

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

**ESTUDIO DE TRABAJO A FATIGA EN DUCTOS MARINOS PARA
UNA UNIDAD FLOTANTE DE PRODUCCIÓN, ALMACENAMIENTO
Y DESCARGA (FPSO) USANDO UN SISTEMA PASIVO DE
COMPENSACIÓN DE ROLIDO.**

Componente: Análisis cinemático de un FPSO

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO**

RUBEN ALEJANDRO PAZMIÑO RIVAS

ruben.pazmino01@epn.edu.ec

DIRECTOR: PhD. Ing. Wilson Guachamin

wilson.guachamin@epn.edu.ec

DMQ, agosto de 2023

CERTIFICACIONES

Yo, RUBEN ALEJANDRO PAZMIÑO RIVAS declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

RUBEN ALEJANDRO PAZMIÑO RIVAS

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por RUBEN ALEJANDRO PAZMIÑO RIVAS, bajo mi supervisión.

WILSON GUACHAMIN

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

RUBEN ALEJANDRO PAZMIÑO RIVAS

WILSON GUACHAMIN ACERO

DEDICATORIA

Dedicado con gratitud y cariño a mis padres, el camino que he recorrido en mi desarrollo profesional ha sido moldeado por su amor incondicional y su apoyo constante. A pesar de los desafíos, ustedes me han brindado las oportunidades más valiosas además que cada logro y obstáculo que he enfrentado ha sido compartido junto a ustedes.

A mi madre, cuyo amor, aliento y sabios consejos han iluminado mis momentos de incertidumbre y largas noches de estudio A mi padre, un pilar de apoyo inquebrantable, cuyos precisos consejos han sido mi guía en cada encrucijada.

También dedico este trabajo a los profesores cuya enseñanza va más allá de los libros, que han ofrecido palabras de aliento y confianza en mi camino académico. A aquellos cuyo corazón está en la enseñanza, respondiendo pacientemente a mis preguntas y desafiándome a superar mis límites.

A mis amigos, tanto los que me acompañan desde la infancia (Henry, Uriel, Luis, Cristian, Francis, Arturo) como los recién llegados, merecen un lugar especial en esta dedicatoria. Siempre han sacado sonrisas en los momentos más difíciles y han sido mi apoyo constante en cada aventura.

Este trabajo no solo es mi logro, sino el reflejo de todos aquellos que han compartido este viaje conmigo. A aquellos que han tomado diferentes senderos, les envío mi cariño y les hago saber que también son parte de este momento en mi vida.

AGRADECIMIENTO

En la culminación de este proceso, deseo expresar mi sincero agradecimiento a todos aquellos que han sido mi apoyo y guía a lo largo de esta maravillosa travesía.

Mi gratitud se dirige hacia mi familia, cuya confianza en mí y comprensión durante el desafío que representó este trabajo han sido fundamentales. Quiero extender un agradecimiento especial a mi madre, quien ha comprendido cada etapa de este proceso y ha permitido que mis energías se centren en esta labor.

Un reconocimiento significativo va dirigido al PhD. Wilson Guachamin, quien ha demostrado un interés genuino y una paciencia encomiable al responder mis inquietudes. Su constante motivación para que este trabajo alcance su máximo potencial y su insistencia en que siempre dé lo mejor de mí han sido factores cruciales. Este trabajo ha sido posible gracias a su acompañamiento constante.

No puedo dejar de agradecer a PepsiCo y a todos sus colaboradores por su comprensión y flexibilidad durante mi tiempo como pasante en su empresa. Líderes como Carolina, Danilo y Carlos, junto con el equipo de Mantenimiento, me han brindado oportunidades invaluableles que han enriquecido considerablemente este trabajo escrito. Cada uno de ustedes ha dejado una huella imborrable en este recorrido, y es con profundo agradecimiento que finalizo esta etapa.

ÍNDICE DE CONTENIDO

1	DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO	1
1.1	Objetivo general	2
1.2	Objetivos específicos	2
1.3	Alcance	2
2	MARCO TEÓRICO.....	3
2.1	Unidad/Buque FPSO.....	3
2.2	Ductos Marinos “Risers”	4
2.3	Placas Compensadoras de Rolido	6
2.4	Modelamiento de carga de oleaje.....	6
2.4.1	Representación de Olas	7
2.4.2	Espectros de Olas.....	8
2.4.3	Espectro Pierson Moskowitz	8
2.4.4	Espectro JonSwap	9
2.4.5	Espectros Direccionales Reales.....	10
2.5	Modelamiento numérico del FPSO	11
2.5.1	Fuerzas Hidrodinámicas Viscosas	12
2.5.2	Fuerzas Hidrodinámicas no Viscosas	13
2.5.3	Análisis en el dominio del tiempo	14
2.5.4	Análisis espectral en dominio de la frecuencia	14
3	METODOLOGÍA.....	17
3.1	Modelado del Sistema.....	18
3.1.1	Parámetros del FPSO.....	18
3.1.2	Estimación del Periodo Natural de Rolido.....	20
3.1.3	Parámetros de las placas de estabilización de rolido	22
3.1.4	Condiciones Medioambientales.....	23
3.2	Modelo Hidrodinámico del Sistema	25

