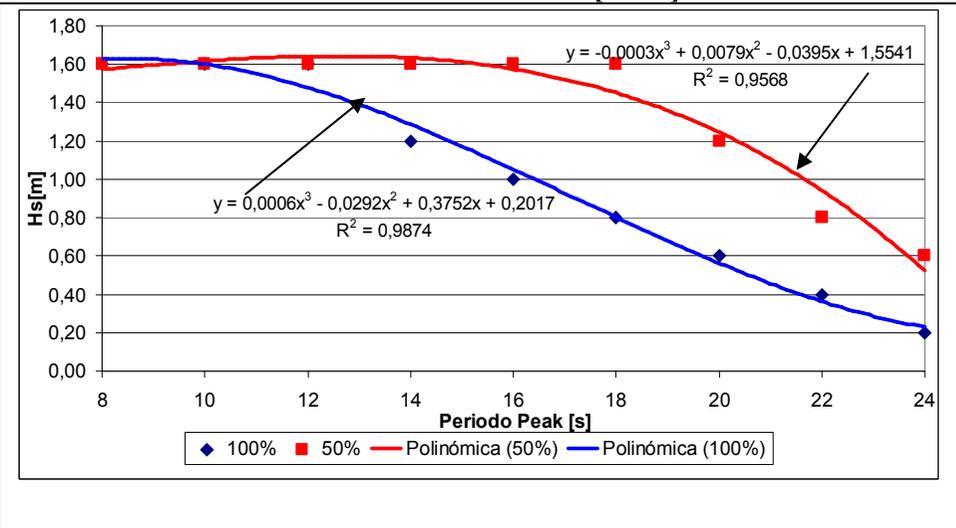
Gráfico 7.1 -2 (Continuación)

Desplazamiento Máximo para Surge según Ángulo de Incidencia. Comparación para Barco 250 [TEU] y 2.000 [TEU]

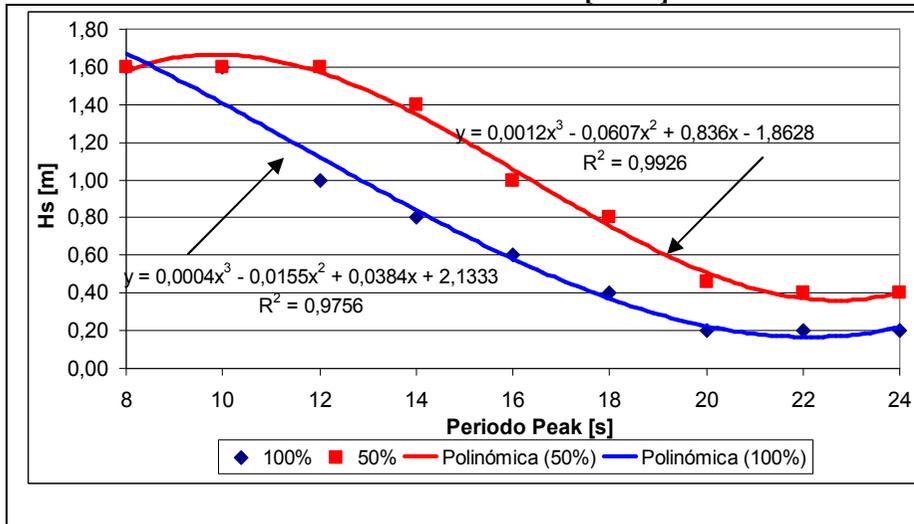
$\alpha = 150^\circ$ Barco 250 [TEU]



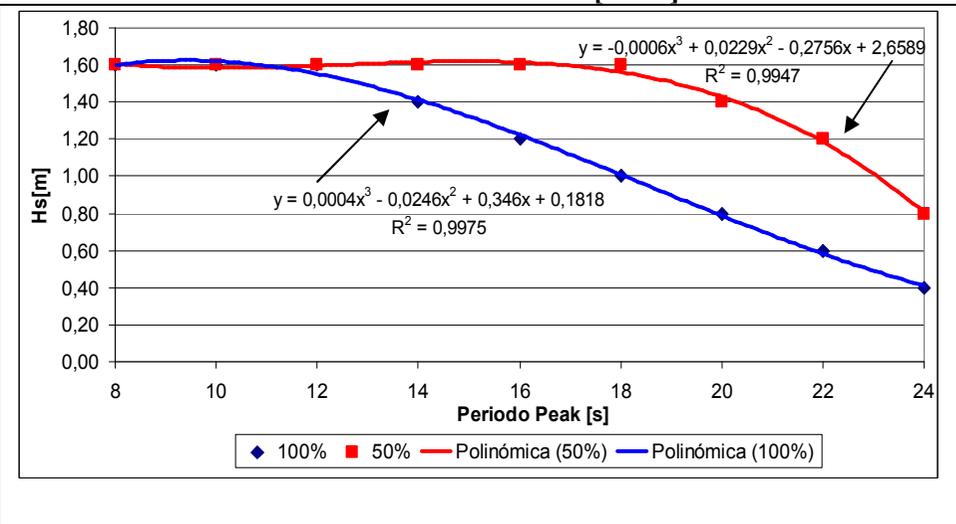
$\alpha = 150^\circ$ Barco 2.000 [TEU]



$\alpha = 180^\circ$ Barco 250 [TEU]



$\alpha = 180^\circ$ Barco 2.000 [TEU]



Para la utilización práctica de estas curvas, se debe introducir como *input* los datos característicos del oleaje incidente (H_s y T_p). Si la combinación estudiada se encuentra bajo la curva graficada, según la eficiencia buscada para la operación, el movimiento del barco estará dentro de los límites permitidos. Por el contrario, si esta combinación de parámetros está por sobre las curvas determinadas, el barco presentará peaks de movimiento superiores a lo permitido para una operación normal de carga y descarga.

Según los criterios definidos por el PIANC, el movimiento máximo permitido corresponde a la diferencia máxima que se produce, para toda la serie de tiempo en estudio, entre un peak positivo y uno negativo que se encuentren en forma simultánea. Puesto que nuestro análisis no se basa en el estudio de las series de tiempo sino que en un análisis estadístico de éstas, la aproximación realizada corresponde a la diferencia entre el peak máximo positivo y el peak máximo negativo, los cuales no necesariamente se encuentran en forma consecutiva.

De los gráficos anteriores podemos ver las diferencias que se dan para las embarcaciones de baja capacidad de carga respecto de las embarcaciones de mayor capacidad, ya que para estas últimas las restricciones operacionales se comienzan a generar con condiciones de oleaje mayor. Para oleajes caracterizados por periodos peak bajo los 14 s, las restricciones de carga y descarga se dan para alturas incidentes $H_s = 1,0$ m como mínimo, en todos los ángulos de incidencia del oleaje. En cambio, para la embarcación de 250 [TEU], estas restricciones se reducen a oleaje con alturas significativas $H_s \approx 0,4-0,6$ m para la mayoría de los ángulos de incidencia. Solo para los ángulos comprendidos entre los 165° y 210° estas restricciones aumentan a $H_s = 1,0$ m.

Es importante notar que para ambas embarcaciones los criterios de PIANC son más permisivos que los propuestos por la ROM y la OCAD. La dependencia de respuesta del barco a las condiciones de oleaje (H_s , T_p y MWD) son notorias, luego un criterio de agitación no es recomendable para utilizar.

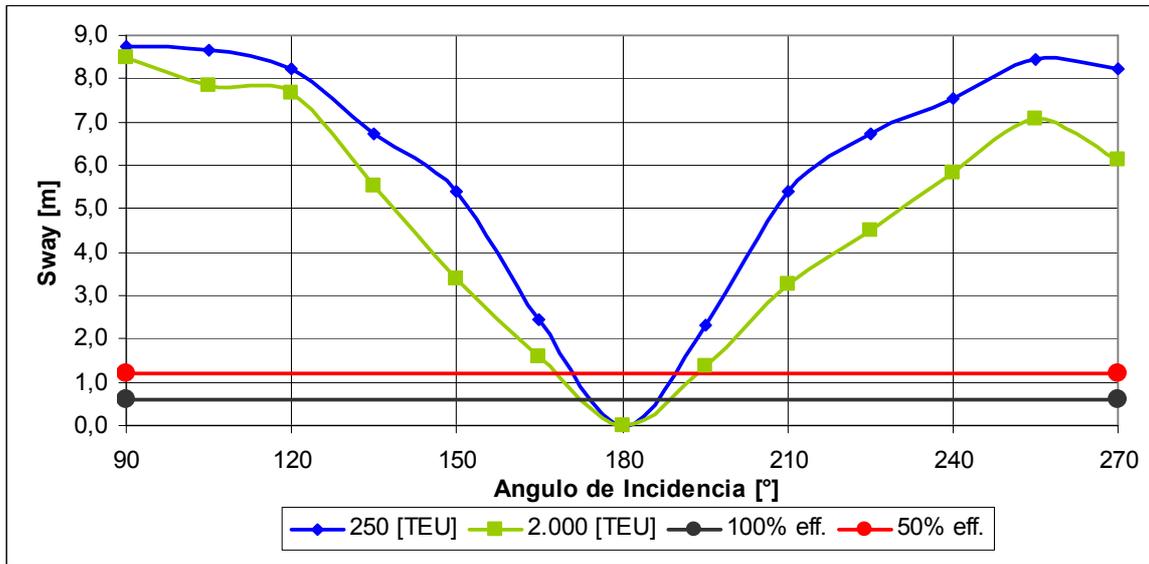
Los resultados de todo el set de curvas límites de operación, para cada uno de los ángulos de incidencia, se pueden apreciar en el Anexo IV, Gráfico A4-1.

7.1.2 Sway

El segundo movimiento horizontal en estudio corresponde al grado de libertad *Sway*, cuyo sentido positivo coincide con el eje “y” según el sistema de referencia utilizado. Para este grado de libertad se presentaron grandes oscilaciones, con desplazamientos máximos mayores a los restantes grados de libertad y superiores a los límites propuestos por el PIANC para las operaciones de carga y descarga.

A continuación se muestran los desplazamientos de ambas embarcaciones para el grado de libertad *Sway*, en el cual puede apreciarse los desplazamientos obtenidos para una altura significativa $H_s = 0,5$ m. Al igual que para *Surge*, los movimientos obtenidos para esta altura significativa fueron obtenidos mediante interpolación lineal entre los resultados obtenidos para $H_s = 0,4$ m y $H_s = 0,6$ m.

Gráfico 7.1-3
Desplazamiento para Sway según
Ángulos de Incidencia del Oleaje para $H_s = 0,5$ m



Según el gráfico anterior, podemos notar la simetría de desplazamientos según la dirección de incidencia del oleaje respecto del barco. Al igual que para el *Surge*, en el *Sway* se presentan variaciones mínimas en el ángulo de incidencia aproado, mientras que para los ángulos de incidencia en la banda (90°) y 255° se dan los desplazamientos máximos, en el caso del porta-contenedores de 250 [TEU]. El comportamiento de la embarcación de 2.000 [TEU] sigue el mismo patrón de comportamiento que la embarcación menor, presentando diferencias en la dirección de oleaje 105° , lo que puede explicarse por alguna singularidad en la serie de tiempo modelada para esa condición.

Estos resultados sugieren elegir de manera cuidadosa las variables que controlan los desplazamientos (sistemas de amarra y defensas) con el fin de reducir los desplazamientos máximos en las maniobras de operación. Para el caso de la embarcación de 2.000 [TEU] las magnitudes de los desplazamientos están por bajo las restricciones propuestas por el PIANC en el caso de ángulos de incidencias cercanos a la condición de 180° ; sin embargo para las direcciones restantes, los desplazamientos presentan magnitudes fuera de rangos aceptables. La magnitud de estos desplazamientos también se repiten para la embarcación de 250 [TEU], siendo estas más restrictivas que las primeras en cuanto a la operación del puerto, pues el rango de operación considerando los ángulos de incidencia del oleaje se reduce en forma importante, hasta el ángulo $180^\circ \pm 10^\circ$.

En ambos casos los resultados obtenidos muestran la necesidad de orientar la posición de las embarcaciones a la dirección de oleaje incidente o que la construcción de muelles sean llevadas a cabo, después de detallados estudios de oleaje, en zonas con presencia de oleaje marcadamente unidireccional, ya que las magnitudes de los movimientos no permiten amplitudes para la variable de ángulo de incidencia.

En el mismo sentido, otra de las variables a considerar corresponde a la pretensión de los sistemas de amarre, ya que estas, en ambas embarcaciones, no cumplieron con el objetivo planteado para estos elementos respecto de la contención de movimiento. En la embarcación de 2.000 [TEU] esta pretensión correspondió a 235 [kN], mientras que para la embarcación de 250 [TEU] esta pretensión se redujo a 100 [kN], los cuales

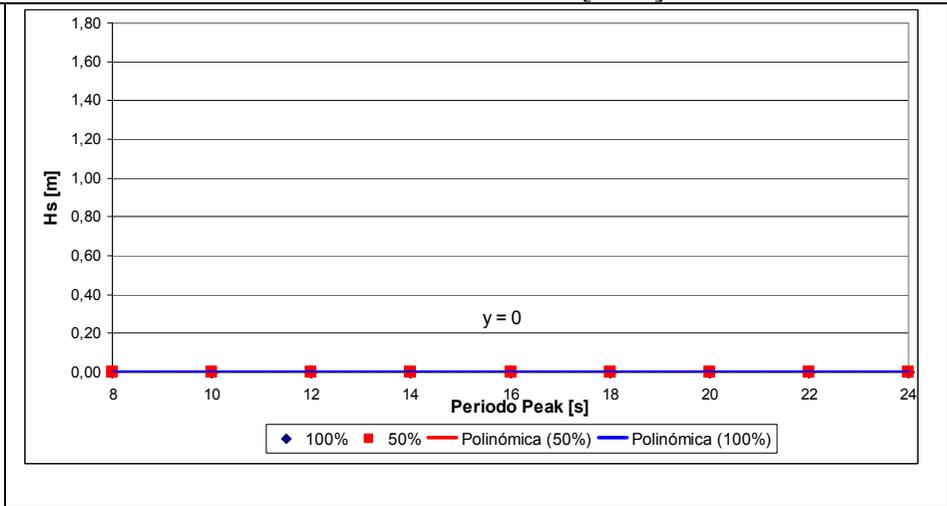
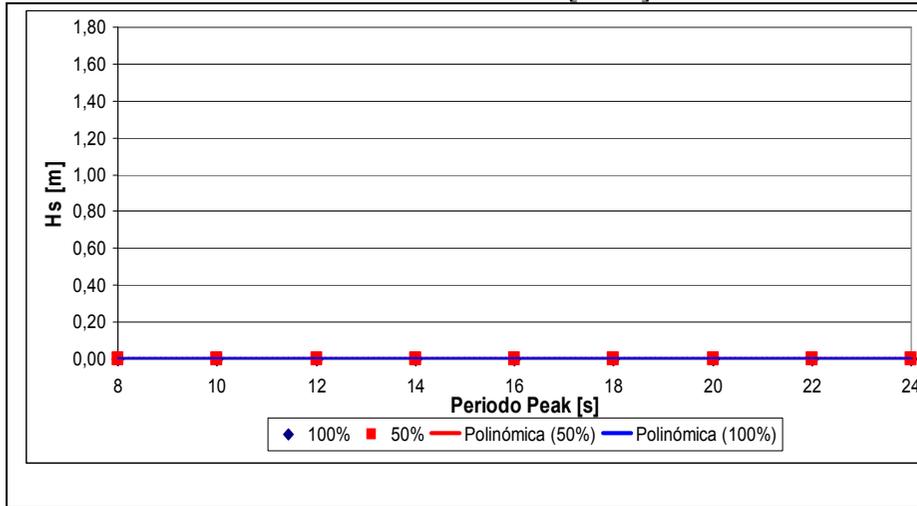
corresponden al 10% de la tensión de rotura. Será necesario determinar en trabajos posteriores los niveles de pretensión necesarios en los sistemas de amarre para reducir las magnitudes de movimiento en este grado de libertad.

Como se desprende del Gráfico 7.1-3, las condiciones de operación para una altura significativa de oleaje $H_s = 0,5$ m están muy por encima de las restricciones propuestas por el PIANC. Para condiciones más desfavorables de oleaje (H_s y T_p mayores) las magnitudes de movimiento obtenidas son aún mayores que las mostradas para $H_s = 0,5$ m, lo que se traduce en curvas límites operacionales más restrictivas en cuanto a los movimientos permitidos para las maniobras de carga y descarga en la zona de atraque. Esta condición se repite para todos los ángulos de incidencia menores a 165° y mayores a 195° , lo que representa una situación delicada para la viabilidad de un puerto.

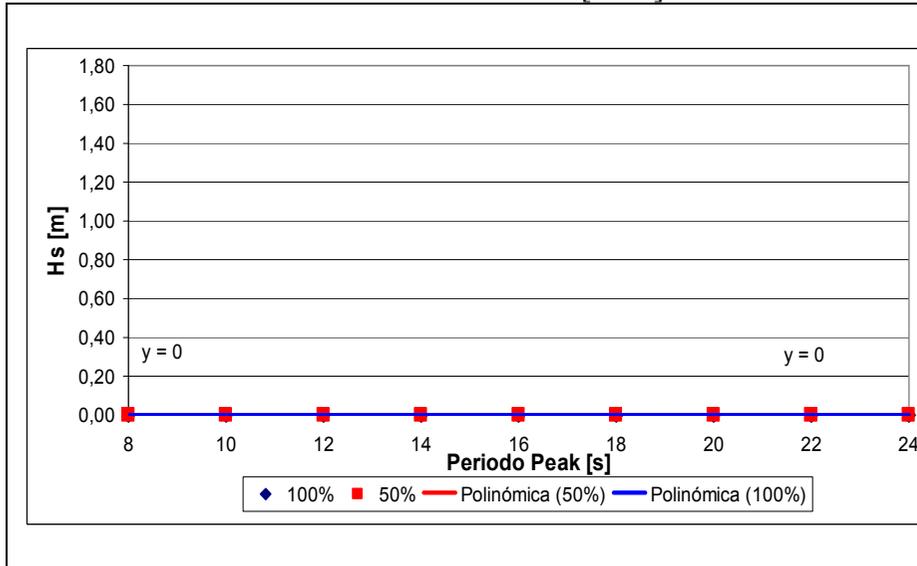
Del mismo modo que para el grado de libertad *Surge*, a continuación en el Gráfico 7.1-4 se muestra un set de curvas correspondientes a las condiciones límites de operación según los criterios propuestos por el PIANC para las direcciones de oleaje 90° , 120° , 150° y 180° .

