

ESTUDIO HIDRODINÁMICO, LÍMITES OPERATIVOS Y DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE "WORKABILITY" EN UN BUQUE OSV

Edna D. Rosas Huerta^{1,2}, José Hernández Hernández^{1,2}, Cristian M. Salazar Domínguez², Gustavo E. Iturbe Rosas³ Y Agustín L. Herrera May^{2,4}.

¹ Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias Navales, Universidad Veracruzana, Calzada Ruiz Cortines 455, Boca del Río, Veracruz 94294, México; josehernandez02@uv.mx; edrosas@uv.mx

² Maestría en Ingeniería Aplicada, Facultad de Ingeniería de la Construcción y el Hábitat, Universidad Veracruzana, Calzada Ruiz Cortines 455, Boca del Río, Veracruz 94294, México; cristian.salazaruv@hotmail.com

³ Nautical Mexico Consulting & Services, Jardines de Mocambo, Boca del Río, Veracruz 94294, Mexico; giturbe@nauticalmx.com

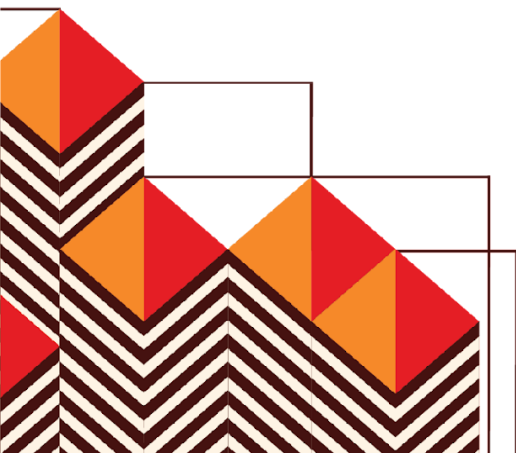
⁴ Micro and Nanotechnology Research Center, Universidad Veracruzana, Calzada Ruiz Cortines 455, Boca del Río, Veracruz 94294, México; leherrera@uv.mx

RESUMEN

Las operaciones marítimas en alta mar dependen de las condiciones meteorológicas. Uno de los factores más importantes para las operaciones marinas son las condiciones meteorológicas que prevalecerán durante las operaciones, cada operación tiene límites en cuanto a la altura del oleaje y mareas así como velocidad de las corrientes y los vientos para sus distintos escenarios de operación. Los límites operacionales del buque se establecen en función de las características de los principales equipos de a bordo y de la respuesta del buque, que mantienen un funcionamiento continuo. En este trabajo, se obtuvieron los tiempos de operación o *Workability* de una embarcación de apoyo en alta mar tipo OSV (Offshore Support Vessels) en el Golfo de México (GOM), considerando datos metoceánicos de oleaje y vientos en la ubicación del buque y los límites operativos establecidos por los equipos para el servicio principal en operación continua de la embarcación, como son el de Posicionamiento Dinámico, la Grúa de cubierta y la escala de seis grados de libertad. Se consideró que el buque puede prestar servicios a la plataforma fija en dos localizaciones, Sur y Oeste. Se determinaron los movimientos hidrodinámicos de respuesta del buque para cada estado de mar de interés, comparándolos con los límites operativos identificando así los valores favorables y desfavorables que contribuyen al *workability* de la embarcación definiendo los tiempos de operación en los meses de enero, febrero, marzo y abril del 2019. El

porcentaje de *workability* se determinó identificando las frecuencias con condiciones que resultaron favorables.

Palabras clave: tiempos de operación; límite operativo; datos metoceanicos; buques de apoyo.