3.3	Análisis en el Dominio del Tiempo.....	26
3.3.1	Registro de Ángulos de Rolido	27
3.3.2	Registro de aceleraciones	27
3.4	Análisis en el Dominio de la Frecuencia	28
4	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	30
4.1	Respuestas de Rolido en el dominio del tiempo	30
4.1.1	Respuestas de roldo para un FPSO sin un sistema compensador	30
4.1.2	Respuestas de roldo para un FPSO con un sistema compensador.....	31
4.2	Respuestas de Funciones de Transferencia.....	33
4.3	Respuestas de Aceleración	34
4.3.1	Aceleración para un FPSO con un sistema de compensación de roldo	35
5	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	37
5.1	Conclusiones.....	37
5.2	Recomendaciones.....	37
6	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	39

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 (a) FPSO (b) FPSO con sistema de compensación de rolido.	1
Figura 2.1 Unidad FPSO con balcony riser con los movimientos en los 6 grados de libertad	3
Figura 2.2 Estructura interna de un riser flexible	4
Figura 2.3 (a) Unidad FPSO tipo torreta central y de (b) balcón lateral	5
Figura 2.4 Tubería marina con tendida en J	5
Figura 2.5 Diagrama de las placas compensadoras de rolido en un barco	6
Figura 2.6 Representación de orbitales en una ola	8
Figura 2.7 Espectros de Pierson Moskowitz con vientos a distintas velocidades	9
Figura 2.8 Comparación de un espectro Jonswap y Pierson Moskowitz.....	10
Figura 2.9. Espectro direccional del Atlántico Norte en las costas de Noruega	11
Figura 2.10 Fuerzas hidrodinámicas	12
Figura 2.11. Representación de la fuerza de arrastre.	12
Figura 2.12 RAO para movimientos al rededor del eje z ("heave") en función de parámetros de amortiguamiento	16
Figura 3.1. Metodología para obtención de aceleraciones y desplazamientos en el FPSO.....	17
Figura 3.2. Plano de formas de un FPSO	18
Figura 3.3. Dimensiones del FPSO.....	19
Figura 3.4. Esquema conceptual de FPSO con placas compensadoras de rolido.	21
Figura 3.5 Diseño conceptual de una placa de estabilización de rolido	23
Figura 3.6 Altura significativa de olas (a), alturas promedio de las olas por cada mes en Campos Basin (b) y diagrama de dispersión de frecuencias(c)	24
Figura 3.7 Partes del sistema de FPSO con placas compensadoras de rolido.....	26
Figura 3.8. Fracción de ángulo de rolido para un FPSO sin sistema de compensación para condiciones $H_s = 4$ y $T_p = 10$	27
Figura 3.9 Fracción de aceleración en el punto de sujeción de un FPSO con compensador de rolido para condiciones $H_s = 4$ y $T_p = 10$	28
Figura 3.10 Espectro de Ruido Blanco	29
Figura 4.1. Mapa de colores y curva de nivel para valores de ángulo de rolido $2r_{ms}$ de un FPSO sin placas compensadores a una dirección de 90°	31
Figura 4.2. Mapa de colores y curva de nivel para valores de ángulo de rolido $2r_{ms}$ de un FPSO con placas compensadores a una dirección de 90°	32
Figura 4.3. RAO de FPSO para olas con ángulos de incidencia a 45°	33

Figura 4.4 RAO de FPSO para olas con ángulos de incidencia a 45°	34
Figura 4.5. Mapa de colores y curva de nivel para valores de ángulo de rolo 2rms de un FPSO sin placas compensadores a una dirección de 90°	35
Figura 4.6. Mapa de colores y curva de nivel para valores de ángulo de rolo 2rms de un FPSO con placas compensadores a una dirección de 90°	36

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1 Parámetros de masa del FPSO	19
Tabla 3.2. Valores utilizados para estimar el periodo natural de rolo	21
Tabla 3.3 Datos de placas compensadoras de rolo	22
Tabla 3.4 Tabla de datos característicos de cada grupo de olas de Campos Basin	25
Tabla 4.1 Ángulos de rolo [deg] 2rms para un FPSO sin placas compensadoras de rolo a una dirección de 90°	30
Tabla 4.2 Ángulos de rolo 2rms para un FPSO con placas compensadoras de rolo a una dirección de 90°	32
Tabla 4.3 Aceleraciones [m/s^2], 2rms para un FPSO sin placas compensadoras de rolo a una dirección de 90°	34
Tabla 4.4 Aceleraciones 2rms para un FPSO con placas compensadoras de rolo a una dirección de 90°	36

RESUMEN

La extracción de petróleo en yacimientos de aguas profundas se realiza con unidades flotantes para la producción, almacenamiento y descarga de petróleo (FPSO) a través de tuberías submarinas (“risers”). Estos buques están sometidos a movimientos de rolido que pueden disminuirse usando un sistema compensador.

En el presente trabajo de integración curricular se implementó una metodología para realizar un análisis cinemático de un FPSO en el punto de sujeción de los “risers”. Este análisis se lo realizó con y sin un sistema compensador de rolido.