Gráfico 7.1-4

Desplazamiento Máximo para Sway. Comparación para Barcos de 250 [TEU] y 2.000 [TEU]
 $\alpha = 90^\circ$ Barco 250 [TEU] $\alpha = 90^\circ$ Barco 2.000 [TEU]



$\alpha = 120^\circ$ Barco 250 [TEU]



$\alpha = 120^\circ$ Barco 2.000 [TEU]

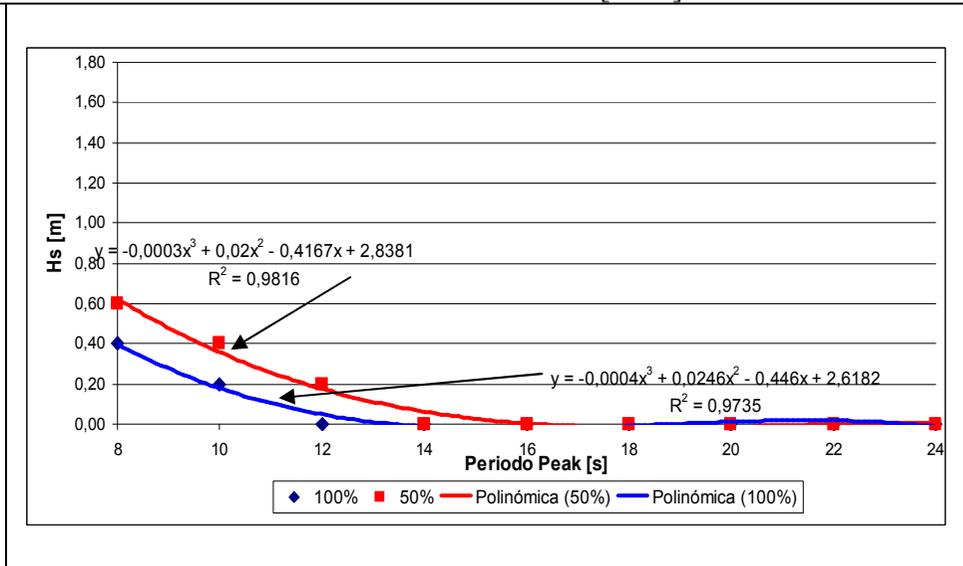
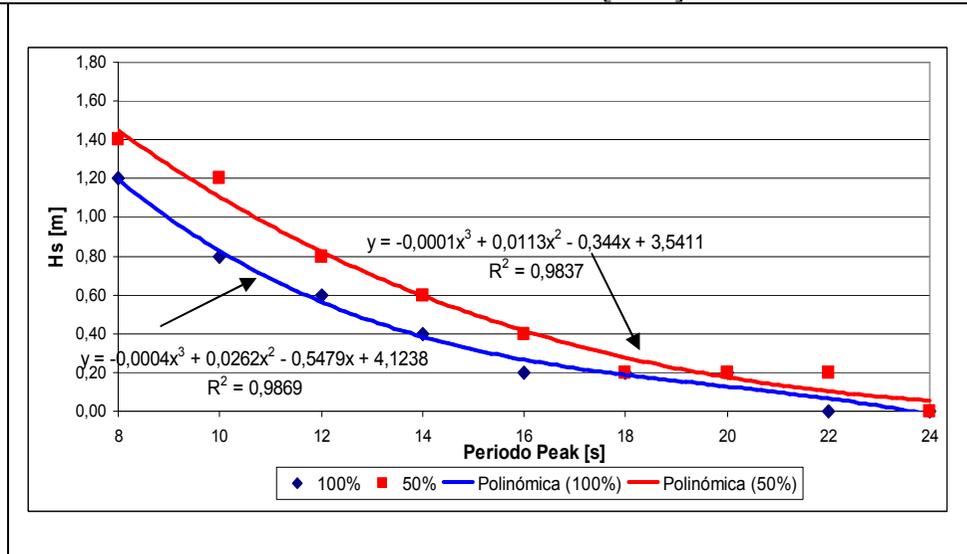
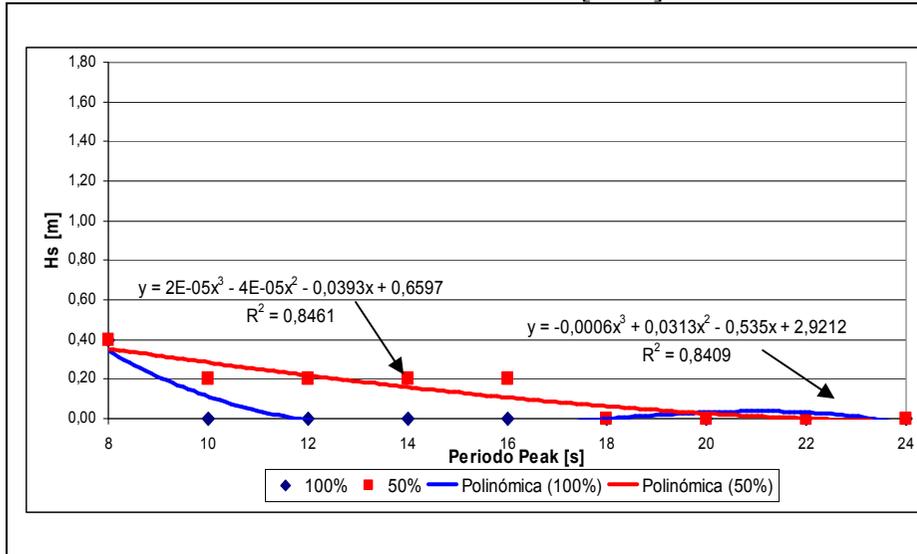
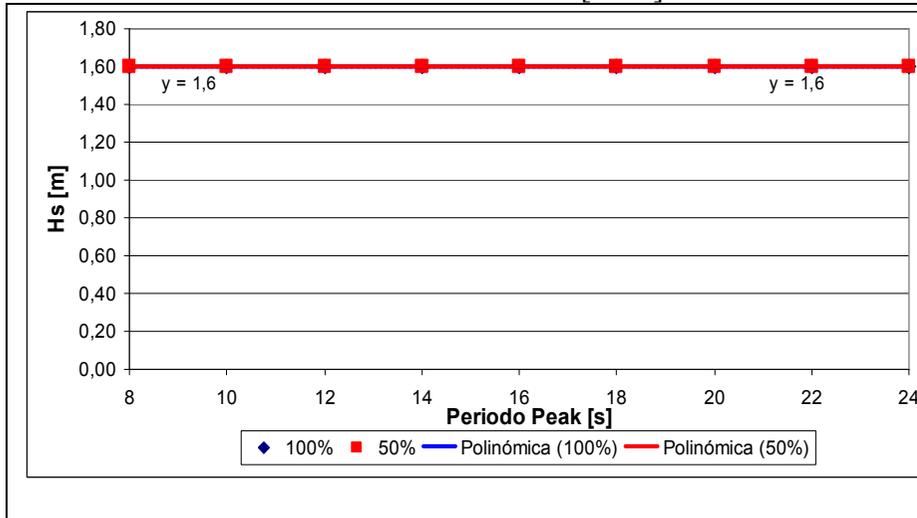


Gráfico 7.1-4 (Continuación)

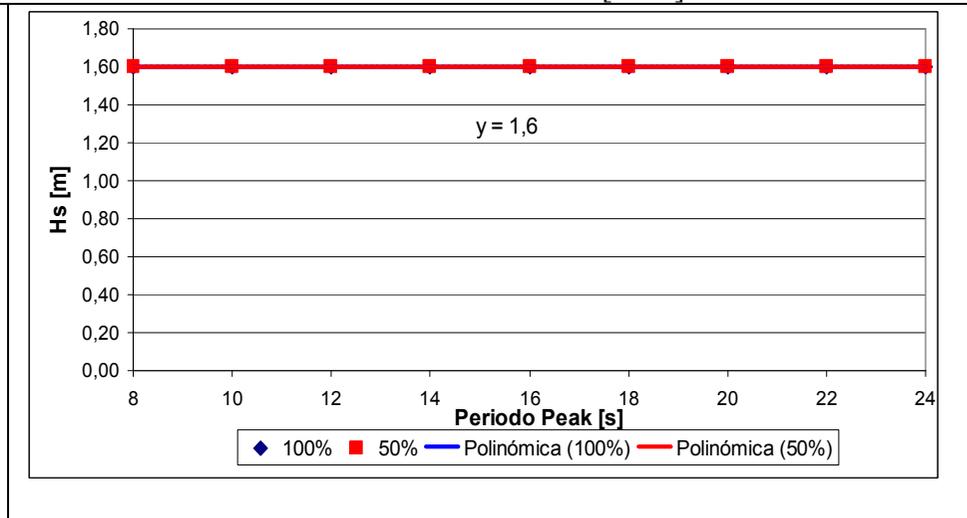
Desplazamiento Máximo para Sway. Comparación para Barcos de 250 [TEU] y 2.000 [TEU]
 $\alpha = 150^\circ$ Barco 250 [TEU] $\alpha = 150^\circ$ Barco 2.000 [TEU]



$\alpha = 180^\circ$ Barco 250 [TEU]



$\alpha = 180^\circ$ Barco 2.000 [TEU]



De los gráficos anteriores podemos ver lo restrictivo que resulta para las operaciones portuarias este grado de libertad. Para la embarcación de 250 [TEU] existen direcciones de oleaje incidente en los cuales no es posible realizar operaciones de carga y descarga, como son los casos de ángulos iguales o cercanos a aquellos que se desarrollan en forma ortogonal a la embarcación (90° y 120°). Para el intervalo medio de incidencia (150° - 180°), estas restricciones se desplazan a valores superiores, alcanzando para la condición de 180° un funcionamiento del 100% bajo cualquier configuración de oleaje. Del mismo modo, para la embarcación de 2.000 [TEU], las condiciones de operación se hacen posibles para todos los ángulos de incidencia mayores a 120° , siendo éstas máximas (con desplazamiento de la embarcación nulo) para el ángulo 180° , de igual forma que para la embarcación menor.

En consideración a las curvas obtenidas, es necesario aclarar que debido a los ajustes hechos mediante polinomios de tercer grado, existen combinaciones de parámetros característicos (T_p , H_s) que admiten condiciones de operación no nulas, mientras que para combinaciones más favorables (T_p y H_s menores) estas curvas no lo permiten. De este modo, en caso de presentarse estas singularidades, deben considerarse curvas decrecientes o crecientes en su totalidad, según sea el comportamiento general de las curvas.

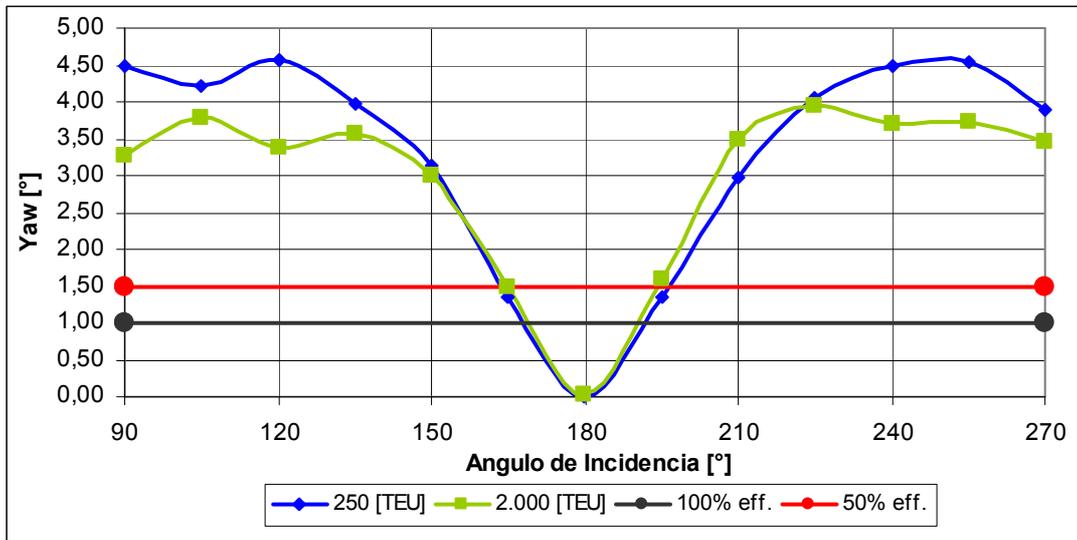
Los resultados de todo el set de curvas límites de operación, para cada uno de los ángulos de incidencia, se pueden apreciar en el Anexo IV, Gráfico A4-2

7.1.3 Yaw

Para este movimiento, según los datos estadísticos obtenidos se presentaron rotaciones máximas superiores a lo establecido por el PIANC para una altura significativa del oleaje $H_s = 0,5$ m, como podemos ver en el Gráfico 7.1-5. Este hecho se ve reflejado en los rangos de incidencias comprendidos entre los 90° y 160° y para los ángulos comprendidos entre los 200° y 270° .

Como elemento principal en la restricción de este movimiento, se encuentra el sistema de amarras con que cuenta cada una de las embarcaciones modeladas. Para el caso de la embarcación de 250 [TEU], este sistema no es simétrico respecto del origen del sistema de referencia fijo, mientras que para la embarcación de 2.000 [TEU], este sistema si cumple con la condición de simetría. Además de lo anterior, debemos considerar el efecto de no contar con un sistema de amarre transversal al barco que trabaje en forma eficiente, pues como se menciona en el numeral 6.2.2, debido a las condiciones de operación de los sistemas de carga y descarga, las líneas de amarre deben estar situadas de forma tal que no interrumpen estos sistemas.

Gráfico 7.1-5
Rotaciones para *Yaw* según Ángulo de Incidencia
del Oleaje para $H_s = 0,4$ m



Como se aprecia del Gráfico 7.1-5, para un ángulo de 180° la rotación respecto del eje z es prácticamente nula, mientras que si nos alejamos hacia ángulos de incidencia más extremos, las oscilaciones aumentan notoriamente. Podemos ver que existe una simetría en las rotaciones máximas hasta $\pm 30^\circ$ respecto del ángulo de incidencia 180° , junto con un comportamiento similar en cuanto a las magnitudes de las oscilaciones para ambas embarcaciones. Para ángulos más extremos, estas magnitudes son menores para la embarcación de 2.000 [TEU]. Por estas razones es posible inferir en la necesidad de orientación de las embarcaciones en forma unidireccional y en sentido opuesto al ángulo de incidencia del oleaje.

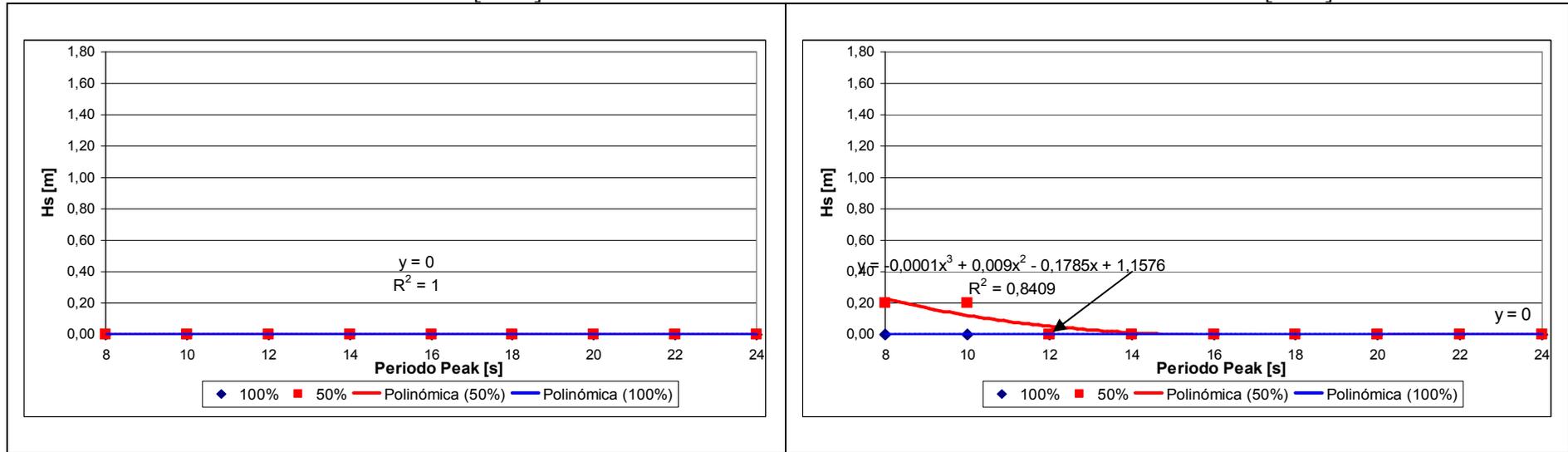
Este hecho podemos explicarlo basados en la geometría del problema. Dado que el oleaje incide con una dirección distinta a la del eje longitudinal del barco (no se considera el ángulo 180° ya que las magnitudes de rotación asociadas al “yaw” son casi nulas) y la superficie de incidencia (casco) no es simétrica en esta dirección (a excepción del ángulo 180° , ya que la proa es simétrica respecto de la vertical), se generan esfuerzos esviados respecto del centro de gravedad (CoG) del barco, por lo que su rotación aumenta en proporción a la componente en el eje y de la fuerza del oleaje y su acción con los sistemas de defensa y amarre. Para el ángulo de incidencia 255° se generaron las rotaciones máximas ya que se combina la acción de elementos de defensa y amarre, aún cuando la componente de la fuerza en el eje de las ordenadas no es máxima en el sentido positivo de éste.

Para este grado de libertad se confeccionaron curvas de ajuste basados en el comportamiento del barco bajo condiciones de oleaje imperante. Estas curvas, presentadas en el Gráfico 7.1-6, representan las magnitudes de rotaciones máximas experimentadas por la embarcación para el ángulo de incidencia 165° , ya que para ángulos más extremos, las gráficas representativas corresponden a rectas que no admiten valores distintos a una altura significativa igual a cero. De este modo, al igual que las restantes curvas mostradas, la combinación de parámetros característicos del oleaje incidente deben encontrarse bajos las curvas, según sea el nivel de eficiencia requerido para el diseño.

Para ambos tipos de embarcaciones, el ajuste de las curvas correspondientes al 100% y 50% de eficiencia fue hecho mediante curvas polinómicas de tercer grado, las cuales poseen un buen ajuste y representan el comportamiento decreciente de la admisibilidad de operación frente a oleaje con periodos característicos crecientes.

