



Universidad Veracruzana

Facultad de Ingeniería de la Construcción y el Hábitat.

Región Veracruz

Maestría en Ingeniería Aplicada.

## Optimización de la respuesta hidrodinámica en balanceo de una plataforma Spar.

Tesis para obtener el grado de Maestro en Ingeniería Aplicada.

Presenta:

**Ing. José Ángel De Jesús Rodríguez Morales.**

Director:

Dr. José Hernández Hernández.

13 de Diciembre de 2023

“Lis de Veracruz: Arte, Ciencia, Luz”





# Universidad Veracruzana

Facultad de Ingeniería de la Construcción y el Hábitat  
Región Veracruz

Maestría en Ingeniería Aplicada.

*Optimización de la respuesta hidrodinámica de balanceo de una  
plataforma tipo Spar.*

Tesis para obtener el grado de Maestro en  
Ingeniería Aplicada.

Presenta:

Ing. José Ángel De Jesús Rodríguez Morales.

Director:

Dr. José Hernández Hernández.

Co-Director:

Dr. Federico Barranco Cicilia

Revisor

Dr. Agustín Leobardo Herrera May

M.I.A. Edna Dolores Rosas Huerta

Dr. Mariano Azzur Hernández Contreras

Mtra. Mariana Silva Ortega

Dr. María Elena Tejeda Del Cueto.



## **Dedicatoria o agradecimientos**

Este trabajo se lo dedico a mi familia quienes a lo largo de estos años me han apoyado para salir victorioso de cada adversidad que la vida le ha puesto adelante, también sobre lo mucho que amo a cada miembro de la familia y el gran orgullo que les tengo.

También quiero agradecer en especial al Dr. José Hernández Hernández y a al Dr. Federico Barranco Cicilia, por su apoyo, enseñanza y brindando grandes consejos para poder desarrollar mis proyectos académicos.

Agradezco al Dr. Agustín Leobardo Herrera May por sus enseñanzas y oportunidad de poder realizar mi estudio de maestría en excelente ambiente académico y profesional, al motivarnos todos los días a esforzarnos y buscar nuevos estudios para seguir desarrollando nuevos conocimientos y competencias.

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la oportunidad de recibir una beca para poder continuar con mis estudios de maestría.



# Índice

<b>Dedicatoria o agradecimientos</b>	<b>1</b>
<b>Índice</b>	<b>3</b>
<b>Índice de figuras.</b>	<b>5</b>
<b>Índice de tablas</b>	<b>6</b>
<b>Índice de ecuaciones</b>	<b>7</b>
<b>Resumen</b>	<b>3</b>
<b>Abstract.</b>	<b>4</b>
<b>Planteamiento del problema.</b>	<b>3</b>
<b>Objetivos.</b>	<b>3</b>
Objetivo general.	3
Objetivos específicos.	3
<b>Justificación.</b>	<b>3</b>
<b>Hipótesis.</b>	<b>3</b>
<b>1. Introducción.</b>	<b>3</b>
1.1. Importancia de los sistemas flotantes de producción.	3
1.2. Desafíos de aguas profundas.	5
1.3. Sistemas flotantes en el mar.	6
1.4. Características de los sistemas flotantes.	6
<b>2. Marco contextual</b>	<b>3</b>
2.1. Características de las plataformas tipo Spar.	3
2.1.1. Diferencia entre las plataformas Spars.	4
2.2. Teoría de hidrodinámica.	6
2.2.1. Teoría de oleaje.	6
2.2.2. Ecuación de Morison y fuerza de sustentación en un cuerpo basado en columnas	7
2.2.3. Modelo compuesto.	9
2.2.4. Líneas de amarre.	10
2.2.5. RAOs.	11
2.2.6. Espectro de oleaje.	12
2.2.7. Espectro de respuesta.	13
<b>3. Modelación de la plataforma Spar tipo armadura y bases de análisis.</b>	<b>3</b>

<b>3.1. Dimensiones y características de la plataforma.</b>	<b>3</b>
<b>3.2. Modelado.</b>	<b>4</b>
<b>3.3. Identificación y análisis de cargas del sistema flotante.</b>	<b>5</b>
3.3.1. Análisis de cargas ambientales.	6
3.3.2. Oleaje.	7
3.3.3. Rigidez de la línea de amarre.	9
<b>4. Análisis.</b>	<b>3</b>
<b>4.1. Mallado.</b>	<b>3</b>
<b>4.2. Análisis hidrodinámico.</b>	<b>5</b>
4.2.1. Introducción de los efectos viscosos	5
4.2.2. Introducción de líneas de amarre	6
<b>4.2.3. Configuración del análisis hidrodinámico.</b>	<b>7</b>
<b>4.3. Respuesta hidrodinámica en flotación libre.</b>	<b>10</b>
4.3.1 RAOs de modelo de panel	11
4.3.2 RAOs de modelo Morison	14
4.3.3 RAOs de modelo compuesto	17
<b>4.4. Respuesta hidrodinámica con líneas de amarre.</b>	<b>20</b>
<b>4.5. Espectro de respuesta.</b>	<b>23</b>
4.5.1 Espectro de respuesta en flotación libre	24
4.5.2 Espectro de respuesta con líneas de amarre.	26
<b>5. Resultados del análisis hidrodinámico.</b>	<b>3</b>
<b>5.1. Resultados con flotación libre</b>	<b>3</b>
<b>5.2. Resultados con líneas de amarre.</b>	<b>6</b>
5.2.1. Resultados de los espectros de respuesta	9
5.2.2. Movimientos de respuesta máxima	12
<b>5.3. Comparación del tiempo y recurso computacional</b>	<b>13</b>
<b>6. Conclusiones.</b>	<b>3</b>
<b>6.1. Trabajos futuros.</b>	<b>4</b>
<b>Referencias</b>	<b>3</b>



# Índice de figuras.

Figura 1.1 Demanda diaria de petróleo crudo a nivel mundial de 2006 a 2020 (en millones de barriles).	3
Figura 1.2 Progreso mundial de las capacidades de perforación y producción costa afuera.	4
Figura 1.3 Tipos de sistemas de producción para aguas profundas.	5
Figura 1.4 Clasificación de aguas profundidad en México.	5
Figura 1.5 Sistemas flotantes de producción.	7
Figura 1.6 Capacidad de producción del Topside vs tirante de agua.	8
Figura 1.7 Grados de libertad del cuerpo rígido de un sistema flotante.	9
Figura 2.1 Partes básicas de una plataforma "Spar".	4
Figura 2.2 Diferencias entre plataformas Spar.	5
Figura 2.3 Características de la línea de amarre.	11
Figura 3.1 Modelo de la plataforma Spar armadura	4
Figura 3.2 Modelado del casco de la plataforma spar: a) modelo de panel, b) modelo morison y c) modelo compuesto.	4
Figura 3.3 Superficie mojada del modelo de la plataforma Spar.	5
Figura 3.4 Cargas que actúan sobre una plataforma Spar.	6
Figura 3.5 Líneas de amarre en cantenaria y taut leg.	9
Figura 3.6 Configuración del sistema de amarre.	10
Figura 3.7 Representación del sistema de amarre a estudiar.	10
Figura 4.1 Propiedad de malla a aplicar al modelo de la Spar.	3
Figura 4.2 Creación de una actividad para el mallado.	3
Figura 4.3 Selección del monitor de actividad.	4
Figura 4.4 Monitor de actividad	4
Figura 4.5 Mallado de los modelos de la plataforma.	5
Figura 4.6 Configuraciones de modelos para el asistente Wadam.	7
Figura 4.7 Definición de la dirección del oleaje.	8
Figura 4.8 Definición de las frecuencias de los trenes de oleaje regular para el análisis de difracción.	8
Figura 4.9 Definición de los parámetros del agua, aire y tirante de agua del sitio de la localización de la plataforma.	9
Figura 4.10 Definición del modelo Morison.	9
Figura 4.11 Visualización de los modelos de elementos finitos: a) modelo de panel, b) modelo morison y c) modelo compuesto.	9
Figura 4.12 Definición de las masas del modelo.	10
Figura 4.13 Visualización de los modelos de la plataforma a su máximo calado.	10
Figura 4.14 Definiendo unidades de los ejes.	11
Figura 4.15 RAOs de arfada del modelo de panel	11
Figura 4.16 RAOs de balanceo del modelo de panel.	12
Figura 4.17 RAOs de cabeceo del modelo de panel.	13
Figura 4.18 Raos del modelo de panel a un ángulo de 90°.	14
Figura 4.19 RAOs de arfada del modelo Morison.	15
Figura 4.20 RAOs de balanceo del modelo Morison.	15
Figura 4.21 RAOs de cabeceo del modelo Morison.	16
Figura 4.22 Raos del modelo morison a un ángulo de 90°.	17
Figura 4.23 RAOs de arfada del modelo compuesto.	18
Figura 4.24 RAOs de balanceo del modelo compuesto.	18
Figura 4.25 RAOs de cabeceo del modelo compuesto.	19
Figura 4.26 Raos del modelo compuesto a un ángulo de 90°.	20
Figura 4.27 RAOs de arfada del modelo compuesto con líneas de amarre.	21
Figura 4.28 RAOs de balanceo del modelo compuesto con líneas de amarre.	21

Figura 4.29 RAOs de cabeceo del modelo compuesto con líneas de amarre.	22
Figura 4.30 Raos modelo compuesto con líneas de amarre a un ángulo de 90°.	23
Figura 4.31 Creación de espectro de ola.	24
Figura 4.32 Definición de grado de libertad y dirección de ola para el espectro de respuesta.	24
Figura 4.33 Espectro de respuesta de arfada en flotación libre.	25
Figura 4.34 Espectro de respuesta de cabeceo en flotación libre.	25
Figura 4.35 Espectro de respuesta de balanceo en flotación libre.	26
Figura 4.36 Espectro de respuesta de arfada con líneas de amarre.	27
Figura 4.37 Espectro de respuesta de cabeceo con líneas de amarre.	27
Figura 4.38 Espectro de respuesta de balanceo con líneas de amarre.	28
Figura 5.1 Comparación de amplitudes máximas en arfada en flotación libre.	4
Figura 5.2 Comparación de amplitudes máximas en cabeceo en flotación libre.	5
Figura 5.3 Comparación de amplitudes máximas en balanceo en flotación libre.	6
Figura 5.4 Comparación de amplitudes máximas en arfada con líneas de amarre.	7
Figura 5.5 Comparación de amplitudes máximas en cabeceo con líneas de amarre.	8
Figura 5.6 Comparación de amplitudes máximas en balanceo con líneas de amarre.	9
Figura 5.7 Comparación de las densidades de energía del espectro de respuesta en arfada.	10
Figura 5.8 Comparación de las densidades de energía del espectro de respuesta en cabeceo.	11
Figura 5.9 Comparación de las densidades de energía del espectro de respuesta en balanceo.	12
Figura 5.10 Comparación de tiempo de simulación.	14

## Índice de tablas

Tabla 2.1 Características de la teoría lineal	6
Tabla 3.1 Dimensiones y desplazamiento de la plataforma Spar de estudio.	3
Tabla 3.2 Condiciones de oleaje.	9
Tabla 3.3 Características del sistema de amarre.	10
Tabla 3.4 Rigidez y pretensión de las líneas de amarre	11
Tabla 4.1 Amplitud máxima de los RAOs del modelo de panel a 90°.	13
Tabla 4.2 Amplitud máxima de los RAOs del modelo morison a 90°.	17
Tabla 4.3 Amplitud máxima de los RAOs del modelo compuesto a 90°.	20
Tabla 4.4 Amplitud máxima de los RAOs del modelo compuesto con líneas de amarre a 90°.	23
Tabla 5.1 Comparación de amplitudes máximas en arfada en flotación libre.	3
Tabla 5.2 Comparación de amplitudes máximas en cabeceo en flotación libre.	4
Tabla 5.3 Comparación de amplitudes máximas en balanceo en flotación libre.	5
Tabla 5.4 Comparación de amplitudes máximas en arfada con líneas de amarre.	7
Tabla 5.5 Comparación de amplitudes máximas en cabeceo con líneas de amarre.	8
Tabla 5.6 Comparación de amplitudes máximas en balanceo con líneas de amarre.	8
Tabla 5.7 Comparación de las densidades de energía del espectro de respuesta en arfada.	10
Tabla 5.8 Comparación de las densidades de energía del espectro de respuesta en cabeceo.	10
Tabla 5.9 Comparación de las densidades de energía del espectro de respuesta en balanceo.	11
Tabla 5.10 Resultados de los movimientos de la plataforma	13

## Índice de ecuaciones

Ecuación 2.1 Superposición de oleaje _____	7
Ecuación 2.2 Ecuación de morison para cuerpos cilíndricos. _____	8
Ecuación 2.3 Velocidad local del fluido. _____	9
Ecuación 2.4 Aceleración local del fluido. _____	10
Ecuación 2.5 Tensión de línea de amarre. _____	11
Ecuación 2.6 Tensión horizontal de línea de amarre. _____	11
Ecuación 2.7 Tensión vertical de línea de amarre. _____	11
Ecuación 2.8 Ecuación de movimiento de la plataforma Spar. _____	12
Ecuación 2.9 Función del operador de amplitud de respuesta de la plataforma (RAO). _	12
Ecuación 2.10 Espectro de Jonswap. _____	13
Ecuación 2.11 Espectro de respuesta de una estructura marina. _____	14
Ecuación 3.1 Relación para el uso de la ecuación de Morison. _____	7
Ecuación 3.2 Ecuación de Morison (DNV-RP-C205, 2010). _____	7
Ecuación 3.3 Relación para el uso de la teoría de difracción – radiación. _____	8
Ecuación 4.1 Ecuación de Morison linealizada. _____	6



## **Resumen**

Los sistemas flotantes tipo Spar son un concepto muy atractivo para la explotación de campos petroleros a nivel global debido a su capacidad operativa, permitiendo efectuar tareas de producción de hidrocarburos y perforación de pozos simultáneamente.

Las plataformas Spar están integradas por un casco en forma de cilindro, el Toppide, líneas de amarre, y ductos ascendentes (risers) para la producción y exportación de hidrocarburos.

Estas características permiten obtener ventajas técnicas y económicas respecto a otros sistemas flotantes. Su hidrodinámica promueve a minimizar los movimientos de respuesta que se presentan por las olas, en caso de ser excesivos, pueden generar daños a los equipos sobre cubierta y el paro de sus actividades.

Este trabajo presenta el análisis hidrodinámico, proporcionando herramientas de análisis ante condiciones oceánicas que se presentan durante su vida útil, previniendo un paro de producción, gastos económicos, optimizar mantenimientos predictivos y resguardo de los equipos.

## **Abstract.**

The oil industry has had major technological developments in exploration, well drilling and hydrocarbon production, due to high demand for energy around the world; which created the need to explore in ever deeper waters. To exploit these fields, floating systems were developed with the characteristics of stability, low movements, processing capacity and storage necessary for the production of oil and gas in deep and ultra-deep water.

This work aims to present the characteristics and capabilities of stability and hydrodynamic behavior of Spar-type platforms, which position it as a structural concept suitable for simultaneously drilling wells and producing hydrocarbons.

The hydrodynamic analysis of the platform was carried out for free flotation conditions at its maximum. The movements in heave, pitch and rolling were studied, the importance of which transcends since of the 6 degrees of freedom existing for a floating rigid body at sea, these are the ones that bring the greatest influences of accelerations in its body and appendices, whose values outside parameters permissible by practical design recommendations would indicate little security for the type of equipment and installations on these platforms.

## **Planteamiento del problema.**

Las plataformas **tipo Spar** son artefactos navales que tienen por característica que su Centro de Gravedad (KG) se encuentra por debajo de su Centro de Empuje (KB). Esto genera movimientos reducidos de arfada y movimientos considerables de cabeceo y balanceo

El hecho anterior permite la instalación de los árboles de control de pozos en cubierta, uso de risers verticales rígidos y efectuar simultáneamente actividades de producción y perforación.

Sin embargo, los movimientos de balanceo y cabeceo generan aceleraciones en las cubiertas donde alojan los equipos de producción, generando fallas estructurales en sus soportes y mal funcionamiento de los mismos.

Ante esta problemática, se realizará un estudio del comportamiento hidrodinámico para determinar los movimientos de respuesta máximos ocasionados por las condiciones de oleaje del sitio de operación.





## **Objetivos.**

### **Objetivo general.**

Estudiar la hidrodinámica de un sistema flotante tipo “Spar”, analizando sus movimientos de respuesta para mantener sus movimientos dentro de límites aceptables para la continuidad de sus actividades.

### **Objetivos específicos.**

- Establecer las condiciones meteorológicas y oceanográficas donde operará la plataforma.
- Realizar los modelos de elementos finitos para el análisis.
- Analizar los movimientos de la plataforma con la teoría de panel, morison y modelo compuesto.
- Comparar los resultados obtenidos de los análisis.
- Determinar los movimientos máximos de respuesta de cada análisis.
- Determinar la rigidez de las líneas de amarre.
- Analizar los movimientos de la plataforma con la teoría del modelo compuesto con la rigidez del sistema de amarre.



## **Justificación.**

México tiene la necesidad de contar con las metodologías idóneas para el desarrollo integral del sector energético. Al adentrar a la exploración y explotación de aguas cada vez más profundas se llevarán a cabo retos importantes en la industria costa afuera, principalmente en sistemas oceánicos dedicados a dicho fin, por ende la industria naval mexicana requiere de empresas y de profesionistas para cumplir con las necesidades y requerimientos del sector marino petrolero.

En el diseño de un Sistema Oceánico el medio ambiente marino juega un papel importante para el cálculo de la vida útil del sistema, siendo el oleaje la carga ambiental cíclica que afecta la integridad estructural del sistema. Es por ello la importancia de incurrir a un análisis hidrodinámico en sitio, para predecir las respuestas del sistema oceánico en la interacción con el oleaje.

En la actualización de los conocimientos de los profesionales del ramo naval, el aprendizaje en la utilización de metodologías ingenieriles bien fundamentadas mediante software especializado, aplicando la innovación científica y tecnológica tendrá como resultado el diseño de Sistemas Oceánicos cada vez más seguros e íntegros.

Debido a lo anterior, se busca estudiar la hidrodinámica de un sistema flotante tipo “Spar”, analizando sus movimientos de respuesta para mantener sus movimientos dentro de límites aceptables para la continuidad de sus actividades. Este trabajo se realizará bajo condiciones ambientales pertenecientes del Golfo de México, estableciendo la forma del casco para cada teoría de análisis y las condiciones de operación para evaluar los movimientos.



## **Hipótesis.**

Es posible realizar un análisis hidrodinámico de la plataforma Spar con su sistema de amarre para evaluar sus respuestas máximas en un enfoque teórico basado en: la teoría potencial considerando los efectos de difracción-radiación (modelo de panel), efectos viscosos en elementos esbeltos (modelo Morison) y una combinación de las dos últimas al considerar los efectos de difracción-radiación en elementos de panel robustos y efectos viscosos en elementos esbeltos (modelo compuesto).



# **I. Introducción.**

La necesidad de disponer de energía es necesario en nuestras vidas; su demanda es vital en el desarrollo económico y social de México. (CNCE, 2018).

La importancia de la industria petrolera en México es satisfacer la demanda energética y de importancia para la economía. La entrada de divisas por la venta, el porcentaje que representa en el PIB y su consumo la vuelven fundamental para la vitalidad del estado mexicano.

El petróleo es un fluido natural constituido por una mezcla de hidrocarburos, el cual se extrae de lechos geológicos continentales o marítimos y del que se obtienen diversos productos útiles con fines energéticos y/o industriales (RAE, 2020). El 88% de la energía que se consume en México proviene de la industria petrolera, resalta la importancia de contemplar reservas energéticas para el consumo (Montano, 2020).

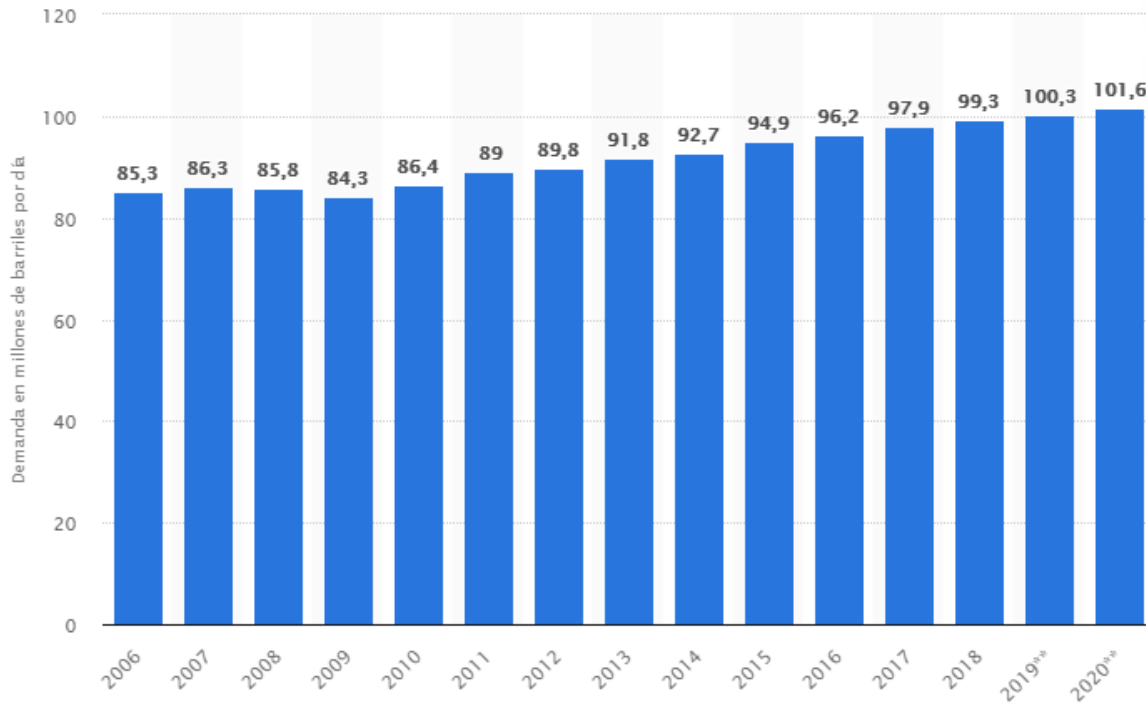
No solamente en México, sino en todo el mundo, el petróleo aun es la principal fuente de energía, por el hecho de que un país posea reservas, le otorga importantes ventajas competitivas.





## 1.1. Importancia de los sistemas flotantes de producción.

La OPEP prevé que la demanda mundial de petróleo crudo, aumentará en 1.08 millones de barriles diarios en 2020 (ver la figura 1), por lo que se estima que tendrá una demanda promedio de 100.8 mbd. (OPEP, 2019).



**Figura 1.1 Demanda diaria de petróleo crudo a nivel mundial de 2006 a 2020 (en millones de barriles).**

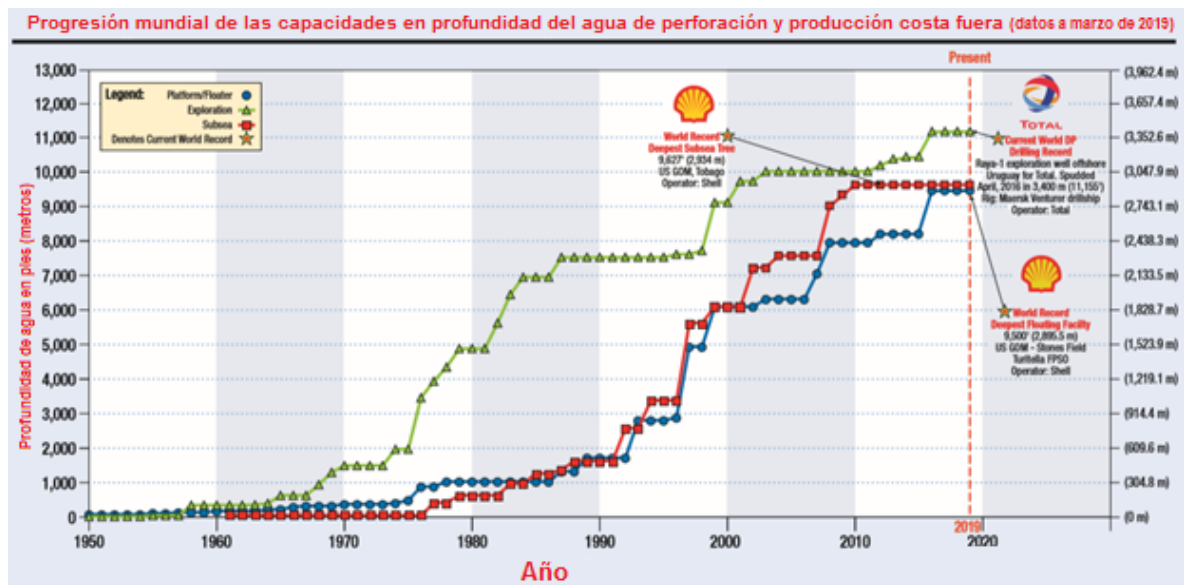
Tomada de: <https://es.statista.com>.

Por lo que disponer de medios de extracción y producción de aceite y gas es vital para cubrir la demanda energética global y, a su vez cubrir la demanda nacional energética. Por lo que se explora en campos más profundos en busca de nuevas reservas; creando la necesidad de nuevas tecnologías cumpliendo con los nuevos requerimientos de la industria petrolera y de protección al medio ambiente.

Actualmente se descubren nuevos campos de petróleo y gas natural en aguas ultra profundas. Muchos de estos se encuentran en ambientes más hostiles, por lo cual “La demanda de sistemas flotantes para aguas ultra profundas de altas especificaciones es ahora igual o superior al número de plataformas comercializables disponibles...” (Thigpen, 2020);

esto hace referencia a la necesidad de nuevos sistemas o actualización de los existentes para satisfacer la demanda actual.

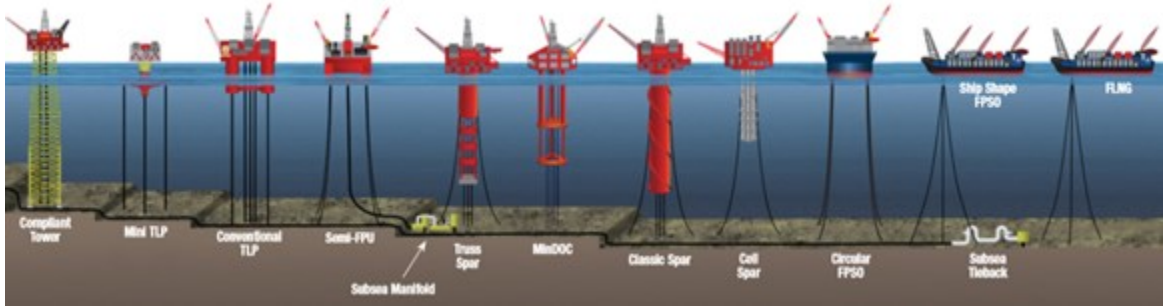
El progreso mundial de las capacidades de perforación y producción costa afuera en aguas profundas va en aumento. La compañía Total obtuvo el récord de perforación en un tirante de 3400 m en el año 2016 en la república de Uruguay (ver figura 2). Esto nos da un panorama claro de los retos de exploración en aguas cada vez de mayor profundidad en los próximos años.



**Figura 1.2 Progreso mundial de las capacidades de perforación y producción costa afuera.**

Tomada de: <https://www.offshore-mag.com/>.

La producción de hidrocarburos en aguas ultra-profundas requiere de sistemas flotantes anclados al fondo marino y/o de sistemas submarinos de producción. Estos reciben los hidrocarburos provenientes de los pozos a través de ductos y/o risers, para el procesamiento, almacenamiento y traslado a tierra mediante buques o ductos (ver figura 3).