Para realizar el análisis se utilizó un modelo hidrodinámico del FPSO con el sistema compensador en el software AQWA ANSYS. A partir de varios análisis en el dominio del tiempo para combinaciones de altura de ola significativas y periodos pico en varias condiciones de mar críticas, se comparó los valores $2rms$ de las aceleraciones y ángulos de rolido con y sin el sistema compensador. Además, se obtienen las funciones de transferencia a partir de un análisis en el dominio de la frecuencia

Los resultados muestran que en los casos críticos el rolido del FPSO disminuye de 23.97° a 12.51° y las aceleraciones en el punto de sujeción disminuyen de $2.14 m/s^2$ a $0.92 m/s^2$, así como el periodo natural de rolido del FPSO aumenta de 13 segundos a 14.5 segundos con el sistema.

PALABRAS CLAVE: FPSO, risers, modelo hidrodinámico, aceleraciones, ángulo de rolido, funciones de transferencia, AQWA ANSYS.

ABSTRACT

Oil extraction in offshore fields is carried out with floating storage, and offloading units (FPSO) for oil production, attached with risers to a balcony. These vessels have roll movements that can be reduced by using a passive compensation system.

In this project, a methodology was implemented to perform a kinematic analysis of an FPSO at the riser attachment point. This analysis was performed with and without a roll compensation system.

A hydrodynamic model of the FPSO with the compensator is modelled in the ANSYS AQWA software. From various time domain analyses for possible combinations of significant wave height and peak periods, the 2rms values of the accelerations and roll angles were compared with and without the compensation system. In addition, the transfer functions are obtained to assess the change in roll natural period.

The results show that in the critical cases the FPSO roll decreases from 23.97° to 12.51° and the accelerations at the attachment point decrease from 2.14 m/s^2 to 0.92 m/s^2 , as well as the natural period of FPSO roll increases from 13 seconds to 14.5 seconds with the system.

KEYWORDS: FPSO, risers, hydrodynamic model, accelerations, roll, transfer functions, AQWA ANSYS.

1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO

En el presente componente se realiza un análisis cinemático de ángulos de rolido y aceleración en el punto de sujeción de ductos submarinos con una unidad flotante para la producción, almacenamiento y descarga de petróleo (FPSO) con y sin un sistema pasivo de compensación de rolido como se puede ver en la Figura 1.1.

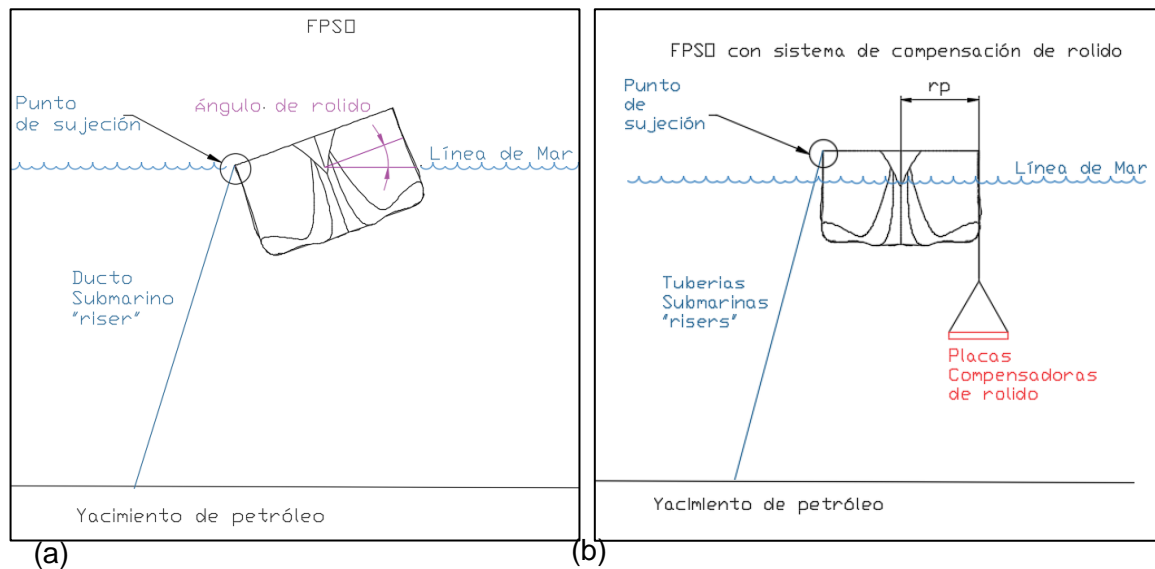


Figura 1.1 (a) FPSO (b) FPSO con sistema de compensación de rolido. (Fuente: Propio)

El ángulo de rolido de un FPSO describe el giro de una embarcación alrededor de su eje longitudinal o de mayor magnitud, este ángulo puede apreciarse en la Figura 1.1 (a). El estudio del movimiento de rolido es de importancia porque asegura la operación y la seguridad de un barco.

El FPSO sin sistema de compensación de rolido está compuesto por un FPSO y "risers" utilizados para extraer petróleo desde los yacimientos submarinos. Sin embargo, el ángulo de rolido y la aceleración en el punto de sujeción de los "risers" pueden disminuir si se usa un sistema pasivo de compensación, como placas compensadoras de rolido, tal como se aprecia en la Figura 1.1 (b).

En este trabajo se utiliza el software ANSYS AQWA para realizar un modelo hidrodinámico de un FPSO con y sin placas compensadoras de rolido. Este es utilizado para simular combinaciones de estados de mar en un ángulo de incidencia crítica de olas para los yacimientos de Campos Basin-Brasil. Finalmente se obtiene un diagrama de dispersión de ángulo rolido y aceleración con y sin placas compensadoras de rolido.