Gráfico 7.1-6

Desplazamiento Máximo para Yaw. Comparación para Barco 250 [TEU] y 2.000 [TEU]
 $\alpha = 90^\circ$ Barco 250 [TEU] $\alpha = 90^\circ$ Barco 2.000 [TEU]



$\alpha = 120^\circ$ Barco 250 [TEU]

$\alpha = 120^\circ$ Barco 2.000 [TEU]

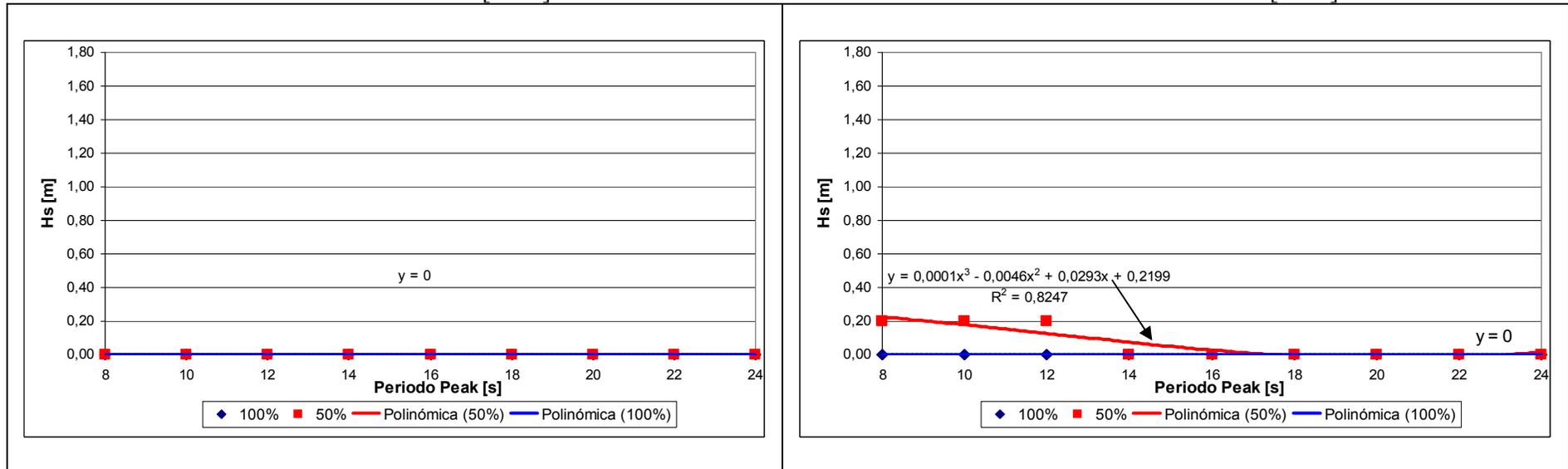
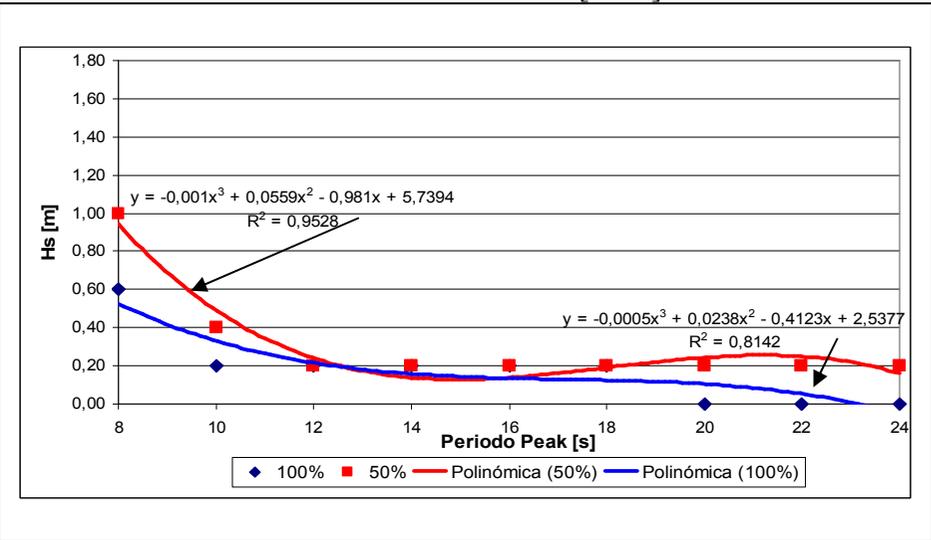
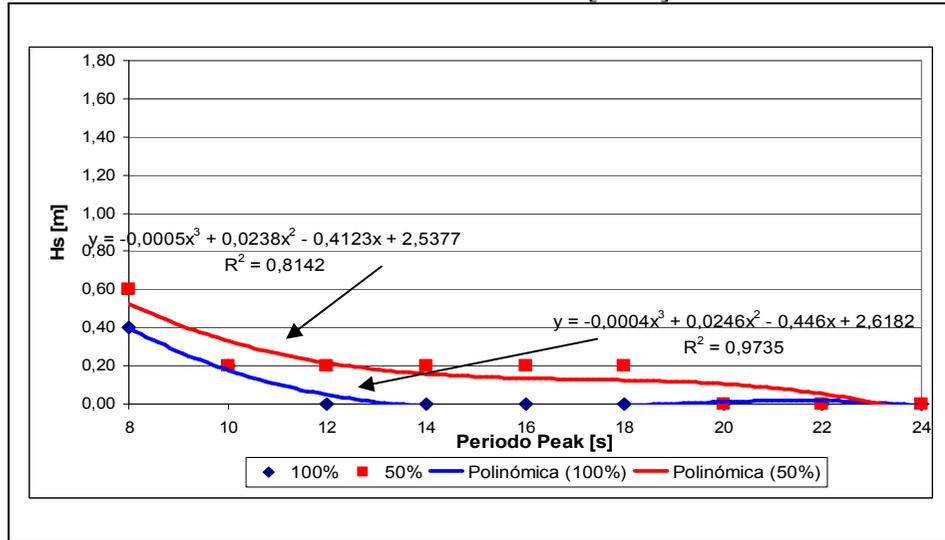


Gráfico 7.1-6 (Continuación)

Desplazamiento Máximo para Yaw. Comparación para Barco 250 [TEU] y 2.000 [TEU]

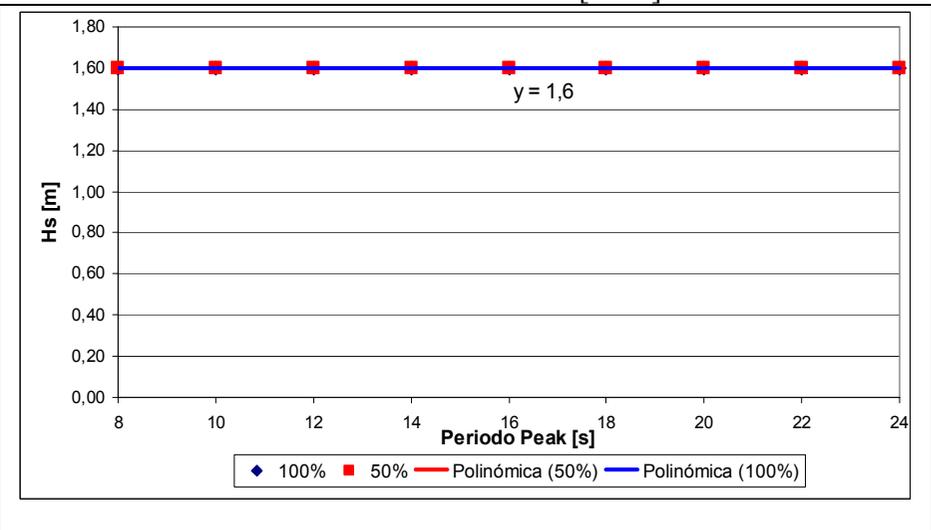
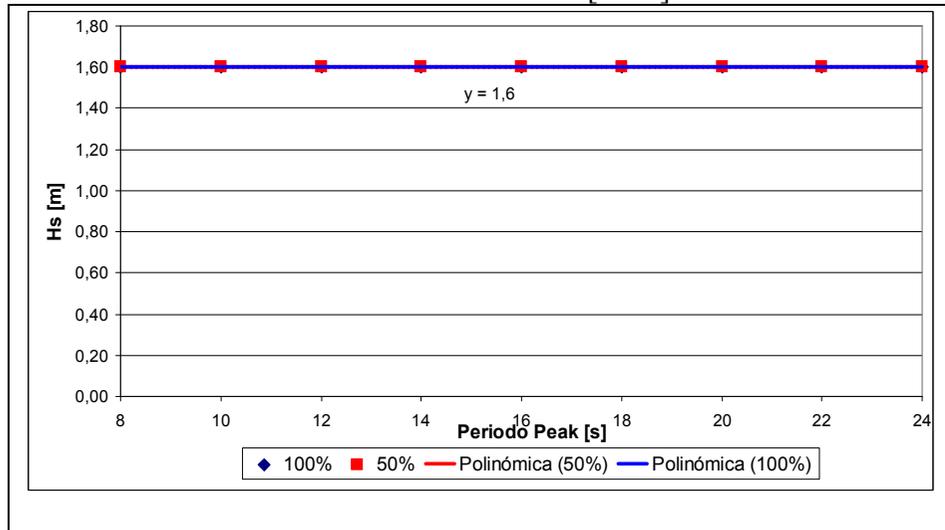
$\alpha = 150^\circ$ Barco 250 [TEU]

$\alpha = 150^\circ$ Barco 2.000 [TEU]



$\alpha = 180^\circ$ Barco 250 [TEU]

$\alpha = 180^\circ$ Barco 2.000 [TEU]



Podemos apreciar de los gráficos de la primera columna, correspondientes al barco de 250 [TEU], lo restrictivo de este grado de libertad para las condiciones operacionales del puerto. Como se menciona en el Gráfico 7.1-6 así como de las figuras anteriores, las condiciones solo permiten realizar estas operaciones para ángulos de incidencia de $180^\circ \pm 30^\circ$, lo cual en terminales abiertos significa un rango bajo. Para las restantes direcciones de incidencia de oleaje, bajo ninguna condición es posible operar.

A diferencia de la embarcación de 250 [TEU], para la embarcación de 2.000 [TEU] se presentan posibilidades de operación para cada uno de los escenarios modelados. Sin embargo, a medida que el oleaje incidente empieza a alejarse de la condición de 180° , las condiciones límites se vuelven cada vez más restrictivas, siendo la peor condición la asociada al ángulo de incidencia 240° , donde sólo es posible operar con un oleaje de parámetros característicos $H_s = 0,2$ m y $T_p = 8$ s.

Como se aprecia de los resultados obtenidos para los movimientos horizontales, estos se muestran restrictivos para la mayoría de las condiciones estudiadas. Estas condiciones presentan una excepción para los ángulos de incidencia cercanos o iguales a 180° , donde los movimientos horizontales presentan los mínimos desplazamientos y rotaciones. Estos antecedentes plantean lo importante de contar con elementos de protección como dársenas o rompeolas, los cuales permitan oleaje unidireccional, junto con oleaje caracterizado por parámetros resumen (T_p , H_s) de menor magnitud.

Los resultados de todo el set de curvas límites de operación, para cada uno de los ángulos de incidencia, se pueden apreciar en el Anexo IV, Gráfico A4-3

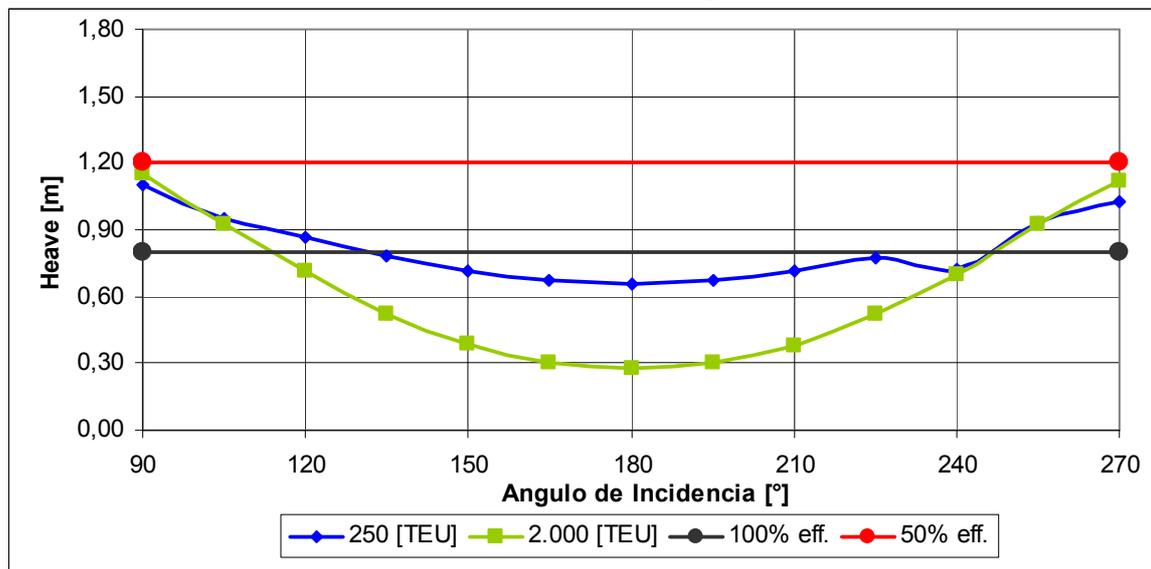
7.2 Movimientos Verticales

7.2.1 Heave

El grado de libertad denominado *Heave* corresponde al desplazamiento del barco a lo largo del eje “z” según el sistema de referencia elegido, considerando como movimientos positivos los desplazamientos ascendentes.

Según el Gráfico 7.2-1 mostrada a continuación, las oscilaciones varían entre los 0,25 y 1,25 m, siendo éstas mínimas para un ángulo de incidencia de oleaje igual a 180° (el punto referido al ángulo 240° se descarta del análisis para la embarcación de 250 [TEU], por encontrarse fuera de la tendencia de movimiento, lo que debe considerarse como un hecho aislado).

Gráfico 7.2-1
Desplazamiento Máximo para Heave según
Parámetro Característico de Oleaje $H_s = 0,5$ m



Los movimientos máximos observados fueron relativamente bajos, siendo éstos, para una altura característica de oleaje $H_s = 0,5$ m, inferiores a los límites propuestos por PIANC respecto de la condición de 50% de eficiencia, para ambos tipos de porta-contenedores.

Como podemos apreciar del gráfico Gráfico 7.2-1, a diferencia de los movimientos horizontales, las oscilaciones obtenidas muestran un comportamiento simétrico respecto de la condición de incidencia 180°. Para el rango comprendido entre los ángulos 135° y 225° vemos el cumplimiento de la condición más restrictiva de rotación asociado a la eficiencia 100%, permitiendo un intervalo de operación importante, por lo que los costos en infraestructura asociada disminuyen considerablemente al considerar como input de diseño los movimientos en este grado de libertad.

A diferencia de los grados de libertad *sway* y *yaw*, las oscilaciones mínimas registradas son distintas de cero, tomando un valor de 0,3 m y 0,7 m para las embarcaciones de 2.000 y de 250 [TEU] respectivamente. Aún así, estas son menores que las restricciones propuestas por el PIANC.

Al igual que para los movimientos horizontales, para los movimientos verticales fueron confeccionadas curvas de operabilidad basados en los datos estadísticos obtenidos de las modelaciones realizadas. En el caso de la embarcación de 250 [TEU], para todos los escenarios modelados se obtuvieron gráficas simétricas, siendo estas también decrecientes con el periodo para la mayoría de los casos.

Todas las curvas fueron posibles de parametrizar mediante funciones polinómicas de tercer grado, siendo el mejor ajuste lineal solo para los casos 105° , 255° y 270° . Como se puede apreciar en las figuras siguientes, en la medida que el oleaje aumenta su periodo peak característico, la embarcación presenta oscilaciones de mayor magnitud, lo cual es explicable mediante la relación 4.29. Dada la inercia que adquiere la embarcación al desplazarse debido a estos movimientos, en la medida que aumenta el periodo y por ende su longitud de la onda, el tiempo que transcurre entre cada cresta de ola consecutiva es mayor. De este modo, el barco puede desarrollar mayores amplitudes de movimiento que en el caso de oleaje de menor longitud de onda, donde el recorrido del desplazamiento es menor debido a presencia de ondas mas cercanas entre si.

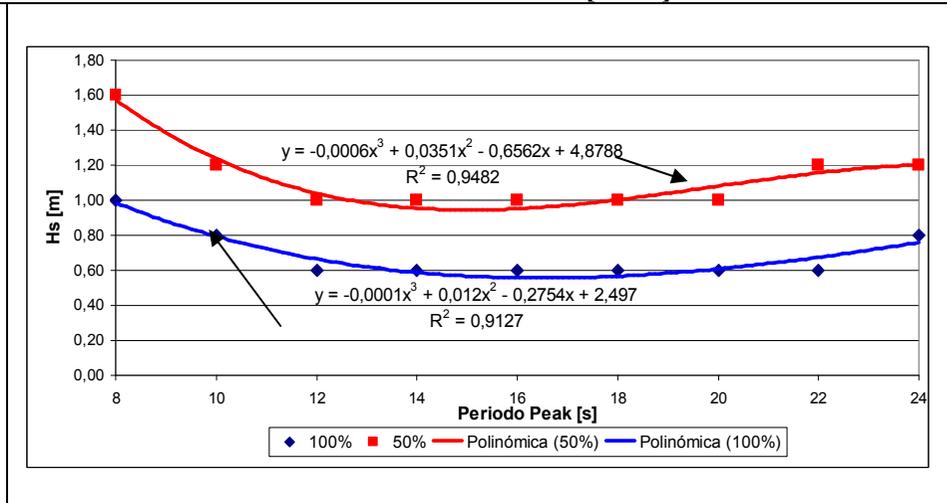
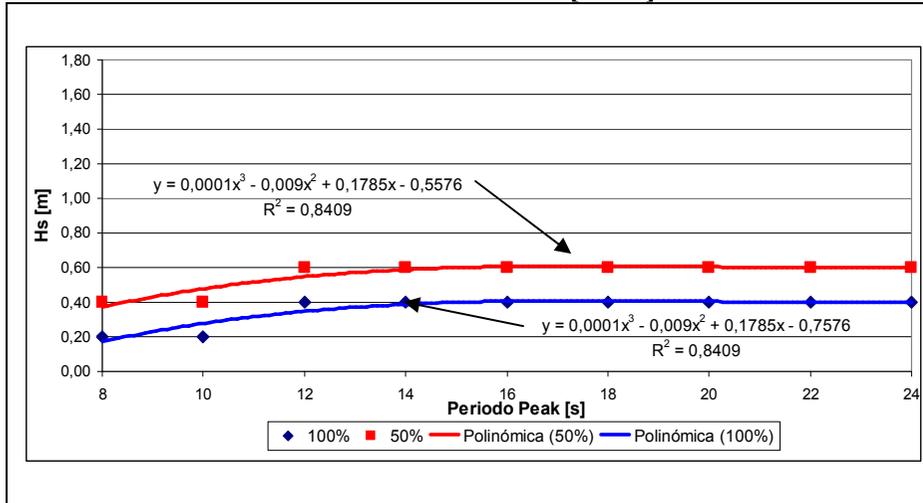
A continuación podemos apreciar las curvas límites de operación antes mencionadas, con ajustes claramente satisfactorios.

Gráfico 7.2-2

Desplazamiento Máximo para Heave. Comparación para Barco 250 [TEU] y 2.000 [TEU]

$\alpha = 90^\circ$ Barco 250 [TEU]

$\alpha = 90^\circ$ Barco 2.000 [TEU]



$\alpha = 120^\circ$ Barco 250 [TEU]

$\alpha = 120^\circ$ Barco 2.000 [TEU]