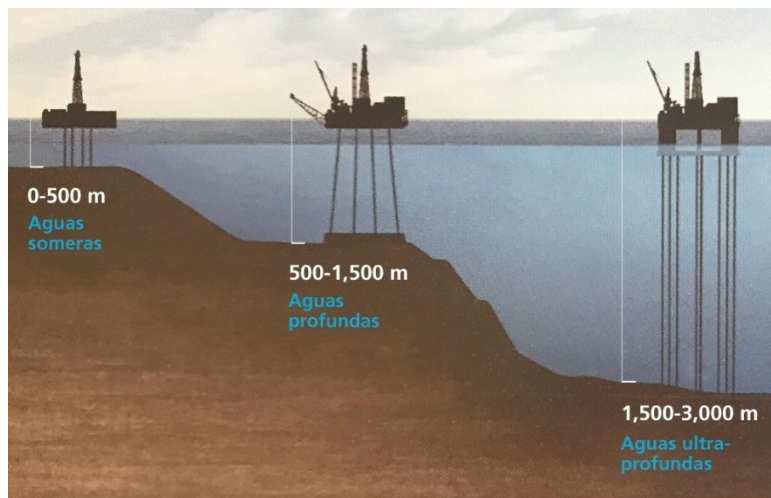


**Figura 1.3 Tipos de sistemas de producción para aguas profundas.**

Tomada de: <https://www.offshore-mag.com/> (Figura modificada por el autor).

## 1.2. Desafíos de aguas profundas.

En la actualidad, se define como aguas profundas los sitios localizados en un tirante de agua mayor a 500 m. Para tirantes de agua superiores a 1500 m, se usa el término de "aguas ultra profundas".(ver figura 4).



**Figura 1.4 Clasificación de aguas profundas en México.**

Tomada de: Pemex (Figura modificada por el autor).

En aguas profundas y especialmente ultra profundas, el diseño de los risers y los sistemas de amarre constituyen un desafío para los ingenieros de diseño. Estas profundidades de agua exigen nuevos materiales y conceptos innovadores.

Otros desafíos a los que se enfrentan los ingenieros de diseño es disminuir la dinámica de la plataforma ante oleajes intensos con el estudio de las formas del casco de flotación y la disminución de su peso.

### **1.3. Sistemas flotantes en el mar.**

Se refieren a las plataformas utilizadas para la explotación de yacimientos en sitios con tirantes de agua superiores a 300 m, aunque algunos se pueden utilizar en aguas someras como los FPSO's.

Dentro de los sistemas flotantes de producción se encuentran (ver figura 5):

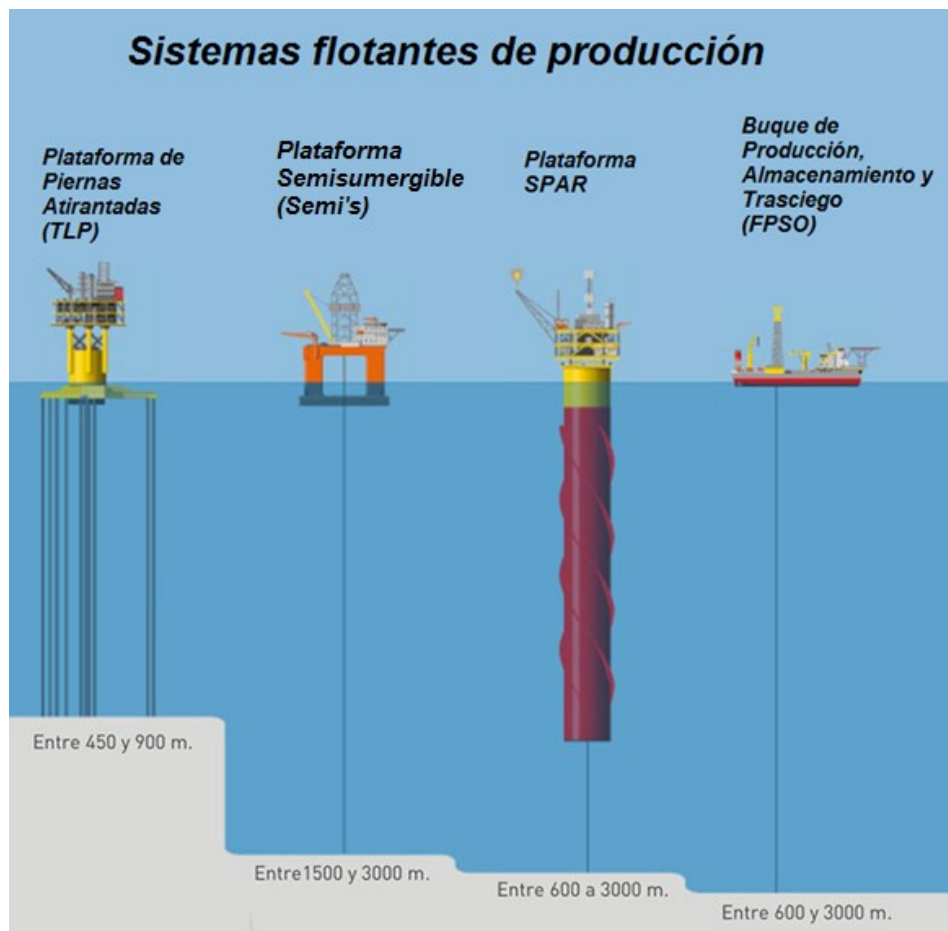
- Los Buques de Producción, Almacenamiento y Traslado (FPSO's por sus siglas en inglés).
- Las plataformas Semisumergibles (Semi's).
- Las Plataformas de Piernas Atirantadas (TLP's por sus siglas en inglés).
- Las plataformas tipo Spar.

### **1.4. Características de los sistemas flotantes.**

La característica distintiva entre las plataformas fijas y los sistemas flotantes es que estos últimos soportan a través del empuje que genera su casco:

- El peso del Topside.
- Los risers.
- Las líneas de amarre.
- Su propio peso.

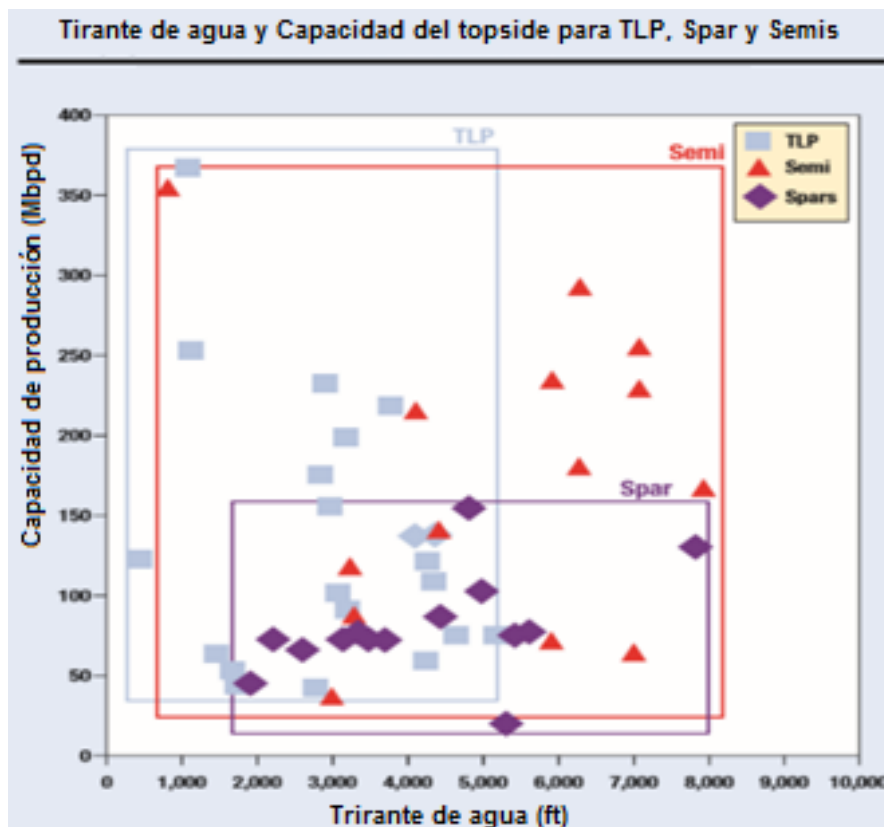
En caso de ser necesario, un sistema de posicionamiento dinámico para mantenerse en su sitio de operación.



**Figura 1.5 Sistemas flotantes de producción.**

Tomada de: <https://www.behance.net/> (Figura modificada por el autor).

En el Topside se encuentran los equipos de perforación y/o producción, generación de energía, servicios auxiliares y de seguridad. Siendo necesarios para la recepción de los fluidos provenientes de los pozos a través de los risers. Efectuando el procesamiento y trasiego a través de ductos o almacenar el aceite en su propio casco de flotación, como los FPSO's. La capacidad de producción está directamente relacionada con la capacidad de procesamiento en el Topside, cuya variación con respecto al tirante de agua para varias plataformas se muestra en la figura 6.



**Figura 1.6 Capacidad de producción del Topside vs tirante de agua.**

Tomada de: <https://www.offshore-mag.com/> (Figura modificada por el autor).

Asimismo, en la cubierta se encuentran las instalaciones para el alojamiento de personal operativo.

El casco de flotación puede ser compuesto por:

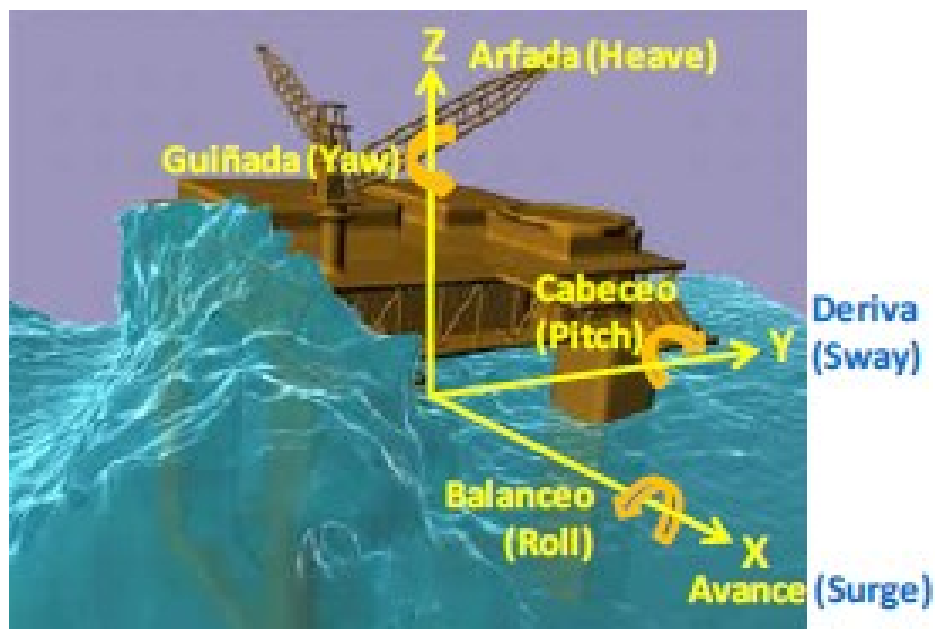
- Por columnas y pontones (como en las TLP's y las Semi's).
- Por una sola columna de gran diámetro (como en las mini-TLP's y las Spars).
- Por un casco tipo embarcación como los FPSO's.

Éste aporta la rigidez, flotación y estabilidad necesaria para soportar las condiciones ambientales a las cuales son sometidas. A su vez soporta su peso propio, además de los equipos, cubiertas, risers, líneas de amarre y los fluidos almacenados en sus compartimentos internos.

El objetivo del sistema de posicionamiento es limitar los movimientos de la plataforma generados por las acciones ambientales dentro de un círculo de operación establecido para

salvaguardar la integridad de los risers. El sistema de posicionamiento puede ser: pasivo a través de líneas de amarre y cimentaciones; o dinámico a través de hélices o una combinación de ambos (DNV, 2008).

Las plataformas flotantes poseen diferentes grados de libertad de movimiento como respuesta a las acciones meteorológicas y oceanográficas. Bajo este criterio, las plataformas flotantes vibran dinámicamente en seis grados de libertad de cuerpo rígido. Existen tres movimientos de traslación en dirección de los ejes X, Y y Z, y tres movimientos de rotación alrededor de los mismos ejes: avance (surge), deriva (sway), arfada (heave), cabeceo (pitch), balanceo (roll) y guiñada (yaw), respectivamente (Barranco Cicilia, 2012) (ver figura 7).



**Figura 1.7 Grados de libertad del cuerpo rígido de un sistema flotante.**

Fuente: (Barranco Cicilia, 2012).





## **2. Marco contextual**

### **2.1. . Características de las plataformas tipo Spar.**

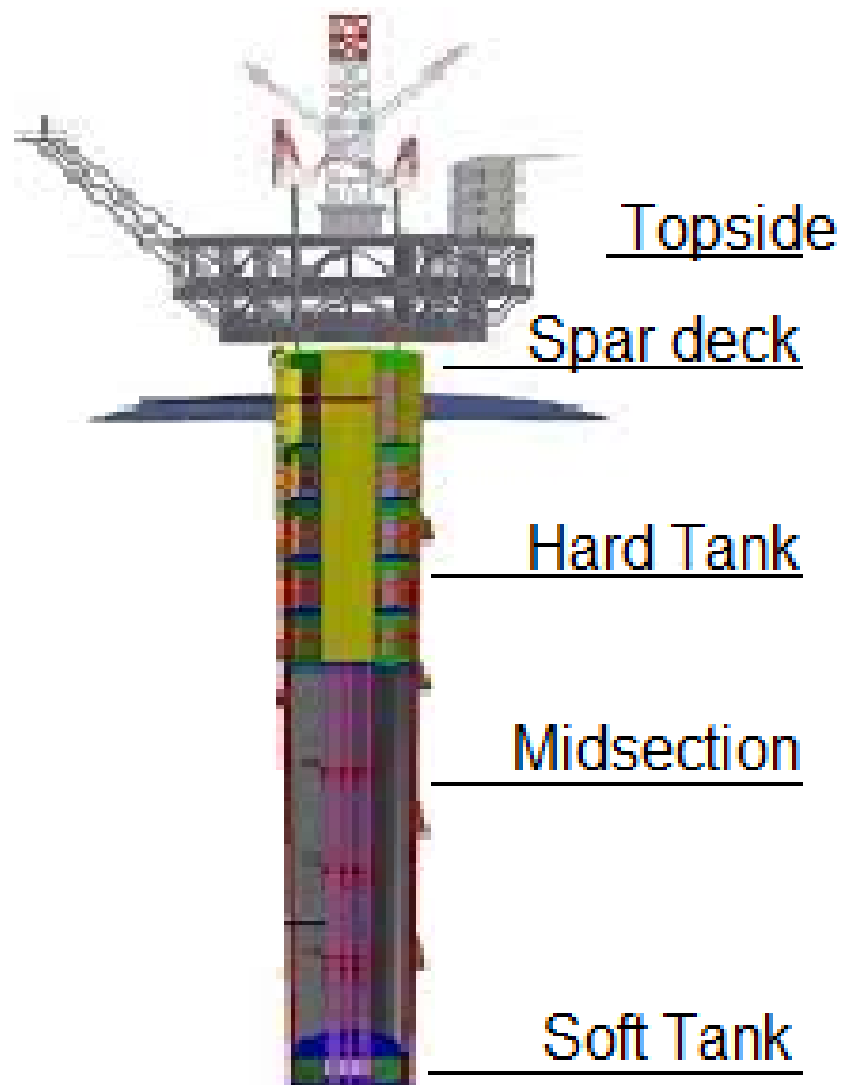
Las plataformas tipo “Spar” están diseñadas para realizar operaciones de perforación pozos y producción de hidrocarburos. Su flotabilidad se utiliza para soportar instalaciones sobre la superficie del agua y en general, se encuentran ancladas al fondo marino con múltiples líneas de amarre.

Las partes básicas de las plataformas Spar incluyen:

- Topside (Cubiertas).
- Hard Tanks (Tanques duros o estructurales).
- Sección media (estructura de armadura o casco de acero).
- Soft Tanks (Tanques blandos o de lastre).

Por lo general, hay de cinco a seis niveles de tanques entre el Spar Deck y en el fondo del Hard Tank, cada uno separado por una cubierta estanca. Además, cada nivel se divide en cuatro compartimentos por mamparos radiales que emanan del centro.

La línea de flotación incluye tanques adicionales de tipo “cofferdam” para reducir el volumen de inundación en el caso de un siniestro en el casco. Por lo tanto, pueden existir hasta 28 compartimentos separados en el Hard Tank y generalmente se utilizan los tanques inferiores para lastre variable, mientras los demás niveles se ocupan como espacios vacíos (ver figura 8).



## Partes básicas de una plataforma "Spar"

**Figura 2.1** Partes básicas de una plataforma "Spar".

Fuente: <https://www.onepetro.org/> (Figura modificada por el autor).

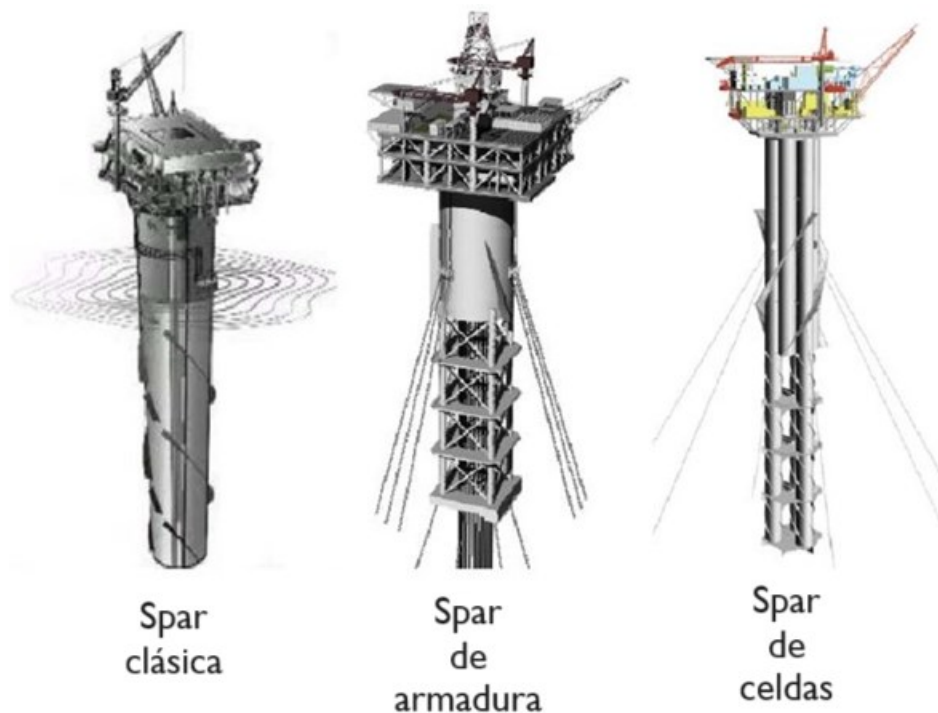
### 2.1.1. Diferencia entre las plataformas Spars.

Las diferentes generaciones de las plataformas Spar han aportado nuevas tecnologías y mejor hidrodinámica en ellas (Ver figura 9). Las principales diferencias entre las Spar clásica y armadura es la reducción de áreas expuestas a cargas ambientales y almacenamiento con la sustitución del casco de la sección media por una armadura con placas de arfada. Estos

cambios benefician al armador, debido a la reducción de costos y mantienen la misma capacidad de perforación y procesamiento de gas y petróleo.

Las plataformas Spar de celdas (Cell Spar) son utilizadas en campos de producción muy pequeños. Poseen poca capacidad de carga y no contienen secciones abiertas en el centro, por ello no poseen capacidad de perforación y requieren sistemas submarinos de producción.

Este trabajo se enfocó a Spars tipo armadura debido a la capacidad de realizar múltiples actividades de perforación de pozos y producción de hidrocarburos. No se consideró el almacenamiento de hidrocarburos debido a que se transporta directamente a tierra por redes de tuberías submarinas o por trasiego a un buque tanque.



**Figura 2.2 Diferencias entre plataformas Spar.**

Tomada de: V.J. Kurian, C.Y. Ng y M.S. Liew (figura modificada por el autor).

## 2.2. Teoría de hidrodinámica.

### 2.2.1. Teoría de oleaje.

Las condiciones meteoceánicas desarrollan fuerzas que provocan daños a la estructura, problemas de operación o navegación. Los fenómenos más importantes que afectan a los sistemas flotantes son: viento y oleaje, definido por Chakrabarti (2005):

Este oleaje es una fuente principal de fuerzas que actúan sobre los sistemas flotantes. Sus características principales es que tiene irregular, varían en longitud, altura y dirección. Por lo consiguiente los estados del mar son descritos en diminutos parámetros estadísticos del oleaje tales como el periodo, la altura significativa, forma espectral y direccionalidad. La altura significativa de la ola ( $H_s$ ) es el principal parámetro de un estado de mar y se obtiene de la altura media de un tercio de las olas más altas. Las principales características de la cinemática del oleaje en aguas profundas, para la teoría lineal de Airy establecidas por Faltinsen (1993), son mostradas en la Tabla 1.

**Tabla 2.1 Características de la teoría lineal**

Tomada de: (Hernández-Hernández, 2020)

Parámetro	Tirante de agua infinito
Potencial de velocidades	$\phi = \frac{g\eta_a}{\omega} e^{kz} \cos(\omega t - kx)$
Frecuencia circular de ola	$\omega = 2\pi/T$
Número de ola	$k = 2\pi/\lambda$
Relación entre $\omega$ y $k$	$\omega^2 = gk$
Relación entre longitud de ola $\lambda$ y período de oleaje $T$	$\lambda = \frac{g}{2\pi} T^2$
Perfil de elevación de oleaje	$\eta = \eta_a \sin(\omega t - kx)$
Presión dinámica	$p_D = \rho g \eta_a e^{kz} \sin(\omega t - kx)$
Velocidad de las partículas del agua en la dirección X	$u = \omega \eta_a e^{kz} \sin(\omega t - kx)$
Velocidad de las partículas del agua en la dirección Z	$w = \omega \eta_a e^{kz} \cos(\omega t - kx)$
Aceleración de las partículas del agua en la dirección X	$\dot{u} = \omega^2 \eta_a e^{kz} \cos(\omega t - kx)$
Aceleración de las partículas del agua en la dirección Z	$\dot{w} = -\omega^2 \eta_a e^{kz} \sin(\omega t - kx)$
$\eta_a$ =Amplitud de ola, $g$ =Aceleración de la gravedad, $t$ =variación del tiempo, $\rho$ =densidad del agua de mar, $x$ =dirección de la propagación de ola, $z$ =Coordenada vertical ( $z = 0$ para el nivel medio del mar).	

Es factible linealizar los resultados generados por oleaje regular para obtener la respuesta del sistema flotantes en oleaje irregular, es practico analizar en olas regulares incidentes sinusoidales (Faltinsen, 1999).

La teoría de oleaje lineal establece y resuelve problemas de cinemática lineal y dinámicas de superficie libre. La teoría de oleaje de segundo grado de Stokes extiende la teoría de oleaje lineal por perturbación de las condiciones de frontera hasta el segundo orden.

En la realidad las olas son aleatorias e irregulares. Una ola completamente desarrollada se modela como un conjunto de espectros de energía desarrollados de trenes de oleaje regular que se combinan en las fases aleatorias. La altura de olas desarrolladas por el viento se puede aproximar mediante la distribución de Rayleigh. Existen diferentes espectros de oleaje utilizados en ingeniería oceánica. Los tres principales espectros describen la distribución de la energía de las olas en función de la velocidad del viento, la altura significativa y el período pico. Estos espectros son: JONSWAP (Proyecto Conjunto de Olas del Mar del Norte), Pierson-Moskowitz, e ITTC (International Towing Tank Conference).

Un espectro de ola dado  $S(\omega)$  se puede generar por superposición de un gran número de componentes de olas lineales con fases aleatorias (ver ecuación 1)

$$\eta(x, t) = \sum_{i=1}^N A_i \cos(k_i x + \omega_i t + \varepsilon_i) = \text{Re} \left[ \sum_{i=1}^N A_i e^{i(k_i x - \omega_i t + \varepsilon_i)} \right]$$

**Ecuación 2.1 Superposición de oleaje**

donde  $A_i = \sqrt{2S(\omega_i) \Delta\omega}$ , N es el número de componentes de ola,  $\Delta\omega$  es el intervalo de división de frecuencia y  $\varepsilon_i$  es un ángulo de fase aleatorio.

**2.2.2. Ecuación de Morison y fuerza de sustentación en un cuerpo basado en columnas**

Las corrientes y el oleaje que inciden en sistemas flotantes son importantes debido a que se determinan como un flujo viscoso. El efecto viscoso toma importancia y la difracción se desprecia sobre elementos esbeltos de sistemas flotantes debido a que la longitud de la ola es mucho mayor al diámetro del elemento.

Para elementos esbeltos fijos de forma circular, la ecuación de Morison es utilizada para dar solución a problemas de flujo potencial cuando la relación longitud de ola/diámetro ( $\lambda/D$ ) es grande y los efectos viscosos son despreciables. (Kvittem, Bachynski, & Moan, 2012)

Para los elementos esbeltos mencionados podemos evaluar la fuerza que ejerce la corriente y ola con la ecuación de Morison. En 1950, Morison et. al. propusieron una ecuación cuerpos cilíndricos, pero fue modificada para elementos esbeltos, como se muestra a continuación 2.

$$F_n = C_m \rho \frac{\pi D^2}{4} \ddot{u}_n - C_a \rho \frac{\pi D^2}{4} \ddot{x}_n + \frac{1}{2} \rho C_d (u_n - \dot{x}_n) |u_n - \dot{x}_n|$$

**Ecuación 2.2 Ecuación de morison para cuerpos cilíndricos.**

Donde F representa la fuerza de Morison,  $C_m = 1 + C_a$  es el coeficiente de inercia,  $C_a$  el coeficiente de masa añadida,  $C_d$  el coeficiente de arrastre,  $\ddot{u}_n$  y  $u_n$  son la aceleración del fluido y la velocidad normal al cuerpo,  $\ddot{x}_n$  y  $\dot{x}_n$  son la aceleración y la velocidad normales de la estructura. (KOO, 2003)

La ecuación (2) muestra que la fuerza total, F, está compuesta por términos de fuerza viscosa y de inercia. Los dos primeros términos de la ecuación (2) muestran la fuerza de inercia, incluida la fuerza de Froude-Krylov y la fuerza de masa añadida. El último término de la ecuación (2) representa la fuerza de arrastre en forma de velocidad relativa.

Otro efecto viscoso importante en las plataformas Spar es la vibración inducida por vórtices (VIV). Cuando una estructura flotante basada un gran cilindro (es decir, spar clásico) y se encuentra expuesta a una corriente fuerte (corrientes de Loop 1).

### 2.2.3. Modelo compuesto.

En sistemas flotantes donde grandes columnas y los esbeltos elementos se utilizan de manera conjunta para proporcionar una fuerza de recuperación del oleaje y reducir las cargas externas totales.

Por este motivo son importantes los efectos de difracción por las grandes columnas y los efectos viscosos por los elementos morison. Es recomendable analizar ambos métodos combinando las ventajas de cada uno, por lo cual se trabaja con modelos compuestos.

Generalmente, en el modelo Morison, todas las fuerzas se calculan a partir de la cinemática de la onda incidente sin considerar el efecto de difracción. Pero el modelo compuesto, el campo de ondas difractadas e irradiadas se consideran también. (Liu, 2016) Por lo anterior se puede calcular la velocidad del fluido en la ubicación de cada sección, mediante la ecuación 3:

$$V_n = 2\pi\sigma(P) + \iint_{S_B} \sigma(Q) \frac{\partial G(P; Q)}{\partial n} dS$$

**Ecuación 2.3 Velocidad local del fluido.**

En conjunto con la aceleración, ver ecuación:

---

<sup>1</sup> Corrientes Loop son corrientes marinas que solo se presentan en el Golfo de México y se forman cuando se unen las corrientes del Mar Caribe y se amplifican en el canal formado entre Yucatán y Cuba

$$\nabla\phi(P) = \int_{S_B} \sigma(Q)\nabla G(P:S)ds$$

**Ecuación 2.4 Aceleración local del fluido.**

**2.2.4. Líneas de amarre.**

Los sistemas de amarre están formados por una serie de cables que se fijan a la estructura flotante en diferentes puntos con los extremos inferiores de los cables anclados al fondo marino.