Adicionalmente se estudia el cambio del periodo natural de rolido en las funciones de transferencias al utilizar el sistema de compensación propuesto.

1.1 Objetivo general

Realizar un análisis cinemático de un FPSO con y sin un sistema de compensación pasivo de rolido, en el punto de sujeción de un “riser” (ducto submarino).

1.2 Objetivos específicos

1. Realizar un modelo numérico de un FPSO con y sin un sistema pasivo de compensación de rolido.
2. Comparar los periodos naturales de rolido de un FPSO con y sin un sistema compensador de rolido
3. Cuantificar las aceleraciones y ángulos de rolido en los puntos de sujeción de los ductos submarinos al FPSO con y sin un sistema compensador de rolido para distintas combinaciones de altura de olas promedio y periodos pico en un estado de mar crítico.

1.3 Alcance

El alcance de este trabajo es obtener las respuestas cinemáticas del FPSO con y sin un sistema de compensación de rolido, en particular en los puntos de sujeción de los ductos submarinos.

Este trabajo se limita al estudio de un FPSO con balcón, y un sistema de compensación de rolido propuesto por Ribadeneira et al (2022). En el presente estudio se realiza un modelo hidrodinámico utilizando el software ANSYS AQWA, para diferentes condiciones de mar en Campos-Basin en Brasil.

Es importante aclarar que este trabajo no incluye un análisis de las tensiones y esfuerzos en los ductos, tratado en el trabajo de González (2023). Además, el alcance de este componente no busca realizar una evaluación de daño por fatiga de los ductos submarinos, realizado en el trabajo de Curay (2023)

2 MARCO TEÓRICO

Para realizar un análisis cinemático empleando herramientas computacionales, es importante realizar una revisión bibliográfica con conceptos importantes de operaciones marinas y análisis de estructuras marinas.

2.1 Unidad/Buque FPSO

Una unidad flotante de producción, almacenamiento y descarga de petróleo, FPSO por sus siglas en inglés “Floating Production Storage Offloading Unit”, es un complejo multipropósito en forma de buque, que se instala cerca de la explotación de un yacimiento marino con el fin de procesar, almacenar y descargar hidrocarburos por medio de tuberías marinas. (Keprate, 2013)

Las unidades FPSO's son parte de los sistemas flotantes de producción de petróleo en yacimientos marinos remotos y profundos. Estas unidades son ampliamente utilizadas debido a: su rápida instalación en áreas con condiciones climáticas extremas, versatilidad en el uso de las distintas etapas de exploración de yacimientos de petróleo, y fácil acondicionamiento de grandes cargueros de petróleo para convertirlos en FPSO. (Mentes & Mollaahmetoglu, 2019)

Este tipo de unidad marina puede moverse con 6 grados de libertad tal como se señala en la Figura 2.1. Los movimientos traslacionales en el eje X, Y, Z adoptan el nombre de “Surge”, “Sway” y “Heave” respectivamente; de igual manera los movimientos rotacionales en el eje X, Y, Z se nombran “Roll”, “Pitch” e “Yaw” correspondientemente.

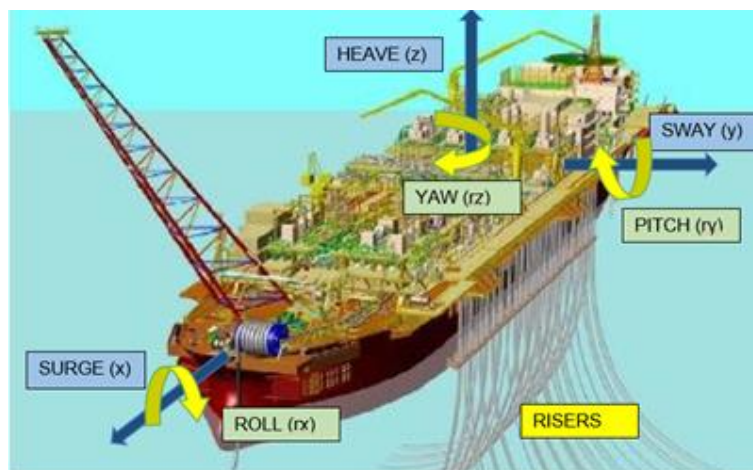


Figura 2.1 Unidad FPSO con balcony riser con los movimientos en los 6 grados de libertad (Mentes & Mollaahmetoglu, 2019)

Los estudios que se realizan en este tipo de buques, se encuentra un análisis cinemático lo cual implica el estudio de los movimientos de la unidad y los elementos con los que esta interactúa como pueden ser: líneas de amarre, tuberías submarinas (“risers”) y sistemas de compensación de movimientos.