1- INTRODUCCIÓN

Los buques de apoyo en alta mar (OSVs) se utilizan habitualmente en el Golfo de México para la exploración, perforación y producción en aguas poco profundas. En la industria del petróleo y el gas en alta mar se utilizan diferentes OSVs, como buques de suministro de plataformas (PSV), embarcaciones para la tripulación (CB), buques de suministro de remolque para la manipulación de anclas (AHTS), remolcadores para la manipulación de anclas, minibuques de suministro (MSV), buques de suministro polivalentes (MPSV), buques de estimulación de pozos (WSV) y buques de inspección, mantenimiento y reparación (IMR). Todo el equipo, los productos químicos, el combustible, los alimentos, el personal y el material utilizados en las operaciones en alta mar son transportados por los OSV [1]. Estas operaciones en alta mar se ven afectadas por los movimientos de los OSV causados por las condiciones del entorno marino, como las cargas de viento, el oleaje y la marea. El equipo de operación a bordo de los OSVs tiene un papel importante en las actividades offshore y puede ser utilizado bajo ciertos límites de operación.

Hong, Lim, Moon y Sim [2] presentaron un trabajo denominado "*Operation Management System of Heavy Lift Crane Vessel*", que incluye un sistema de previsión meteorológica de 72 horas. Su sistema tiene en cuenta el viento y la presión atmosférica para simular el oleaje en la zona de operaciones. Otro estudio relacionado es el de "*Operability analysis of offshore crane vessel operations*" presentado por Mazzuco y Nishimoto [3], que muestran el análisis operacional desde un punto de vista comparativo entre dos tipos de buques. La capacidad de trabajo de la grúa de alta mar se centra en la "condición de péndulo" cuando el peso está suspendido por el cable de izaje. Van del Wal y De Boer [4] reportó en su trabajo "*Downtime Analysis Techniques*", dos métodos diferentes para determinar el tiempo de inactividad. El primer método es una predicción del tiempo de inactividad sobre la base de diagramas de dispersión de olas. El segundo método es menos habitual, pero da lugar a una estimación del tiempo de inactividad mucho más fiable: la

determinación de la cantidad de tiempo en estado operable sobre la base de simulaciones de escenarios.

Para la planificación eficaz de las actividades de la industria petrolera en alta mar que involucren embarcaciones es necesario disponer de estadísticas sobre las condiciones del mar, incluidos los datos de la altura y el periodo de pico de las olas [5]. De este modo, esta selección puede incluir a los OSVs que tienen la mejor operación continua [6]. Para ello, se compara la respuesta del movimiento del buque con respecto a los límites operativos para lograr el porcentaje total de *workability* evaluado dentro del diagrama de dispersión de olas.

Los requisitos tradicionales de funcionamiento de los OSVs consideran los factores del medio ambiente de las velocidades limitantes del viento, altura de ola y corriente como un parámetro absoluto para determinar si los OSVs pueden operar alrededor de un aparejo fijo. Sin embargo, este parámetro no es suficiente para limitar el funcionamiento de los OSVs. El diseño avanzado de este tipo de embarcación permite un mejor comportamiento marino en condiciones severas del mar, comparado con otros buques monocasco de tamaño similar.

Para superar este problema, proponemos una metodología para determinar el porcentaje de *workability* por mes, de los OSVs alrededor de una plataforma fija en el Golfo de México. La operación continua estará delimitada por los servicios principales de sus equipos de Posicionamiento Dinámico, Grúa de Cubierta y Escala para acceso de personal a plataforma. Esta metodología considera una operación típica de OSV y criterios metoceanicos (oleaje y carga viento). Se aplica a un OSV con dos escenarios operación (la grúa más pasarela y solo la pasarela) y criterios meteorológicos (oleaje y carga viento) para cada escenario. Se desarrolla el modelo electrónico de la embarcación con el plano de líneas y los planos de arreglo general de la embarcación en el módulo del software Maxsurf Modeler Advanced, el cual se compara con los resultados que arroja el libro de estabilidad de la embarcación para verificar la exactitud de las formas modeladas. Este modelo se utiliza, para determinar los RAOs (Operador de Amplitud de respuesta) para cada combinación de altura significativa de la Ola (H_s) y periodo pico de la ola (T_p)

en los 360° de incidencia en intervalos de 30° y movimientos en 6 grados de libertad. Se definen los límites operativos establecidos por los equipos para el servicio principal en operación continua de la embarcación.