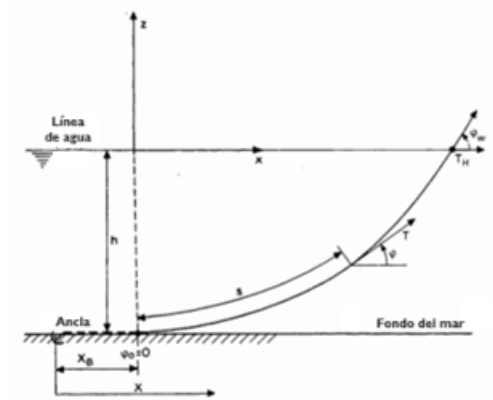
En un sistema de amarre, se colocan varias líneas de anclaje pretensadas alrededor del sistema flotante para mantenerla en la ubicación deseada. Esto implica que el ancla en funcionamiento no puede ser cargada por fuerzas verticales demasiado grandes y, para garantizar que las anclas se mantengan en su posición, es necesario que una parte importante de las líneas de amarre se apoye en el lecho marino. Las líneas están formadas por cadenas, cables de poliéster o una combinación de ambos.

Las líneas de amarre segmentadas, es decir, los cables compuestos por dos o más tramos de material diferente, se utilizan para obtener un cable pesado en el fondo (es decir, cadena), y una línea ligera cerca de la superficie del agua. De este modo se consigue una mayor rigidez y unas líneas de anclaje más ligeras que con el uso exclusivo de cadena o cable. Las fuerzas de tensión en los cables, que son el medio de aplicar fuerzas de sujeción a la estructura flotante, dependen del peso del cable y/o de sus propiedades elásticas, dependiendo de la forma en que esté tendido el sistema de cables.

La tensión inicial, o pretensión, de una línea de amarre suele establecerse mediante el uso de winches en el sistema. A medida que el sistema se mueve en respuesta a las cargas meteoceánicas, la tensión cambia debido a la geometría la línea. Así, las líneas de amarre tienen una rigidez efectiva compuesta por una rigidez elástica y otra geométrica que, combinadas con los movimientos de la unidad, introducen fuerzas que dependen de las características la línea de amarre.

Debemos de suponer un lecho marino horizontal y que la línea está en un plano vertical que coincide con el plano x-z (ver figura 10).





**Figura 2.3 Características de la línea de amarre.**

Tomada de: (Faltinsen, 1999) (Figura modificada por el autor)

La tensión de la línea puede hallarse con la ecuación 5:

$$T = T_H + wh + (w + \rho gA)z$$

**Ecuación 2.5 Tensión de línea de amarre.**

La componente horizontal de la tensión en el plano de agua (ecuación 6).

$$T_H = T \cos(\phi_w)$$

**Ecuación 2.6 Tensión horizontal de línea de amarre.**

La componente vertical de la tensión en el plano de agua (ecuación 7).

$$T_Z = ws$$

**Ecuación 2.7 Tensión vertical de línea de amarre.**

**2.2.5. RAOs.**

Los operadores de amplitud de respuesta (RAO por sus siglas en inglés), son funciones de transferencia que relacionan la excitación de que produce el oleaje a los movimientos de la plataforma a una frecuencia determinada.

Las dimensiones principales se deben de ajustar para que los periodos naturales coincidan con los periodos de cero excitación de modo que la resonancia sea nula, tal como (JP, 1972) lo demostró con una plataforma semisumergible. El período natural del oleaje

debe ser menor que su periodo de casi cero-excitación en oleaje (Faltinsen, 1999) y (Newman, 1999) lo confirmó. También demostró cuando exista una longitud de ola grande, el Operador de Amplitud de Respuesta (RAO) del oleaje se aproxima a la unidad (Newman, 1999).

La obtención de estos resultados nos ayuda a obtener la predicción de los movimientos de la plataforma.

Los RAOs de una plataforma solamente se pueden determinar cuando se relacionan sus movimientos con la excitación que produce el oleaje mediante la ecuación de movimiento lineal para cada ola (ecuación 8).

$$F = (M + A)\ddot{x} + B\dot{x} + Cx$$

**Ecuación 2.8 Ecuación de movimiento de la plataforma Spar.**

Donde F representa la fuerza de excitación armónica y es proporcional a la altura de la ola  $\eta$ , M representa la matriz de masa e inercia, A representa la matriz de masa adherida, B representa la matriz de amortiguamiento, C representa la matriz de restauración hidrostática, x representa el vector de los grados de libertad de la plataforma. La ecuación anterior se resuelve para obtener la ecuación 9 donde se obtiene el RAO. (Ventura Castelló, 2016):

$$RAO(w) = \frac{x}{\eta} = \frac{|F(w)|}{C - [M + A(w)] * w^2 + i * B(w) * w}$$

**Ecuación 2.9 Función del operador de amplitud de respuesta de la plataforma (RAO).**

**2.2.6. Espectro de oleaje.**

El conocimiento de la generación de las olas es muy extenso y no es suficiente aún lo avanzado para permitir una completa predicción de las olas por medio de consideraciones teóricas.

Existen varias fórmulas de espectro que se utilizan en el diseño de estructuras costa afuera. Estas fórmulas se derivan de las propiedades observadas de las olas oceánicas y, por lo tanto, son de naturaleza empírica.

Diferentes modelos de espectro para el mismo contenido de energía distribuyen la energía de manera diferente en la banda de frecuencia. Por lo tanto, la respuesta de la estructura para la misma energía de ola aleatoria (o equivalente, altura de ola significativa) será diferente si se utilizan diferentes modelos de espectro (Chakrabarti, 2005).

Dos de los modelos espectrales más comunes utilizados en el diseño de estructuras offshore son el espectro Pierson-Moskowitz (P\_M) y JONSWAP. Es importante mencionar que el espectro P-M es un caso especial de JONSWAP con el valor del parámetro de pico es uno.

El espectro de oleaje utilizado en esta tesis es el espectro de JONSWAP, ya que es aplicable para estados de mar desarrollados con fetch limitado. La forma de dicho espectro ha sido demostrada por un programa de observación de olas conocido con el nombre de Joint North Sea Wave Project (JONSWAP por sus siglas en inglés) y dependen de la altura significativa y los períodos pico (ecuación 10):

$$S_J(\omega) = A_\gamma S_{PM}(\omega) \gamma^{\exp(-0.5(\frac{\omega-\omega_p}{\sigma\omega_p})^2)}$$

**Ecuación 2.10 Espectro de Jonswap.**

Donde:

- $\gamma$  es el parámetro de forma del pico del espectro.
- $\sigma$  es el parámetro del ancho del espectro.
- $A_\gamma$  es el parámetro de normalización y es igual a  $1-0.287 \ln(\gamma)$ .

**2.2.7. Espectro de respuesta.**

Es importante la predicción del comportamiento de la plataforma en una determinada condición de mar, debido a que se evalúan sus efectos en el desempeño de ésta y sus efectos perjudiciales, como por ejemplo el embarque de agua, slamming y excesivas aceleraciones verticales.

Este comportamiento es obtenido por el espectro de respuesta, cuyo procedimiento para su obtención consiste en el producto del cuadrado de la norma del RAO de un movimiento determinado por el espectro de oleaje (ver ecuación 11) utilizado para representar una determinada condición de mar:

$$S_R = |RAO^2| \cdot S_j$$

**Ecuación 2.11 Espectro de respuesta de una estructura marina.**

### 3. Modelación de la plataforma Spar tipo armadura y bases de análisis.

#### 3.1. Dimensiones y características de la plataforma.

La plataforma considerada como caso de estudio es una plataforma Spar armadura (Truss); la cual tiene las siguientes características (ver tabla 2):

**Tabla 3.1 Dimensiones y desplazamiento de la plataforma Spar de estudio.**

Dimensiones de la plataforma Spar		
Calado de operación (Calado máximo)	164.6	m
Puntal total (Base hasta Spar Deck)	181.3	m
Francobordo	16.7	m
Desplazamiento al calado máximo.	67127	T
Centroides de la plataforma Spar desde la línea base		
Centro de gravedad longitudinal de la estructura de la plataforma Spar (LCG)	0	m
Centro de gravedad transversal de la estructura de la plataforma Spar (TCG)	0	m
Centro de gravedad vertical de la estructura de la plataforma Spar (VCG)	95.79	m
Dimensiones del tanque duro (Hard Tank)		
Diámetro del tanque duro	37.2	m
Dimensión de la bahía de risers (Centrewell)	16x16	m
Altura total del tanque duro	80.8	m
Dimensiones del tanque suave (Soft Tank)		
Dimensión (eslora x manga)	37.2x37.2	m
Altura del tanque suave	6.1	m
Dimensiones de las placas de arfada (Heave Plates)		
Numero de las placas de arfada	3	m
Altura de las placas de arfada	1	m
Dimensión (eslora x manga)	37.2x37.2	m
Altura (distancia) entre tanque duro y la parte superior de la primera placa de arfada	23.6	m
Altura entre placas de arfada	22.6	m
Altura ente tanque suave y la parte inferior de la última placa de arfada	23.6	m
Dimensiones y características de las armaduras (Truss)		
Longitud total de las armaduras principales (Main Truss)	94.5	m
Diámetro total de las armaduras principales (Main Truss)	2	m
Diámetro total de las armaduras secundarias (X Truss)	0.8	m
Distancia entre armaduras principales	18.6	m
Dimensiones y características de las cubiertas		
Spar Deck (top of Hard Tank)	181.3	m
Subcellar Deck (cubierta inferior a 22 m de la línea de agua)	24x26	m
Cellar Deck (cubierta a 32 metros de la línea de agua)	42*58	m
Production Deck (cubierta de producción a 42 m de la línea de agua)	42*58	m
Main Deck (cubierta principal a 52 metros de la línea de agua)	42*58	m

### 3.2. Modelado.

El modelado del casco de la plataforma se realizó por medio de un software de elemento finito (ver figura 11 y 12) con la finalidad de poder sustentar apropiadamente los resultados obtenidos en este trabajo.



Figura 3.1 Modelo de la plataforma Spar armadura

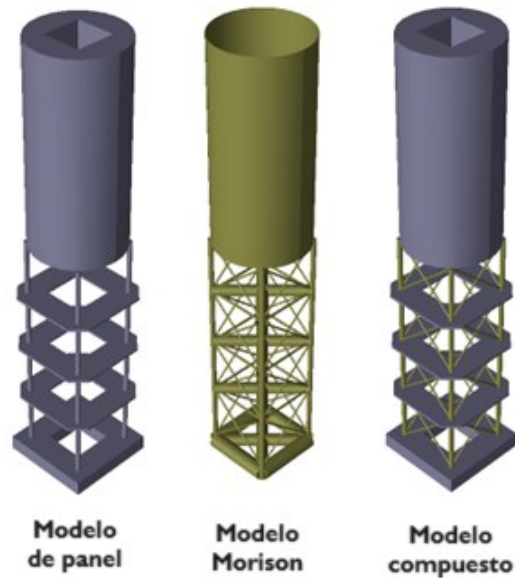


Figura 3.2 Modelado del casco de la plataforma spar.

El análisis hidrodinámico fue efectuado con el modelo de paneles, morison y compuesto del casco, mismo que usa elementos de placa y tubos esbeltos a los cuales se les puede asignar propiedades de superficie y estructurales.

- Secciones (Tuberías y vigas).

- Materiales.
- Espesores.
- Calibración de mallado.
- Peso de la estructura.
- Superficie Mojada. Entre otras.

Dado que el análisis hidrodinámico solo utiliza la parte sumergida y expuesta al oleaje del modelo, se seleccionan todas las superficies del casco, en la figura 13 se muestra el resultado de la aplicación de la propiedad de superficie mojada.



**Figura 3.3 Superficie mojada del modelo de la plataforma Spar.**

### **3.3. Identificación y análisis de cargas del sistema flotante.**

Los diferentes tipos de cargas que afectan directamente a los sistemas flotantes (ver figura 14) se emplean primordialmente en el análisis para dos condiciones:

- En operación.
- En tormenta.

Se dice condición de operación cuando la plataforma se encuentra habitada, dando el servicio por la cual fue diseñada en condiciones climatológicas normales. La condición de tormenta es cuando las condiciones climatológicas son adversas (tormenta/huracán), y por lo

tanto se deben asegurar los equipos para posteriormente, en caso de ser necesario, abandonar la plataforma.

- CARGAS QUE ACTÚAN SOBRE UNA SPAR

- VERTICALES

- PESO DE LA PLATAFORMA
    - EMPUJE (FLOTABILIDAD)

- METEOCEÁNICOS

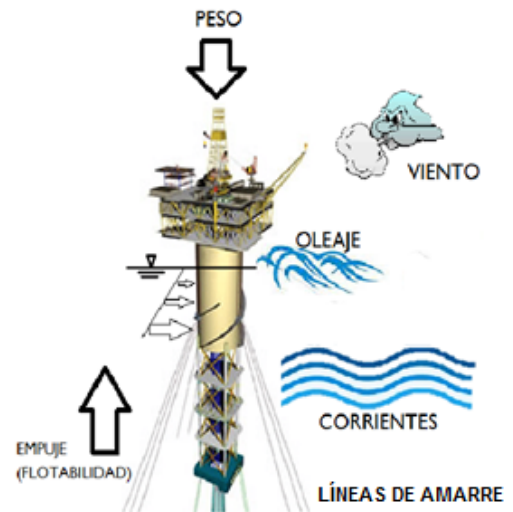
- VIENTO
    - OLEAJES
    - CORRIENTES

- FABRICACIÓN, TRANSPORTACIÓN E INSTALACIÓN

- SOLO OCURREN EN CIERTAS PARTES ESPECÍFICAS DEL SPAR

- ACCIDENTALES

- COLISIÓN



**Figura 3.4 Cargas que actúan sobre una plataforma Spar.**

Fuente: <https://www.researchgate.net/> (Modificada por el autor).

### 3.3.1. Análisis de cargas ambientales.

Las consideraciones ambientales desfavorables son aquellas que producen la respuesta extrema y las cuales tienen baja probabilidad de ser excedidas en el tiempo de vida de la estructura. Un periodo de retorno menor de 100 años para el diseño de los componentes estructurales del sistema flotante puede ser usado solamente si el análisis de riesgo justifica un intervalo corto de recurrencia para el criterio de diseño.

Las cargas ambientales que se utilizarán en el diseño deberán ser basadas sobre datos ambientales (meteorológicos y oceanográficos) para la localización específica y operación en cuestión. Estos serán determinados por el uso de métodos adecuados y aplicables para la localización/operación, tomando en consideración el tipo de estructura, tamaño, forma y características de respuesta.



### 3.3.2. Oleaje.

Las fuerzas por oleaje de primer orden que actúan sobre una estructura pueden ser calculadas por la Ecuación de Morison<sup>2</sup> o por la Teoría de Difracción/Radiación.

Para determinar que método es conveniente utilizar, se hace una relación entre la dimensión del elemento estructural ( $L$ ) y la longitud de ola ( $\lambda$ ).

La ecuación de Morison es válida cuando la relación es menor a 0.2 (ver ecuación 12) y considera que el movimiento de las olas no se modificará por la estructura.

$$\frac{L}{\lambda} \ll 0.2$$

#### **Ecuación 3.1 Relación para el uso de la ecuación de Morison.**

La ecuación de Morison se compone de las fuerzas de inercia y arrastre, como se expresa en la ecuación 13:

$$F = \rho(1 + C_A)A\dot{u} + \frac{1}{2}\rho C_D v|v|$$

#### **Ecuación 3.2 Ecuación de Morison (DNV-RP-C205, 2010).**

Donde:

- $\rho$  es la densidad del agua.
- $C_A$  es el coeficiente de masa adherida.
- $A$  es el área transversal ( $m^2$ ).

---

<sup>2</sup> Creada por Morison, O'Brien, Johnson y Schaaf introdujeron en 1950 y se utiliza para estimar las cargas de oleaje en el diseño de las plataformas petroleras y otras estructuras relacionadas.

- $\dot{u}$  es la aceleración de las partículas del fluido  $[\frac{m}{s^2}]$ .
- $C_D$  = coeficiente de arrastre.
- $v$  es la velocidad de las partículas del fluido (olas y / o corriente)  $[\frac{m}{s}]$ .

La teoría de difracción/radiación es válida cuando la relación  $\frac{L}{\lambda}$  es mayor a 0.2 (ver ecuación 14). En esta teoría el sistema flotante es forzado a oscilar en la frecuencia del oleaje, y genera ondas hacia el exterior por el movimiento del sistema flotante, por lo cual permite evaluar las fuerzas y movimientos, debidos a masas y amortiguamiento, por el agua circundante por el efecto de restauración hidrostática del sistema flotante.

$$\frac{L}{\lambda} \gg 0.2$$

**Ecuación 3.3 Relación para el uso de la teoría de difracción – radiación.**

Los movimientos de la plataforma Spar son dominados por la inercia, debido al gran volumen de su estructura, la determinación de sus propiedades hidrodinámicas, las acciones presentes sobre el casco de flotación y su respuesta, por lo que el cálculo de las fuerzas del oleaje, su masa adherida, amortiguamiento y movimientos se deben determinar con un análisis de difracción/radiación de oleaje.

Las características del oleaje se obtienen de datos recopilados en el sitio donde operará la plataforma y de un análisis de valores extremos para los periodos de retorno de diseño. En este estudio, la plataforma se considera estará ubicada en el campo Lucius, en Keathley Canyon 874, 875, 918 y 919 (Tule, 2015). La plataforma Spar se analizará con un oleaje de retorno de 100 años en condición de tormenta, con los siguientes parámetros (ver tabla 3).

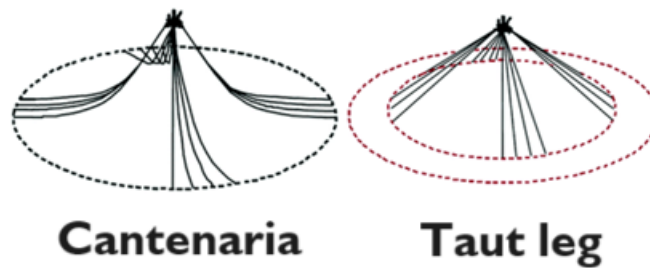
**Tabla 3.2 Condiciones de oleaje.**

Criterio Metoceánico	Huracán de 1000 años		Huracán de 100 años	
	Ola máxima	Viento máximo	Ola máxima	Viento máximo
Hs (m.)	18.745	17.831	13.503	12.832
Tp (seg)	15.600	15.400	14.000	13.800
Tz (Tp/1.1049) (seg)	11.104	10.962	9.965	9.823
Gamma	2.200	2.200	2.200	2.200
Cresta Máxima (m.)	21.366	20.300	15.392	14.630
Velocidad del viento (nudos) (1 hora a 33 pies)	92.500	92.500	92.500	92.500
Velocidad de corriente de superficie (pies / seg.)	7.000	7.000	7.000	7.000

### 3.3.3. Rigidez de la línea de amarre.

El sistema de amarre que se estudiará será Taut Leg, este sistema propone mejores ventajas en comparación del sistema tradicional en catenaria donde los movimientos del sistema serán limitados por el peso de la sección inferior de la línea de amarre que encuentra sobre el fondo marino. El sistema Taut leg aumenta la estabilidad gracias tensión de sus líneas y teniendo poca longitud de esta sobre el lecho marino.

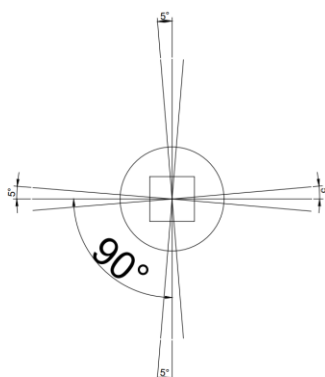
En la figura 15 podemos apreciar los sistemas de amarre en catenaria y taut leg.



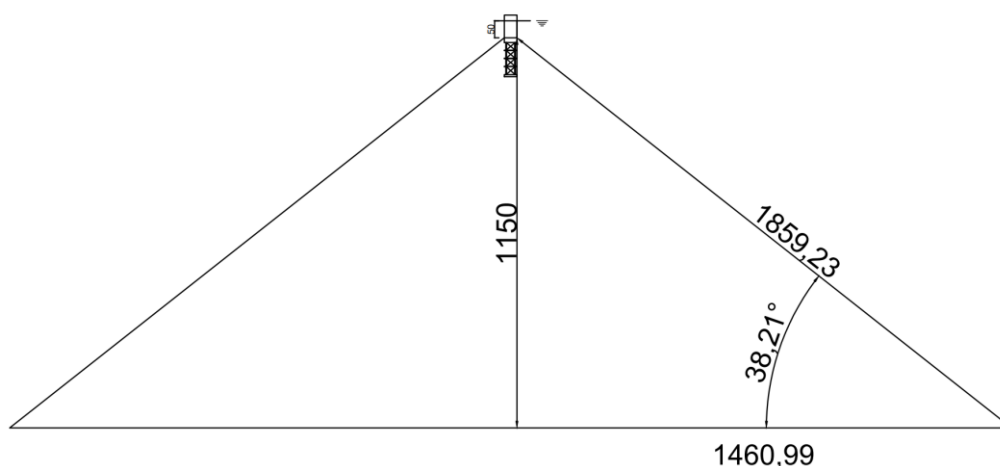
**Figura 3.5 Líneas de amarre en catenaria y taut leg.**

Tomada de: Review of the state of the art of mooring and anchoring designs, technical challenges and identification of relevant DLCs (2020) (Figura modificada por el autor).

En este caso de estudio se analizará el sistema flotante con 12 líneas de amarre divididas en cuatro grupos a cada 90°. Cada grupo contará de tres líneas separadas a 5° entre cada una, tal como se muestra en las figuras 16 y 17.



**Figura 3.6 Configuración del sistema de amarre.**



**Figura 3.7 Representación del sistema de amarre a estudiar.**

El material de la línea es de poliéster en su totalidad debido a su resistencia y bajo peso de la misma, en la tabla 4 podemos apreciar las características de las líneas.

**Tabla 3.3 Características del sistema de amarre.**

Características de taut leg		
Material del taut leg	Poliester	
Diámetro	0.160	m
Tirante de agua	1200.00	m
Punto debajo del nivel del agua donde se sujeta la línea de amarre sobre la plataforma	-50.00	m
Longitud del taut leg	1859.30	m
Angulo respecto al fondo	38.21	grados
Anclaje en el lecho marino desde el extremo de la plataforma	1460.99	m
Módulo de elasticidad e	1.96	GN
Peso de la línea de amarre en mojado	2257.30	kN
Peso por metro	0.1238	ton/m
Rigidez de cada línea de amarre	1054160.17	n/m

La rigidez del sistema de amarre se determina aplicando la teoría de la sección 2.2.3, se obtiene la tensión horizontal y vertical para posteriormente dividirlo con su desplazamiento unitario. Posteriormente la rigidez horizontal se debe de descomponer en el eje X y Y para analizar solo el desplazamiento horizontal.

A continuación, en la tabla 5 se muestra la rigidez de cada línea de amarre:

**Tabla 3.4 Rigidez y pretensión de las líneas de amarre**

Línea de amarre	Ubicación respecto al eje x (grados)	Ángulo respecto a la superficie (grados)	Rigidez horizontal (n/m)	Rigidez vertical (n/m)	Pretensión (n)
<b>1</b>	0	38.21	2198911.5	2834109	3573783
<b>2</b>	5	38.21	2190543.978	2834109	3573783
<b>3</b>	85	38.21	191647.765	2834109	3573783
<b>4</b>	90	38.21	1.347e-10	2834109	3573783
<b>5</b>	95	38.21	191647.765	2834109	3573783
<b>6</b>	175	38.21	2190543.978	2834109	3573783
<b>7</b>	180	38.21	2198911.5	2834109	3573783
<b>8</b>	185	38.21	2190543.978	2834109	3573783
<b>9</b>	265	38.21	191647.765	2834109	3573783
<b>10</b>	270	38.21	4.04099e-10	2834109	3573783
<b>11</b>	275	38.21	191647.765	2834109	3573783
<b>12</b>	355	38.21	2190543.978	2834109	3573783



## 4. Análisis.

El análisis hidrodinámico de la plataforma Spar tipo armadura utilizando 3 modelos, permitiendo someter el modelo a distintos trenes de oleaje regular y obtener sus movimientos en forma de operadores de amplitud de respuesta (RAOs por sus siglas en inglés).

### 4.1. Mallado.

El mallado de la sección sumergida del casco de la plataforma es el primer paso para el análisis hidrodinámico.

Primero se requiere llevar a cabo el proceso de definición y refinación del mallado del casco para evaluar adecuadamente el perfil de presiones generado por el oleaje (ver figura 18).

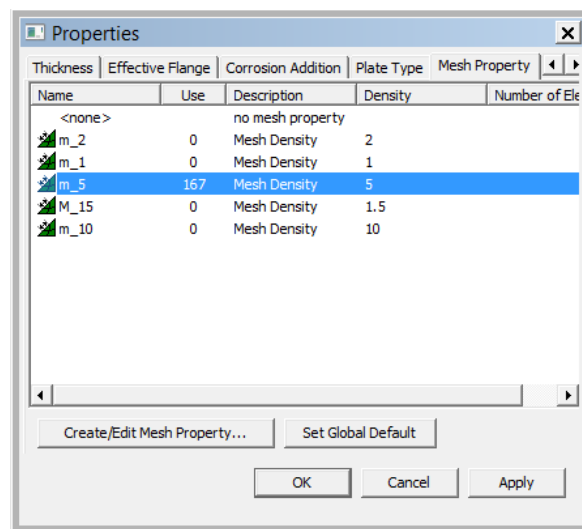


Figura 4.1 Propiedad de malla a aplicar al modelo de la Spar.

Ahora se requiere generar una actividad para la creación de la malla del modelo (ver figura 19).

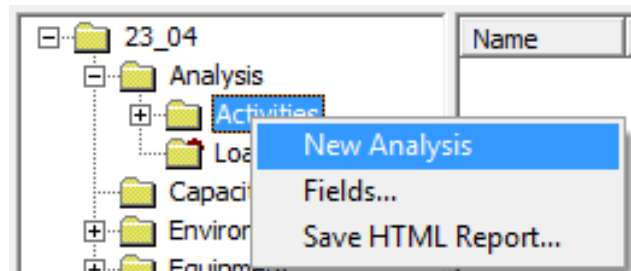
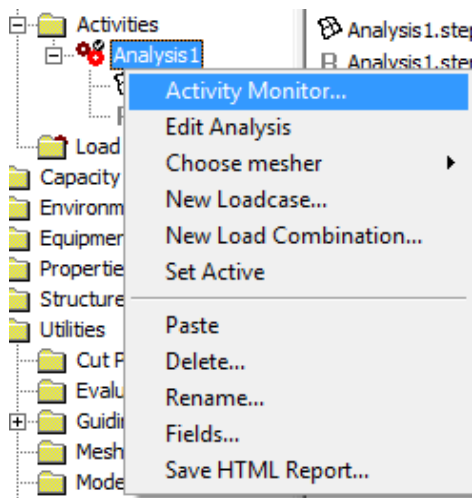
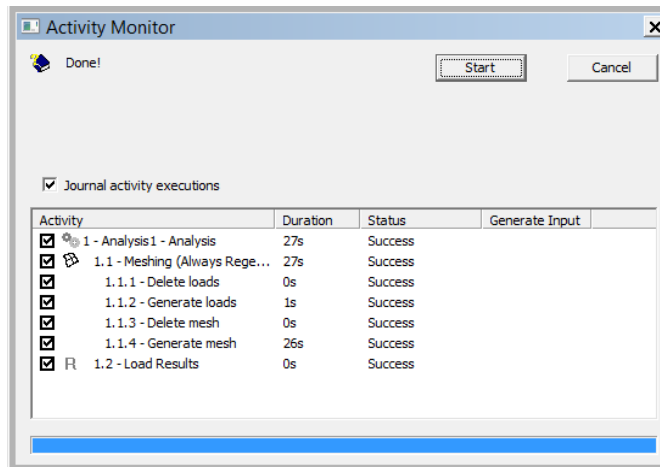


Figura 4.2 Creación de una actividad para el mallado.

Se abre el monitor de actividades (ver figura 20) e inicia la ejecución de la actividad del mallado (ver figura 21).