2.2 Ductos Marinos “Risers”

Entre los elementos con los que interactúa el FPSO están los ductos submarinos o “risers”, cuyo principal propósito es transportar el hidrocarburo desde el fondo submarino a la superficie marina. Este tipo de tubería está sometido a esfuerzos de fatiga por el movimiento de la unidad, por lo que su selección es realizada en base a un estudio de movimiento, periodos naturales del FPSO, tensiones y peso propio del ducto (Kwang- Kyu & Youngseok , 2017)

Los ductos pueden ser de tipo rígido o flexibles. Las tuberías de tipo rígido son construidas de metal y pueden ser segmentadas o por partes, y las tuberías de tipo flexible como la de la Figura 2.2, son construidas en base a capas de material, usando materiales elastómeros vulcanizados y carcasas metálicas. (Keprate, 2013)

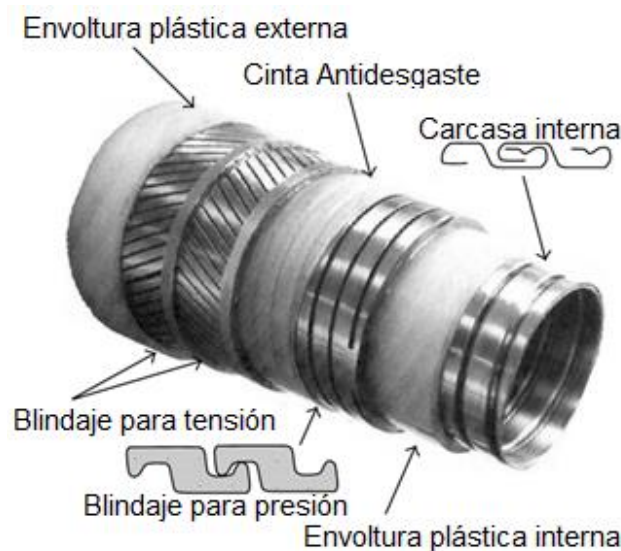


Figura 2.2 Estructura interna de un riser flexible (Sousa et al, 2012)

La ubicación de los risers en el FPSO, pueden ser de torreta central o de balcón. Cuando es de torreta central, se colocan en la parte inferior del barco y en configuración circular como se puede en Figura 2.3 (a), mientras que cuando es de balcón como en la Figura 2.3 (b) se coloca en un solo lado del barco para que por el otro lado se pueda manipular carga y suministros para la operación en alta mar. (Ferreira et al, 2012)

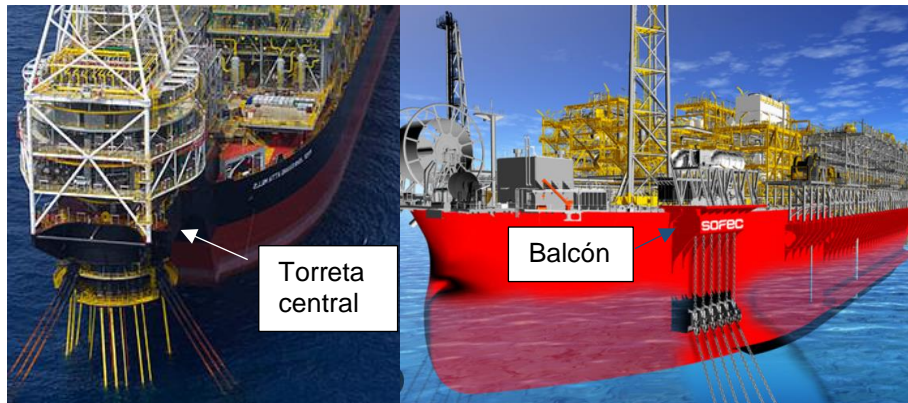


Figura 2.3 (a) Unidad FPSO tipo torreta central y de (b) balcón lateral (MODEC, 2023)

Independiente de la ubicación de las conexiones de los ductos marinos con la unidad FPSO, estos pueden adoptar diferentes geometrías de tendido: en forma de J para aguas profundas y en forma de S para aguas superficiales. Cuando adopta una geometría en forma de J como en la Figura 2.4, la tubería baja de forma casi vertical reduciendo la distancia entre el punto de extracción y la superficie marina. Además, esta geometría reduce la fuerza horizontal en los puntos de acople y los esfuerzos residuales. (Lenci & Callegari, 2005)

Uno de los movimientos que pueden afectar en mayor medida a los ductos marinos colocados en el balcón del FPSO son los movimientos de rolido por lo que es importante contar con un sistema compensador.