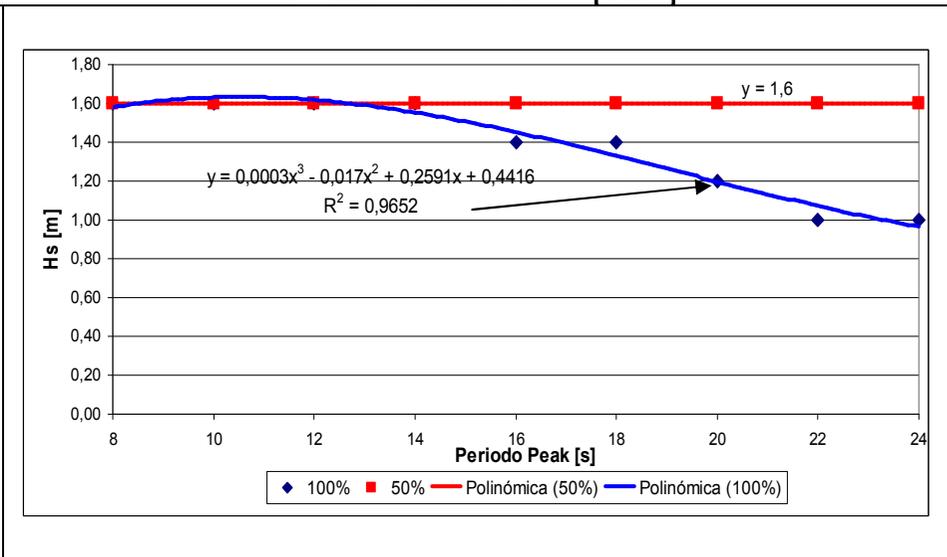
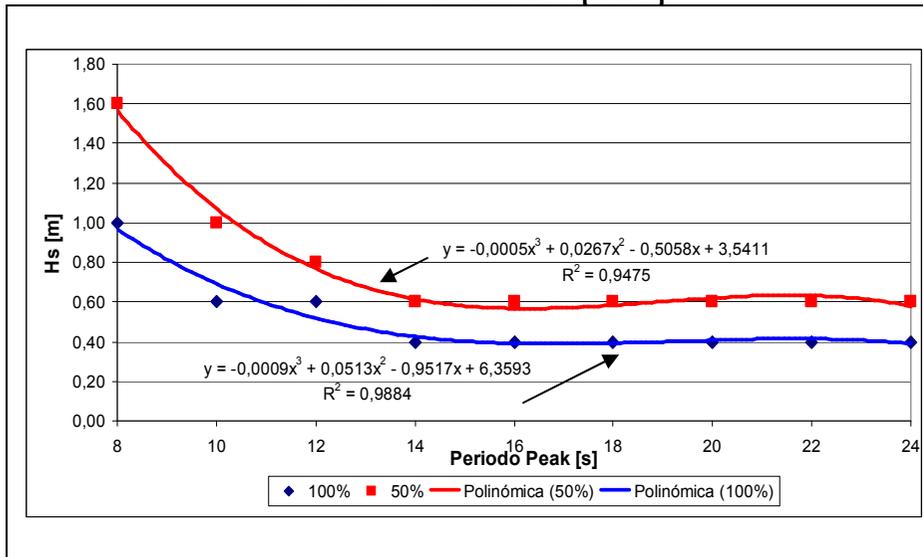
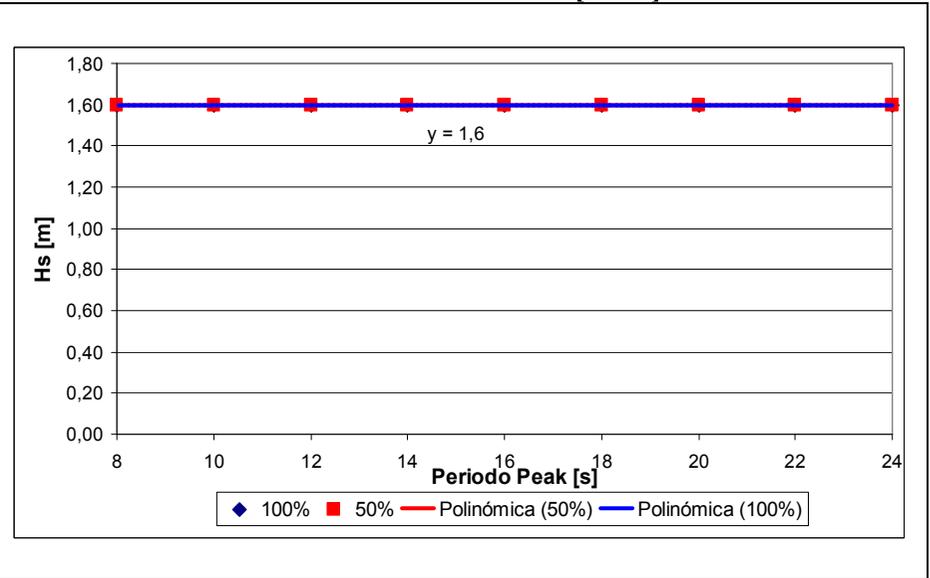
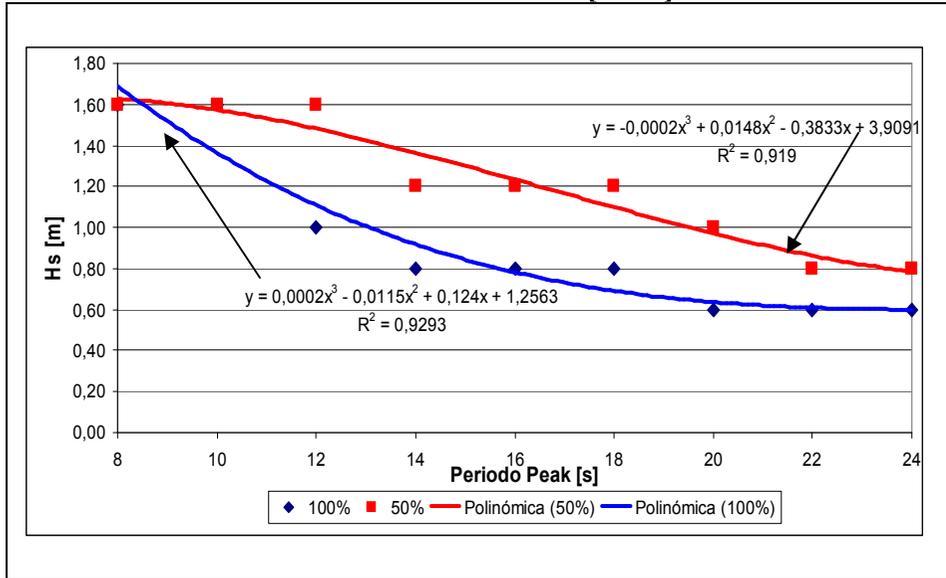


Gráfico 7.2-2 (Continuación)

Desplazamiento Máximo para Heave. Comparación para Barco 250 [TEU] y 2.000 [TEU]

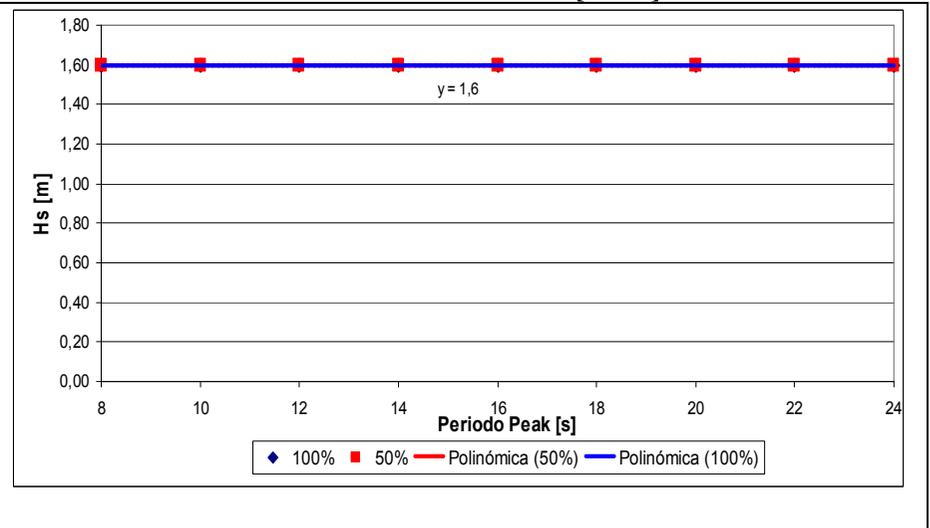
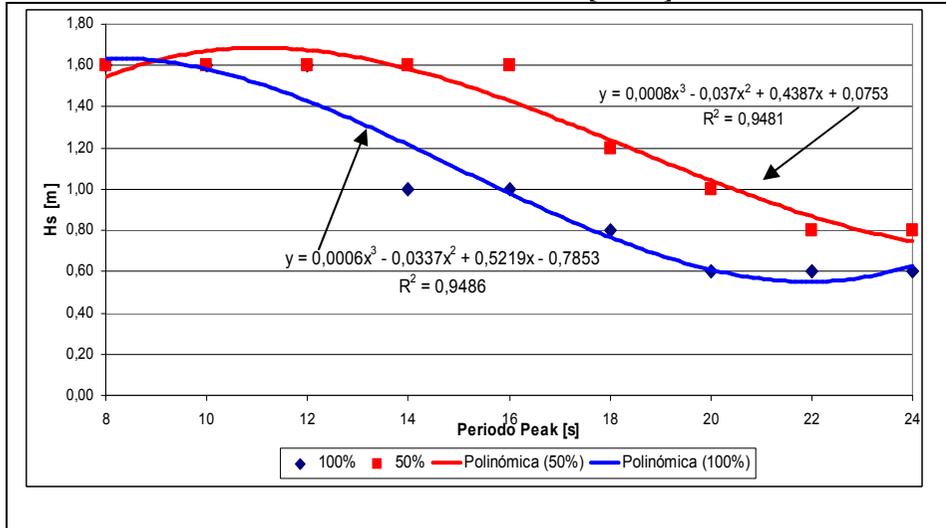
$\alpha = 150^\circ$ Barco 250 [TEU]

$\alpha = 150^\circ$ Barco 2.000 [TEU]



$\alpha = 180^\circ$ Barco 250 [TEU]

$\alpha = 180^\circ$ Barco 2.000 [TEU]



Como se observa en la set de gráficos mostrados en el Gráfico A4-4 del Anexo IV, para la embarcación de 250 [TEU] se puede observar la posibilidad de operación para todos los ángulos de incidencia estudiados, encontrando un valor mínimo $H_s = 0,2$ m de altura significativa como condición límite máxima restrictiva para desarrollar las maniobres de carga y descarga en la zona de atraque, según los criterio del PIANC. Además, podemos apreciar la simetría de las curvas representativas de movimientos máximos permitidos. Para todos los casos, los ajustes realizados cumplen satisfactoriamente con los coeficientes de correlación.

Para el caso de la embarcación de 2.000 [TEU] se puede apreciar las menores oscilaciones desarrolladas, por lo cual las curvas que describen sus condiciones límites de operación admiten condiciones de oleaje incidente más desfavorables que en el caso de la embarcación menor. Para este grado de libertad, se obtuvieron curvas cuya condición mas restrictiva de da para una altura significativa $H_s = 0,4$ m y un $T_p = 16$ s, esto para el ángulo de incidencia de 90° .

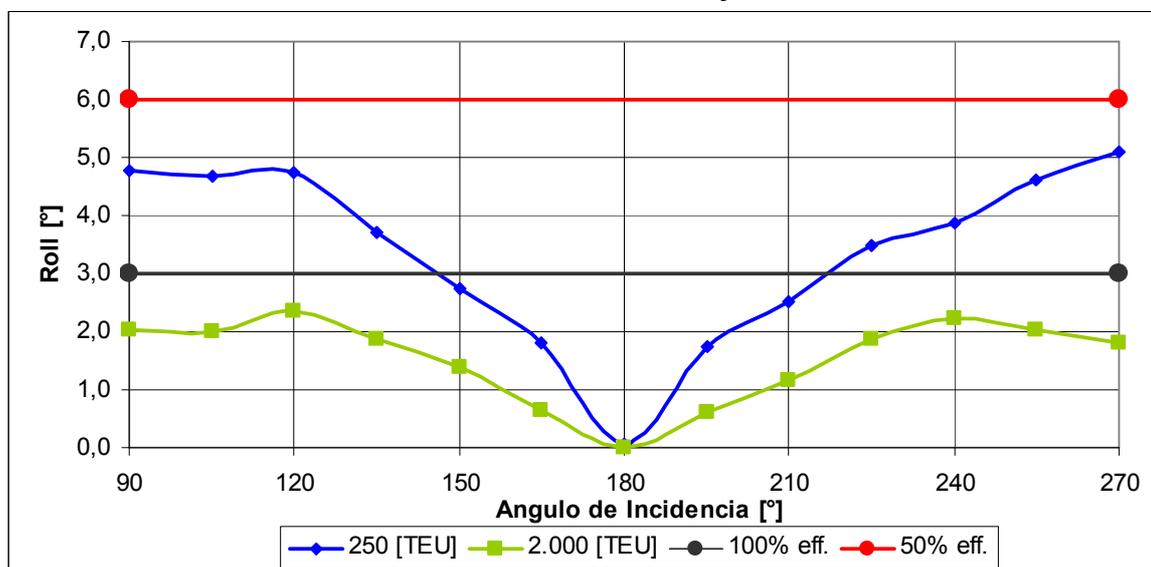
Los resultados de todo el set de curvas límites de operación, para cada uno de los ángulos de incidencia, se pueden apreciar en el Anexo IV, Gráfico A4-4.

7.2.2 Roll

El segundo de los grados de libertad estudiado para los movimientos verticales corresponde al *Roll*, el cual se desarrolla en torno al eje “x” según el sistema de referencia elegido.

Como vemos en el Gráfico 7.2-3, las oscilaciones máximas experimentadas por la embarcación de 250 [TEU] frente a oleaje caracterizado por $H_s = 0,5$ m, son menores a los criterios límites expuestos por PIANC en el caso de puertos con una condición de eficiencia de 50%, para cualquiera de los ángulos de incidencia, mientras que para la embarcación de 2.000 [TEU], esta condición se hace extensiva para puertos con condición de eficiencia de 100%.

Gráfico 7.2-3
Rotaciones Máximas para *Roll* según
Parámetros Característicos de Oleaje $H_s = 0,5$ m



Al igual que para los anteriores grados de libertad analizados, estas oscilaciones presentan su valor mínimo para un ángulo incidente de 180° respecto del sistema de referencia utilizado, mientras que las mayores oscilaciones se dan para el ángulo de incidencia que actúan en forma ortogonal a la embarcación, para el caso de 250 [TEU]. Junto a lo anterior, se muestra la clara simetría de movimiento respecto del ángulo de menores desplazamientos, para ambos casos estudiados.

Los movimientos disipativos de la embarcación son generalmente causados por olas que liberan energía debido a efectos viscosos como los del roce, vórtices u otros. Sin embargo, estos efectos pueden no ser significativos para el Roll. Un cilindro rotando en torno a su centro no produce olas, por lo que su potencial disipativo debido a este movimiento es cero.

Debido a la geometría del barco, con una relación Manga / Calado ≈ 2.5 , es posible afirmar que la mayor parte del barco tiene una sección “mas o menos” circular, por lo que estas olas disipativas son cercanas a cero, haciendo que su aporte a la rotación del barco respecto del eje “x” sea despreciable. De este modo, vemos que para olas de baja amplitud, los movimientos son de baja magnitud y ajustados a criterios. Los movimientos generados solo se deberían a las inclinaciones que podría sufrir el eje ascendente del barco (z) en el recorrido de la estructura a través del oleaje incidente.

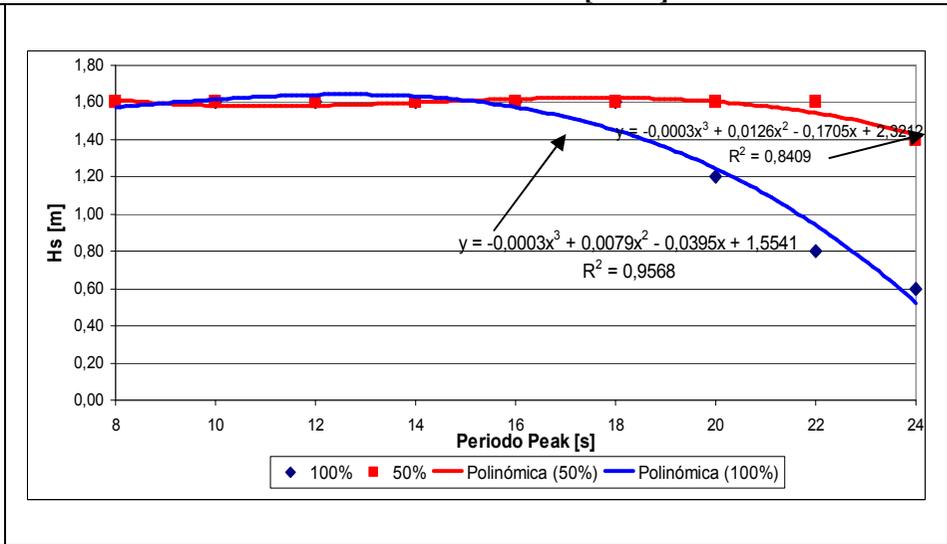
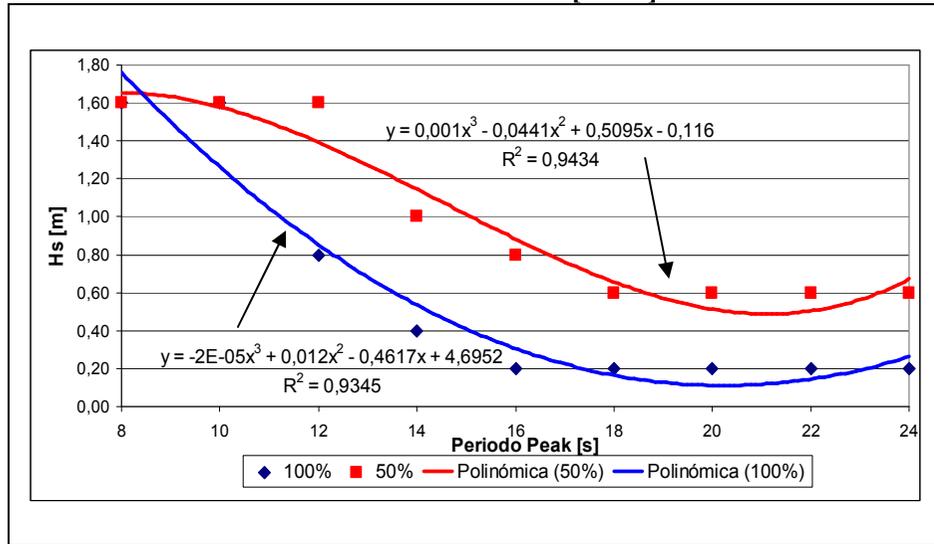
Del Gráfico 7.2-4, podemos ver que para la peor condición de oleaje incidente las curvas de rotación máxima permiten un amplio rango de valores para los cuales los movimientos máximos cumplen con las restricciones propuestas por el PIANC, cumpliendo así un funcionamiento normal en los procesos de carga y descarga. Esto último es de gran importancia, dado que este movimiento no es controlable por medio de las configuraciones de amarras.

Gráfico 7.2-4

Desplazamiento Máximo para Roll. Comparación para Barco 250 [TEU] y 2.000 [TEU]

$\alpha = 90^\circ$ Barco 250 [TEU]

$\alpha = 90^\circ$ Barco 2.000 [TEU]



$\alpha = 120^\circ$ Barco 250 [TEU]

$\alpha = 120^\circ$ Barco 2.000 [TEU]