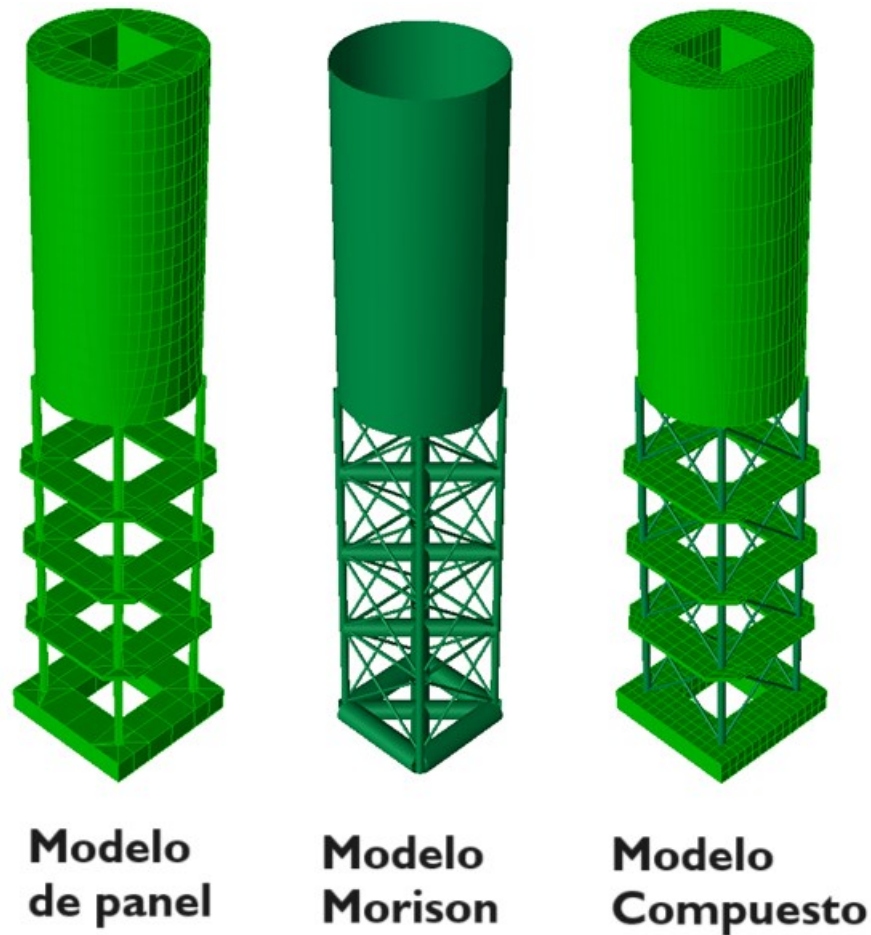
**Figura 4.3 Selección del monitor de actividad.**



**Figura 4.4 Monitor de actividad**

Una vez finalizado el proceso de mallado, se debe de inspeccionar que no existan mensajes de error y advertencias, así como que el mallado no presente inconsistencias geométricas (ver figura 22).





**Figura 4.5 Mallado de los modelos de la plataforma.**

## **4.2. Análisis hidrodinámico.**

Se llevará a cabo un análisis hidrodinámico lineal en el dominio de la frecuencia definiendo la configuración e introducción de los datos geométricos y del oleaje considerados en este estudio.

El desafío principal de este estudio es incluir los efectos viscosos y la definición en el sistema de las líneas de amarre.

En la industria offshore, el análisis hidrodinámico es requerido para obtener las fuerzas que impactan y afectan a la estructura, tales como las cargas de inercia debidas a las aceleraciones producidas por los movimientos de respuesta, la presión del oleaje y fluidos internos al casco y las fuerzas transferidas por los risers y líneas de amarre. (Kirkhorn Vada, 2013)

### **4.2.1. Introducción de los efectos viscosos**

La forma más práctica de introducir en el análisis los efectos viscosos sobre elementos esbeltos es utilizar la ecuación de Morison. En el caso de la plataforma Spar la armadura del casco, sus cargas se determinan mediante la ecuación de Morison.

El modelo de panel se utiliza para modelar el hard tank, soft tank y heave plates, determinando su empuje, inercia y masa añadida, pero si se modela la armadura con elementos morison es posible incluir el término de resistencia viscosa.

En la armadura del casco esto toma importancia debido a que la amortiguación del oleaje es muy pequeña. Por lo tanto, el arrastre viscoso en la armadura será la contribución de amortiguación más importante para este analisis.

Una propuesta es definir el modelo Morison y el modelo de paneles mediante dos modelos diferentes, con ello el diámetro de las vigas (D) puede disminuir y aumentar el coeficiente de arrastre (Cd), obtenga un valor aceptable de Cd\*D, obteniendo un coeficiente de resistencia aceptable, eliminando empuje y masa adherida del modelo Morison. (Kirkhorn Vada, 2013)

Debido a que el coeficiente de arrastre es un término no lineal debemos linealizarlo mediante el método de linealización estocástica, donde la fuerza obtenida en la ecuación de Morison puede escribirse como: (ver ecuación 15)

$$F = \frac{1}{2} * \rho * D * C_d * |u_{rel}| * u_{rel} \approx \rho * D * C_d * \sqrt{\frac{2}{\pi}} * \sigma_{rel} * u_{rel}$$

#### **Ecuación 4.1 Ecuación de Morison linealizada.**

Donde  $\sigma_{rel}$  es la desviación estándar de la velocidad relativa en un determinado estado de la mar. Dado que este valor no puede calcularse hasta que se conoce la velocidad de la estructura, este método da lugar a un proceso iterativo. (Kirkhorn Vada, 2013)

### **4.2.2. Introducción de líneas de amarre**

Se puede modelar las líneas de amarre de dos formas.

1. Utilizando elementos tipo ancla
2. Utilizando una matriz de restauración y masa adicional.

Los elementos tipo ancla son un conjunto de resortes lineales con una pretensión determinada, su rigidez se debe de especificar en dirección horizontal, donde se especifica la dirección de la línea de anclaje) y vertical.

La rigidez acumulada debido a todas las líneas de amarre se puede definir mediante una matriz de restauración y las pretensiones acumuladas se especifican con una matriz de masas.

La principal ventaja de los elementos ancla es la definición de las fuerzas en un punto y si es necesario, la carga del sistema de amarre puede trasladarse a un análisis estructural. Cuando esta fuerza especifica en una matriz de restauración, se obtiene la fuerza real sobre la estructura, pero su desventaja es que no aporta información sobre cómo se distribuye y no hay una forma de representarla en el modelo estructural como carga, su ventaja es la

obtención de los periodos naturales calculados a partir de las ecuaciones de movimiento serán más correctos debido a que la pretensión se representa como una masa. (Kirkhorn Vada, 2013)

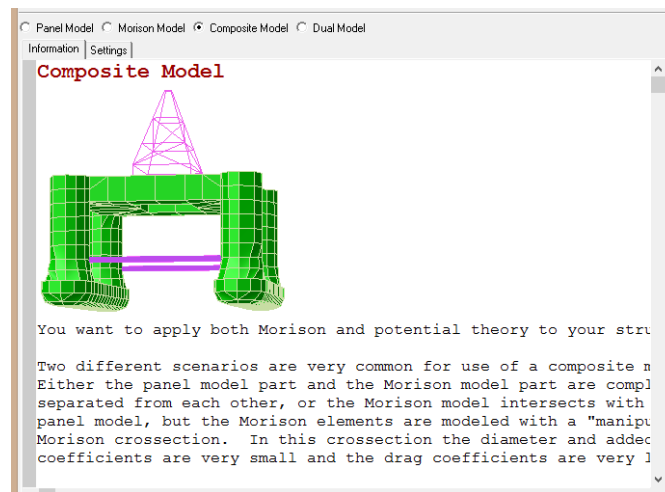
#### 4.2.3. Configuración del análisis hidrodinámico.

Se inicia eligiendo la configuración requerida para la plataforma flotante; para la plataforma Spar se requiere seleccionar el modelo de panel, morison o compuesto dependiendo el modelo a analizar.

El modelo de panel del sistema flotante determina las fuerzas del oleaje por un análisis de difracción, un modelo morison de elementos esbeltos para calcular las fuerzas del oleaje con la ecuación de Morison y modelo compuesto, que incluye elementos panel y esbeltos, toma en consideración ambas teorías.

Luego se configura el programa para que se efectúe el análisis hidrodinámico (ver figura 23) con base a:

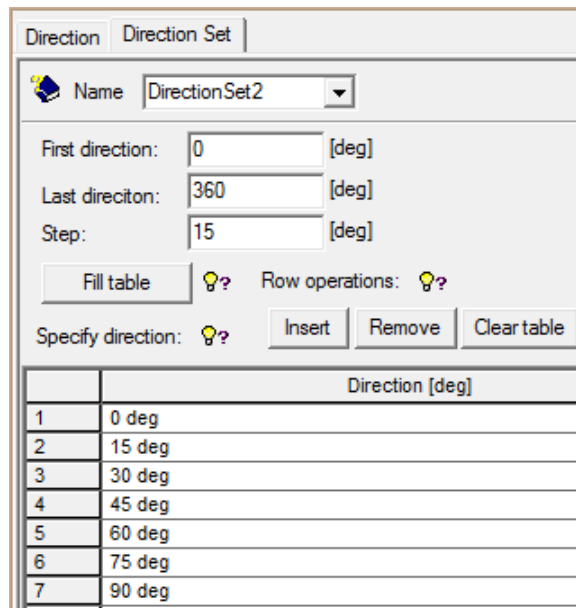
- Dominio de la frecuencia.
- Modelo de elementos finitos.
- Elementos tipo ancla, este para simular la rigidez de las líneas de amrre.



**Figura 4.6 Configuraciones de modelos para el asistente Wadam.**

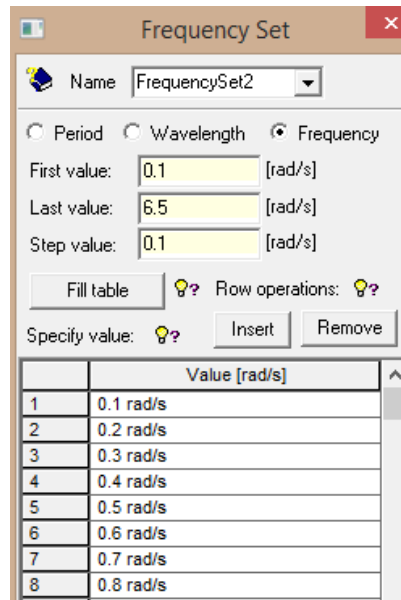
Donde cada frecuencia representará a una ola regular y para ésta se determinará los RAOs de la plataforma para sus 6 grados de libertad.

Se indican las características de los trenes de oleaje regular que se aplicarán sobre el casco de la plataforma; iniciando con la definición de la dirección de los mismos (ver figura 24).



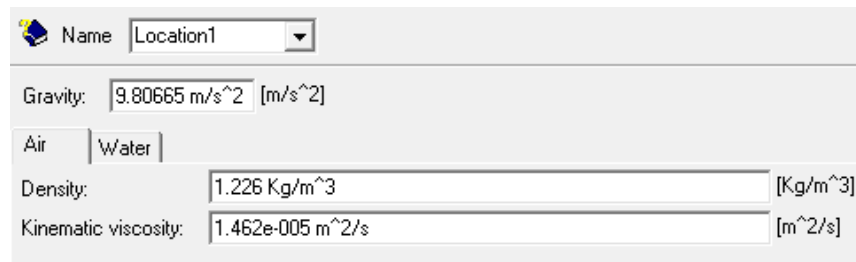
**Figura 4.7 Definición de la dirección del oleaje.**

Luego se define las frecuencias o periodos de las olas regulares a analizar (ver figura 25).



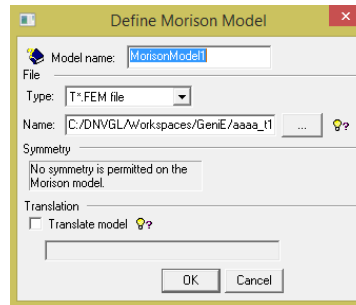
**Figura 4.8 Definición de las frecuencias de los trenes de oleaje regular para el análisis de difracción.**

Posteriormente se define la localización de la plataforma, la densidad y viscosidad cinemática del agua y aire, y la profundidad del mar del sitio de operación de la plataforma (ver figura 26).



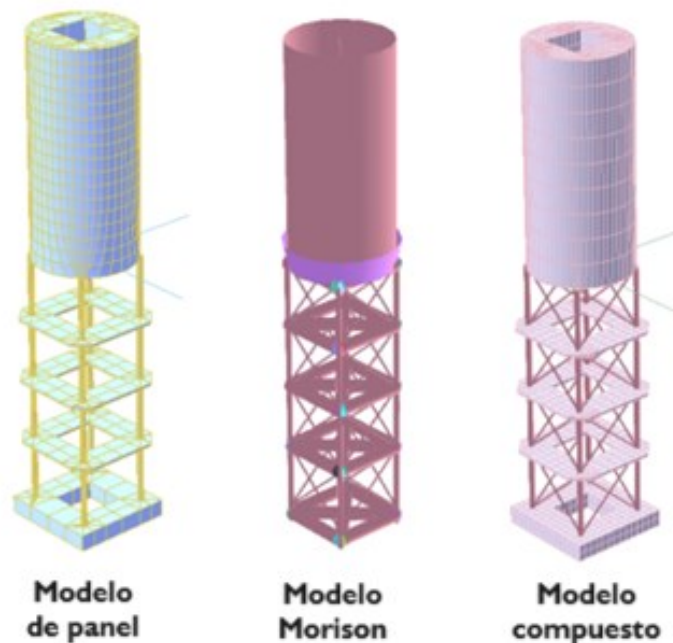
**Figura 4.9** Definición de los parámetros del agua, aire y tirante de agua del sitio de la localización de la plataforma.

Se importa el modelo de elementos finitos de la Spar (ver figura 27).



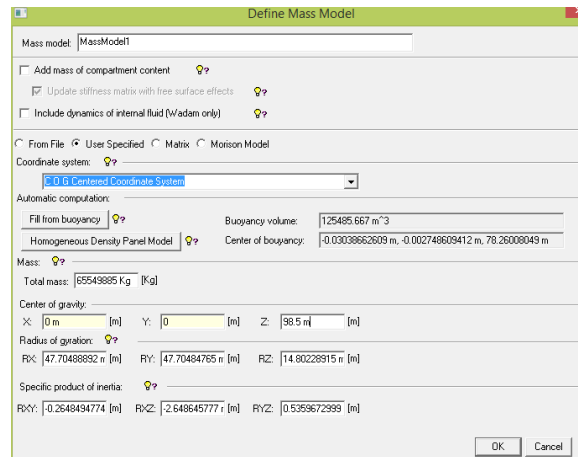
**Figura 4.10** Definición del modelo Morison.

Llegado a este punto, se visualiza el modelo de elementos finitos que se utilizará en el análisis hidrodinámico (ver figura 28).



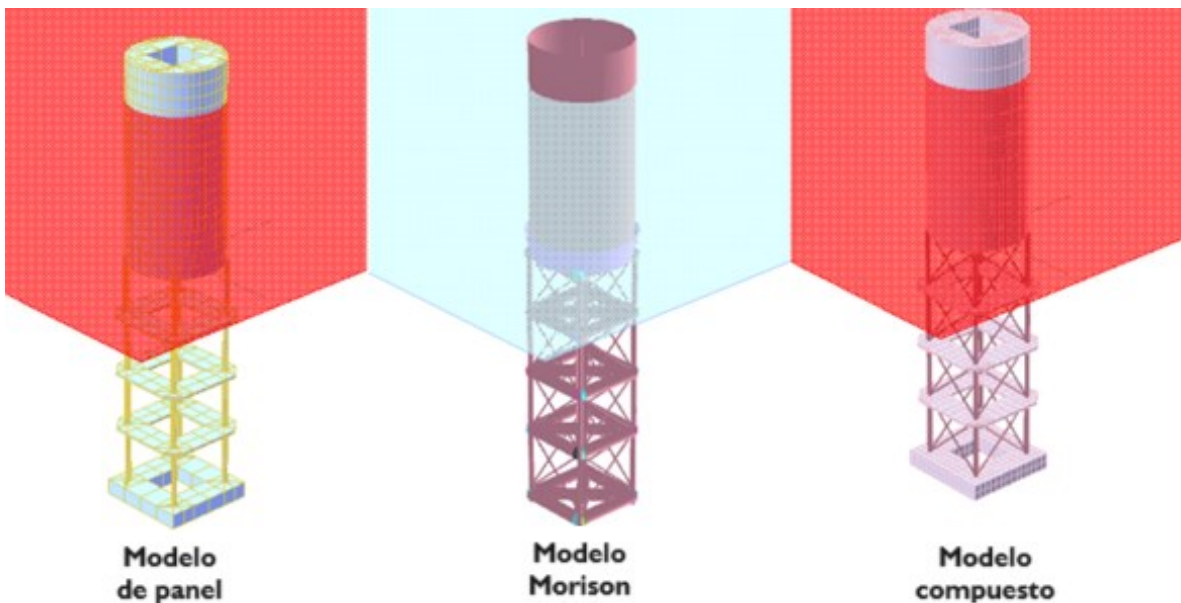
**Figura 4.11** Visualización de los modelos de elementos finitos.

A continuación, se define el desplazamiento, centro de gravedad y radios de giro (ver figura 29) de la plataforma Spar.



**Figura 4.12 Definición de las masas del modelo.**

Se debe realizar una visualización de la plataforma y su línea de agua (ver figura 30).



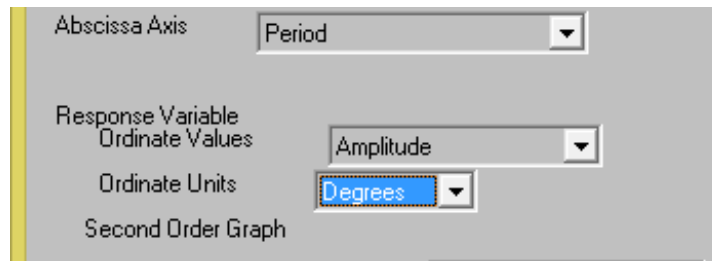
**Figura 4.13 Visualización de los modelos de la plataforma a su máximo calado.**

### 4.3. Respuesta hidrodinámica en flotación libre.

Se evaluaron diferentes simulaciones con condiciones de oleaje idénticas para la plataforma spar y sus 3 modelos diferentes: modelo de panel (la teoría del flujo potencial), modelo morison (efectos viscosos y de arrastre) y del modelo compuesto (una combinación de los dos modelos anteriores). Los trenes de oleaje se aplicaron en la dirección x, es decir, normal al plano de crujía.

A través de un procesador estadístico de respuesta se pueden visualizar los resultados del análisis hidrodinámico como masas adheridas, amortiguamiento, fuerzas de oleaje y los RAOs para cada uno de los seis grados de libertad de cuerpo rígido de la plataforma.

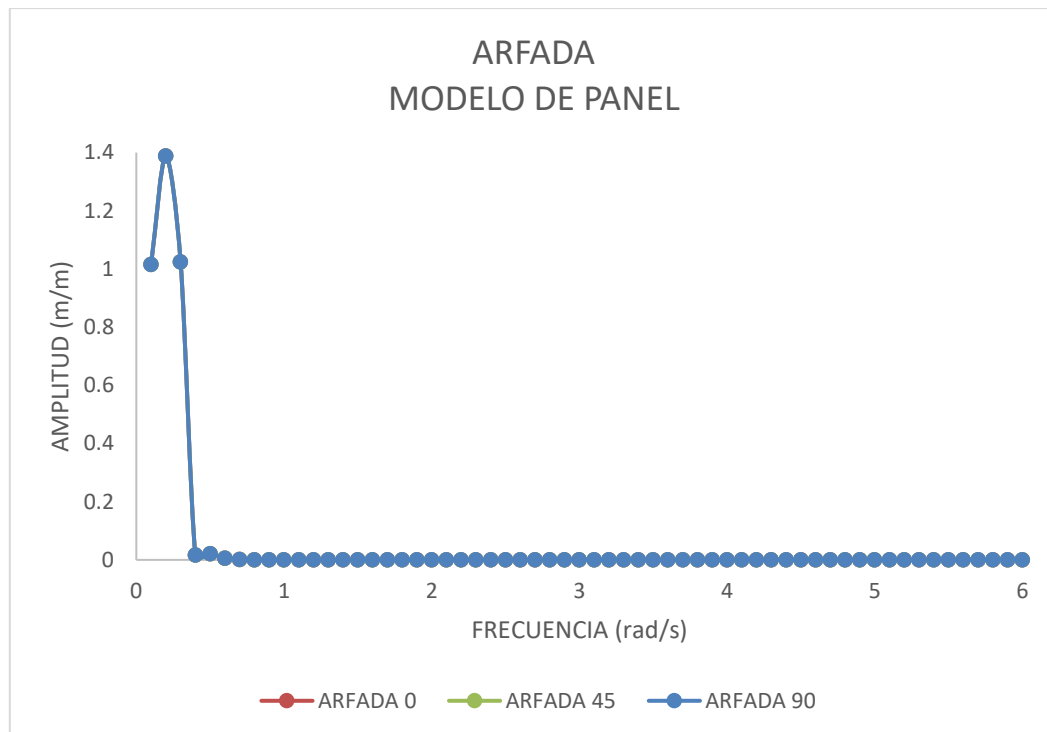
Inicialmente se debe definir la opción de presentación de los resultados, como los RAOs. Para ello se debe de cambiar las variables para el eje de los gráficos, donde el eje “X” se define el periodo o la frecuencia del oleaje y en el eje “Y” se define la amplitud de respuesta (ver figura 31).



**Figura 4.14** Definiendo unidades de los ejes.

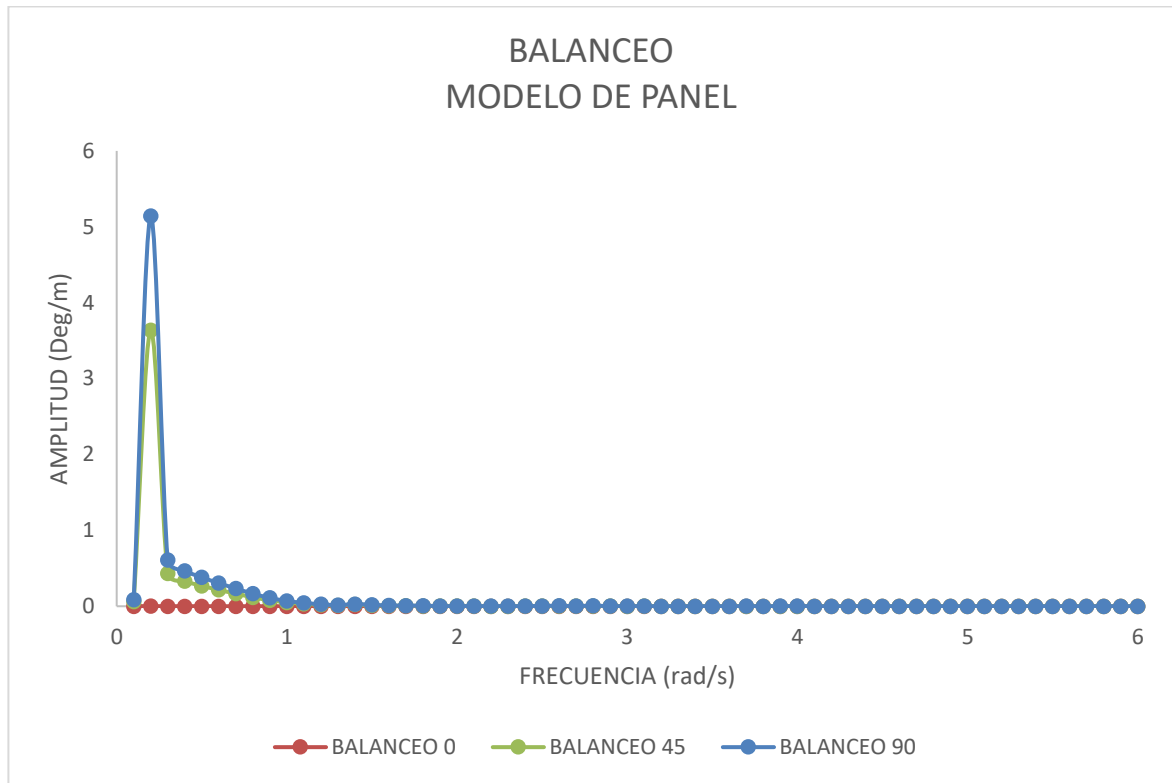
#### 4.3.1 RAOs de modelo de panel

A continuación, se muestran los RAOs de la plataforma en su modelo de panel, para una dirección de oleaje de 0 a 90 grados, en intervalos de 45 grados para los siguientes grados de libertad: arfada, balanceo y cabeceo (ver figuras 32, 33 y 34).



**Figura 4.15** RAOs de arfada del modelo de panel

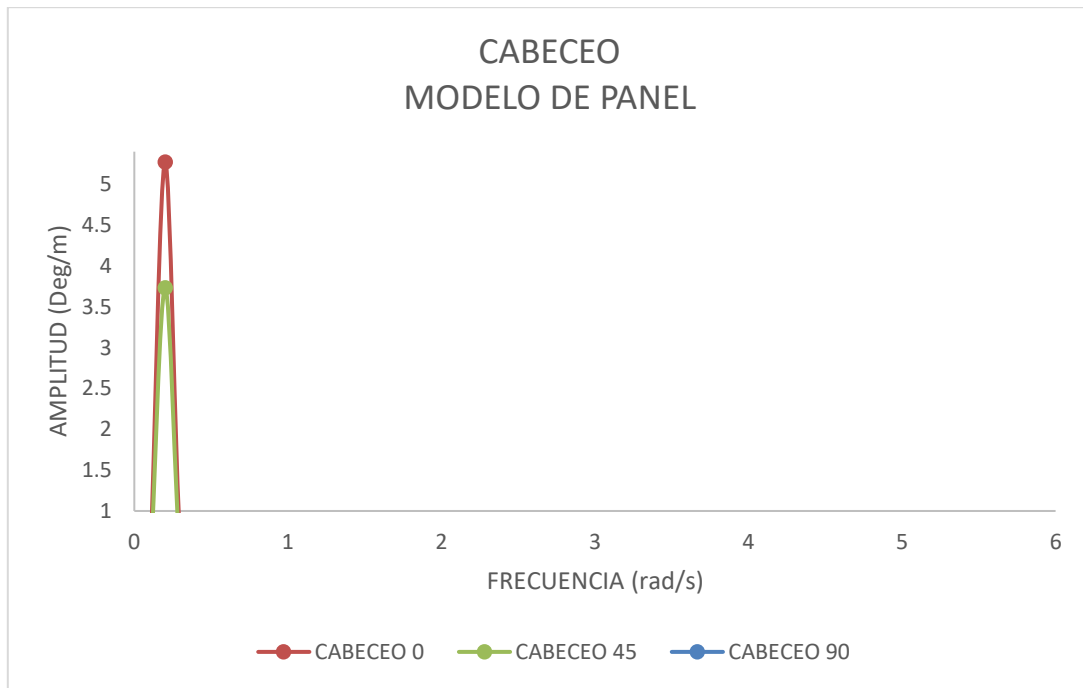
El valor máximo de amplitud obtenido en arfada, para cualquier dirección de oleaje es de 1.39 m/m y el período dominante es de 31.42 s (0.2 rad/s), esto es debido a la geometría del sistema flotante no presentará cambio alguno en este grado de libertad



**Figura 4.16 RAOs de balanceo del modelo de panel.**

El valor máximo de amplitud obtenido en balanceo, para una dirección de ola de 90° es de 5.14 deg/m y el período dominante es de 31.42 s (0.2 rad/s). Esta amplitud se debe a que la plataforma recibe de forma perpendicular el tren de oleaje y afecta a la estabilidad de la misma. (Rodríguez-Morales, 2020)





**Figura 4.17 RAOs de cabeceo del modelo de panel.**

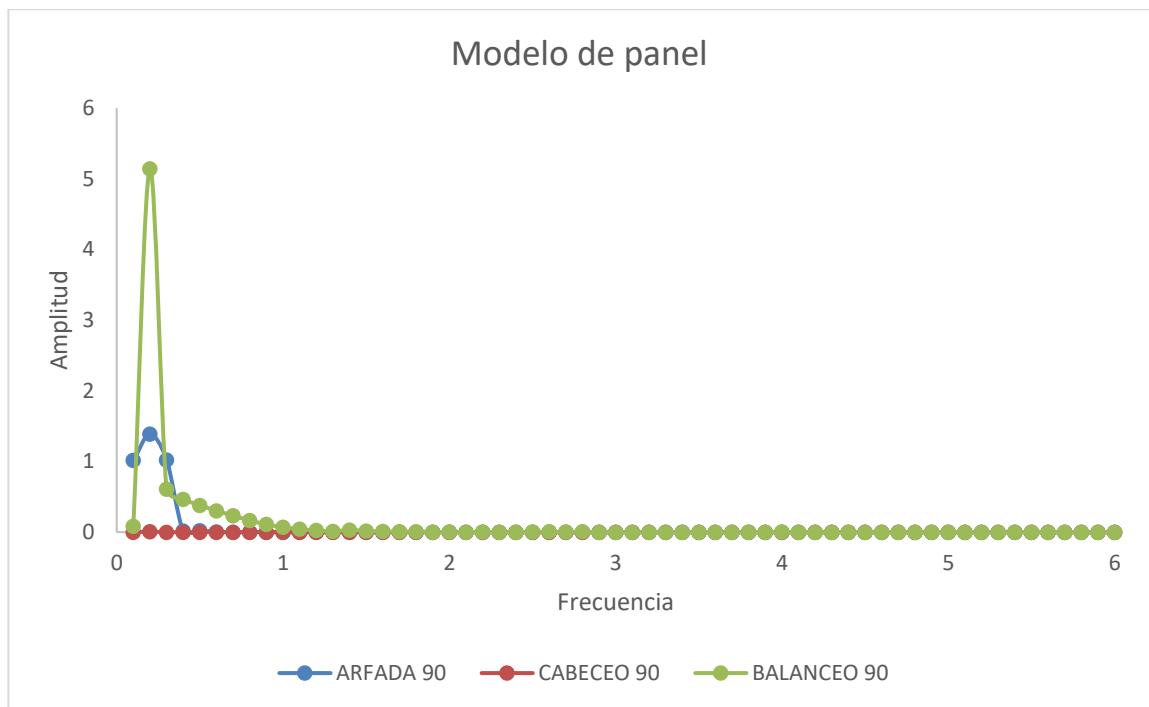
El valor máximo de amplitud obtenido en cabeceo, para una dirección de ola de  $0^\circ$  es de 5.27 deg/m y el período dominante es de 31.42 s (0.2 rad/s).