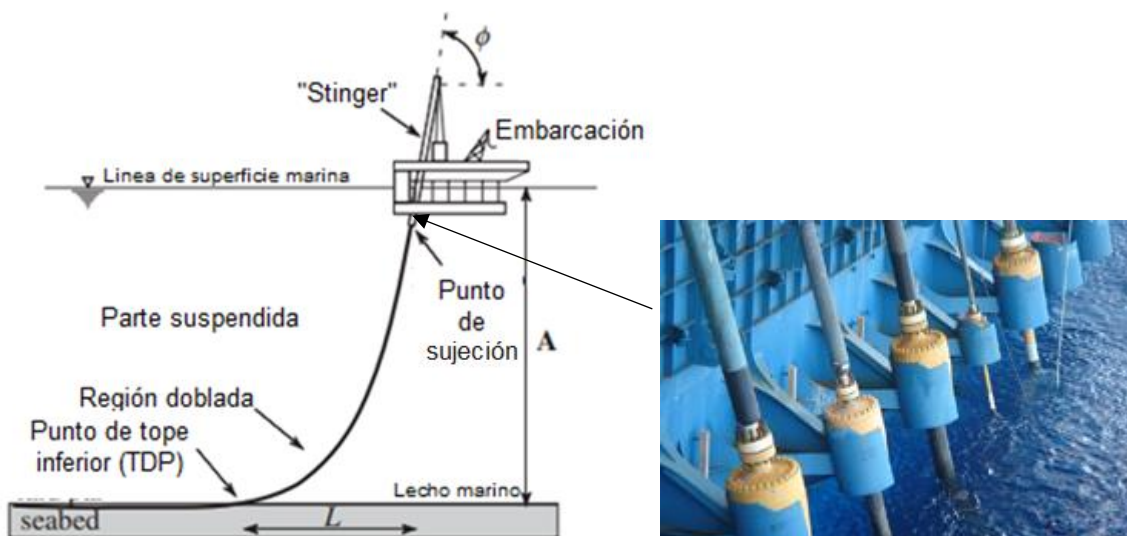


Figura 2.4 Tubería marina con tendida en J (Lenci & Callegari, 2005)

2.3 Placas Compensadoras de Rolido

Los sistemas de compensación de rolido, son mecanismos que permiten estabilizar los movimientos de rolido de manera activa con actuadores y sistemas de control; o de manera pasiva con estructuras como: aletas o placas.

Entre los sistemas de compensación de rolido pasivo se encuentran las placas compensadoras de rolido “Flopper Stopper” como se aprecia en la Figura 2.5. Las placas son cuerpos suspendidos por un cable al costado del barco, con el objetivo de reducir el movimiento de rolido y aumentar la estabilidad y seguridad de una estructura marina. Entre las principales ventajas que presenta el sistema es su mínimo costo de fabricación y mantenimiento, su fácil instalación y una gran vida útil.

La forma de estos cuerpos puede variar en función de las aplicaciones pueden ser: tachos suspendidos por cables atados a un brazo metálico (McCreight & Jones , 1978), o en forma de placas delgadas (Ribadeneira et al, 2023). En ambos casos se ha demostrado que se reduce el efecto de rolido en los barcos, por lo que son alternativas útiles para los sistemas activos de compensación de rolido que pueden ser más costosos y complejos de instalar.

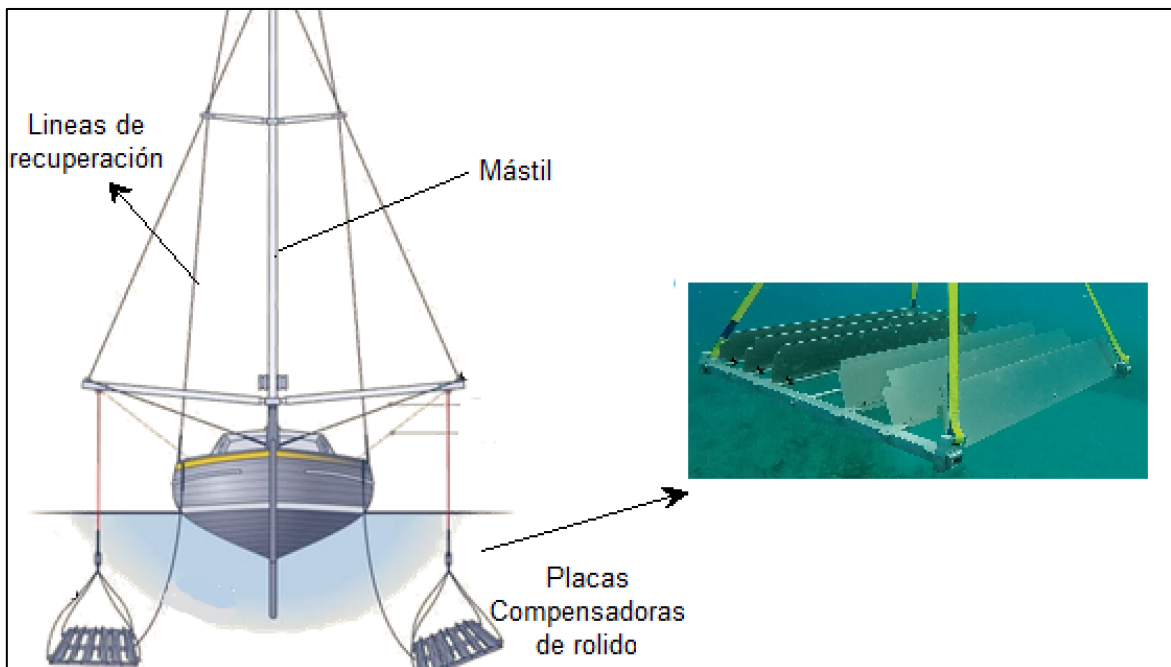


Figura 2.5 Diagrama de las placas compensadoras de rolido en un barco (Mackency, 2023)

2.4 Modelamiento de carga de oleaje

Los elementos del sistema de un FPSO, como los ductos submarinos y las placas compensadoras de rolido, están sometidos a condiciones marinas que puede ser

determinadas mediante un modelamiento de cargas de oleaje. El modelamiento es fundamental como dato de entrada para determinar: desplazamientos y aceleraciones en puntos específicos del modelo numérico del barco. Por tal motivo, se utilizan herramientas estadísticas para definir las condiciones generales del mar en un instante y ubicación determinada. (Hughes & Kee Paik, 2010)

La superficie marina tiene un comportamiento aleatorio e irregular, pero puede ser representado como la superposición de olas regulares de diferentes alturas, periodos y direcciones con un desfase aleatorio.