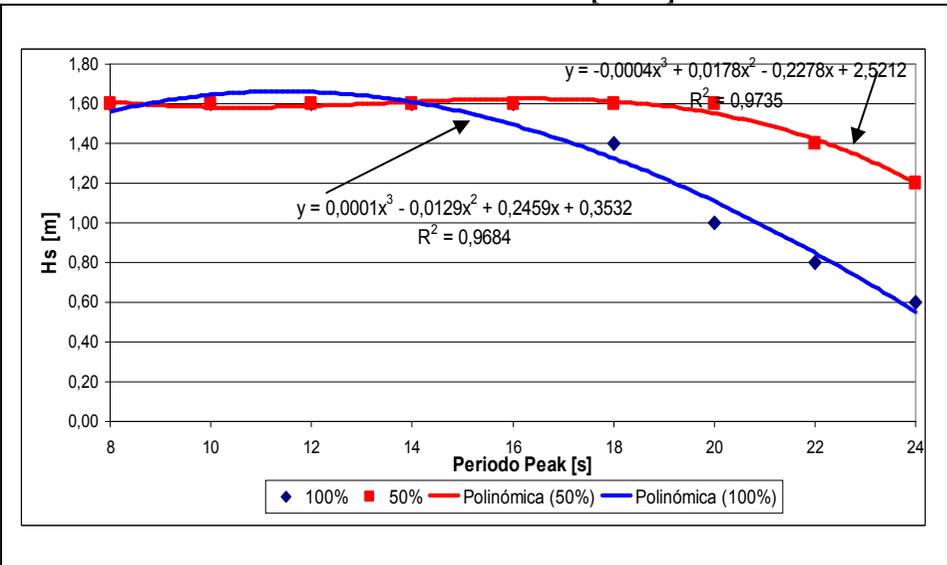
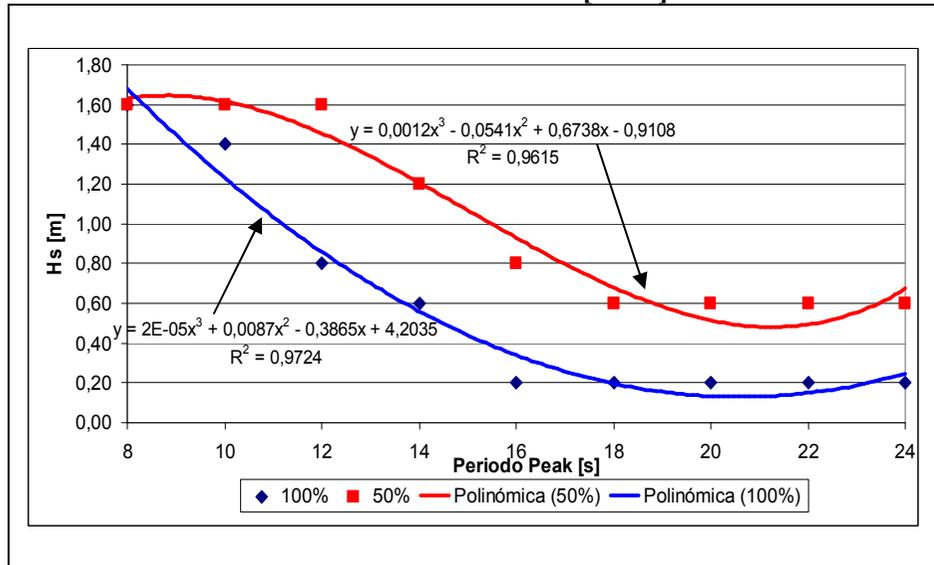
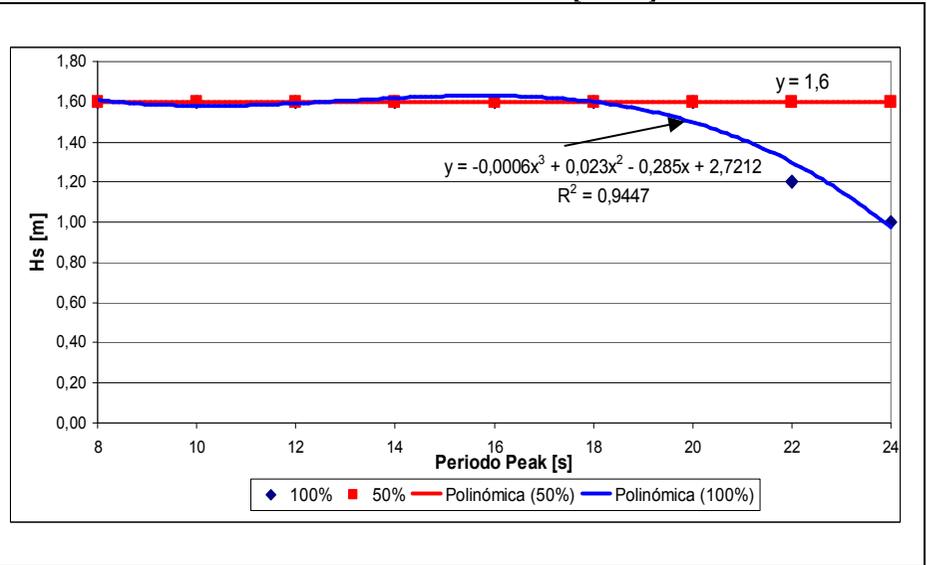
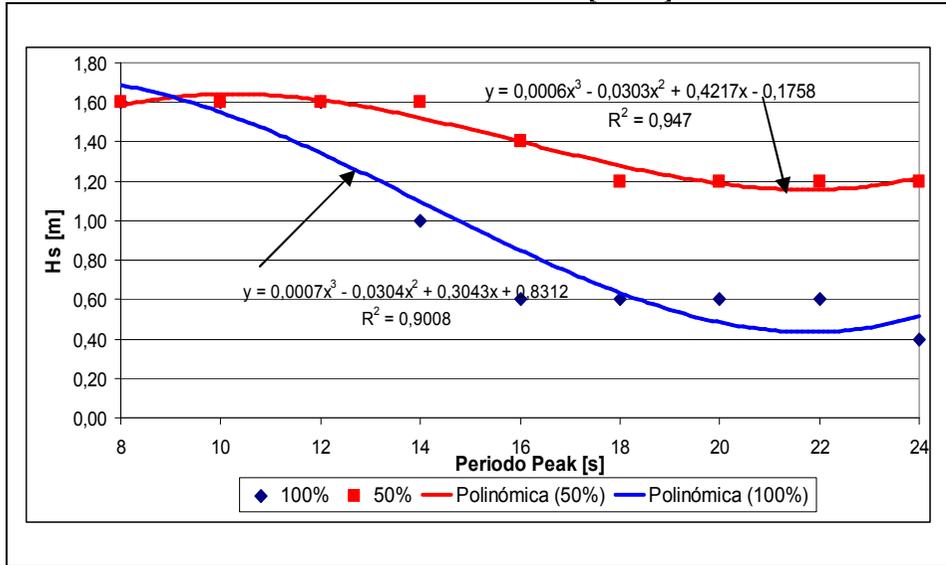


Gráfico 7.2-4 (Continuación)

Desplazamiento Máximo para Roll. Comparación para Barco 250 [TEU] y 2.000 [TEU]

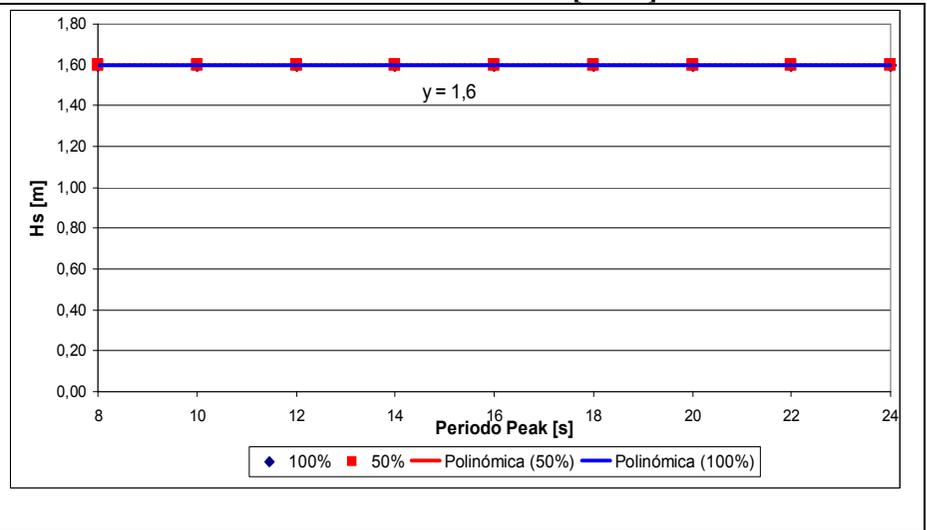
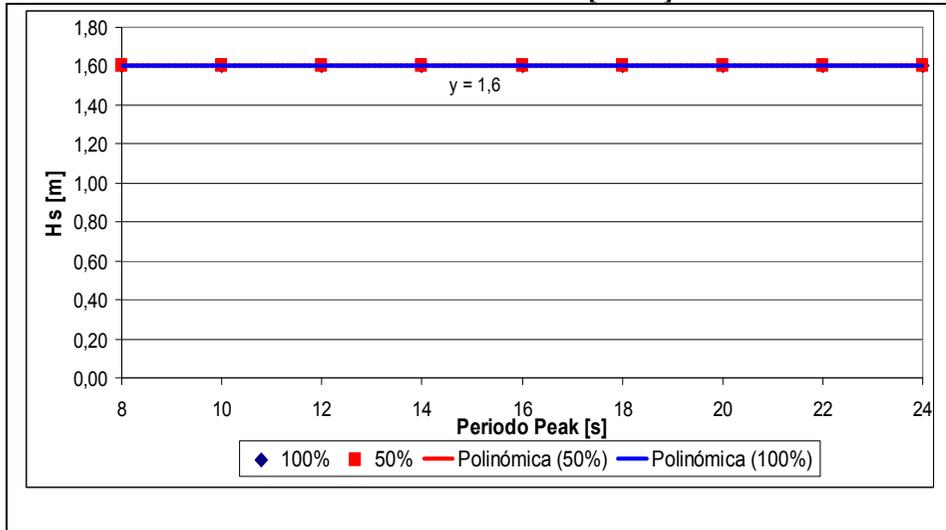
$\alpha = 150^\circ$ Barco 250 [TEU]

$\alpha = 150^\circ$ Barco 2.000 [TEU]



$\alpha = 180^\circ$ Barco 250 [TEU]

$\alpha = 180^\circ$ Barco 2.000 [TEU]



De estas gráficas podemos inferir que, para una embarcación de 250 [TEU], con oleaje de altura significativa menor o igual a $H_s = 0,2$ m y con un periodo peak, T_p , menor o igual a 24 s, el puerto puede operar con una condición máxima de eficiencia el 100 % del tiempo, mientras que para una altura significativa menor o igual a $H_s = 0,6$ m, el puerto puede operar con una condición de eficiencia del 50%, lo que determina un downtime operacional alto solo considerando el *Roll* como condición restrictiva.

Para el caso de la embarcación de 2.000 [TEU], la última condición mencionada, relacionada a una altura $H_s = 0,6$ m, es válida para eficiencias del 100%, mientras que para una operación con eficiencia menor (50%), esta condición límite aumenta a $H_s = 1,2$ m para un ángulo de incidencia de 255° .

Los resultados de todo el set de curvas límites de operación, para cada uno de los ángulos de incidencia, se pueden apreciar en el Anexo IV, Gráfico A4-5.

7.2.3 Pitch

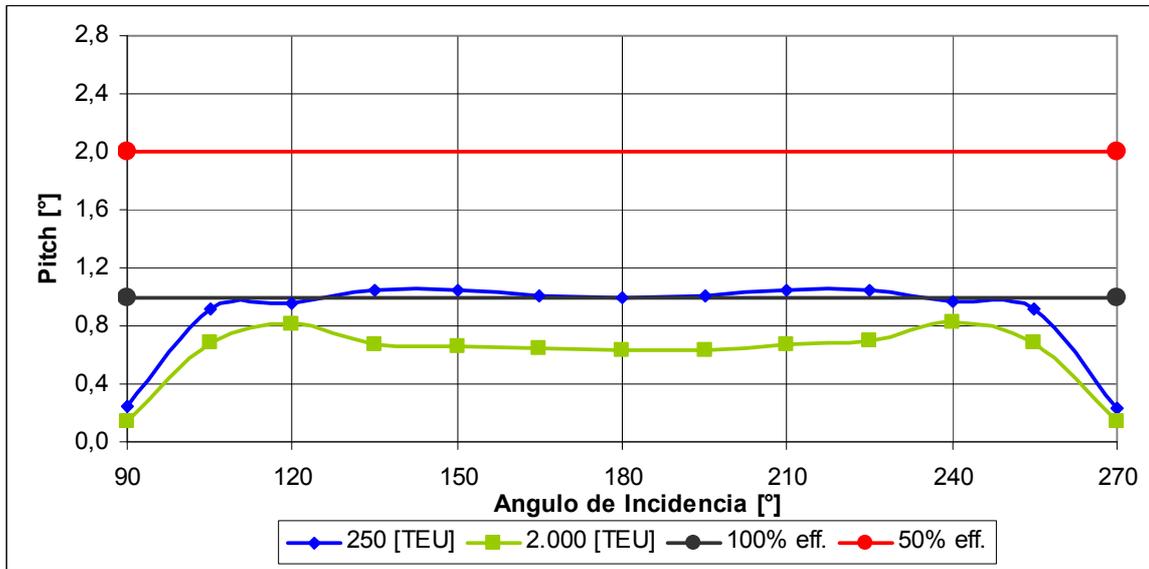
El último movimiento vertical analizado corresponde al grado de libertad denominado Pitch, el cual es de tipo rotacional y se desarrolla respecto al eje de las ordenadas según el sistema de referencia utilizado.

Para este movimiento, al igual que para el *Heave*, se observó que bajo condiciones de oleaje de diseño ($H_s = 0.5$ m), las rotaciones de la embarcación están por debajo de los límites recomendados por el PIANC, inclusive para una condición de eficiencia del 100% y para cada uno de los ángulos de incidencia estudiados, como se muestra en el Gráfico 7.2-5. Sin embargo, se aprecia que las mayores oscilaciones se dan para los ángulo de incidencia en torno a la dirección de 180° , en el caso embarcación de 250 [TEU], lo cual se diferencia de los grados de libertad estudiados anteriormente, donde los mayores valores obtenidos, tanto para los desplazamientos como para las rotaciones, eran mínimas bajo estas condiciones de oleaje.

Por otro lado, para la embarcación de 2.000 [TEU] los valores peak de rotación se dan para los ángulos de 120° y 240° . Del Gráfico 7.2-5 se desprende que las rotaciones máximas observadas para cada uno de los ángulos de incidencia estudiados, y para una $H_s = 0.5$ m, tienen un comportamiento simétrico respecto de su condición más desfavorable, alcanzando un valor mínimo para el oleaje incidente en forma ortogonal a la embarcación.

Este hecho es explicable dada la geometría del problema, ya que al tener un oleaje incidente en forma ortogonal al eje longitudinal del barco, los esfuerzos que generan rotación en torno al eje “y” son de baja intensidad y sólo provocan oscilaciones importantes en el eje “z” según el sistema de referencia utilizado. El barco asciende y desciende sin rotar.

Gráfico 7.2-5
 Rotaciones Máximas para *Pitch* según
 Parámetro Característico de Oleaje $H_s = 0,5$ m



Del Gráfico 7.2-5 se puede desprender que para las curvas obtenidas, la altura significativa de las olas incidentes que generan las rotaciones de mayor magnitud están por sobre los niveles adoptados para el diseño de las obras, según la OCAM y la ROM, por lo que la operabilidad del puerto no vería disminuida su eficiencia por este grado de libertad, en un porcentaje importante del tiempo.

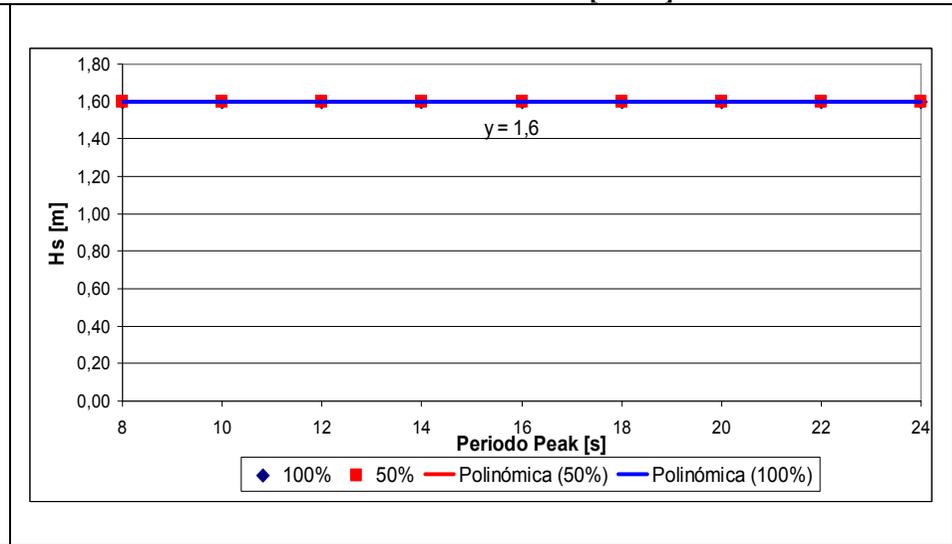
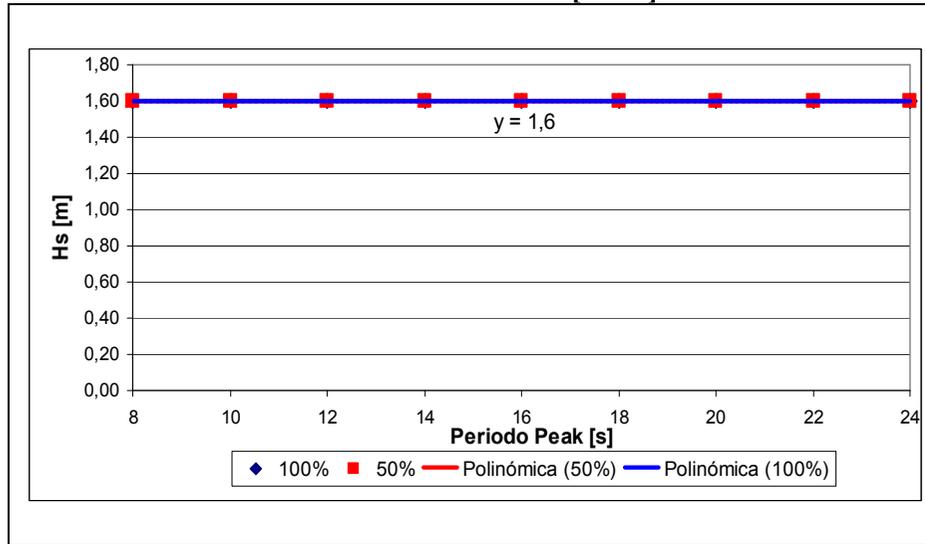
Al igual que en casos anteriores, las aproximaciones realizadas para las curvas de ajuste corresponden a tendencias tipo polinómicas de tercer grado, las cuales poseen un coeficiente de correlación menor a los obtenidos para los grados de libertad anteriores, pero muestra la tendencia de los valores límites de movimiento. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que estas curvas fueron hechas para los valores resultantes de las diferencias de los peak globales positivos y negativos de las series de tiempo modeladas, lo que podría aumentar el factor de seguridad real de las embarcaciones para las operaciones de carga y descarga.