Las gráficas de los RAOs de balanceo y cabeceo muestran un comportamiento similar debido a la simetría de la forma geometría de la plataforma, obteniendo los mismos valores de amplitud y período en el ángulo de incidencia de oleaje a  $90^\circ$ .

Debido a la simetría del modelo, se identificó que las mayores amplitudes se obtuvieron a  $90^\circ$  y se repiten al mismo intervalo, la tabla 6 y la figura 35 muestran los resultados de los RAOs del modelo de panel a un ángulo de  $90^\circ$ .

**Tabla 4.1 Amplitud máxima de los RAOs del modelo de panel a  $90^\circ$ .**

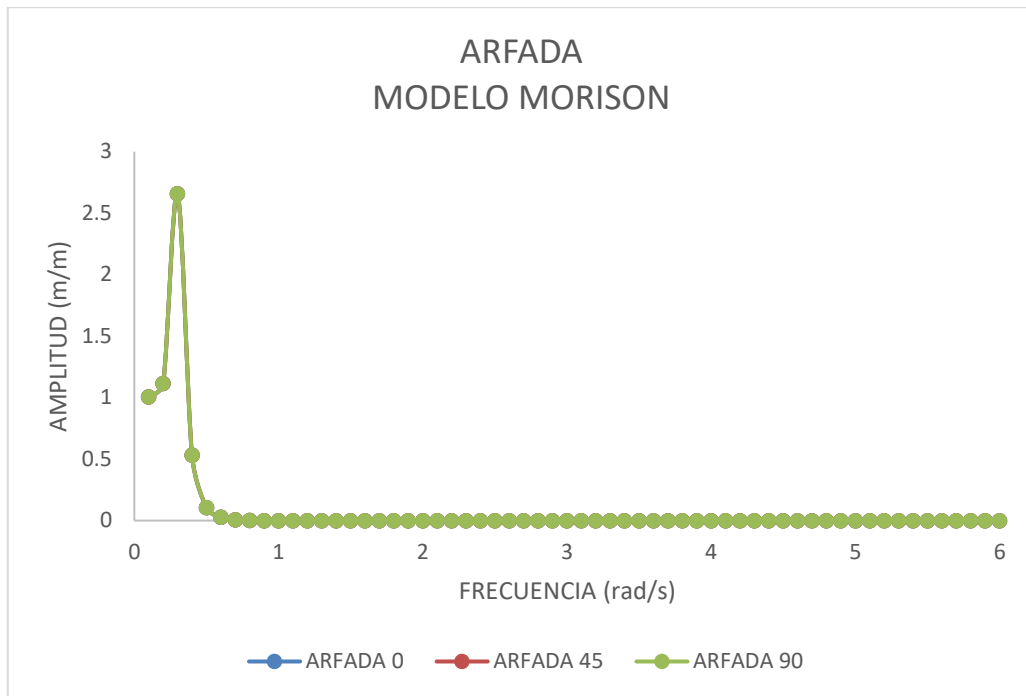
Modelo de panel				
Movimiento	Unidades	Amplitud	Frecuencia (rad/s)	Periodo (s)
Arfada	M/m	1.39	0.20	31.42
Cabeceo	Deg/m	0.01	0.20	31.42
Balanceo	Deg/m	5.14	0.20	31.42



**Figura 4.18 Raos del modelo de panel a un ángulo de 90°.**

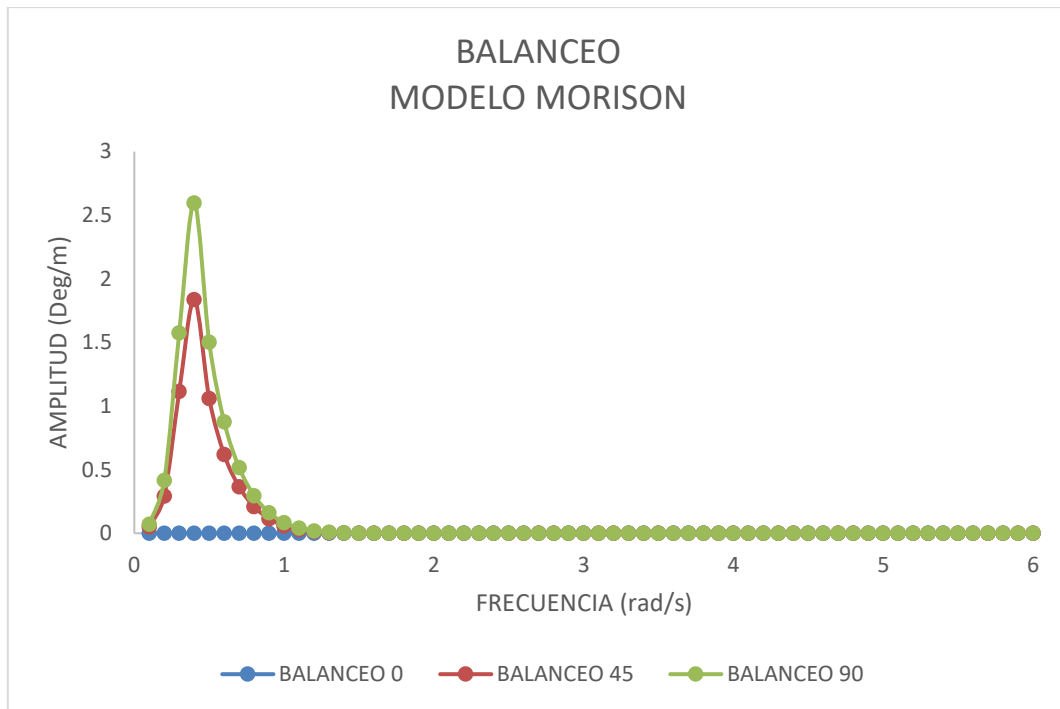
### 4.3.2 RAOs de modelo Morison

A continuación, se muestran los RAOs de la plataforma en su modelo morison, para una dirección de oleaje de 0 a 90 grados, en intervalos de 45 grados para los siguientes grados de libertad: arfada, balanceo y cabeceo (ver figuras 36, 37 y 38).



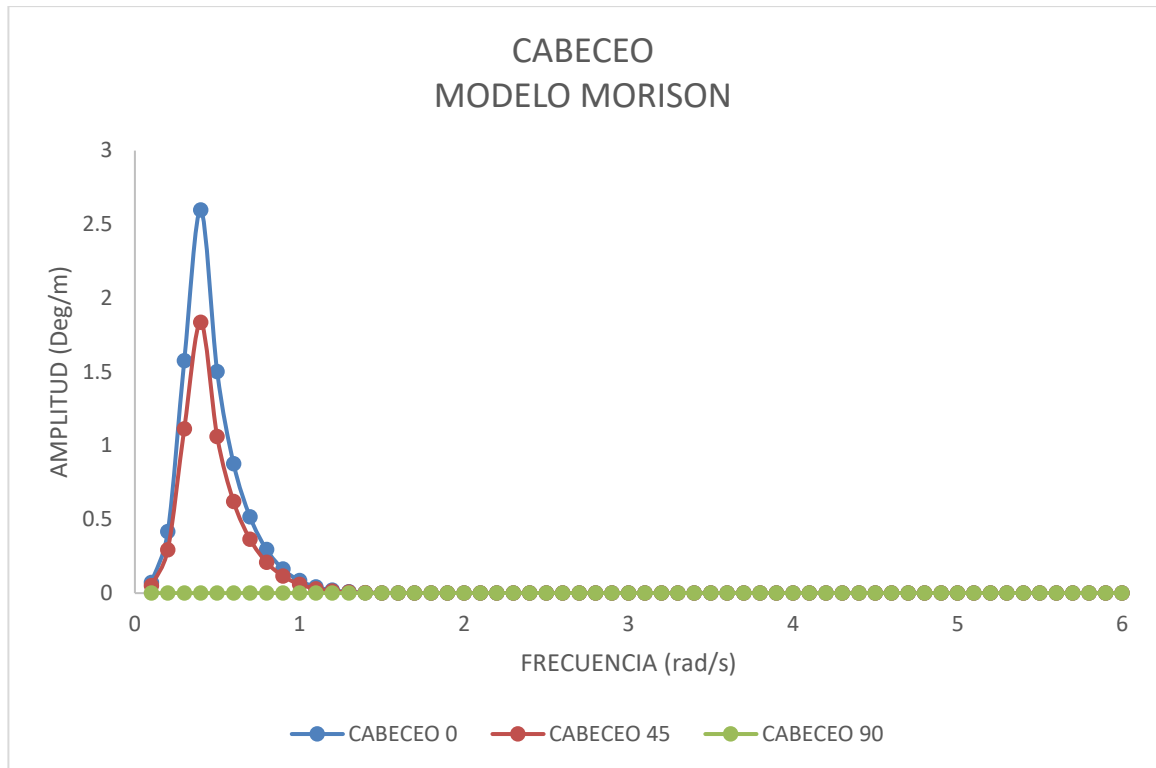
**Figura 4.19 RAOs de arfada del modelo Morison.**

El valor máximo de amplitud obtenido en arfada, para cualquier dirección de oleaje es de 2.66 m/m y el período dominante es de 20.94 s (0.3 rad/s) , esto es debido a la geometría del sistema flotante no presentará cambio alguno en este grado de libertad



**Figura 4.20 RAOs de balanceo del modelo Morison.**

El valor máximo de amplitud obtenido en balanceo, para una dirección de ola de  $90^\circ$  es de 2.6 deg/m y el período dominante es de 15.71 s (0.4 rad/s). Esta amplitud se debe a que la plataforma recibe de forma perpendicular el tren de oleaje y afecta a la estabilidad de la misma. (Rodríguez-Morales, 2020)



**Figura 4.21 RAOs de cabeceo del modelo Morison.**

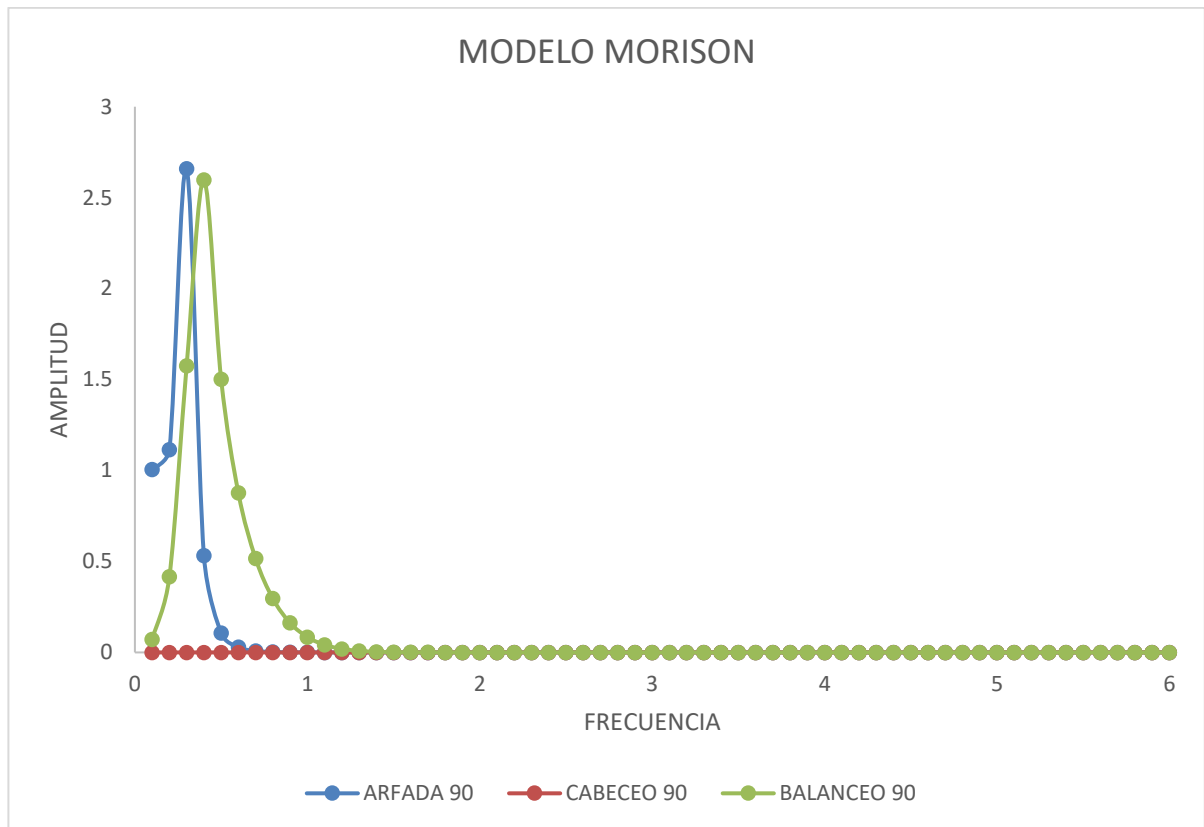
El valor máximo de amplitud obtenido en cabeceo, para una dirección de ola de  $0^\circ$  es de 2.6 deg/m y el período dominante es de 15.71 s (0.4 rad/s).

Las gráficas de los RAOs de balanceo y cabeceo muestran un comportamiento similar debido a la simetría de la forma geométrica de la plataforma, obteniendo los mismos valores de amplitud y período en el ángulo de incidencia de oleaje a  $90^\circ$ .

La tabla 7 y la figura 39 muestran los resultados de los RAOs del modelo de morison a un ángulo de  $90^\circ$ .

**Tabla 4.2 Amplitud máxima de los RAOs del modelo morison a 90°.**

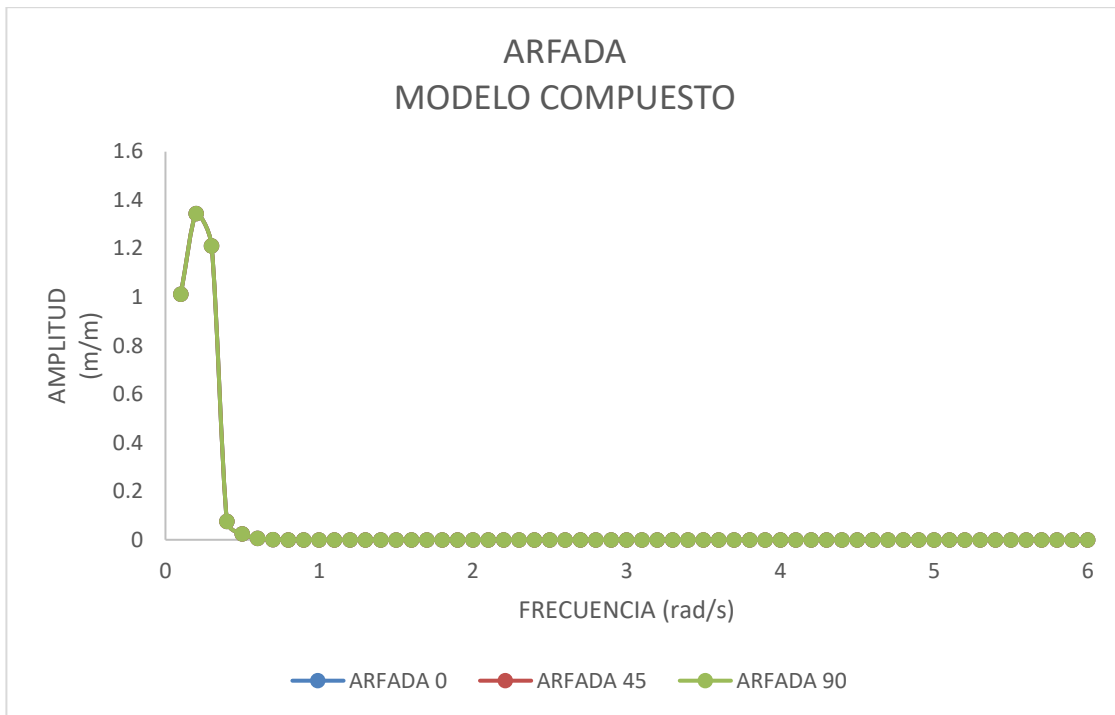
Modelo morison				
Movimiento	Unidades	Amplitud (deg/m)	Frecuencia (rad/s)	Periodo (s)
<b>Arfada</b>	m/m	2.66	0.30	20.94
<b>Cabeceo</b>	Deg/m	0.00	0.10	62.83
<b>Balaneo</b>	Deg/m	2.60	0.40	15.71



**Figura 4.22 Raos del modelo morison a un ángulo de 90°.**

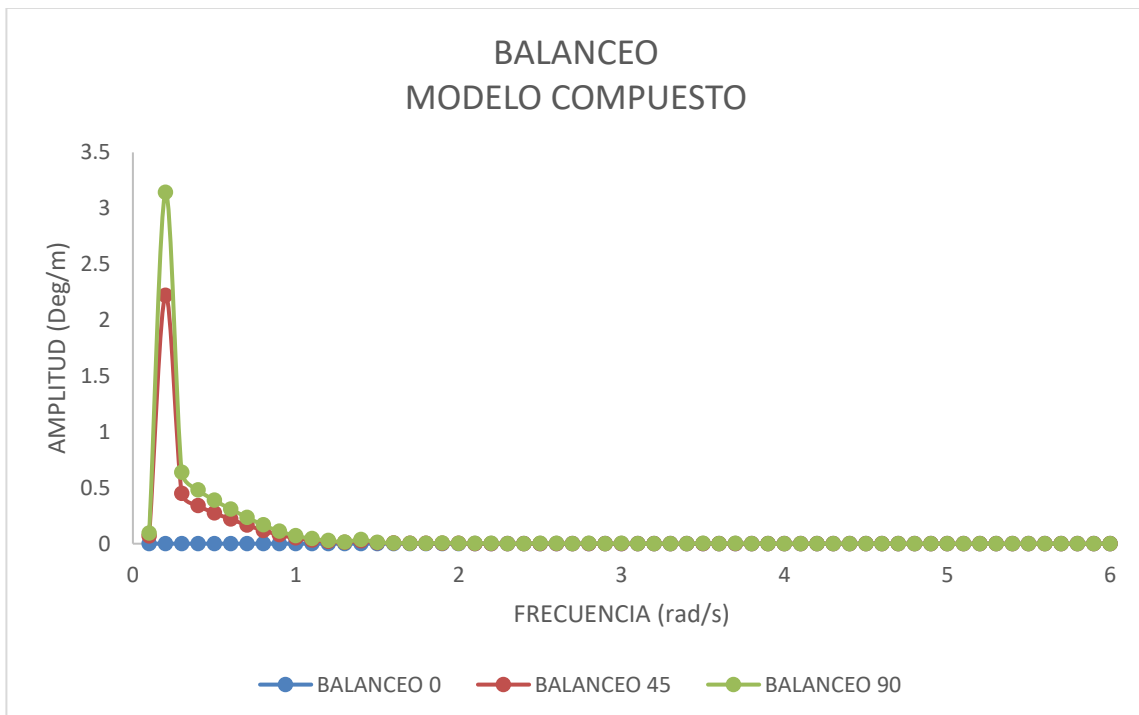
### 4.3.3 RAOs de modelo compuesto

A continuación, se muestran los RAOs de la plataforma en su modelo compuesto, para una dirección de oleaje de 0 a 90 grados, en intervalos de 45 grados para los siguientes grados de libertad: arfada, balanceo y cabeceo (ver figuras 40, 41 y 42).



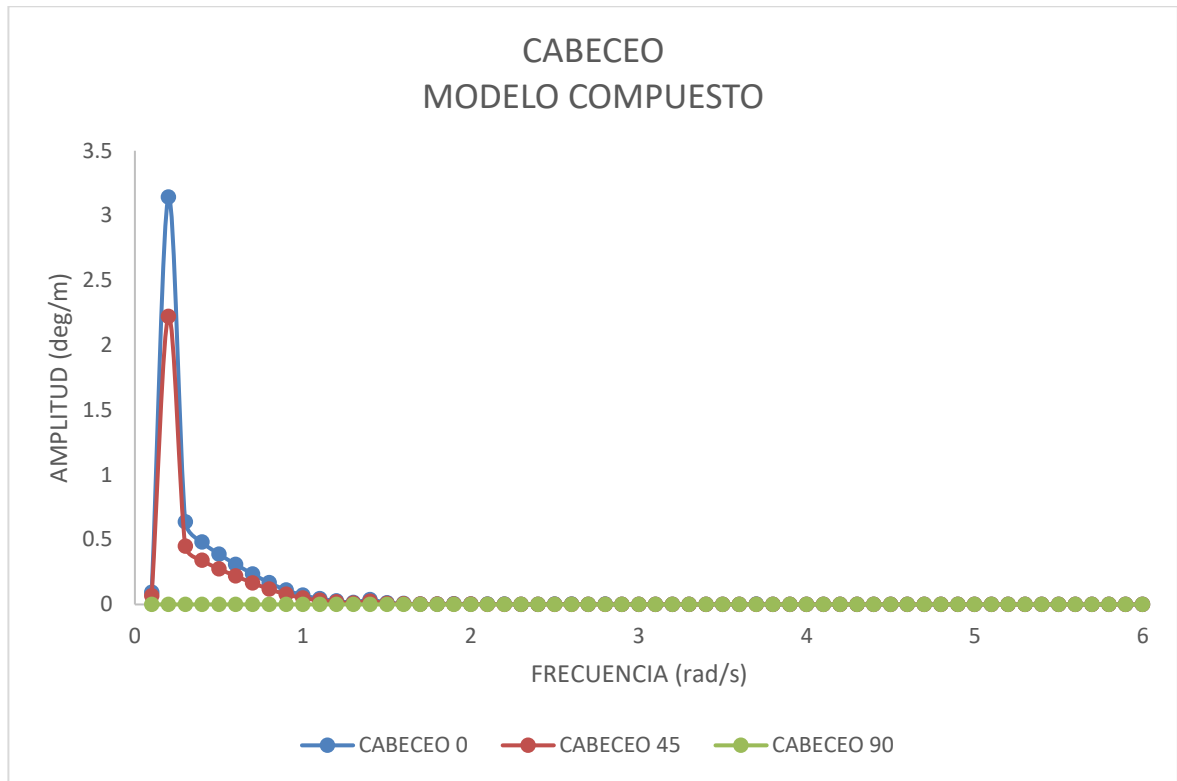
**Figura 4.23 RAOs de arfada del modelo compuesto.**

El valor máximo de amplitud obtenido en arfada, para cualquier dirección de oleaje es de 1.345 m/m y el período dominante es de 31.42 s (0.2 rad/s).



**Figura 4.24 RAOs de balanceo del modelo compuesto.**

El valor máximo de amplitud obtenido en balanceo, para una dirección de ola de  $90^\circ$  es de 3.14 deg/m y el período dominante es de 31.42 s (0.2 rad/s).



**Figura 4.25 RAOs de cabeceo del modelo compuesto.**

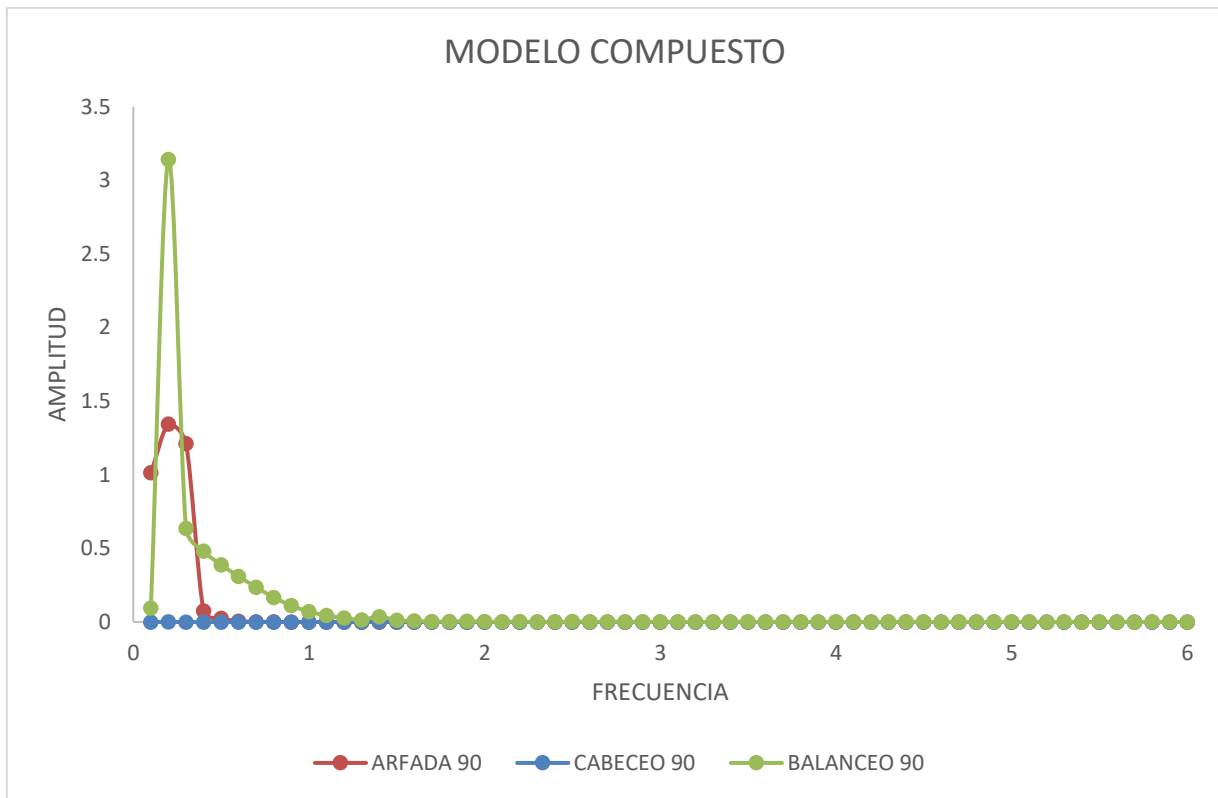
El valor máximo de amplitud obtenido en cabeceo, para una dirección de ola de  $0^\circ$  es de 3.142 deg/m y el período dominante es de 31.42 s (0.2 rad/s).