2.4.1 Representación de Olas

Un modelo lineal de la superficie marina asume un fluido incompresible, no viscoso y no rotacional, además de profundidad uniforme (Brosna, y otros, 2012). El perfil de una ola típica de mar está definido como una senoide en función de su frecuencia, amplitud, parámetro de ola y el ángulo de fase. La Ecuación (1) describe lo mencionado:

$$\zeta(x, t) = a \cdot \cos(-kt - \omega t + \theta) \quad (1)$$

Donde:

- a : Amplitud de la ola, medida a través de la superficie del agua promedio donde se localiza el eje x
- λ : Longitud de la ola, es la distancia horizontal entre crestas sucesivas
- $k = 2\pi/\lambda$ El parámetro de ola
- T : es el periodo de las olas, y se define como el tiempo en el que dos crestas sucesivas pasan a través de un punto en específico
- $\omega = 2\pi/T$ es la frecuencia de la ola
- θ es el ángulo de fase

Desde el punto de vista de la cinemática de las olas, cada partícula se mueve en forma de orbitales donde las partículas no avanzan solo se mueven en su mismo orbital. Los orbitales tienen mayor tamaño conforme se aproximan a la superficie y disminuyen su tamaño a medida que aumenta la profundidad. (Nortek, 2023). En la Figura 2.6. se puede observar los orbitales dentro de la representación de la superficie marina, donde se puede apreciar una representación de la amplitud de las olas usando orbitales, y parámetros de cresta, valle y dirección de la ola.

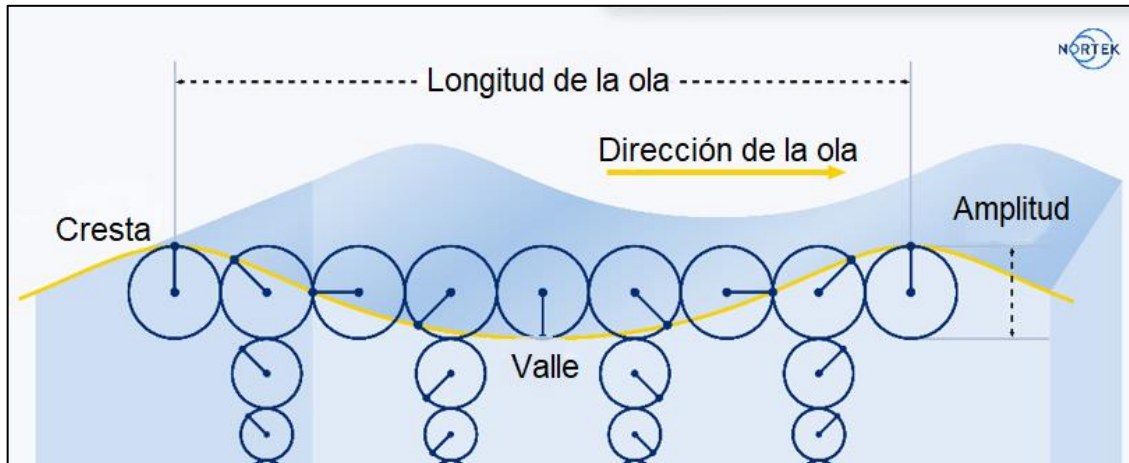


Figura 2.6 Representación de orbitales en una ola (Nortek, 2023)

2.4.2 Espectros de Olas

Debido a que la variación de la superficie marina es un proceso aleatorio que fluctúa en el tiempo es mejor trabajar en términos de frecuencia con una representación espectral usando la relación de Wiener Khintchine y la función de densidad espectral que es un indicador de la representatividad de un proceso aleatorio en un rango de frecuencias. (Hughes & Kee Paik, 2010)

El espectro energía de olas puede ser construido a partir de información visual y registros de oceanógrafos en varias partes del mundo. Para tal motivo se tienen recopilados 55 millones de observaciones entre los años de 1854 a 1984, con olas cuyos periodos oscilan entre 0.6 a 22.5 segundos, este tipo de dato no es consistente por lo que depende del juicio del observador. En cambio, los registros oceanográficos son una información precisa pero limitada por la región geográfica especialmente para el mar Atlántico Norte. (Hughes & Kee Paik, 2010)

2.4.3 Espectro Pierson Moskowitz

Uno de los primeros espectros de mar caracterizados es el espectro de Pierson Moskowitz, que es una representación de un espectro de energías totalmente desarrollado. Inicialmente en base a parámetros de la altura de la cresta de la ola y del periodo promedio de la misma. La relación de este espectro con la velocidad del viento se puede observar en la Figura 2.7 en donde conforme aumenta la velocidad del viento, también aumenta el periodo y la amplitud de la respuesta. Es necesario resaltar que el uso de este espectro está restringido a condiciones de mares totalmente desarrollados que generan olas de parámetros moderados. (Hughes & Kee Paik, 2010).