Con estas condiciones, se determina un alto porcentaje (90%) de *workability* del OSV en los meses de enero, febrero, marzo y abril. Así, este OSV es adecuado para realizar las operaciones en los dos escenarios de estudio con alto índice de *workability* por mes. Además, la metodología propuesta puede estimar el periodo de tiempo inactividad operacional del OSV, considerando sus escenarios de operación.

2- MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología propuesta estima el porcentaje de días que la OSV opera junto a una plataforma fija. La plataforma fija tiene dos ubicaciones diferentes (Fig. 1) en las que se puede ejecutar la operación. Este estudio se centra únicamente en los OSV, se seleccionan dos escenarios como operación típica y se aplican determinados criterios meteorológicos a cada escenario.

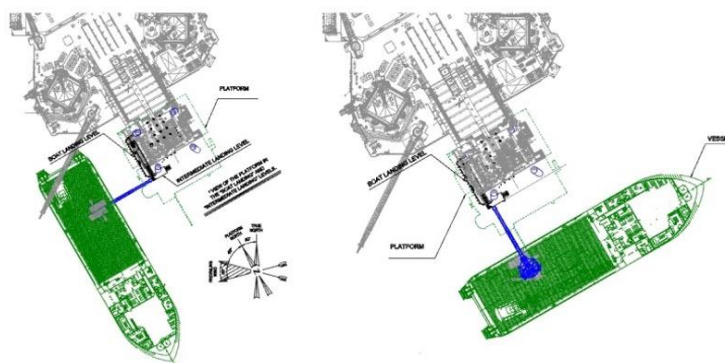


Figura 1. Vista superior de la plataforma y del funcionamiento de la zona del buque.

Para la evaluación de la viabilidad, en función de la información disponible sobre las olas, su ubicación, los límites operativos y las respuestas del movimiento del buque, se selecciona el método de los diagramas de dispersión de las olas.

Las olas son condiciones ambientales que afectan principalmente a los movimientos del buque, pero todos los factores influyen en los movimientos dinámicos del buque durante las operaciones en alta mar. La respuesta del buque y su capacidad para afrontarla dependen de la magnitud de las olas y son las que más influyen en la capacidad de trabajo.

El tiempo de espera para iniciar las operaciones de los buques en las instalaciones del emplazamiento y la duración del servicio dependen de las condiciones meteorológicas inciertas.

Las normas de seguridad actuales exigen el cese de las operaciones de los buques en las instalaciones cuando la altura significativa de la ola (H_s), definida como la media del tercio más alto de las olas por período de observación, supera los 3.5 metros o cuando la velocidad del viento (W_{sp}) es superior a 40 nudos [7]).

En el presente estudio, se evalúa un OSV para operar en el GOM, teniendo en cuenta las condiciones meteoceánicas en la zona. El OSV operará junto a una plataforma fija con el fin de transferir personal a través de una pasarela y material utilizando una grúa de brazo. Se utiliza la técnica de predicción de *workability* basada en el diagrama de dispersión, mostrada en la figura 2.

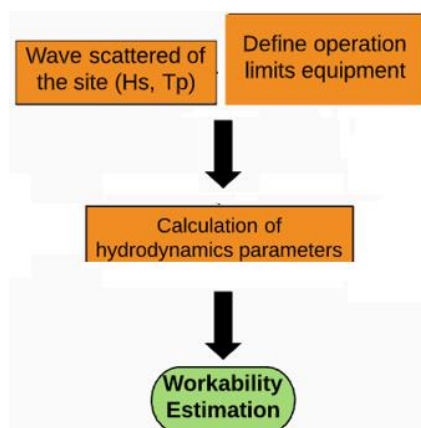
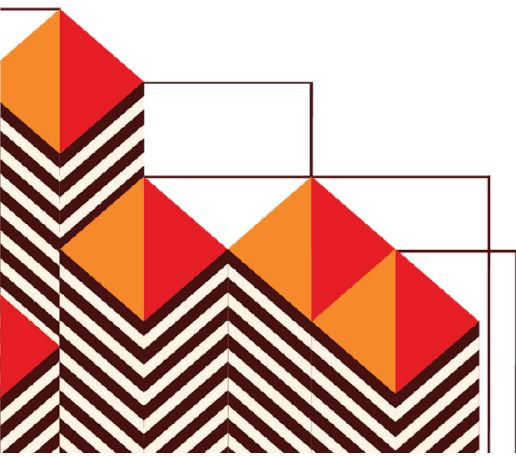


Figura 2. Evaluación de la viabilidad del diagrama de flujo.