Gráfico 7.2-6

Desplazamiento Máximo para Pitch. Comparación para Barco 250 [TEU] y 2.000 [TEU]

$\alpha = 90^\circ$ Barco 250 [TEU]

$\alpha = 90^\circ$ Barco 2.000 [TEU]



$\alpha = 120^\circ$ Barco 250 [TEU]

$\alpha = 120^\circ$ Barco 2.000 [TEU]

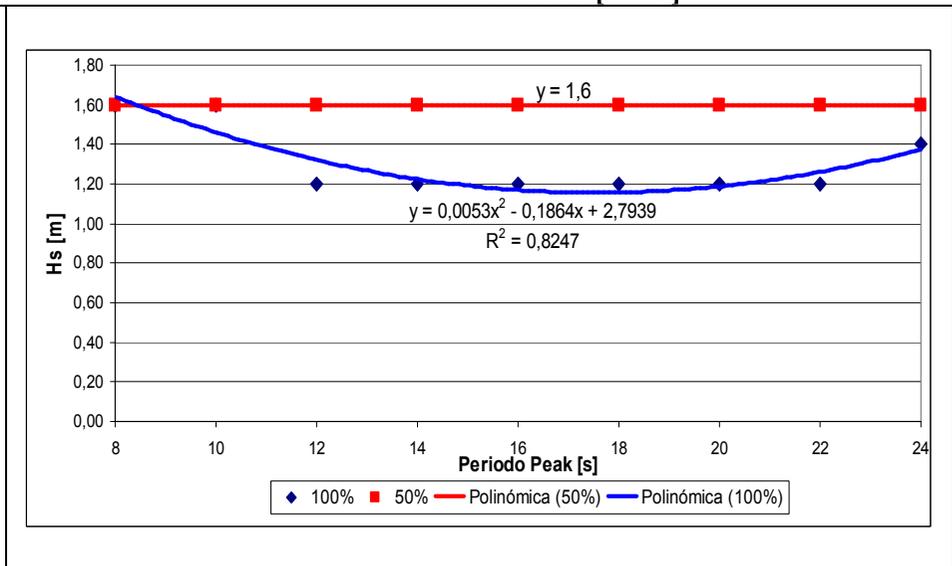
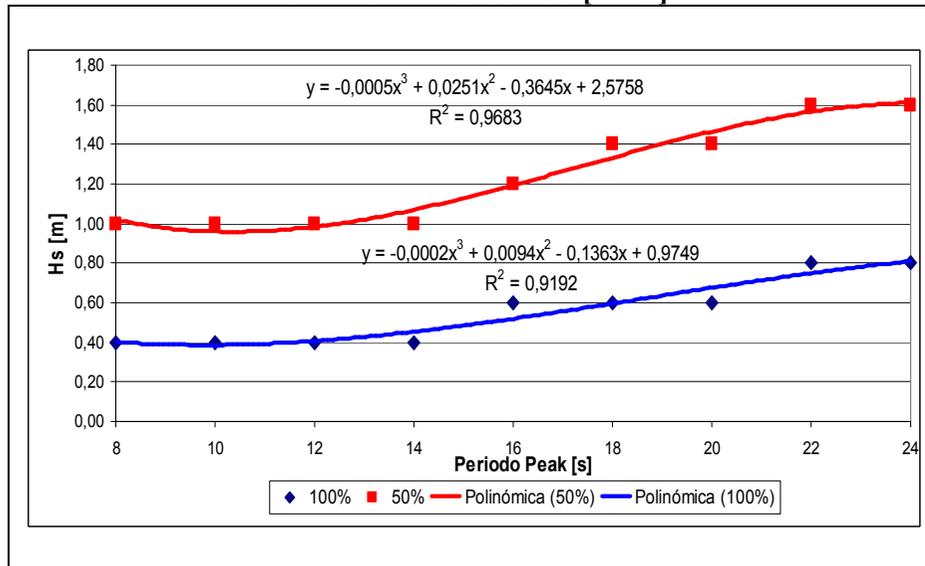
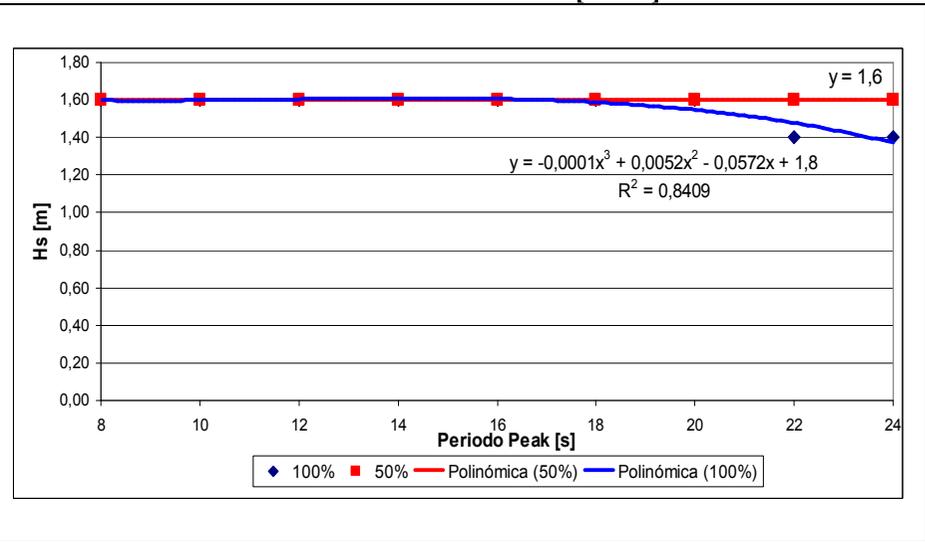
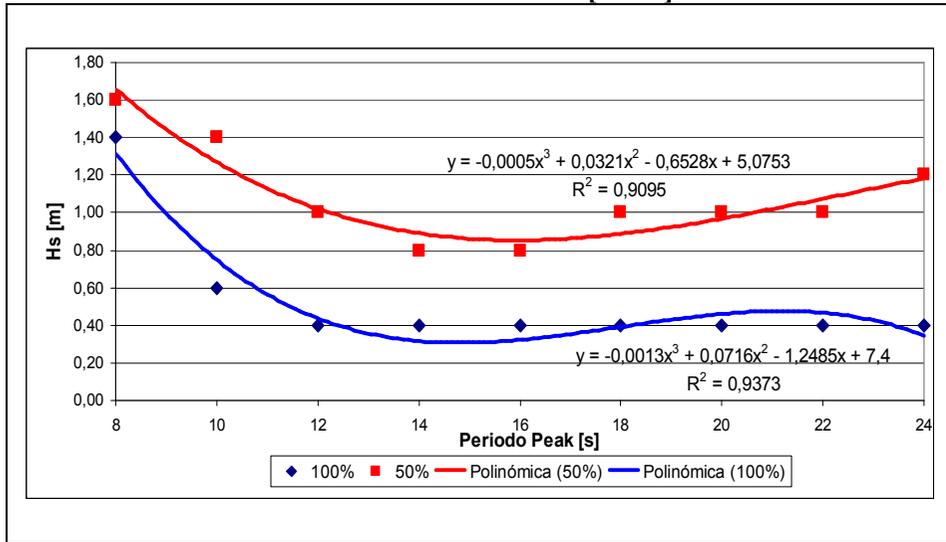


Gráfico 7.2-6 (Continuación)

Desplazamiento Máximo para Pitch. Comparación para Barco 250 [TEU] y 2.000 [TEU]

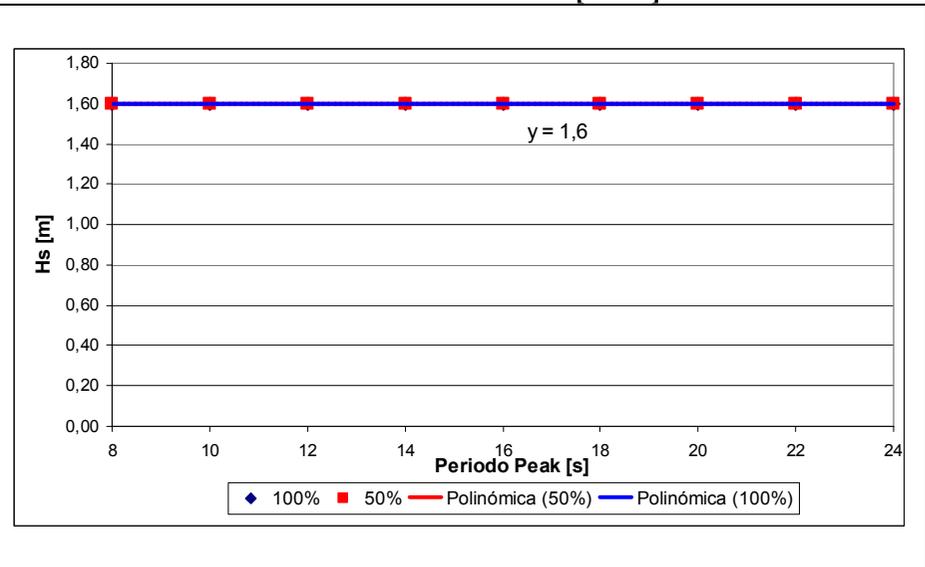
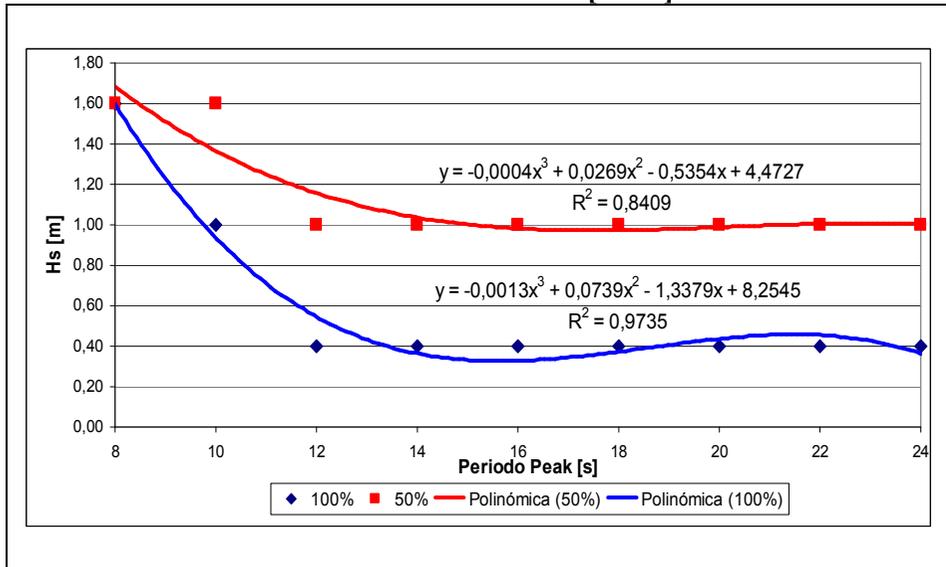
$\alpha = 150^\circ$ Barco 250 [TEU]

$\alpha = 150^\circ$ Barco 2.000 [TEU]



$\alpha = 180^\circ$ Barco 250 [TEU]

$\alpha = 180^\circ$ Barco 2.000 [TEU]



Como se menciona anteriormente, las diferencias en el comportamiento de ambas embarcaciones, respecto de los restantes grados de libertad, son sustanciales. En ambos casos las condiciones ortogonales de oleaje incidente son los escenarios que presentan las mejores condiciones para la operación, pues en estos las rotaciones son las menores observadas. Por otro lado, para ninguna condición estudiada se supera claramente las limitaciones propuestas por el PIANC, lo que traducido en tiempo de operación, significa grandes ventajas para las embarcaciones de todo tipo. Además vemos que los resultados obtenidos para los tres movimientos verticales son coincidentes en cuanto a sus magnitudes

Los resultados de todo el set de curvas límites de operación, para cada uno de los ángulos de incidencia, se pueden apreciar en el Anexo IV, Gráfico A4-6

7.3 Condición Máxima según Ángulo de Incidencia del Oleaje

Como se vio en los análisis anteriores, para cada uno de los grados de libertad existe un ángulo de incidencia que genera la condición más desfavorable respecto a los desplazamientos. En base a esto, y con la intención de integrar esta información para determinar la importancia de cada grado de libertad, según sean los parámetros característicos que gobiernen el oleaje incidente, se realizaron gráficas que muestran el comportamiento de cada uno de estos ángulos.

Para realizar un análisis completo, se separó entre movimientos de translación y movimientos de rotación, con el fin de compararlos según la misma escala. De este modo, se puede determinar para cada par de parámetros significativos de oleaje, T_p y H_s , qué movimiento será el restrictivo en la determinación del downtime.

Independiente del ángulo de incidencia del oleaje, para los grados de libertad traslacionales se observó que la condición crítica de movimiento está dada por el movimiento horizontal *Sway*, el cual presenta magnitudes muy por sobre las condiciones aceptadas para las maniobras de carga y descarga.

Para el caso de los movimientos rotacionales, la condición crítica está dada por el grado de libertad *Yaw*, mientras que para los restantes grados de libertad, las condiciones críticas se alternan y los movimientos restrictivos varían según las magnitudes asociadas al periodo peak y a la altura significativa de la ola.

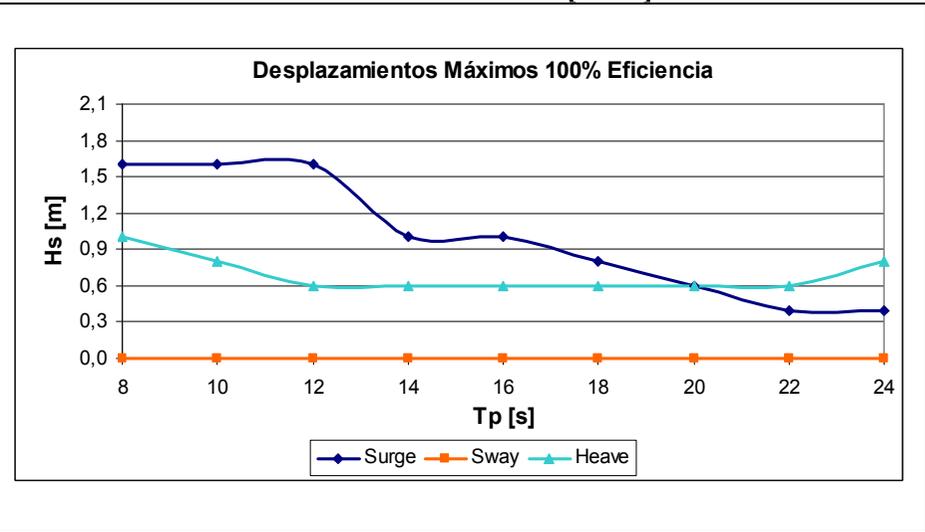
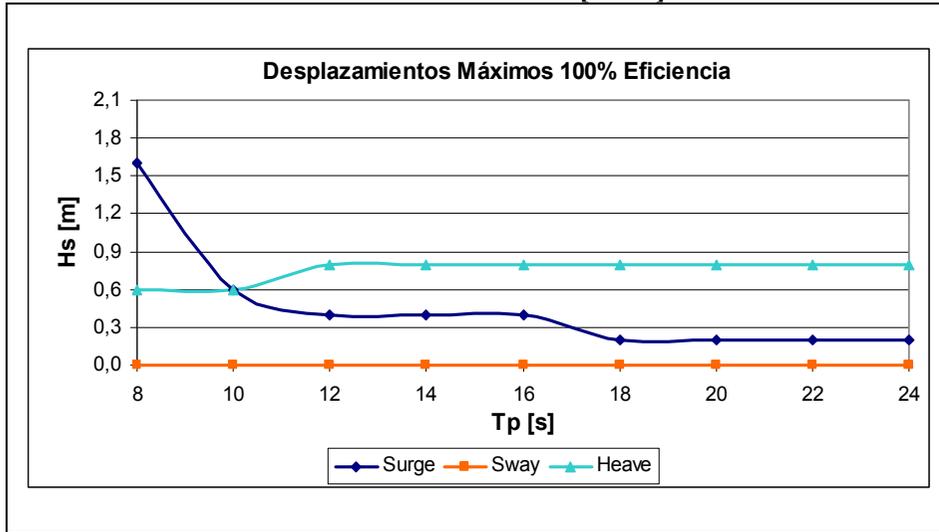
Del Gráfico 7.3-1 podemos concluir los movimientos restrictivos para cada ángulo de incidencia del oleaje. Para cada uno de los ángulos mostrados (90° , 135° y 180°) las restricciones de movimientos están dadas por el grado de libertad *Sway*, el cual como lo habíamos analizado en el numeral 7.2.1. Estas restricciones corresponden tanto a la embarcación de 250 [TEU] como a la de 2.000 [TEU], en sus dos condiciones de eficiencia.

Gráfico 7.3-1

Curvas de Desplazamiento Máximo según Eficiencia en Sistema de Carga y Descarga para $\alpha = 90^\circ$.
 Comparación para Barco 250 [TEU] y 2.000 [TEU]

$\alpha = 90^\circ$ Barco 250 [TEU]

$\alpha = 90^\circ$ Barco 2.000 [TEU]



$\alpha = 90^\circ$ Barco 250 [TEU]

$\alpha = 90^\circ$ Barco 2.000 [TEU]

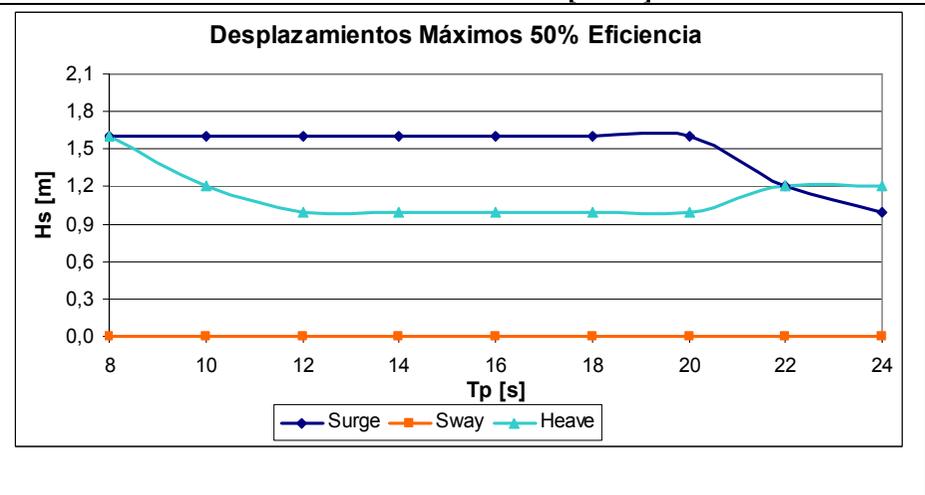
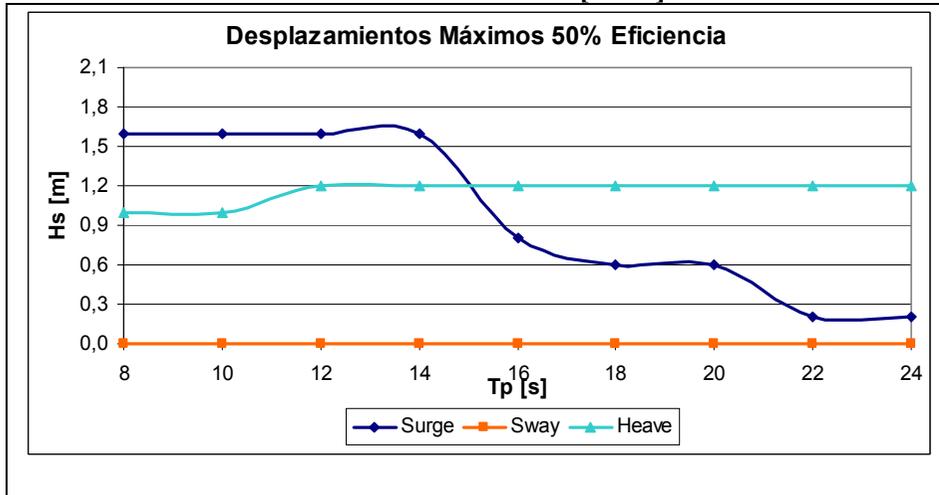


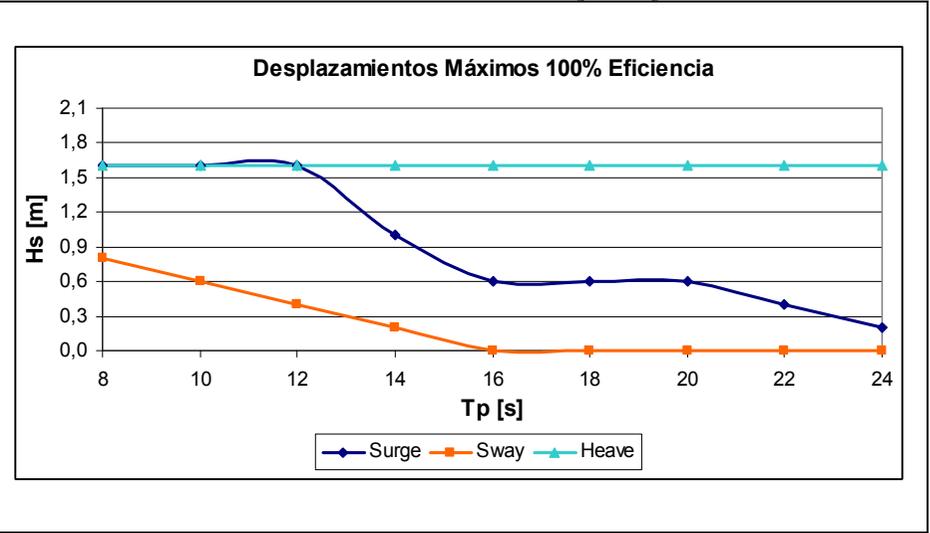
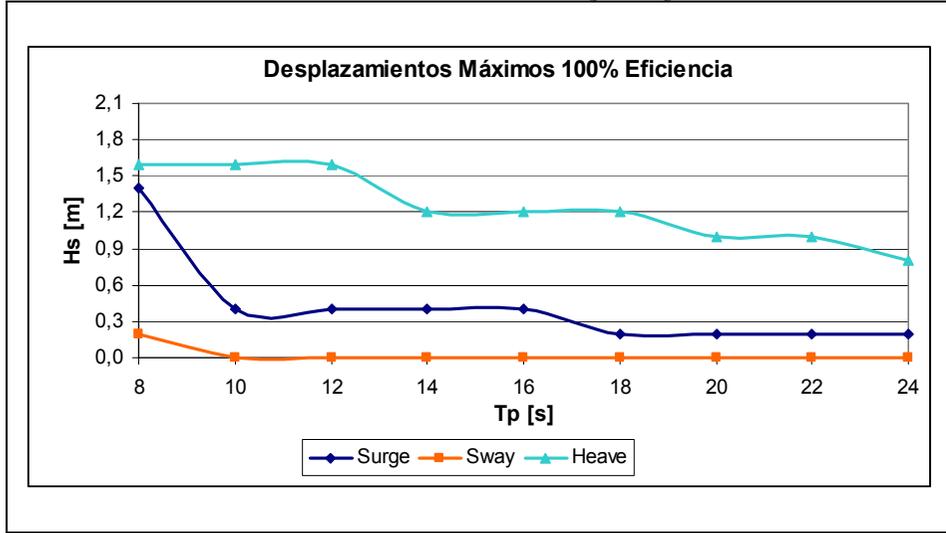
Gráfico 7.3 -1 (Continuación)

Curvas de Desplazamiento Máximo según Eficiencia en Sistema de Carga y Descarga para $\alpha = 135^\circ$.