Las gráficas de los RAOs de balanceo y cabeceo muestran un comportamiento similar debido a la simetría de la forma geométrica de la plataforma, obteniendo los mismos valores de amplitud y período en el ángulo de incidencia de oleaje a  $90^\circ$ .

La tabla 8 y la figura 43 muestran los resultados de los RAOs del modelo compuesto a un ángulo de  $90^\circ$ .

**Tabla 4.3 Amplitud máxima de los RAOs del modelo compuesto a 90°.**

Modelo compuesto				
Movimiento	Unidades	Amplitud (deg/m)	Frecuencia (rad/s)	Periodo (s)
Arfada	M/m	1.35	0.20	31.42
Cabeceo	Deg/m	0.00	1.40	4.49
Balaneo	Deg/m	3.14	0.20	31.42

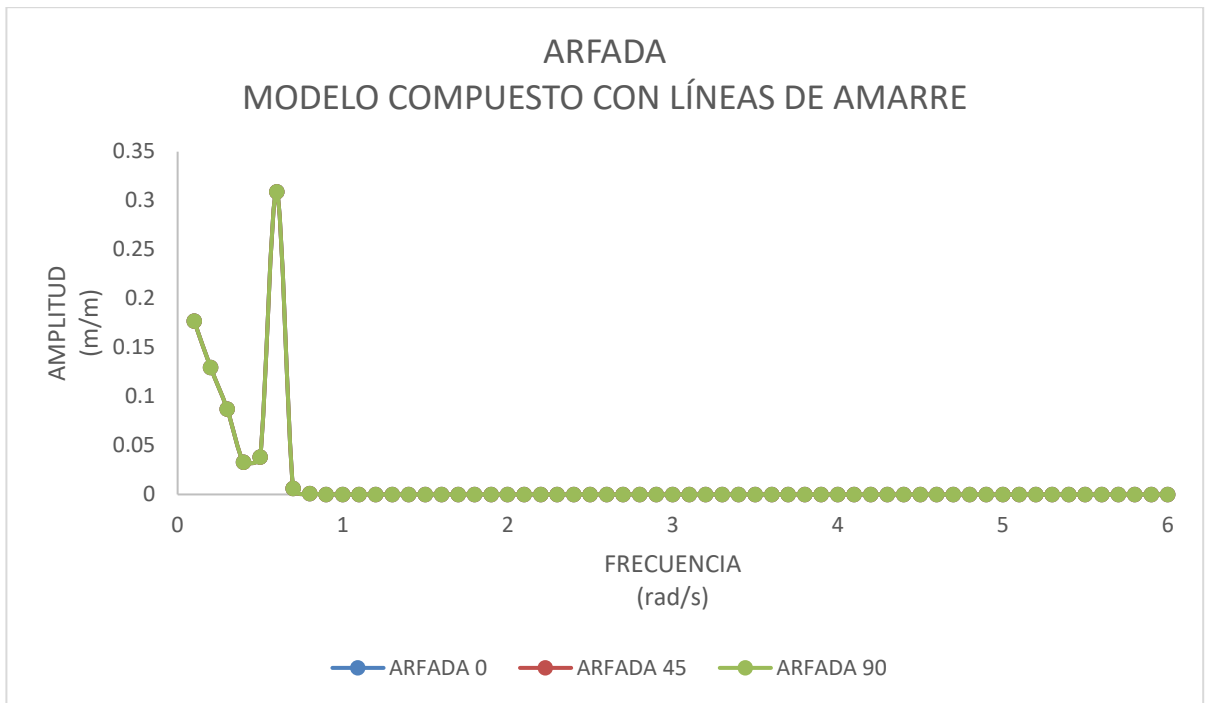


**Figura 4.26 Raos del modelo compuesto a un ángulo de 90°.**

#### **4.4. Respuesta hidrodinámica con líneas de amarre.**

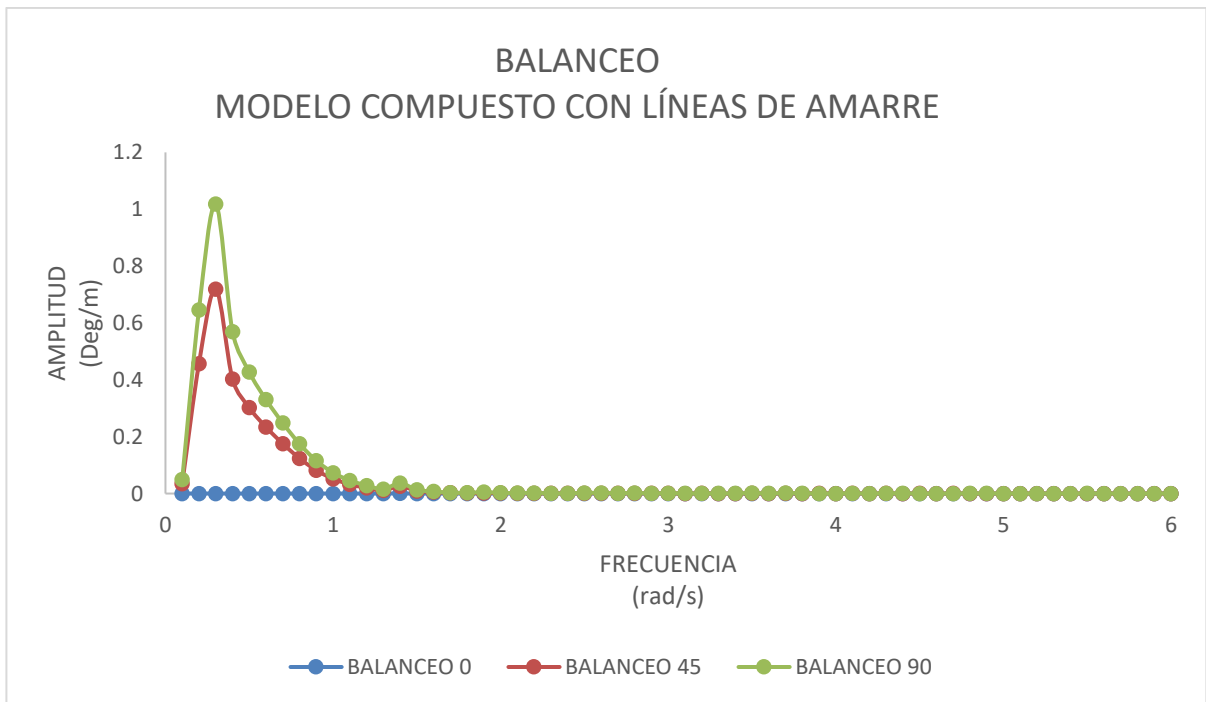
A continuación, se muestran los RAOs de la plataforma en su modelo de panel con líneas de amarre, para una dirección de oleaje de 0 a 90 grados, en intervalos de 45 grados para los siguientes grados de libertad: arfada, balanceo y cabeceo (ver figuras 44, 45 y 46).





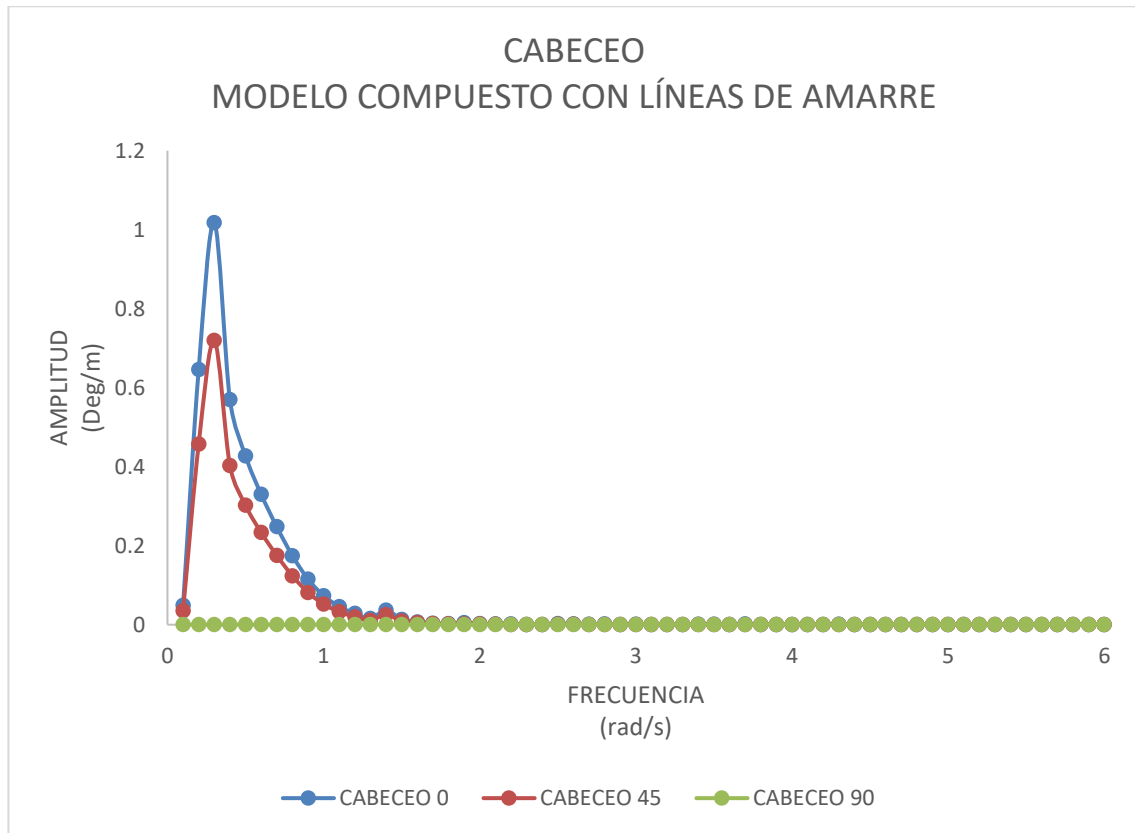
**Figura 4.27 RAOs de arfada del modelo compuesto con líneas de amarre.**

El valor máximo de amplitud obtenido en arfada, para cualquier dirección de oleaje es de 0.309 m/m y el período dominante es de 10.47 s (0.6 rad/s).



**Figura 4.28 RAOs de balanceo del modelo compuesto con líneas de amarre.**

El valor máximo de amplitud obtenido en balanceo, para una dirección de ola de  $90^\circ$  es de 1.02 deg/m y el período dominante es de 20.94 s (0.3 rad/s).



**Figura 4.29 RAOs de cabeceo del modelo compuesto con líneas de amarre.**

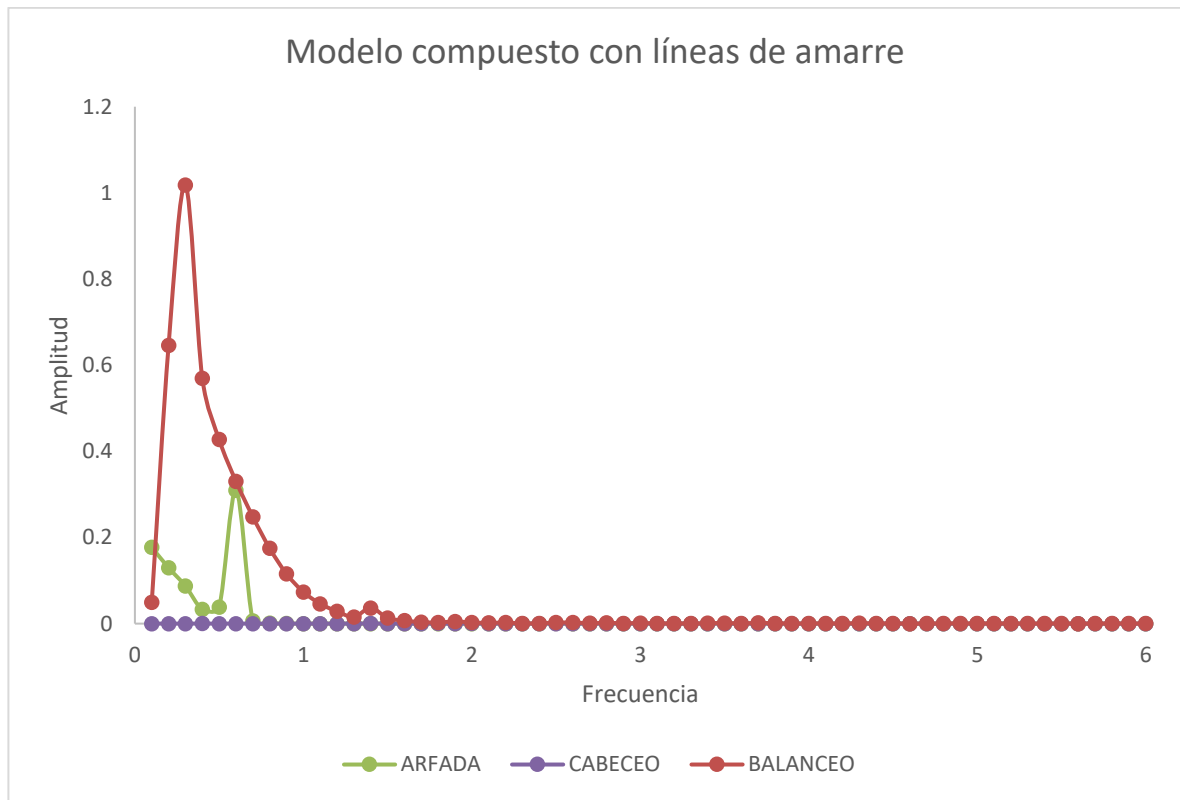
El valor máximo de amplitud obtenido en cabeceo, para una dirección de ola de  $0^\circ$  es de 1.018 deg/m y el período dominante es de 20.94 s (0.3 rad/s).

Las gráficas de los RAOs de balanceo y cabeceo muestran un comportamiento similar debido a la simetría de la forma geometría de la plataforma, obteniendo los mismos valores de amplitud y período en el ángulo de incidencia de oleaje a  $90^\circ$ .

La tabla 9 y la figura 47 muestran los resultados de los RAOs del modelo compuesto con líneas de amarre a un ángulo de  $90^\circ$ .

**Tabla 4.4 Amplitud máxima de los RAOs del modelo compuesto con líneas de amarre a 90°.**

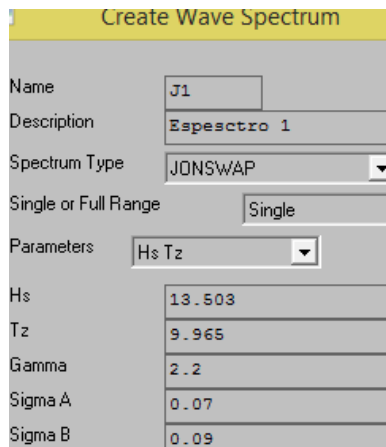
Modelo compuesto con restricción				
Movimiento	Unidades	Amplitud (deg/m)	Frecuencia (rad/s)	Periodo (s)
<b>Arfada</b>	m/m	0.31	0.60	10.47
<b>Cabeceo</b>	Deg/m	0.00	1.40	4.49
<b>Balanceo</b>	Deg/m	1.02	0.30	20.94



**Figura 4.30 Raos modelo compuesto con líneas de amarre a un ángulo de 90°.**

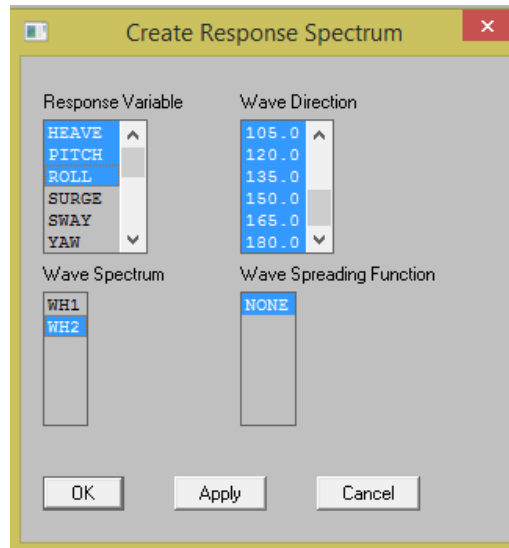
### 4.5. Espectro de respuesta.

Con la finalidad de calcular los espectros de respuesta para cada grado de libertad de la plataforma, se debe de definir el espectro de oleaje de JONSWAP donde la altura de ola (Hs) y el periodo (Tz) son definidos para el sitio de operación (ver figura 48).



**Figura 4.31 Creación de espectro de ola.**

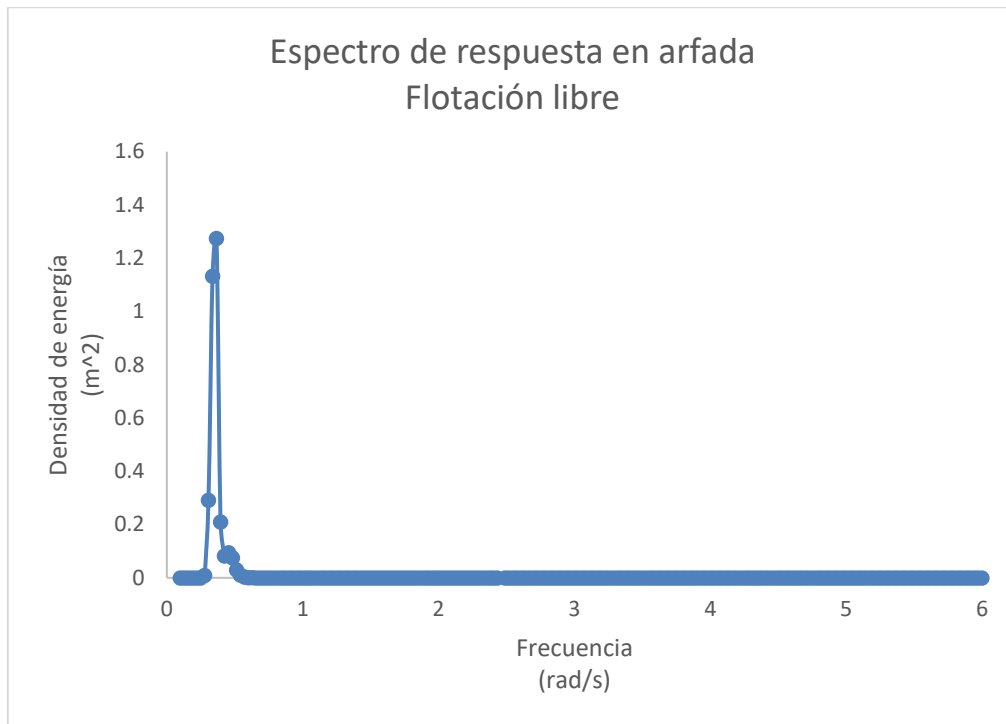
Una vez definido el espectro de oleaje y utilizando la teoría de la Sección 2.2.7, se obtiene el espectro de respuesta de la plataforma, en el cual se puede visualizar en cada grado de libertad (ver figura 49).



**Figura 4.32 Definición de grado de libertad y dirección de ola para el espectro de respuesta.**

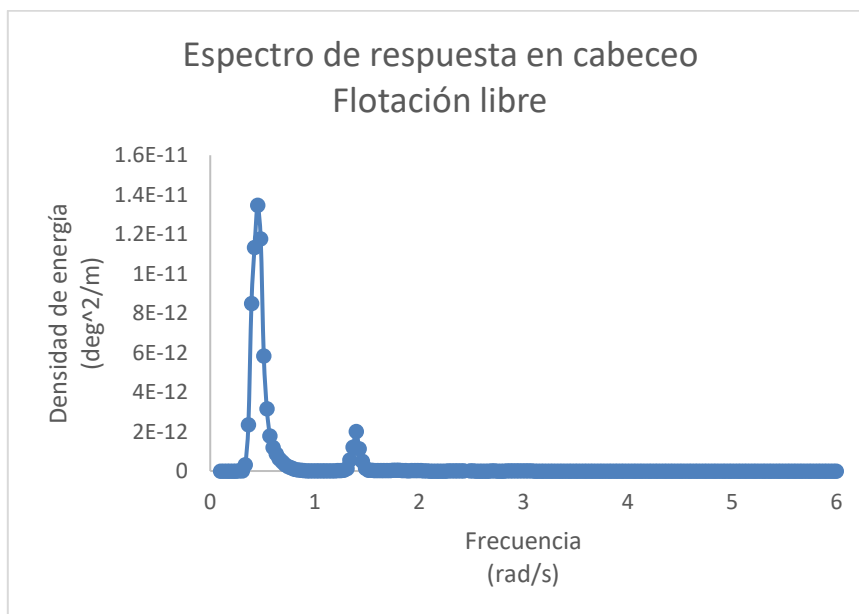
#### 4.5.1 Espectro de respuesta en flotación libre

A continuación, se muestran los espectros de respuesta de la plataforma en su modelo compuesto en flotación libre, para una dirección de oleaje de 90 grados, para los siguientes grados de libertad: arfada, balanceo y cabeceo (ver figuras 50, 51 y 52).



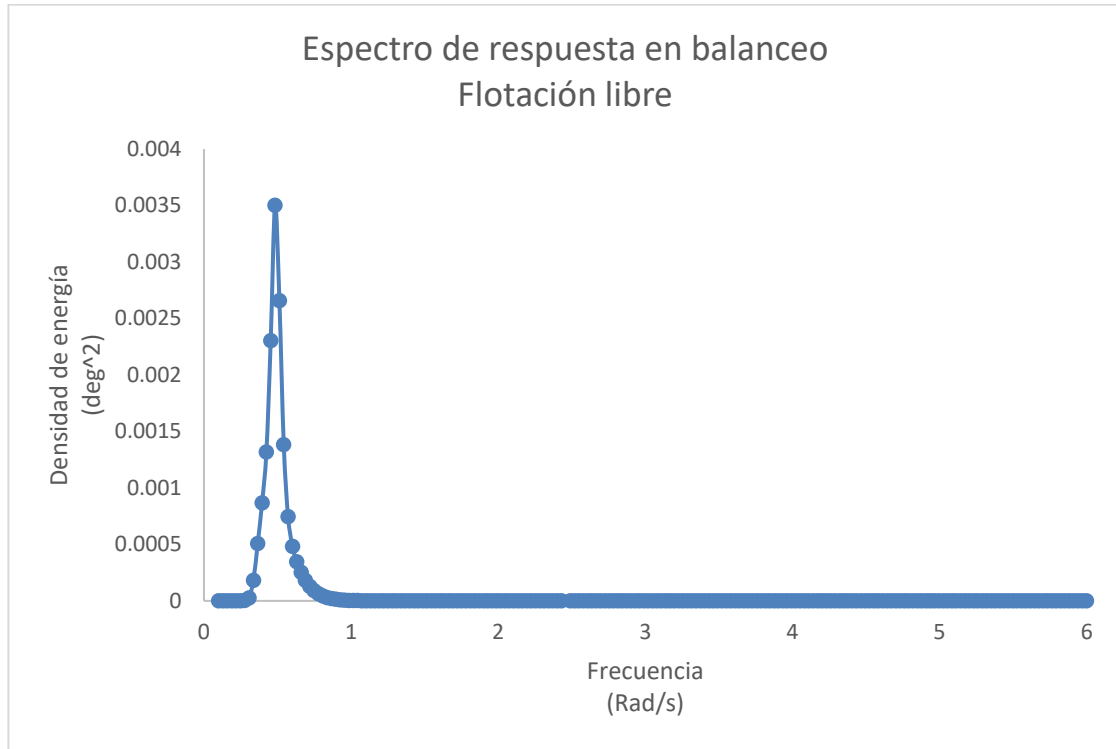
**Figura 4.33 Espectro de respuesta de arfada en flotación libre.**

El valor máximo del espectro de respuesta en arfada es de  $1.275 \text{ m}^2$  y su periodo es el periodo natural de la plataforma, que es de  $17.19 \text{ s}$ . si la plataforma se encontrara en condiciones de oleaje con ese periodo, comenzaría a resonar que puede provocar a un colapso.



**Figura 4.34 Espectro de respuesta de cabeceo en flotación libre.**

El valor máximo del espectro de respuesta en cabeceo es de  $1.347 \times 10^{11} \text{ deg}^2$  y su periodo es el periodo natural de la plataforma, que es de 13 s. si la plataforma se encontrara en condiciones de oleaje con ese periodo, comenzaría a resonar que puede provocar a un colapso.

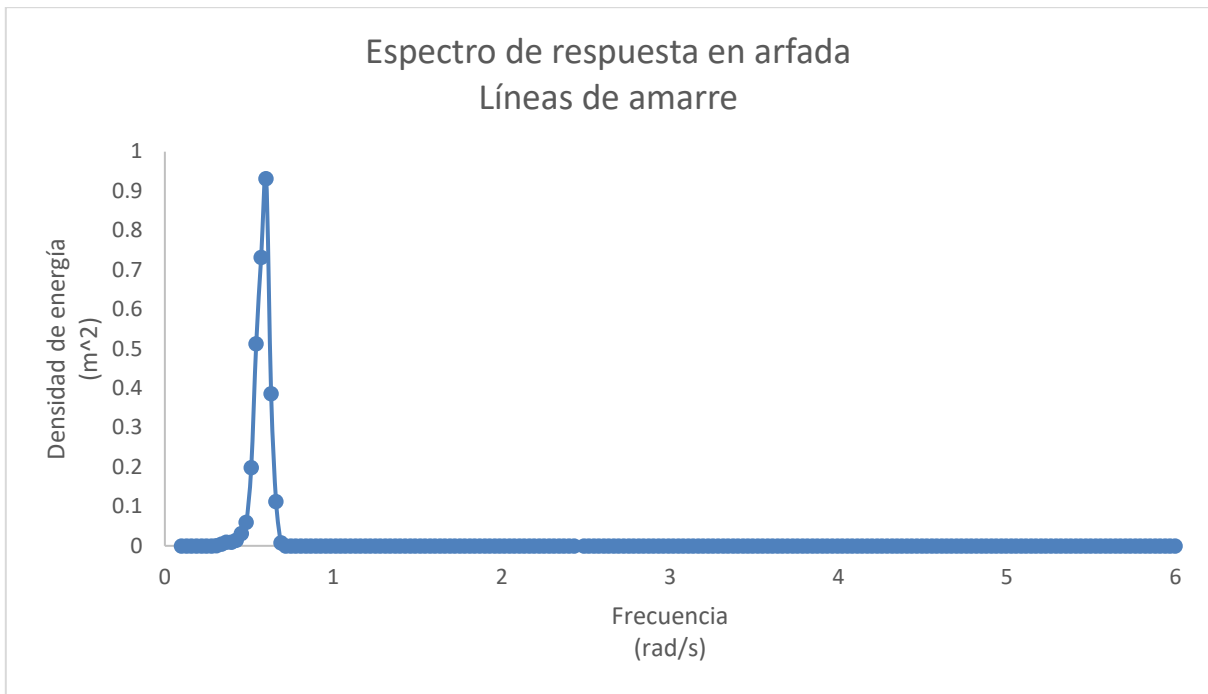


**Figura 4.35 Espectro de respuesta de balanceo en flotación libre.**

El valor máximo del espectro de respuesta en balanceo es de  $0.003503 \text{ deg}^2$  y su periodo es el periodo natural de la plataforma, que es de 13 s. si la plataforma se encontrara en condiciones de oleaje con ese periodo, comenzaría a resonar que puede provocar a un colapso.