Diagrama de dispersión de olas del sitio de operación.

Esta tabla es una distribución a largo plazo de las alturas y periodos de las olas para un lugar determinado en el que operará el buque [8]. Las variaciones a largo plazo de las olas pueden



describirse mediante un conjunto de estados del mar caracterizados por los parámetros del espectro de olas. También define las regiones operables y no operables, y expresa la probabilidad de ocurrencia a largo plazo de cada región sumando las correspondientes probabilidades conjuntas de la altura significativa de la Ola (H_s) y el periodo promedio de la ola (T_z) (Fig.3).

Hs (m)	Tz (s)											Sum Tz
	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14		
Calm												6.8
0.5	4.9	1.6	1.3	1.1	0.2	1.6	0.9	1.6	1.6	1.1		16.1
1.0	10.4	4.8	2.2	1.1	0.9	1.5	0.5	2.0	1.6	2.6		27.7
1.5	4.6	2.4	1.8	2.0	0.4	0.7	0.7	0.2	1.3	0.7		14.8
2.0	3.3	3.1	1.8	2.0	0.4	0.7	0.7	0.5	-	1.8		14.5
2.5	2.2	2.4	1.5	2.2	0.4	0.9	-	0.2	0.2	0.4		10.3
3.0	0.5	0.2	1.1	1.8	0.5	0.2	0.2	-	-	0.2		4.8
3.5	0.4	-	-	1.3	-	0.2	-	-	-	-		1.8
4.0	0.5	0.2	0.4	0.2	-	0.5	0.2	-	-	-		2.0
4.5	0.4	-	0.2	0.4	0.2	0.2	-	-	-	-		1.3
Sum Hs	27.3	14.7	10.3	12.1	2.9	6.6	3.3	4.6	4.8	6.8		100.

Figura 3. Probabilidad conjunta de los estados del mar, con limitaciones de operación [9].

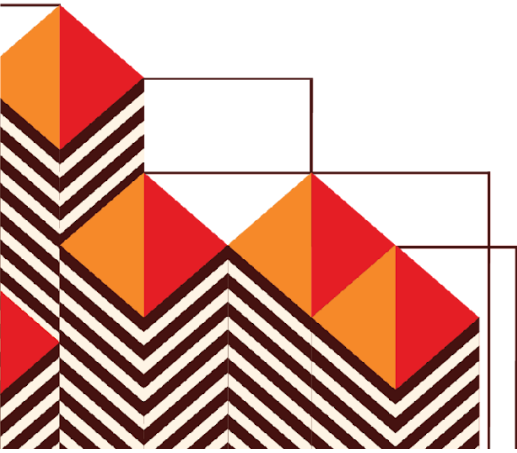
Definición de los límites operativos.

Los límites operativos es la combinación de valores de datos metoceánicos en donde la operación de algún equipo no puede llevarse a cabo de manera segura. Los límites operativos de los equipos para el servicio principal en la operación continua del buque están definidos, como el Posicionamiento Dinámico, la Grúa en cubierta y la Pasarela de seis grados de libertad para el traslado del personal instalado en cubierta.

Hay otros factores que pueden aumentar la duración de la operación, por ejemplo, el error humano, pero estos están fuera de consideración en este documento.

Tabla 1. Límite operativo de los equipos a evaluar.

Grúa	Escala	DP2
Meteorológico	Meteorológico	Meteorológico
Escora 5° y asiento 2°	Hs = < 3 m	Hs > 3 m



En base a lo anterior, se han definido dos escenarios operativos en funcionamiento continuo considerando la combinación de equipos mostradas en la siguiente tabla.