Comparación para Barco 250 [TEU] y 2.000 [TEU]

$\alpha = 135^\circ$ Barco 250 [TEU]

$\alpha = 135^\circ$ Barco 2.000 [TEU]



$\alpha = 135^\circ$ Barco 250 [TEU]

$\alpha = 135^\circ$ Barco 2.000 [TEU]

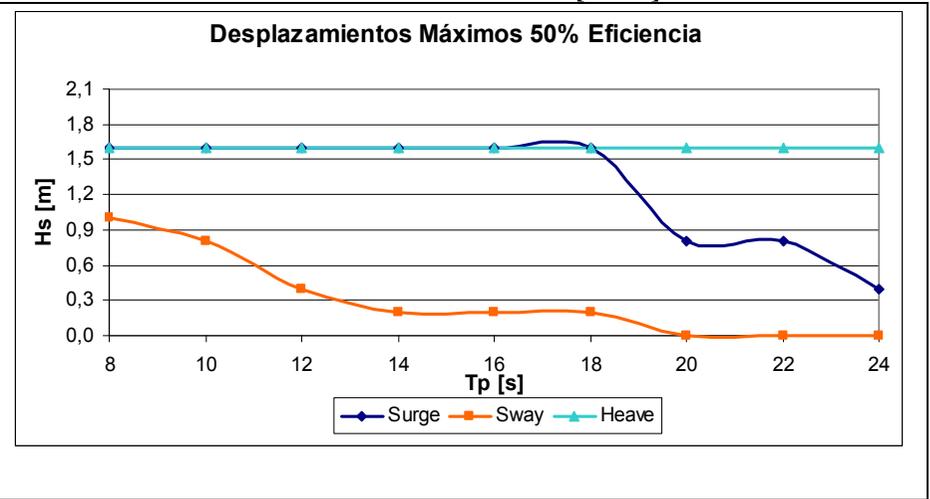
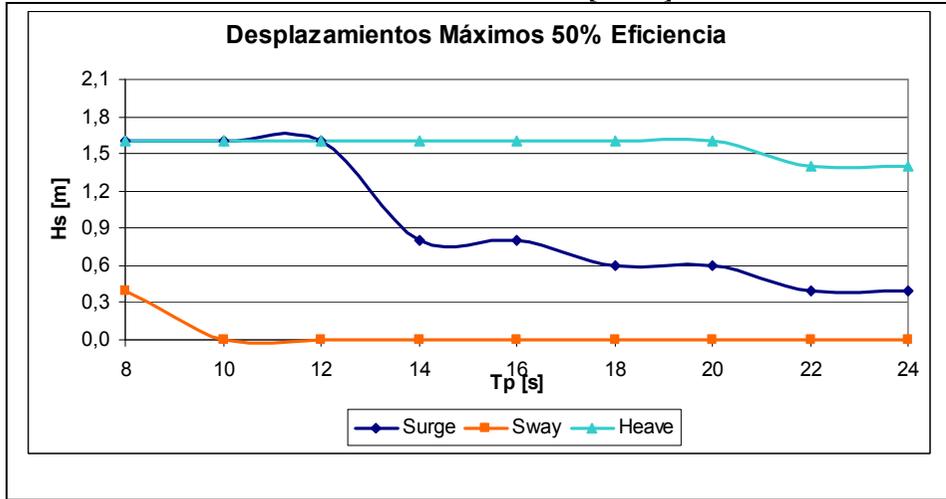


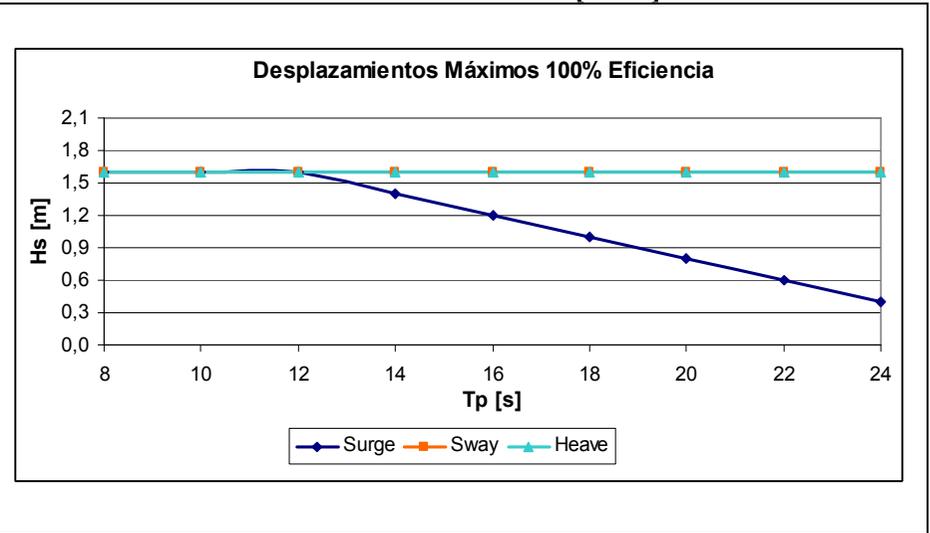
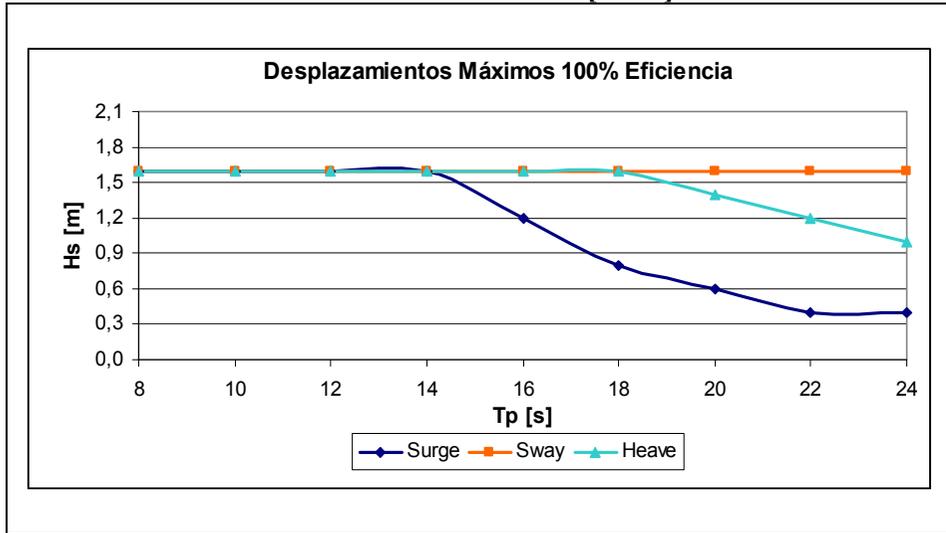
Gráfico 7.3 -1 (Continuación)

Curvas de Desplazamiento Máximo según Eficiencia en Sistema de Carga y Descarga para $\alpha = 180^\circ$.

Comparación para Barco 250 [TEU] y 2.000 [TEU]

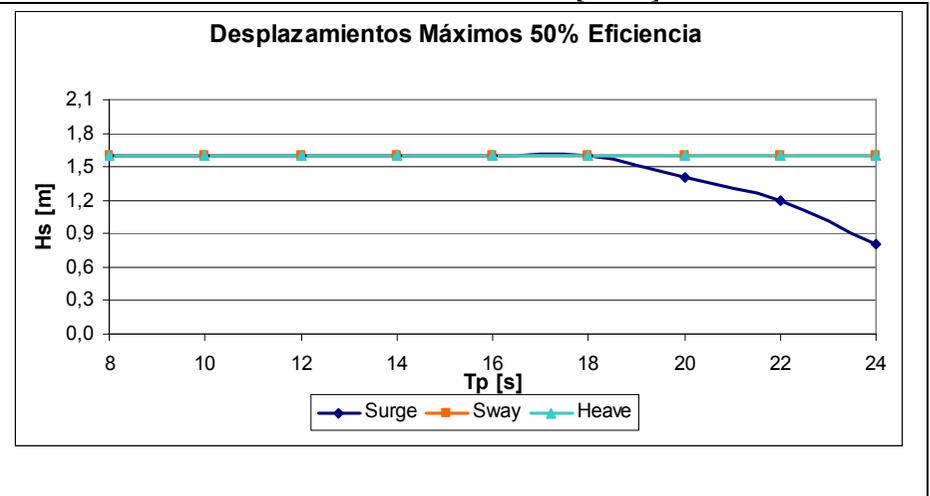
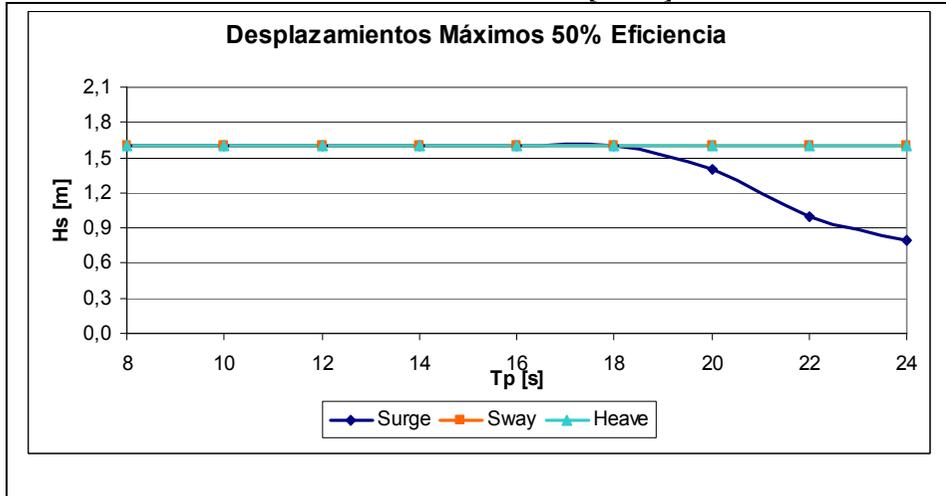
$\alpha = 180^\circ$ Barco 250 [TEU]

$\alpha = 180^\circ$ Barco 2.000 [TEU]



$\alpha = 180^\circ$ Barco 250 [TEU]

$\alpha = 180^\circ$ Barco 2.000 [TEU]



Para el ángulo de incidencia 90° se aprecia lo restrictivo del grado de libertad Sway, como se mencionó anteriormente, para cada combinación de parámetros. Posteriormente, el grado de libertad que restringe la operación de carga y descarga, para la embarcación de 250 [TEU], corresponde al Heave hasta los valores de periodo peak, T_p , cercano a los 14 s y H_s 0,6 m, mientras que para la embarcación de 2.000 [TEU] esta situación se repite, pero para un periodo peak cercano a los 22 s y $H_s = 1,2$ m. Para los periodos peak de oleaje mayores a 14 s, las restricciones de movimiento están dadas por el Surge en el caso de la embarcación de 250 [TEU], al igual que para la embarcación mayor donde este fenómeno ocurre para periodos mayores a los 22 s.

Para el ángulo de incidencia 135° se observa una situación diferente respecto del ángulo de incidencia anterior, ya que las restricciones de movimiento están dadas, según sea la altura significativa H_s que caracterice el oleaje, por cada uno de los grados de libertad en forma independiente. De este modo, es posible definir zonas o conjunto de parámetros para los cuales cada uno de los grados de libertad es restrictivo.

Por último, para el ángulo de 180° , las condiciones de operabilidad son menos restrictivas respecto de los parámetros característicos del oleaje en los cuales las maniobras de carga y descarga son posibles de llevar a cabo, apreciándose una disminución en el downtime. Para la embarcación de 2.000 [TEU] estas restricciones operacionales están dadas por el Surge, que a diferencia de los ángulos anteriormente analizados, eran dados por el grado de libertad Sway.

Del mismo modo, se presentarán curvas para las rotaciones máximas experimentadas por la embarcación para los ángulos 90° , 135° y 180° , para ambas eficiencias en los sistemas de carga y descarga de las embarcaciones.

Del Gráfico 7.3-2 los resultados obtenidos se comportan de forma similar que para los correspondientes a desplazamientos. Para los ángulos 90° y 135° el grado de libertad restrictivo corresponde al Yaw, mientras que las curvas de rotaciones correspondientes a Roll y Pitch se cruzan definiendo zonas de influencia según los parámetros característicos del oleaje.

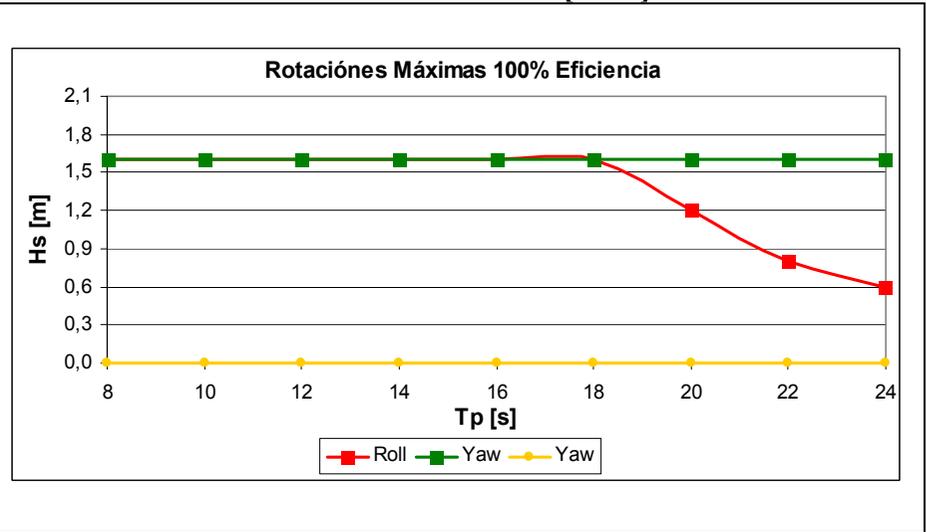
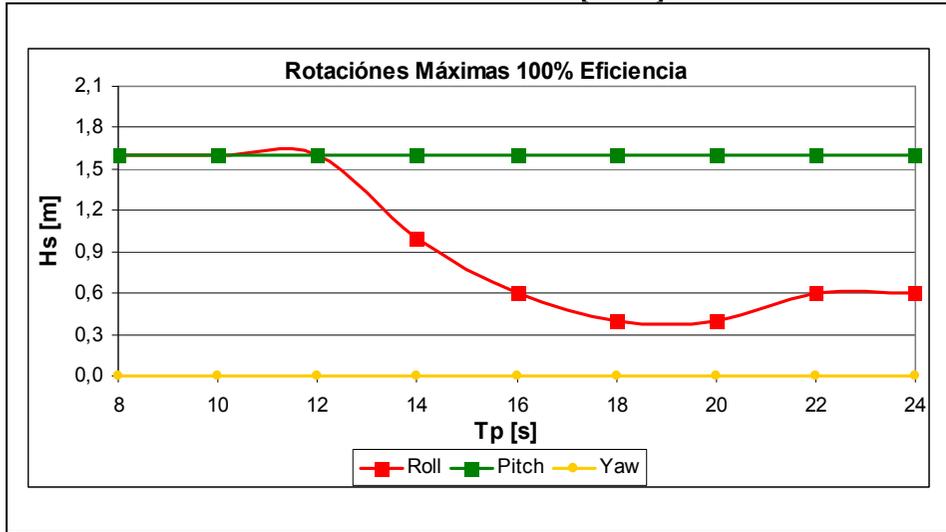
La condición más favorable para las operaciones de carga y descarga están dadas por el Pitch, la cual para los primeros ángulos analizados corresponde a una $H_s = 1,6$ m. Sólo para el ángulo de 180° este grado de libertad es más restrictivo dada la geometría del problema, ya que oleaje incidente en forma longitudinal al barco genera oscilaciones en torno al eje transversal del mismo, lo que provoca una menor altura significativa H_s admisible.