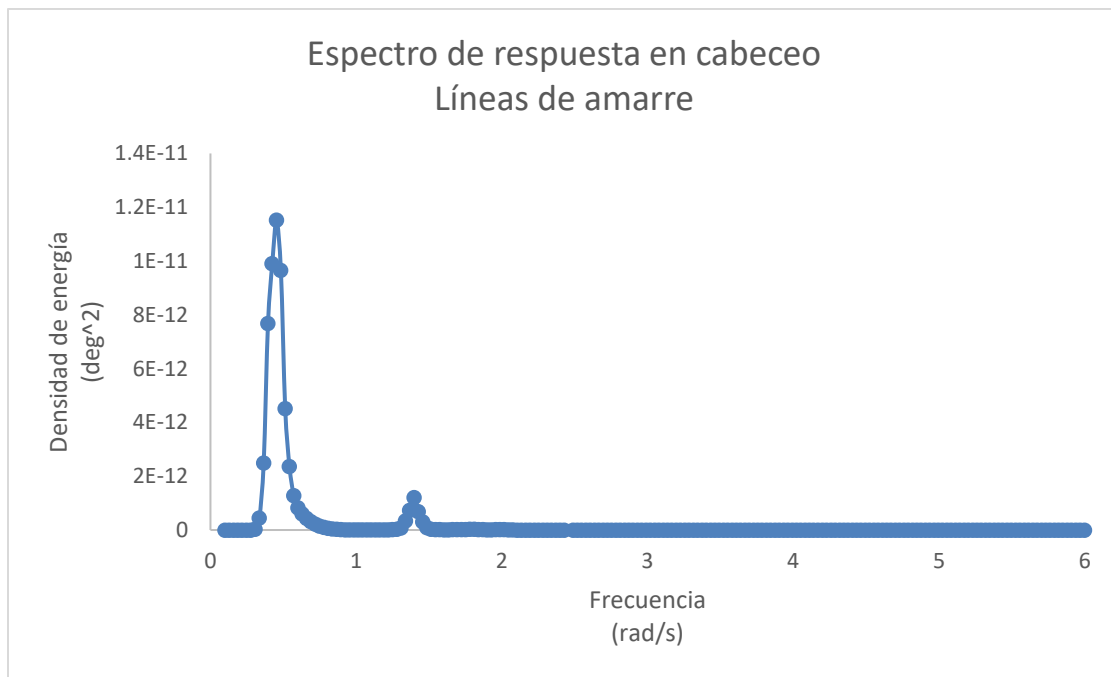
#### 4.5.2 Espectro de respuesta con líneas de amarre.

A continuación, se muestran los espectros de respuesta de la plataforma en su modelo compuesto con líneas de amarre, para una dirección de oleaje de 90 grados, para los siguientes grados de libertad: arfada, balanceo y cabeceo (ver figuras 53, 54 y 55).



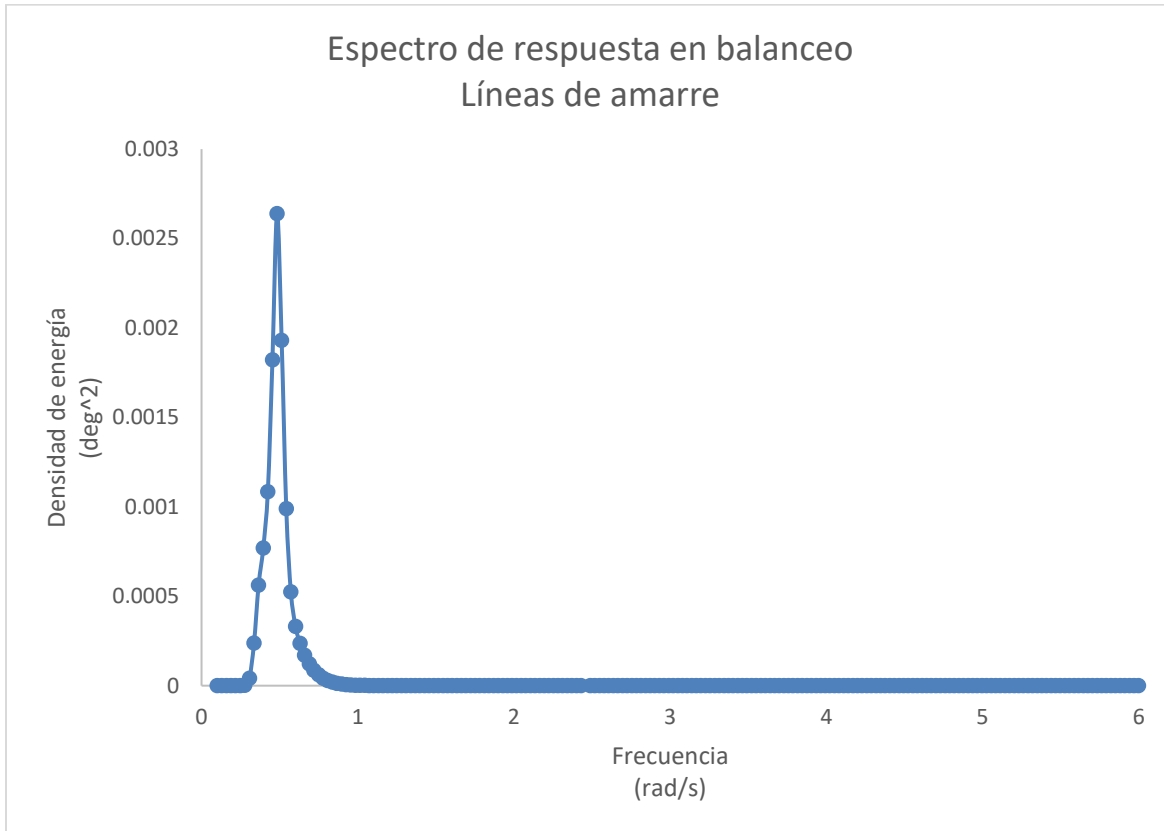
**Figura 4.36** Espectro de respuesta de arfada con líneas de amarre.

El valor máximo del espectro de respuesta en arfada es de  $0.9316 \text{ m}^2$  y su periodo es el periodo natural de la plataforma, que es de  $10.45 \text{ s}$ . si la plataforma se encontrara en condiciones de oleaje con ese periodo, comenzaría a resonar que puede provocar a un colapso.



**Figura 4.37** Espectro de respuesta de cabeceo con líneas de amarre.

El valor máximo del espectro de respuesta en cabeceo es de  $1.152 \times 10^{11} \text{ deg}^2$  y su periodo es el periodo natural de la plataforma, que es de 13 s. si la plataforma se encontrara en condiciones de oleaje con ese periodo, comenzaría a resonar que puede provocar a un colapso.



**Figura 4.38** Espectro de respuesta de balanceo con líneas de amarre.

El valor máximo del espectro de respuesta en balanceo es de  $0.002639 \text{ deg}^2$  y su periodo es el periodo natural de la plataforma, que es de 13 s. si la plataforma se encontrara en condiciones de oleaje con ese periodo, comenzaría a resonar que puede provocar a un colapso.



## 5. Resultados del análisis hidrodinámico.

En el capítulo anterior se evaluó los 3 modelos diferentes: modelo de panel (la teoría del flujo potencial), modelo morison (efectos viscosos y de arrastre) y del modelo compuesto (una combinación de los dos modelos anteriores).

Al estudiar los RAOs obtenidos, se identificó que en un ángulo de  $90^\circ$  se tienen las mayores repuestas hidrodinámicas y estos nos indican la excitación inducida por el oleaje a los movimientos de la plataforma en una frecuencia específica, pero va a depender del amortiguamiento y rigidez del propio modelo.

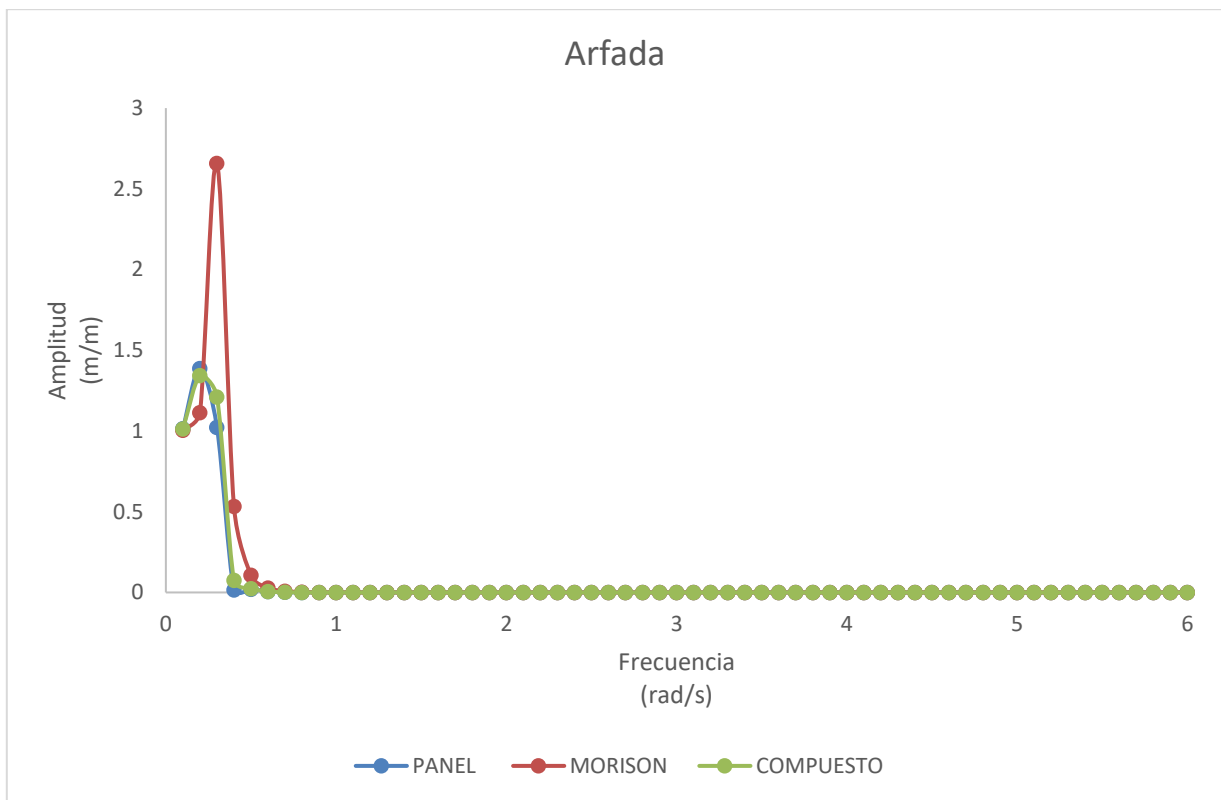
En este capítulo analizaremos los resultados obtenidos por los RAOs, de los 3 modelos en flotación libre y el modelo compuesto con líneas de amarre, así como los espectros de respuesta de los modelos compuestos en flotación libre y con líneas de amarre para determinar los movimientos máximos de respuesta.

### 5.1. Resultados con flotación libre

Las amplitudes máximas en arfada de los modelos de panel, morison y compuesto en flotación libre fueron con un ángulo de incidencia de  $90^\circ$ , en la tabla 10 se muestran los resultados obtenidos y sus representaciones gráficas en la figura 56.

**Tabla 5.1 Comparación de amplitudes máximas en arfada en flotación libre.**

Arfada			
Modelo	Amplitud (m/m)	Frecuencia (rad/s)	Periodo (s)
Panel	1.388	0.2	31.416
Morison	2.659	0.3	20.944
Compuesto	1.345	0.2	31.416



**Figura 5.1 Comparación de amplitudes máximas en arfada en flotación libre.**

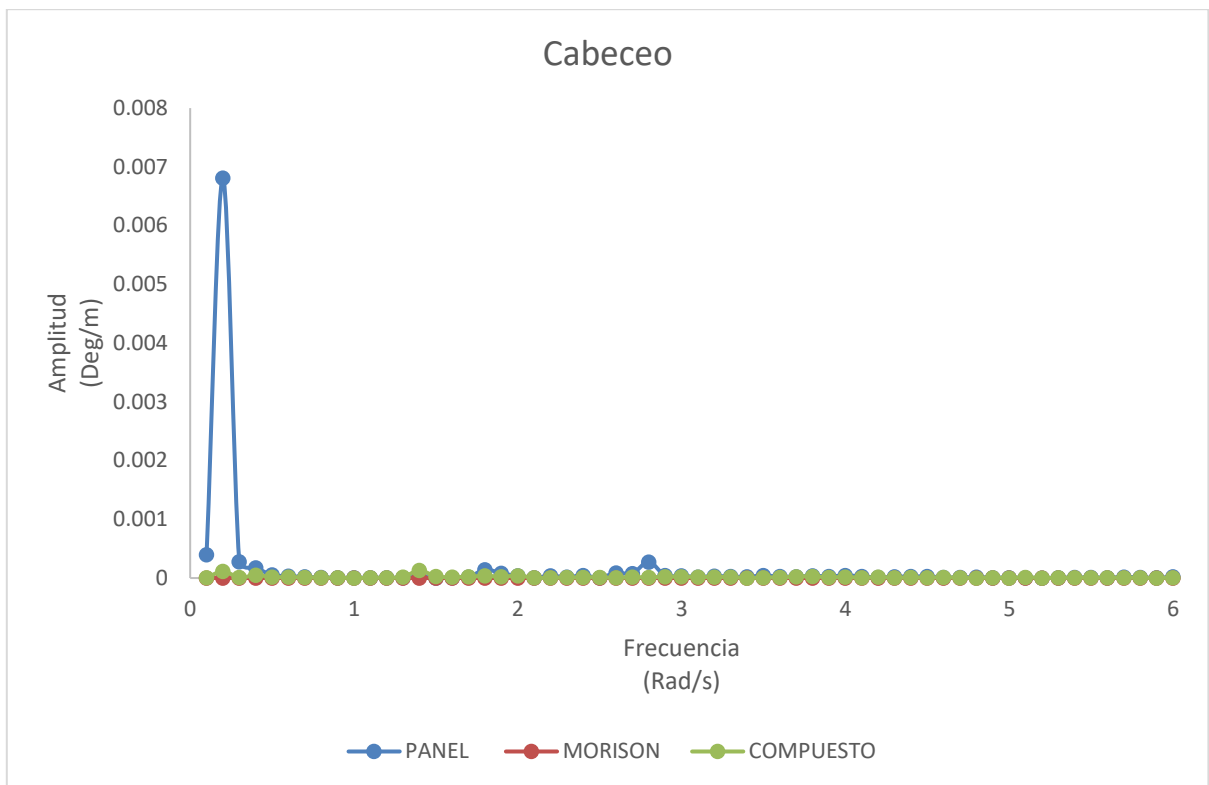
El modelo morison muestra una mayor amplitud en arfada debido a que la estructura de su soft tank y heave plates se representaron con elementos esbeltos con volúmenes equivalentes, pero estos no contienen las mismas áreas que restringen el flujo en dirección vertical.

Los modelos de panel y compuesto muestran amplitudes menores, esto es debido a que la distribución del empuje que se obtiene es menor que en el modelo morison.

Las amplitudes máximas en cabeceo de los modelos de panel, morison y compuesto en flotación libre fueron con un ángulo de incidencia de 90°, en la tabla 11 se muestran los resultados obtenidos y sus representaciones gráficas en la figura 57.

**Tabla 5.2 Comparación de amplitudes máximas en cabeceo en flotación libre.**

Cabeceo			
Angulo de incidencia	Amplitud (deg/m)	Frecuencia (rad/s)	Periodo (s)
<b>Panel</b>	0.006809	0.2	31.42
<b>Morison</b>	0.000000201	0.1	62.83
<b>Compuesto</b>	0.0001309	1.4	4.49



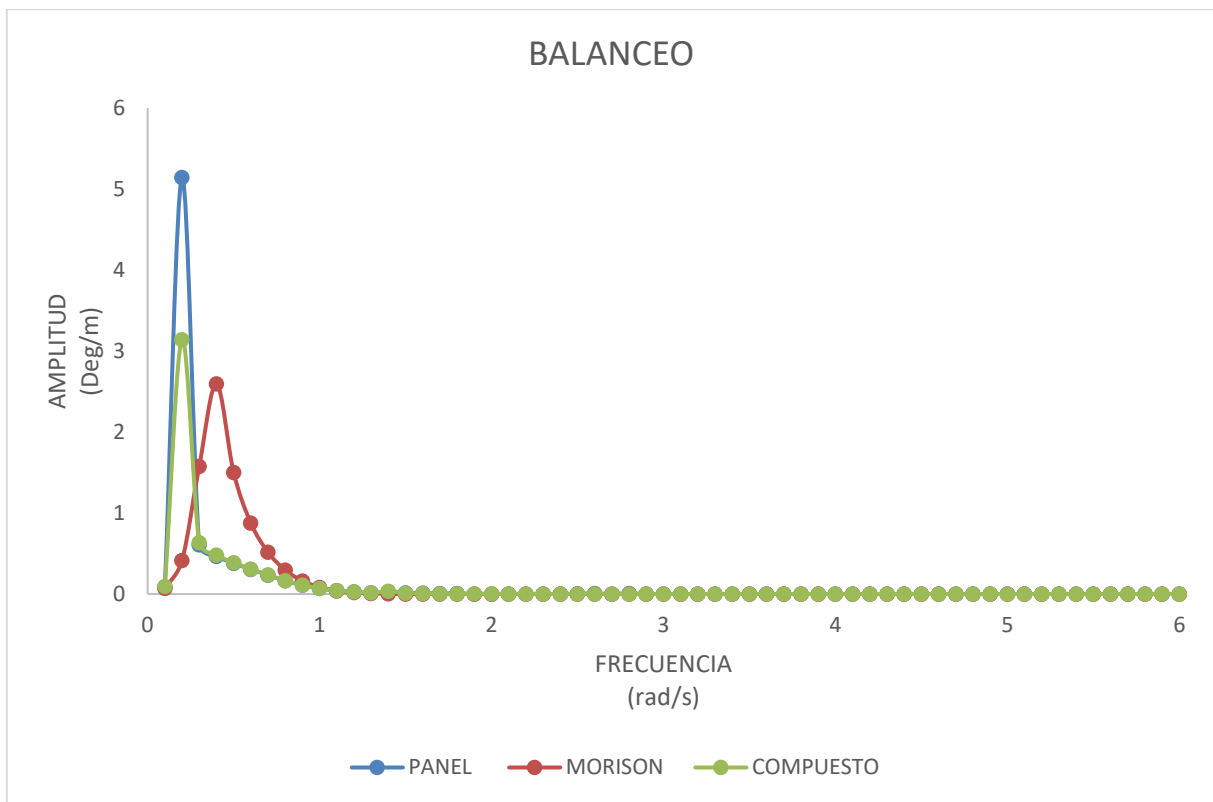
**Figura 5.2 Comparación de amplitudes máximas en cabeceo en flotación libre.**

El modelo de panel muestra una mayor amplitud en cabeceo debido a que la estructura de su armadura se representó sus elementos esbeltos con placas, pero estas no se analizan el arrastre de sus elementos esbeltos, mismas que restringen el flujo en dirección vertical debido efecto del arrastre.

Las amplitudes máximas en balanceo de los modelos de panel, morison y compuesto en flotación libre fueron con un ángulo de incidencia de  $90^\circ$ , en la tabla 12 se muestran los resultados obtenidos y sus representaciones gráficas en la figura 58.

**Tabla 5.3 Comparación de amplitudes máximas en balanceo en flotación libre.**

Balanceo			
Angulo de incidencia	Amplitud (deg/m)	Frecuencia (rad/s)	Periodo (s)
<b>Panel</b>	5.144	0.2	31.42
<b>Morison</b>	2.597	0.4	15.71
<b>Compuesto</b>	3.142	0.2	31.42



**Figura 5.3 Comparación de amplitudes máximas en balanceo en flotación libre.**

El modelo de panel muestra una mayor amplitud en balanceo debido a que la estructura de su armadura se representó sus elementos esbeltos con placas, pero estas no se analizan el arrastre de sus elementos esbeltos, mismas que restringen el flujo en dirección vertical.

El modelo morison muestra una menor amplitud debido al arrastre que es considerado en su análisis, el modelo compuesto muestra mejor comportamiento debido a la consideración de los efectos viscosos, de arrastre y de la teoría potencial del modelo.

## 5.2. Resultados con líneas de amarre.

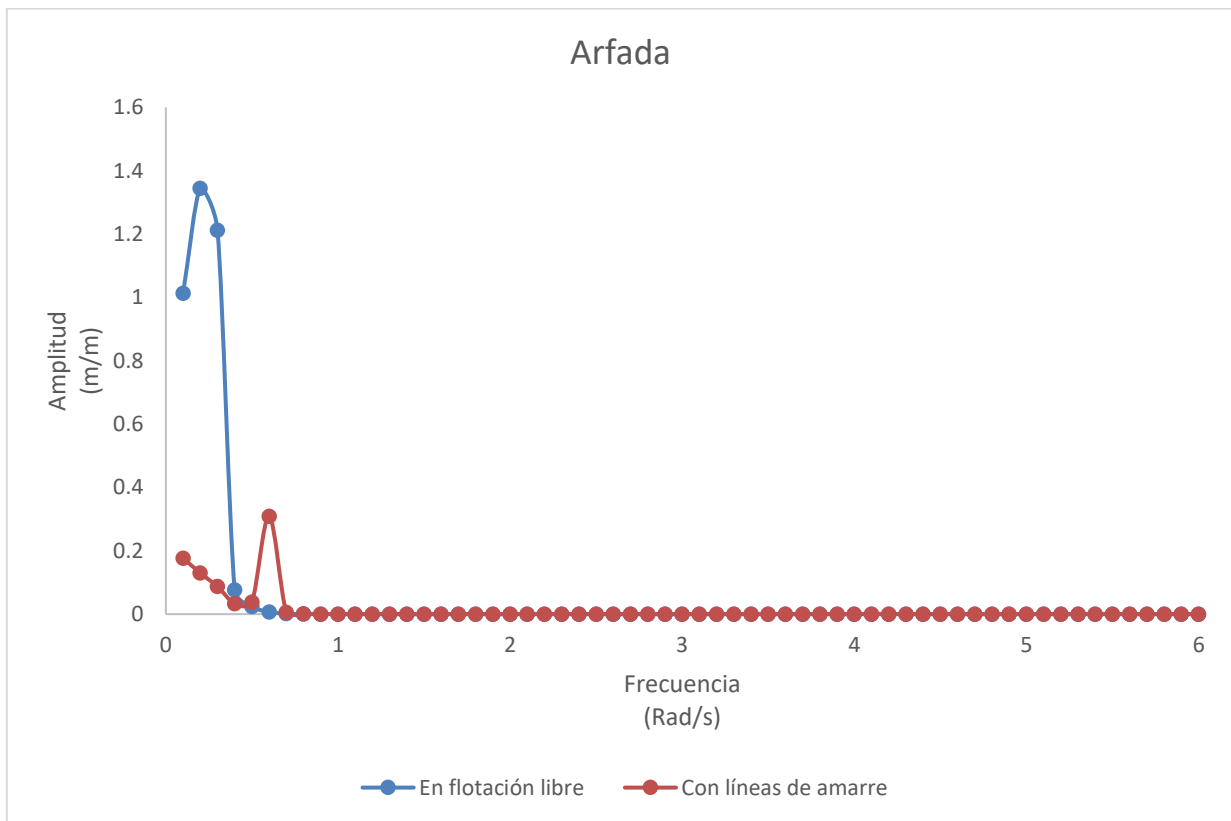
Los RAOs que se obtuvieron con el modelo compuesto con líneas de amarre son con un ángulo de incidencia de 90°, debido a que en esta dirección el sistema presentaba mayores amplitudes.

A continuación, se presentan los RAOs del modelo con líneas de amarre y se compara con el mismo modelo en flotación libre.

Las amplitudes máximas en arfada del modelo compuesto con líneas de amarre se muestran en la tabla 13 y sus representaciones gráficas en la figura 59.

**Tabla 5.4 Comparación de amplitudes máximas en arfada con líneas de amarre.**

Modelo	Arfada		
	Amplitud (m/m)	Frecuencia (rad/s)	Periodo (s)
Flotación Libre	1.345	0.2	31.416
Con líneas de amarre	0.3092	0.6	10.472



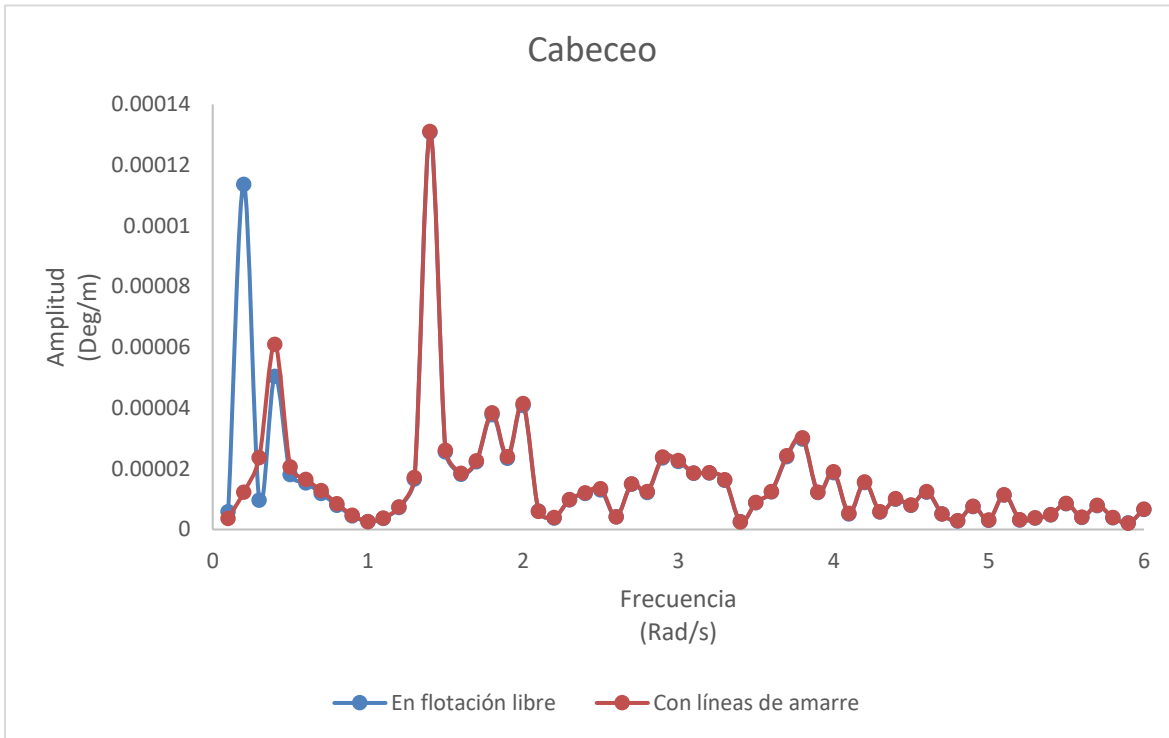
**Figura 5.4 Comparación de amplitudes máximas en arfada con líneas de amarre.**

El modelo con líneas de amarre muestra una menor amplitud en arfada debido a que el efecto de la tensión de la línea de amarre y su peso aportan la rigidez al sistema restringiendo su movimiento (Kvittem, Bachynski, & Moan, 2012), para que este aumente, la fuerza de empuje que se debe de ejercer debe ser mayor a la rigidez de las líneas de amarre.

Las amplitudes máximas en cabeceo del modelo compuesto con líneas de amarre se muestran en la tabla 14 y sus representaciones gráficas en la figura 60.