Tabla 2. Escenario operativo de los equipos a evaluar.

Caso 1 Grúa, escala y DP2	Caso 2 Escala y DP2
---------------------------	---------------------

Cálculo de los parámetros hidrodinámicos.

Se considera que la embarcación podrá mantener operación continua en dos ubicaciones de la plataforma fija, por lo que para comparar los resultados de los movimientos de la embarcación por la dirección de incidencia de oleaje, se hace la corrección de dicha dirección del oleaje con respecto a la embarcación considerando el norte verdadero de las dos ubicaciones. La corrección de las direcciones de los resultados del movimiento del buque con respecto a la plataforma fija y la zona operativa se muestra a continuación (Figura 4).

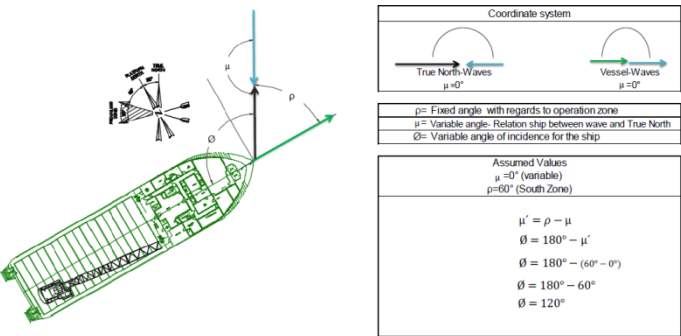


Figura 4. Vista de la posición sur de la plataforma fija.

El Maxsurf Motions es un programa para análisis de comportamiento en la mar en la suite del software Maxsurf. Utiliza el archivo de geometría del Maxsurf para calcular la respuesta de la embarcación a las condiciones definidas por el usuario. El método usado es un análisis hidrodinámico de primer orden de difracción/radiación en donde se usa el método de frontera (BEM Boundary Element Method). El método genera sus elementos de análisis sobre la geometría de las superficies NURBS (B-splines racionales no-uniformes) en el archivo de diseño de Maxsurf (Figura 5). Este método genera los operadores de amplitud de respuesta (RAOs) para los seis grados

de libertad: avance, deriva, arfada, balanceo, cabeceo y guiñada. El desfase entre los movimientos de la embarcación y la ola con relación al centro de gravedad está dado en grados.



Figura 5. Modelo utilizado en el análisis hidrodinámico.

El centro de gravedad vertical de la embarcación fue recalculado, considerando la condición del Libro de Estabilidad, cambiando ciertos parámetros de la grúa como son, peso a izar de 14 Ton y radio de operación de 17.6 m de acuerdo a las operaciones costa fuera con la grúa y considerando un calado de 7.5 m.

Tanto el espectro JONSWAP como el espectro Pierson-Moskovitz, son utilizados en mares completamente desarrollados, pero en este caso para el análisis de espectro de oleaje se utilizó el primero. La fórmula del espectro viene dada por la (Ecuación 1):

$$S_{PM}(\omega) = \left(\frac{5}{16} \right) (H_s^2) (\omega_p^4) (\omega^{-5}) \cdot \exp \left(-\frac{5}{4} \left(\frac{\omega}{\omega_p} \right)^4 \right) \quad (1)$$

$\omega_p = 2\pi/T_p$ es la frecuencia del pico espectral angular.

H_s = altura significativa de la ola (m).

T_p = periodo pico (s).

Estimación del *workability*.

Como último paso, sus RAO (Operadores de Amplitud de Respuesta; por sus siglas en inglés), que describen la respuesta de la embarcación, sujeta a un oleaje de amplitud unitaria, en el dominio de la frecuencia. Su obtención permitió realizar la estimación de la respuesta de la embarcación ante oleaje de acuerdo con las condiciones ambientales del Golfo de México (Figura 6).