Gráfico 7.3-2

Curvas de Rotaciones Máximas según Eficiencia en Sistema de Carga y Descarga para $\alpha = 90^\circ$.
Comparación para Barco 250 [TEU] y 2.000 [TEU]

$\alpha = 90^\circ$ Barco 250 [TEU]

$\alpha = 90^\circ$ Barco 2.000 [TEU]



$\alpha = 90^\circ$ Barco 250 [TEU]

$\alpha = 90^\circ$ Barco 2.000 [TEU]

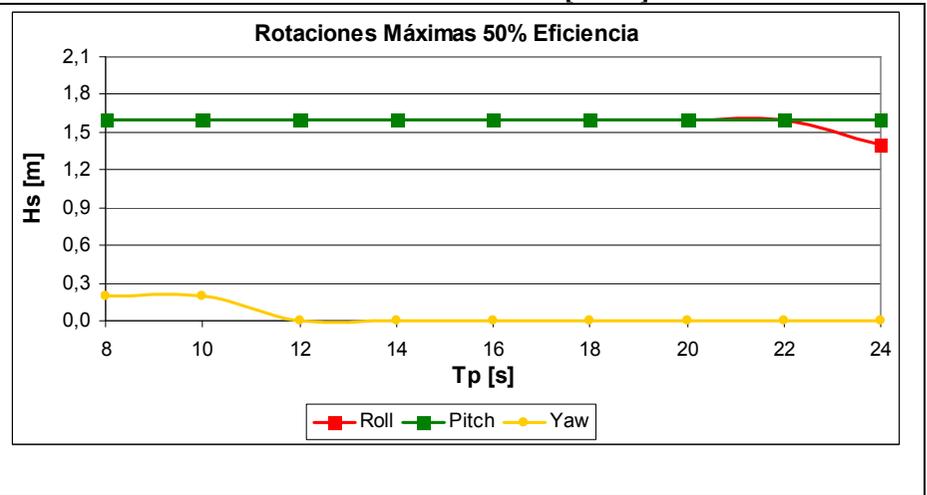
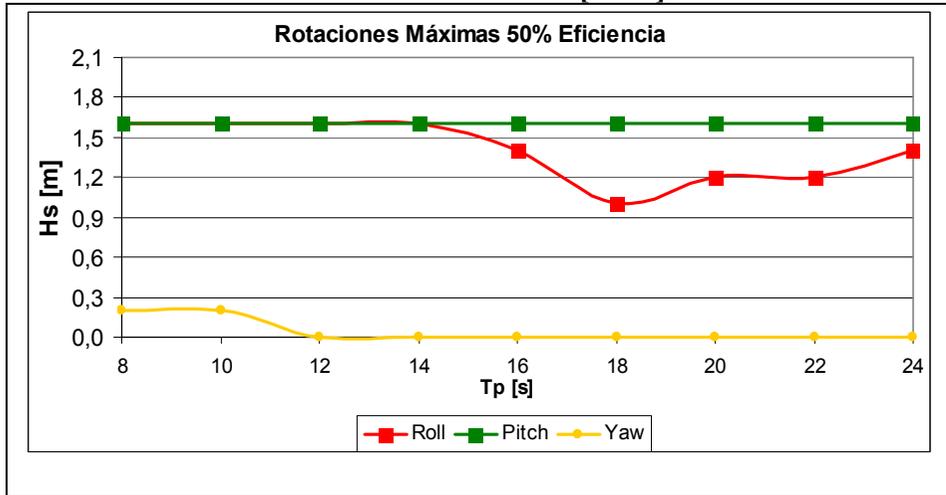
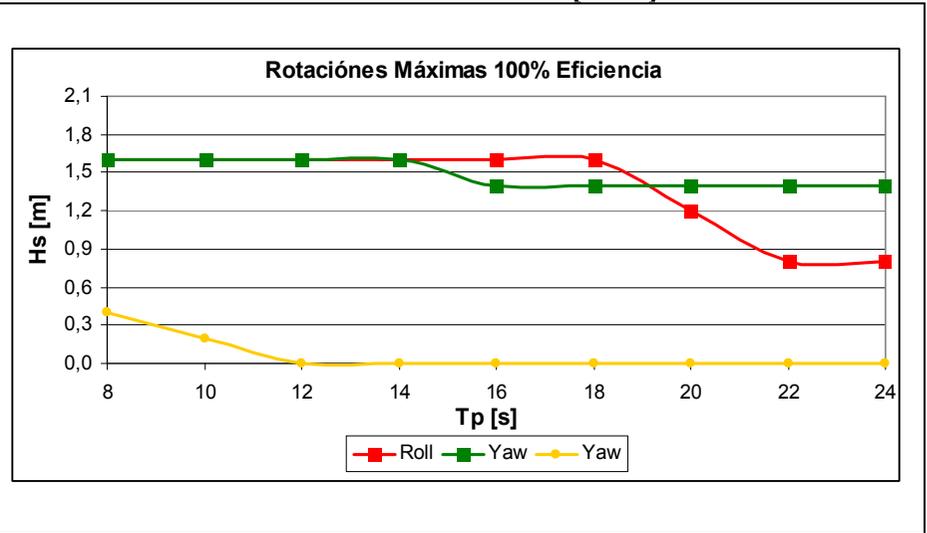
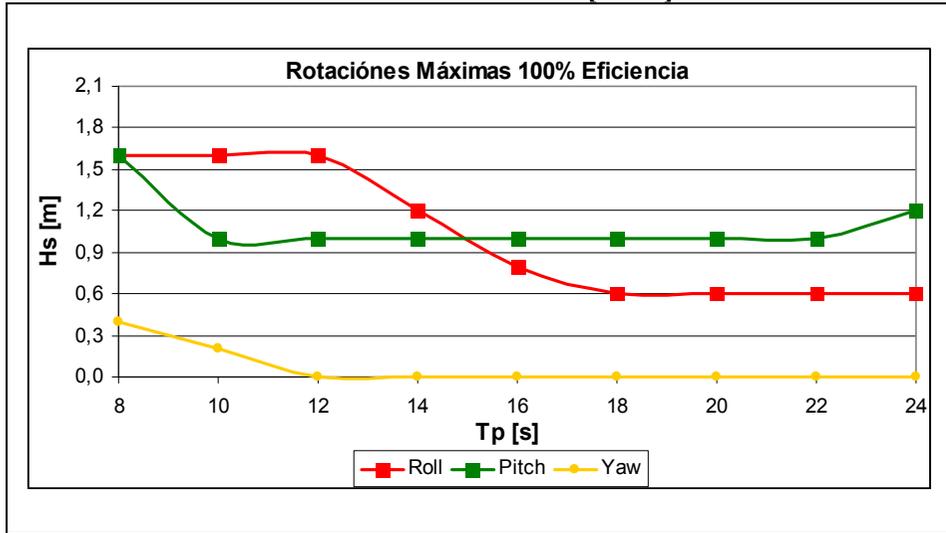


Gráfico 7.3-2 (Continuación)

Curvas de Rotaciones Máximas según Eficiencia en Sistema de Carga y Descarga para $\alpha = 135^\circ$.
Comparación para Barco 250 [TEU] y 2.000 [TEU]

$\alpha = 135^\circ$ Barco 250 [TEU]

$\alpha = 135^\circ$ Barco 2.000 [TEU]



$\alpha = 135^\circ$ Barco 250 [TEU]

$\alpha = 135^\circ$ Barco 2.000 [TEU]

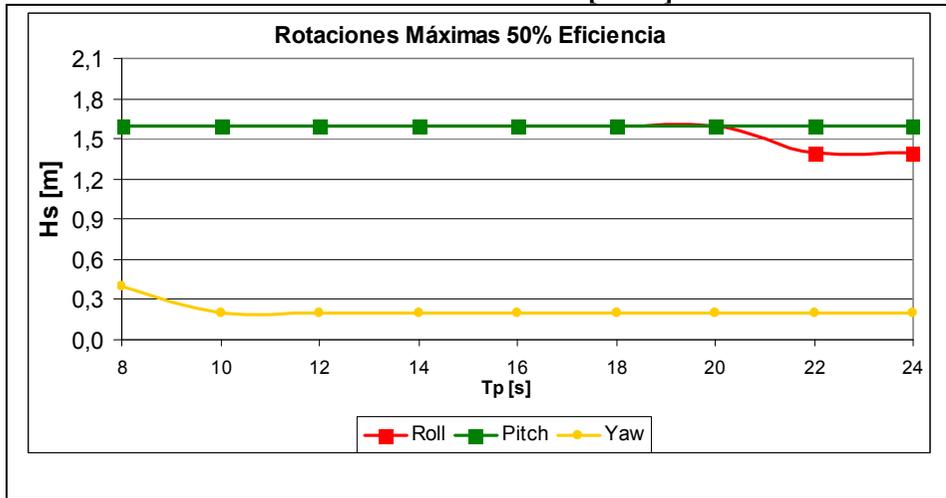
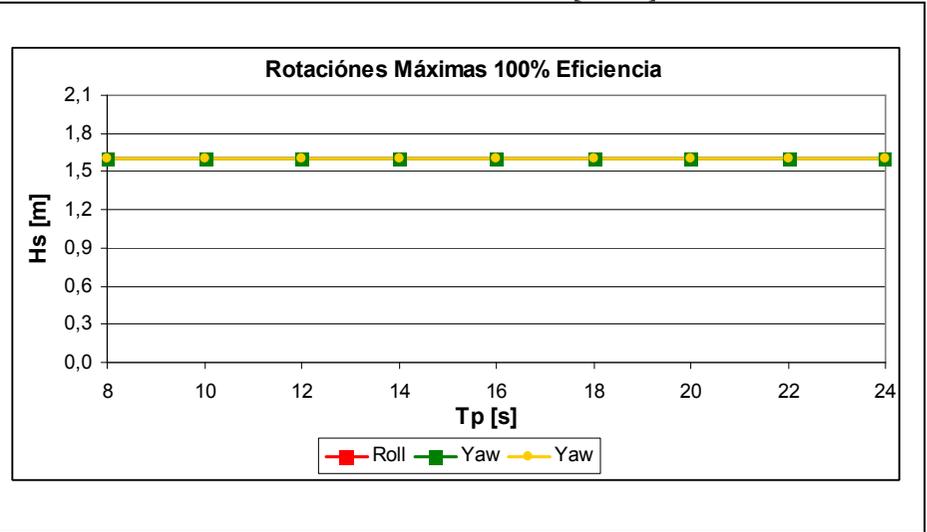
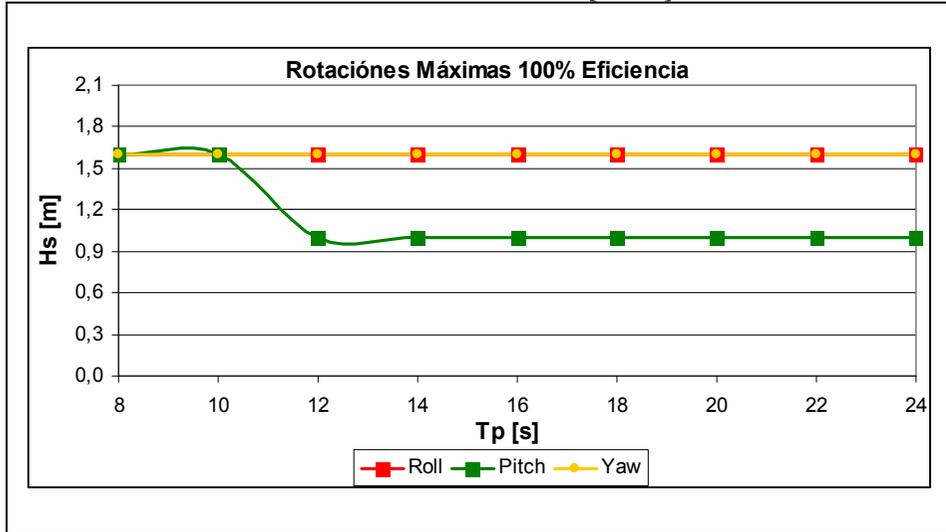


Gráfico 7.3-2 (Continuación)

Curvas de Rotaciones Máximas según Eficiencia en Sistema de Carga y Descarga para $\alpha = 180^\circ$.
 Comparación para Barco 250 [TEU] y 2.000 [TEU].

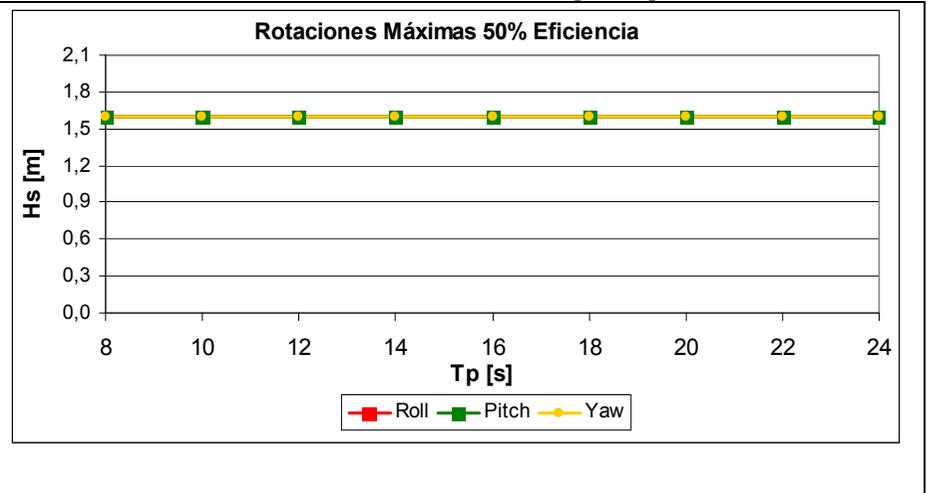
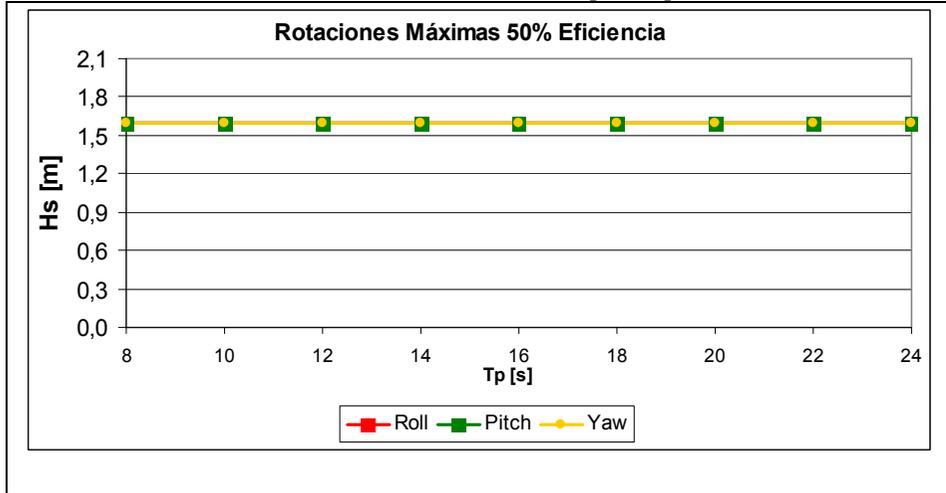
$\alpha = 180^\circ$ Barco 250 [TEU]

$\alpha = 180^\circ$ Barco 2.000 [TEU]



$\alpha = 180^\circ$ Barco 250 [TEU]

$\alpha = 180^\circ$ Barco 2.000 [TEU]



CAPÍTULO VIII

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En todas las etapas de estudio para el diseño de obras portuarias es imprescindible contar con un estudio acabado del clima de oleaje imperante en la zona de emplazamiento de las obras. Con los resultados obtenidos en este trabajo se mostró lo sensible que son las respuestas de las embarcaciones a las condiciones de oleaje, lo que demuestra la necesidad de contar con estudios detallados y de precisión.

De todos los análisis realizados, se concluye que es técnica y económicamente conveniente disponer los terminales de tal forma que la dirección del oleaje incidente sea apropiado. Este tipo de consideraciones permitiría disminuir la respuesta del barco para cada uno de los grados de libertad de las embarcaciones, lo cual se traduce en un aumento del tiempo efectivo de operación del puerto.

Como se desprende de los resultados obtenidos, para los movimientos horizontales (*Surge*, *Sway* y *Yaw*), los desplazamientos máximos bajo condiciones de diseño $H_s = 0,5$ m y con ángulo de incidencia fuera del rango $180^\circ \pm 15^\circ$, sobrepasan los límites impuestos por el PIANC. De este modo, vemos que las restricciones operacionales de los terminales portuarios abiertos están dadas por este tipo de movimientos. Por este motivo, como se mencionó anteriormente, la disposición del terminal portuario debe estar necesariamente dentro de este pequeño rango de ángulos de incidencia.

A las condiciones mencionadas debe sumarse un sistema de defensa y amarre eficientes, los cuales en los casos estudiados no fueron suficientes para evitar desplazamientos de gran magnitud. Con el fin de obtener un downtime operacional bajo, lo que permitiría un aumento de la viabilidad del proyecto en términos técnicos y económicos, será necesaria la evaluación de nuevas configuraciones de amarre en estudios posteriores, junto con diversos pre-tensados y distintos tipos de defensa portuaria, con el fin de determinar que configuración permite disminuir las magnitudes de las diversas oscilaciones obtenidas.

Para el caso de los movimientos verticales, las oscilaciones máximas obtenidas para condiciones de oleaje incidente $H_s = 0,5$ m estuvieron bajo las restricciones de operación propuestas por el PIANC, para la mayoría de los casos. Sólo se presentaron oscilaciones fuera de rango en el caso del grado de libertad *Roll*, y para ángulos de incidencia ortogonales a la embarcación, o cercanos a éstos.

Las curvas de movimiento fueron desarrolladas para las condiciones de oleaje propuesta por la OCAD y la ROM y comparadas con las propuestas por el PIANC; del mismo modo, aquellas desarrolladas para obtener las condiciones restrictivas de operación, fueron realizadas comparando los desplazamientos obtenidos de las modelaciones, con los criterios propuestos por esta última institución. Aunque la cantidad de casos estudiados son bastantes, éstos sólo se refieren a reacciones frente a condiciones de oleaje y no frente a condiciones más globales, como corrientes o vientos, lo cual podría generar cierto grado de sesgo en los resultados obtenidos. Sin embargo, se puede concluir que para los movimientos horizontales estas restricciones se ajustan a criterio, puesto que las oscilaciones frente a variaciones mínimas de oleaje generan cambios radicales en las

oscilaciones de cada una de las embarcaciones. Por el contrario, para los movimientos verticales, las restricciones propuestas por el PIANC generalmente están por sobre los desplazamientos obtenidos en cada una de las modelaciones.

En la estimación de magnitudes máximas asociadas a cada uno de los grados de libertad de movimiento, se consideró la diferencia entre los peak globales máximos y mínimos, lo que conlleva un error en el análisis de los criterios límites de operación según el PIANC, el cual estipula que estas restricciones corresponde a la diferencia máxima entre un peak negativo y un positivo dados en forma consecutiva. Al igual que para los anteriores análisis mencionados, esto debe realizarse considerando la serie de tiempo completa y no sólo los parámetros estadísticos, lo que conlleva necesariamente la utilización de mayores recursos tanto humanos como tecnológicos que sean capaces de procesar y entender el nivel de información entregada para cada una de estas series.

Para realizar operaciones en terminales portuarios con embarcaciones porta-contenedores menores, es imprescindible contar con obras de abrigo de costa, como son molos de abrigo o espigones, frente a oleaje caracterizado por ángulos de incidencia variable. Este tipo de estructura generaría una disminución considerable en la altura del oleaje incidente, permitiendo un tiempo de operación considerablemente mayor. A pesar de significar inversiones importantes, la construcción de este tipo de estructuras significa en el largo plazo un incremento en las garantías de operación para todo tipo de embarcaciones, con su consiguiente aumento en los ingresos para las empresas que controlan los terminales portuarios.

Sin duda TERMSIM II es una herramienta poderosa y útil en el desarrollo de este tipo de estudios, permitiendo modelar situaciones que en la vida real llevaría tiempos prolongados y costos económicos considerables. Sin embargo es de gran utilidad validar este tipo de resultados con información de terreno.

Como última recomendación, y desde un punto de vista personal, creo sumamente necesario desarrollar el área de Ingeniería Marítima a cabalidad en nuestra universidad, en complemento al valioso aporte que ha significado hasta el momento el curso de Hidráulica Marítima. Somos una universidad que siempre ha estado en la vanguardia del conocimiento, y no podemos quedarnos atrás en la formación de ingenieros de primera línea en un tema de desarrollo tan vital para el crecimiento económico de nuestro país. Es necesaria la introducción de ramos de obras civiles portuarias, logística de transporte, estudio de costas, etc., lo cual generará sin duda un valor agregado en los profesionales del mañana.

CAPÍTULO IX

9. BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

- [1] Journée, J.M.J. and Massie, W.W., Offshore Hydromechanics, First edition, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands, 2001.
- [2] Dean, Robert G., R. Dalrymple, Water wave mechanics for engineers and scientist, Vol. 2, 1991.
- [3] PIANC, Criteria for movements of Moored Ships in Harbours, a Practical Guide, Report of Working group n ° 24 of the Permanent Technical Committee II, Supplement to Bulletin n ° 88, 1995.
- [4] TERMSIM II, User's Guide, Maritime Research Institute Netherlands, 2006.
- [5] Wuisman, Wieke, Hydrodynamics of a LNG Carrier Behind a Detached Breakwater, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands, 2005.
- [6] AA.VV, ROM 3.1-99. Proyecto de la Configuración Marítima de los Puertos; Canales de Acceso y Áreas de Flotación, Puertos del Estado, Madrid, 2000.
- [7] The Technical Standards and Commentaries for Port and Harbour Facilities in Japan, Overseas Coastal Area Development (OCAD), Institute of Japan,, 1999.
- [8] Briso, Carlos A., Calibración y Ensayos de Defensa Costera en Canal de Olas Bidimensional, Memoria para optar al grado de Ingeniero Civil, 2003
- [9] Macdonel, Guillermo; Pindter, Julio; Horrejón de la Torre, Luis, Ingeniería Marítima y Portuaria, Alfaomega, 1999.
- [10] Mills, Ray, A Glimpse at the Future Expansion of the Porto f Durban, Southern Africa's Largest Container Port, SNC-Lavalin Inc., Halifax Canada, 2002.
- [11] Condiciones de diseño y Formas de obras de atraque, Obras Marítimas y Costeras, Escola Técnica Superior d'Enginyers de Camins, Canals i Ports, 2004.
- [12] SHOA, Instrucciones Oceanográficas N° 1 "especificaciones Técnicas para Mediciones y Análisis Oceanográficos". Pub. 3201, 3° Edición, 2005