**Tabla 5.5 Comparación de amplitudes máximas en cabeceo con líneas de amarre.**

Cabeceo			
Modelo	Amplitud (deg/m)	Frecuencia (rad/s)	Periodo (s)
Flotación Libre	0.0001309	1.4	4.488
Con líneas de amarre	0.000131	1.4	4.488



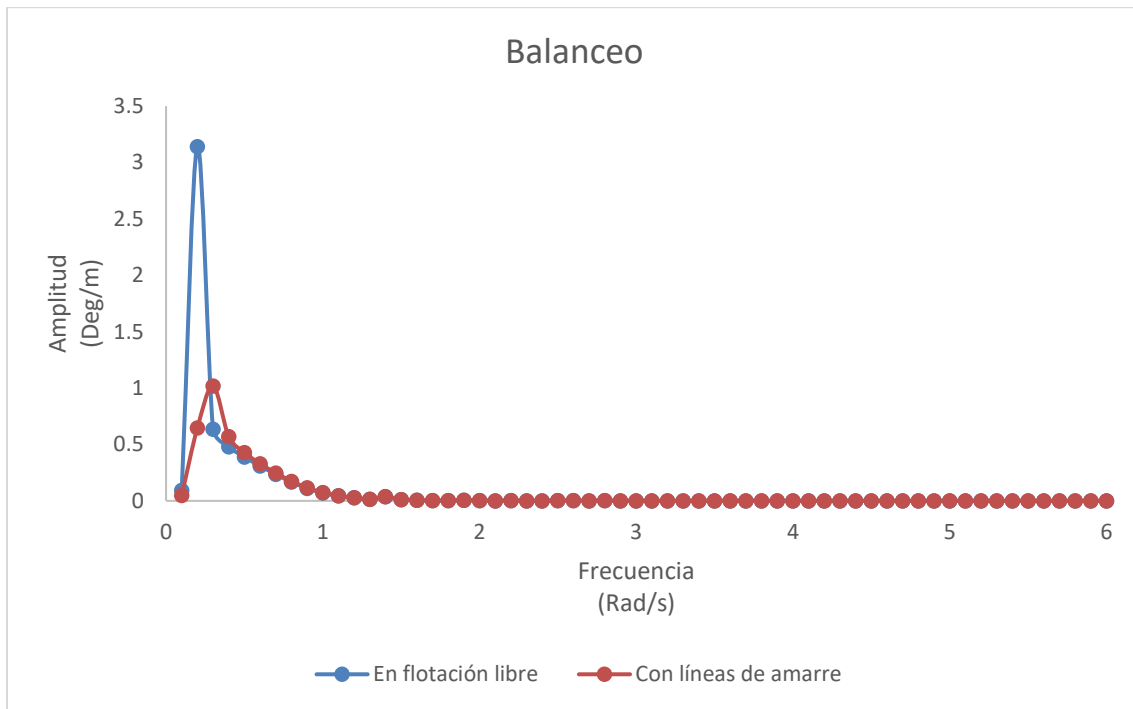
**Figura 5.5 Comparación de amplitudes máximas en cabeceo con líneas de amarre.**

El modelo con líneas de amarre muestra una menor amplitud en cabeceo, aunque en ambos modelos están muy cerca del cero. Aunque esté presente la rigidez de la línea de amarre, esta no influye en este grado de libertad esto debido que el ángulo de incidencia del oleaje es perpendicular al movimiento.

Las amplitudes máximas en balanceo del modelo compuesto con líneas de amarre se muestran en la tabla 15 y sus representaciones gráficas en la figura 61.

**Tabla 5.6 Comparación de amplitudes máximas en balanceo con líneas de amarre.**

Balanceo			
Modelo	Amplitud (deg/m)	Frecuencia (rad/s)	Periodo (s)
Flotación Libre	3.142	0.2	31.416
Con líneas de amarre	1.018	0.3	20.944



**Figura 5.6 Comparación de amplitudes máximas en balanceo con líneas de amarre.**

El modelo con líneas de amarre muestra una considerable disminución en la amplitud en balanceo, esto es debido al efecto de la tensión de la línea de amarre y su peso aportan la rigidez al sistema restringiendo su movimiento e influye directamente en este grado de libertad esto debido que el ángulo de incidencia del oleaje es paralelo al movimiento.

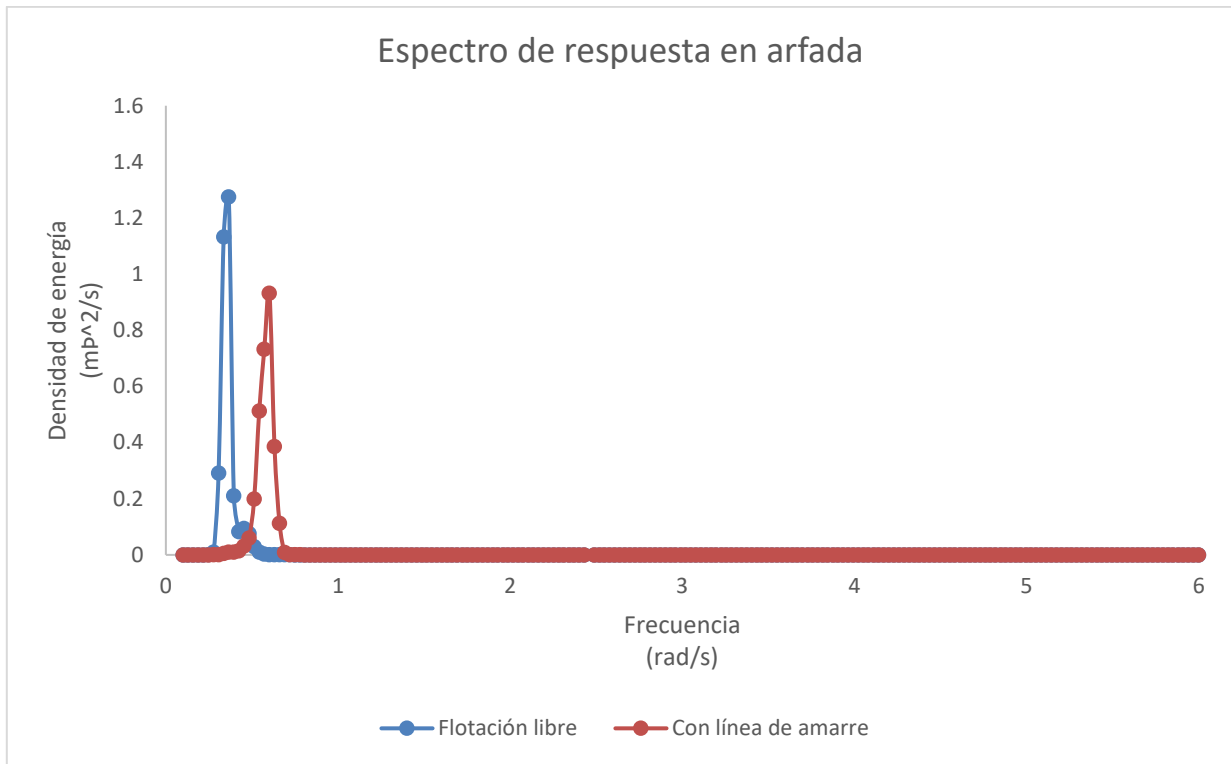
Esta disminución es primordial, debido a que se disminuyen las aceleraciones y efectos sobre los equipos debido al movimiento de la plataforma, evitando peligros al personal y al paro de producción.

### **5.2.1. Resultados de los espectros de respuesta**

A continuación, se muestran los espectros de respuesta para el modelo compuesto en flotación libre y con líneas de amarre (ver tablas 16, 17 y 18) para los grados de libertad en arfada, cabeceo y balanceo de la plataforma, para una dirección de oleaje de 90° (ver figuras 62, 63 y 64).

**Tabla 5.7 Comparación de las densidades de energía del espectro de respuesta en arfada.**

Arfada			
Modelo	Densidad de energía (m <sup>2</sup> /s)	Frecuencia (rad/s)	Periodo (s)
Flotación Libre	1.275	0.37	17.19
Con líneas de amarre	0.9316	0.60	10.45



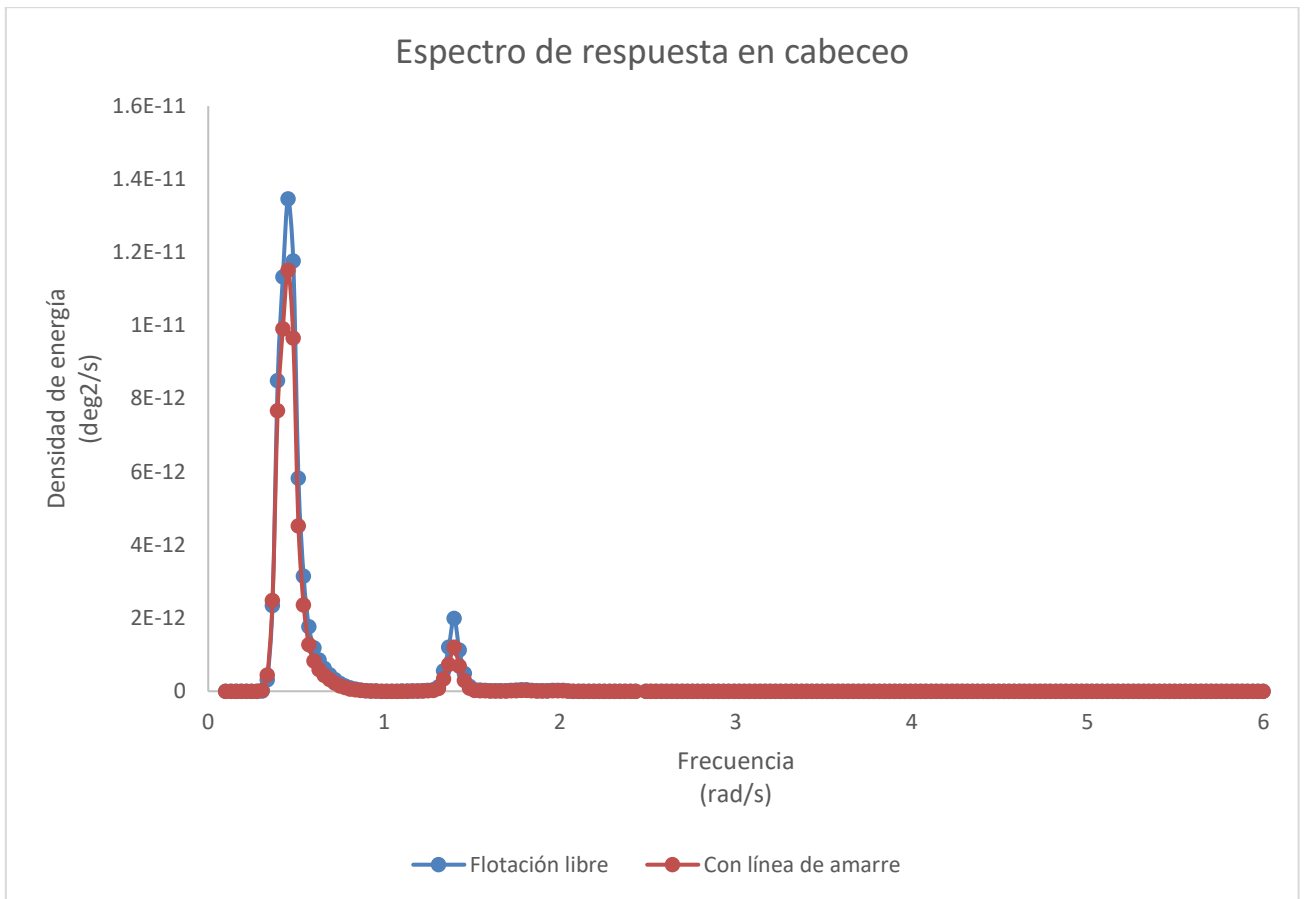
**Figura 5.7 Comparación de las densidades de energía del espectro de respuesta en arfada.**

El valor máximo del espectro de respuesta en arfada en flotación libre es de 1.275 m<sup>2</sup> y con línea de amarre es de 0.9316 m<sup>2</sup>, lo cual es una reducción del 27% en su respuesta máxima disminuyendo las aceleraciones obtenidas en el top side de la plataforma.

**Tabla 5.8 Comparación de las densidades de energía del espectro de respuesta en cabeceo.**

Cabeceo			
Modelo	Densidad de energía (deg <sup>2</sup> /s)	Frecuencia (rad/s)	Periodo (s)
Flotación Libre	1.347E-11	0.45	13.84
Con líneas de amarre	1.152E-11	0.45	13.84



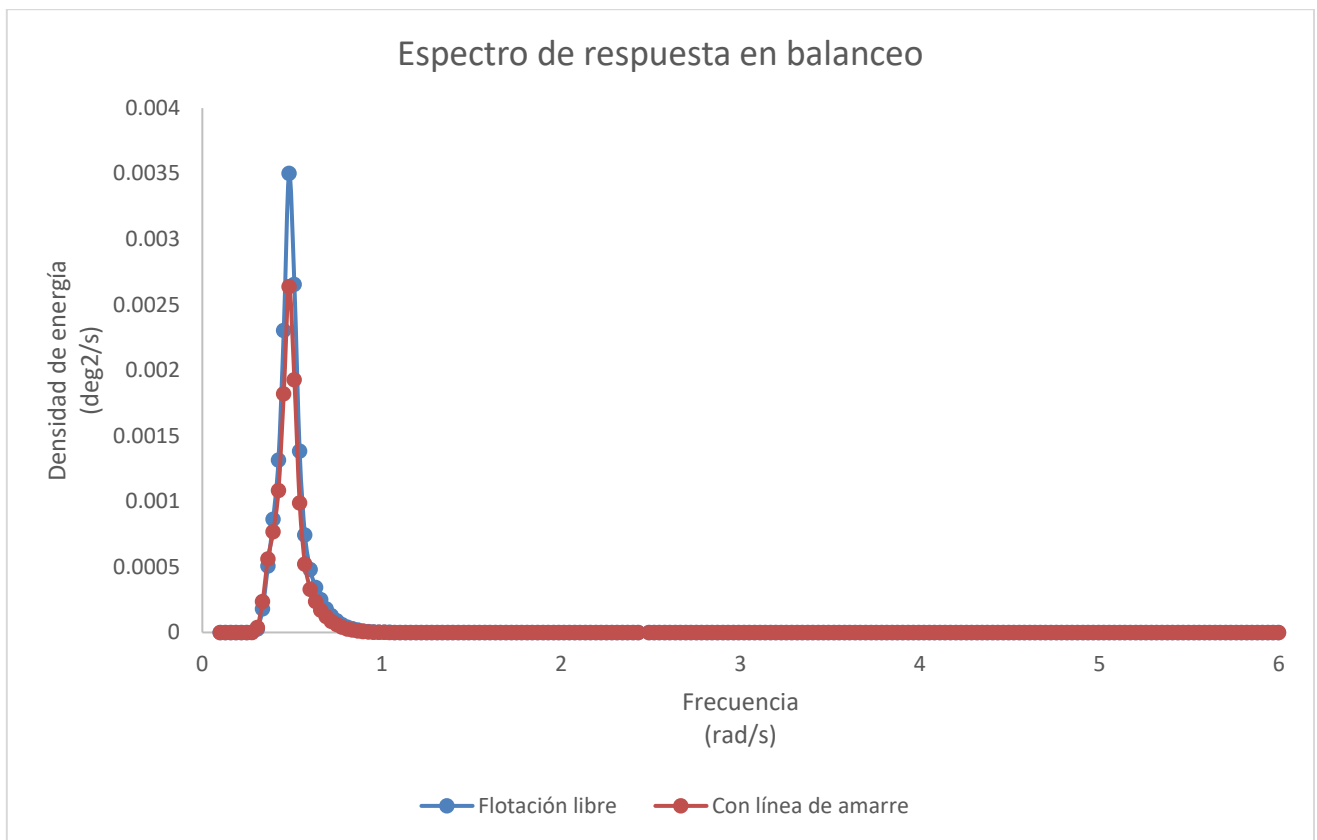


**Figura 5.8 Comparación de las densidades de energía del espectro de respuesta en cabeceo.**

El valor máximo del espectro de respuesta en cabeceo en flotación libre es de  $1.34 \times 10^{-11} \text{ deg}^2$  y con línea de amarre es de  $1.0 \times 10^{-11} \text{ deg}^2$ , lo cual es una reducción del 15% en su respuesta máxima disminuyendo las aceleraciones obtenidas en el top side de la plataforma.

**Tabla 5.9 Comparación de las densidades de energía del espectro de respuesta en balanceo.**

Modelo	Balanceo		
	Densidad de energía (deg <sup>2</sup> /s)	Frecuencia (rad/s)	Periodo (s)
<b>Flotación Libre</b>	0.003503	0.48	13.00
<b>Con líneas de amarre</b>	0.002639	0.48	13.00



**Figura 5.9 Comparación de las densidades de energía del espectro de respuesta en balanceo.**

El valor máximo del espectro de respuesta en cabeceo en flotación libre es de  $0.003503 \text{ deg}^2$  y con línea de amarre es de  $0.002639 \text{ deg}^2$ , lo cual es una reducción del 15% en su respuesta máxima disminuyendo las aceleraciones obtenidas en el top side de la plataforma.

### 5.2.2. Movimientos de respuesta máxima

Los movimientos de arfada, balanceo y cabeceo de la plataforma fueron analizados con la altura de ola ( $H_s$ ), periodo ( $T_z$ ) y espectro (JONSWAP) anteriormente mencionados. Esto se analizó una incidencia de ola a 90 grados debido a que es el ángulo de incidencia del oleaje que más movimiento genera en la plataforma.

Los movimientos de la plataforma en su modelo compuesto son los siguientes (ver tabla 19):

**Tabla 5.10 Resultados de los movimientos de la plataforma**

<b>Movimientos máximos de respuesta</b>			
<b>Grados de libertad</b>		Flotación libre	Líneas de amarre
<b>Arfada</b>	m	2.665	0.848
<b>Cabeceo</b>	deg	0	0
<b>Balanceo</b>	deg	4.174	0.155

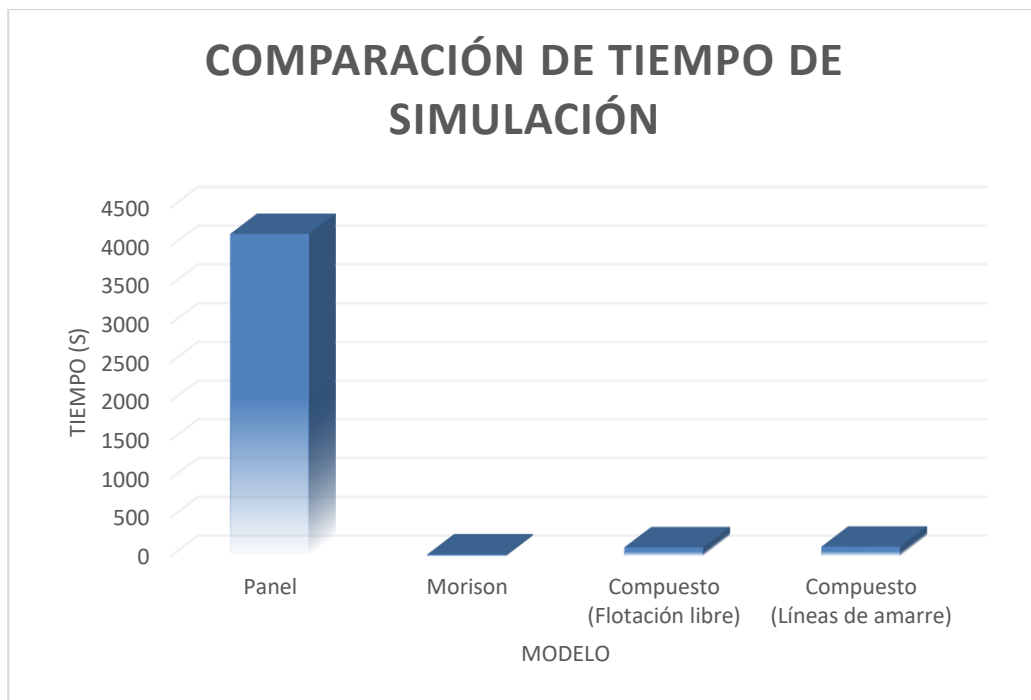
Se estudiaron los movimientos obtenidos de la plataforma, observando que los menores movimientos de respuesta se obtienen con la plataforma con líneas de amarre, esto es debido a la tensión y rigidez que aportan las líneas de amarre al sistema.

Los valores de balanceo y cabeceo son iguales a los ángulos de  $0^\circ$  y  $90^\circ$  debido a la simetría de la geometría del casco de la plataforma.

Estos movimientos disminuyen, arfada disminuyo 1.18 m y representa una reducción del 68.18%, en balance disminuyo  $4.019^\circ$  y representa una reducción del 96.29%, en cabeceo no se muestra movimiento y reducción alguna y esto provocado a que el oleaje se encuentra desfasado a  $90^\circ$  con respecto a este movimiento debido a la geometría particular de la plataforma que es simétrica a cada  $90^\circ$ .

### **5.3. Comparación del tiempo y recurso computacional**

El recurso computacional es importante a la hora de resolver problemas con modelos numéricos a través de elementos finitos, en la figura 65 se muestra una comparación del tiempo computacional de los modelos analizados.



**Figura 5.10 Comparación de tiempo de simulación.**

Todos los análisis se realizaron en una laptop OMEN de la marca HP con 16 GB de memoria ram, procesador de 11 generación de la marca Intel(R) Core™ i5-11400H a 2.70 GHz de 6 núcleos, con sistema operativo Windows 11 de 64 bits.

En la comparación se observa que el modelo de panel necesita más tiempo de procesamiento debido a la resolución para toda la estructura sumergida que incluye la armadura y heave plates, así como la cinemática del fluido que se deriva del campo de ondas difractadas y radiación. El consumo de tiempo del método Morison es el menor, esto significa que siempre que todos los miembros de la estructura sean pequeños con respecto a la longitud de onda, proporcionan una herramienta de cálculo más rápida y económica para la solución de elementos finitos.

El modelo compuesto, es muy alentador tarde un poco más que el modelo Morison, lo que demuestra que la parte del cálculo que consume más tiempo depende del número de paneles, su mallado y el analizar los elementos esbeltos con la teoría de morison ayuda a ahorrar una gran parte del tiempo de cálculo sin pérdida de precisión. Por último, el modelo compuesto con líneas de amarre tarda solo 9 segundos más, lo que nos permite analizar los modelos con restricción de movimiento sin mayor consumo computacional.

## 6. Conclusiones.

Durante el desarrollo de este trabajo el análisis hidrodinámico ha demostrado la importancia de desarrollar un modelo numérico apropiado en el que se puedan tener en cuenta e interpretar todas las fuerzas hidrodinámicas y meteorológicas que actúan sobre la plataforma.

Las gráficas de los RAOs muestran un comportamiento similar en los grados de libertad de balanceo y cabeceo debido a la simetría geometría del casco de la plataforma, obteniendo los mismos valores de amplitud y período en el ángulo de incidencia de oleaje a 90°.

En el modelo de panel obtenemos respuesta hidrodinámica con la teoría potencial, pero no considera los efectos viscosos en elementos esbeltos. También la realización del mallado es más complejo y consume mayor recurso computacional debido al mayor número de elementos tipo panel que analiza.

El modelo morison se modelan elementos tipo panel como elementos esbeltos de área y volumen equivalentes, pero obtenemos mayores respuestas hidrodinámicas debido a que los elementos robustos tipo panel se les considera los efectos viscosos.

En el modelo compuesto obtenermos resultados más favorables debido que las grandes columnas y los esbeltos elementos se utilizan de manera conjunta para proporcionar una fuerza de recuperación del oleaje. Por este motivo son importantes los efectos de difracción por las grandes columnas y los efectos viscosos por los elementos morison. Es recomendable analizar el modelo compuesto debido a que combina las ventajas de cada uno.

El impacto de la línea de amarre en la respuesta del sistema, reduce la amplitud de los operadores de respuesta (RAO), el espectro de respuesta de la plataforma y la respuesta máxima de las olas en el sitio de operación (ver tabla 20).

**Tabla 6.1 Movimientos máximos de la plataforma.**

Movimientos máximos de respuesta			
Grados de libertad		Flotación libre	Líneas de amarre
<b>Arfada</b>	m	2.665	0.848
<b>Cabeceo</b>	deg	0	0
<b>Balanceo</b>	deg	4.174	0.155

Con ello se demuestra la capacidad hidrodinámica de resistir grandes condiciones de oleaje, obteniendo bajos movimientos de arfada, balanceo y cabeceo debido a:

- La configuración y forma del casco.
- Un correcto modelado del casco y elementos esbeltos que contribuyen a la respuesta hidrodinámica.
- La distribución de pesos que busca mantener los centroides en el centro longitudinal y transversal de la plataforma, resultando con una operación a calados parejos.
- La simetría del casco de la plataforma.
- La implementación de líneas de amarre que contribuyen a dar rigidez al sistema.

Debido a lo anterior, si se puede realizar un análisis hidrodinámico de la plataforma Spar con su sistema de amarre para evaluar sus respuestas máximas en un enfoque teórico basado en: la teoría potencial considerando los efectos de difracción-radiación (modelo de panel), efectos viscosos en elementos esbeltos (modelo Morison) y una combinación de las dos últimas al considerar los efectos de difracción-radiación en elementos de panel robustos y efectos viscosos en elementos esbeltos (modelo compuesto).

## **6.1. Trabajos futuros.**

Este trabajo representó un primer paso hidrodinámico de una plataforma tipo Spar, donde quedaron definidas las metodologías para los análisis en flotación libre y con líneas de amarre, pero es necesario detallar aún más los análisis y para ello se proponen las siguientes actividades:

- Realizar una modificación del casco añadiéndole una quilla de balance, para el análisis en flotación libre.
- Realizar un análisis estructural para definir en qué punto de la plataforma es más susceptible de una falla a máxima carga.

## Referencias

- Barranco Cicilia, F. (2012). *Sistemas flotantes para la producción de petróleo en aguas profundas mexicanas*.
- Chakrabarti, S. K. (2005). *Handbook of offshore engineering*. Elsevier.
- CNCE, C. N. (16 de 07 de 2018). *Gobierno de México*. Obtenido de <https://www.gob.mx/cenace/articulos/demanda-de-energia-un-factor-clave-en-el-desarrollo-de-mexico?idiom=es>
- DNV, D. N. (2008). (*DNV, 2008*).
- Faltinsen. (1999). *Sea loads on ships and offshore structure*. Cambridge.
- Hernández-Hernández, J. (2020). *ANÁLISIS DE ESTABILIDAD AERODINÁMICA E HIDRODINÁMICA DE UN BUQUE FPSO EN AGUAS PROFUNDAS DEL GOLFO DE MÉXICO*. Veracruz.
- JP, H. (1972). *Hydrodynamic aspects of semi-submersible platforms*. . Delft University of.
- Kirkhorn Vada, T. (2013). *Hydrodynamic analysis of offshore structures*. Noruega: DNV.
- KOO, B.-J. (2003). *EVALUATION OF THE EFFECT OF CONTACT BETWEEN RISERS AND GUIDE FRAMES ON OFFSHORE SPAR PLATFORM MOTIONS*. Texas: Texas A&M University.
- Kvittem, M. I., Bachynski, E. E., & Moan, T. (2012). *Effects of hydrodynamic modelling in fully coupled simulations of a semi-submersible wind turbine*. Science direct, Elsevier.
- Liu, Y. (2016). *Journal of Marine Science and Technology*.
- Montano, J. (21 de 01 de 2020). *Lifeder*. Obtenido de <https://www.lifeder.com/importancia-petroleo-mexico/>
- Newman, J. (1999). *Heave response of a semi-submersible near resonance*.
- OPEP, O. d. (31 de 12 de 2019). *Energía a Debate*. Obtenido de <https://www.energiaadebate.com/petroleo/demanda-de-petroleo-superara-100-millones-barriles-dia-en-2020/>
- RAE, R. A. (21 de 01 de 2020). *Diccionario de la Lengua Española*. Obtenido de Diccionario de la Lengua Española: <https://dle.rae.es/petr%C3%B3leo>
- Rodríguez-Morales, J. Á. (2020). *ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE UNA PLATAFORMA SPAR EN AGUAS PROFUNDAS DEL GOLFO DE MÉXICO*. Veracruz: Universidad Veracruzana.
- Thigpen, J. T. (08 de 01 de 2020). *Transocean* . Obtenido de offshore-mag: <https://www.offshore-mag.com/rigs-vessels/article/14074461/transocean-seeing-increasing-demand-for-ultradeepwater-floaters>
- Tule, J. (2015). *Lucius Spar, Desing to Delivery*. Houston, Texas : Offshore Tecnology Conference.
- Ventura Castelló, G. (2016). *Estudio del comportamiento en la mar de una plataforma tipo truss spar* . Barcelona, España: Universidad Politécnica de Catalunya.





“Lis de Veracruz: Arte, Ciencia, Luz”

[www.uv.mx](http://www.uv.mx)