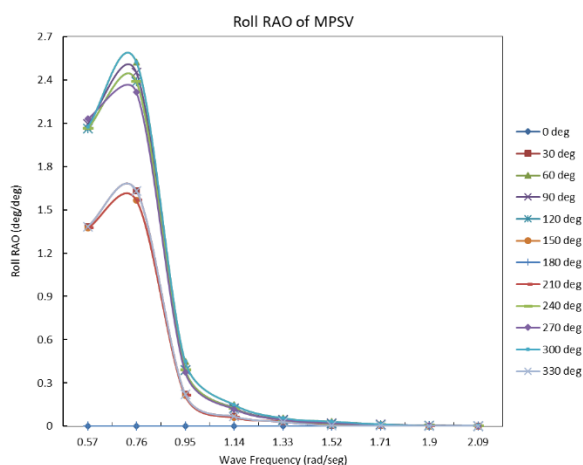


Figura 6. RAO en balanceo con diferentes ángulos de incidencia del oleaje.

La embarcación va adquirir un ángulo de escora por la acción del viento, el cual ha sido calculado considerando un viento de 22m/s con una incidencia a 90° que es la condición más severa, resultando un ángulo de escora que ha sido considerado en el análisis de RAO.

3- RESULTADOS

Los resultados de cada simulación de movimientos del OSV se han calculado en función de la zona de operación, y el mes, reflejando el porcentaje de *workability* en la tabla 3 y en la tabla 4.

Tabla 3. Porcentaje de *Workability* en el Escenario de operación 1.

Workability		
Zona Sur (%)	Zona Oeste (%)	Mes
88.39	86.48	enero
88.78	87.06	febrero
89.99	88.38	marzo
92.82	91.61	abril

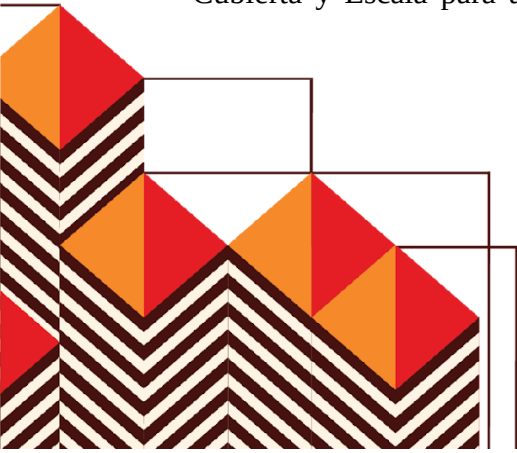
Tabla 4. Porcentaje de *Workability* en el Escenario de operación 2.

Workability		
Zona Sur (%)	Zona Oeste (%)	Mes
88.39	88.41	enero
88.78	88.78	febrero
89.99	88.78	marzo
92.82	92.82	abril

Las tablas 3 y 4 representan el porcentaje de *workability* del buque para el propósito deseado. El buque tiene un mayor porcentaje de trabajabilidad en abril similar en los dos escenarios de operación. La zona de operación seleccionada en la plataforma fija en abril no tiene impacto en el resultado. Esto podría plantear dudas sobre si es realmente conveniente para una plataforma fija tener dos puntos de operación para el traslado de personal y materiales. Sin embargo, entre enero y marzo hay diferencias significativas del 1% al 2%. En ambos escenarios de operación, se espera que la zona sur sea la más factible para el funcionamiento continuo.

4- DISCUSIÓN

El actual proyecto tuvo como objetivo principal obtener el porcentaje de *workability* por mes en un buque OSV, que se posicionará en el lado oeste y en el lado sur de la plataforma fija, para condiciones ambientales del Golfo de México de oleaje y viento. La operación continua estará delimitada por los servicios principales de sus equipos de Posicionamiento Dinámico, Grúa de Cubierta y Escala para acceso de personal a plataforma. El trabajo establecido se realizó con



modelos numéricos. Con el modelo electrónico de la embarcación y el uso de software especializado se realizó la estimación de los RAOs, también conocidos como funciones de transferencia, para cada combinación de Hs-Tp en los 360° de incidencia en intervalos de 30° y movimientos en 6 grados de libertad. Su obtención permitió realizar la estimación de la respuesta de la embarcación de acuerdo con las condiciones ambientales del Golfo de México. Las amplitudes significantes de los movimientos estimados de la embarcación se comparan con los límites operativos identificando así los valores favorables y desfavorables que contribuyen al *workability* de la embarcación

Este trabajo se desarrolló con la finalidad de disponer en el Golfo de México de una metodología capaz de determinar el porcentaje de *workability*, considerando el área de localización más conveniente de operación de la embarcación a una plataforma fija, si la seguridad disponible es mayor que la que se exige, entonces, el empleo de embarcación será adecuado; de lo contrario, la embarcación y su entorno estarían en una situación muy vulnerable. Además, los resultados obtenidos serán una herramienta para decidir rentar o no la OSV.

5- CONCLUSIONES

Se presentó un procedimiento para la determinación del índice de *workability* de un OSV basado en el dominio de la frecuencia de las olas. El modelo digital para el OSV desarrollado en el software se validó para el estudio hidrodinámico comparándolo con el cuaderno de estabilidad del buque proporcionado. Se ha determinado el RAO del buque para cada altura y frecuencia de ola considerando un ángulo de incidencia del viento de 90° con respecto al buque. Los límites operativos del buque se han determinado de acuerdo con las características de los equipos de a bordo esenciales para el funcionamiento continuo del buque.

La corrección del ángulo de la dirección del oleaje se ha realizado con respecto al ángulo del buque y al norte verdadero para cada zona de operación. Es posible determinar el índice de *workability* con la disponibilidad de datos metoceanicos y podría evaluarse una predicción más precisa si se

dispone de datos mensuales de la altura significativa de las olas (H_s) y del período pico (T_p). Los porcentajes de *workability* del OSV resultantes para los escenarios operativos caso 1 y 2, es decir, el modo 1 Grúa, Escala y DP, el modo 2 Escala y DP, están dentro del rango del 90%.

6- REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Kaiser, M. J.; Snyder, B. F. Economic impacts of the offshore supply vessel shipbuilding market in the Gulf of Mexico. *Maritime Economics Logistics* 2013, 15, 256–287. <https://doi.org/10.1057/mel.2013.4>
 2. Hong, Jin W., Lim, Dae U., Moon, Joong S. and Sim, Woo S. “Operation Management System of Heavy Lift Crane Vessel”. *SNAME Maritime Convention*. Washington, 2016.
 3. Mazzuco, J. C.; Nishimoto, K. Operability Analysis of Offshore Crane Vessel Operations. *The Second International Offshore and Polar Engineering Conference*. California, 1992.
 4. Van der Wal, Remmelt J. and De Boer, G. “Downtime Analysis Techniques for Complex Offshore and Dredging Operations.” *The 23rd International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*. Canada, 2004.
 5. Graham, C. The Parameterisation and prediction of wave height and wind speed persistence statistics for oil industry operational planning purposes. *Coastal Engineering* 1982, 6, 303–329.
 6. Kondratenko, A.A.; Tarovik, O.V. Analysis of the impact of arctic-related factors on offshore support vessels design and fleet composition performance. *Ocean Engineering* 2020, 203, 107201. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107201>
 7. Maisiuk, Y. and Gribkovskaia, I. “Fleet Sizing for Offshore Supply Vessels with Stochastic Sailing and Service Times”. *Procedia Computer Science*, 31 (2014): 939–948.
 8. Mazzuco, Joao C. and Nishimoto, K. “Operability Analysis of Offshore Crane Vessel Operations”. *The Second International Offshore and Polar Engineering Conference*. California, 1992.
 9. DNV-RP-H103, *Modelling and Analysis of Marine Operations*, Chapter 8 – Weather Criteria and Availability Analysis, Det Norske Veritas, 2011, Pags. 122–129.
- Scheu, Matti N., Kaufer, D., Schwarzkopf, Marie A. and Kolios, A. “Workability on Offshore Wind Turbines—a Comparative Study of Fixed-bottom and Floating Applications.” *The 28th International Ocean and Polar Engineering Conference*. Japan, 2018.