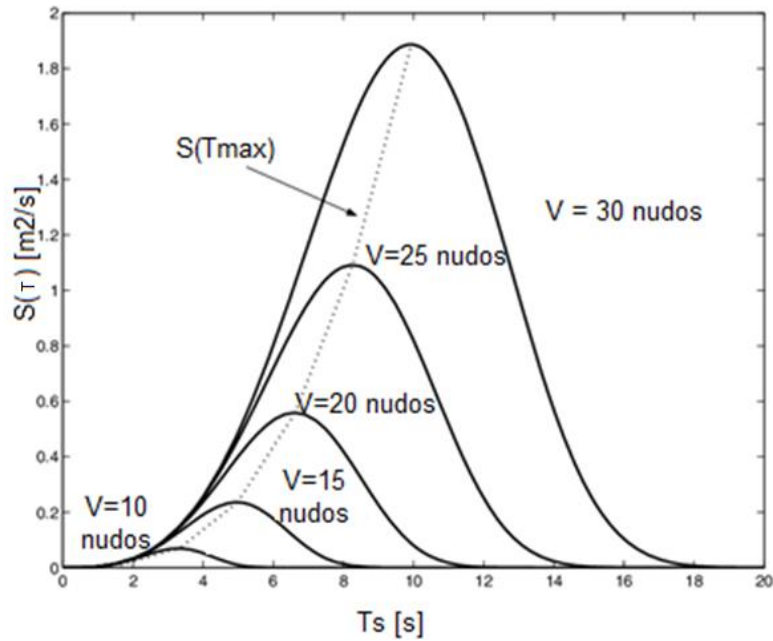


Figura 2.7 Espectros de Pierson Moskowitz con vientos a distintas velocidades (Ringwood et al,2014)

Existen fórmulas alternativas, y de uso generalizado, que definen la densidad espectral $S(\omega)$ en función de una altura significativa de la ola H_s y la frecuencia modal de las olas ω tal como en la Ecuación (2):

$$S(\omega) = 0.313 \frac{H_s^2 \omega_m^4}{\omega^5} \exp \left[-\frac{5}{4} \left(\frac{\omega_m}{\omega} \right)^4 \right] \quad (2)$$

Donde:

- H_s es la altura significativa de las olas
- T y T_m es el periodo de las olas y el periodo modal
- $\omega_m = 2\pi/T_m$ es la frecuencia modal de las olas siendo la frecuencia donde el espectro de olas tiene su mayor altura
- $\omega = 2\pi/T$ es la frecuencia de las olas

2.4.4 Espectro JonSwap

El Proyecto "Joint North Sea Wave Project" (JONSWAP) nace en 1967 con el objetivo principal de determinar las condiciones de las olas con condiciones ambientales limitadas y aguas poco profundas (Lee & Bales, 1980). El proyecto organizó sistemáticamente patrones del mar del norte recolectados a lo largo de 100 millas de la costa este de Alemania, luego utilizando métodos espectrales en los datos obtenidos se parametrizó una

ecuación que ajusta las formas espectrales críticas a estados totalmente desarrollados como lo es el espectro de Pierson-Moskowitz (Figura 2.8).

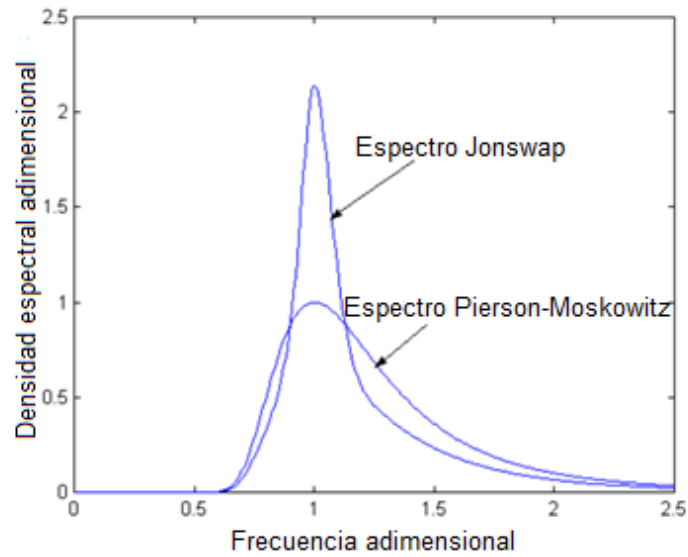


Figura 2.8 Comparación de un espectro Jonswap y Pierson Moskowitz (Abankawa et al,2015)

La representación del espectro JonSwap se lo realiza con la Ecuación (3), y se observa la similitud con la Ecuación (2) de la representación del espectro Pierson Moskowitz con un factor de forma y altura de pico. Los términos de la Ecuación (3) incluyen H_s que es la altura significativa de las olas, ω_m la frecuencia modal de las olas, ν el factor de altura del pico de la frecuencia que generalmente adopta valores de 3.3 y σ el factor de forma con valores de 0.07 a 0.009.

$$S(\omega) = 0.205 \frac{H_s^2 \omega_m^4}{\omega^5} \exp\left[-\frac{5}{4}\left(\frac{\omega_m}{\omega}\right)^4\right] \nu \exp\left[-\frac{(\omega - \omega_m)^2}{2\sigma^2 \omega_m^2}\right] \quad (3)$$

2.4.5 Espectros Direccionales Reales

Una mejor representación de un estado de mar se logra con un espectro direccional bidimensional que indica el ángulo de dirección, así como la frecuencia típica de los componentes de las olas. Estas condiciones varían en función de la ubicación geográfica y algunos proyectos oceanográficos que se dedican a representarlos. (Hughes & Kee Paik, 2010)

El Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Rango Medio (ECMWF), en su proyecto ERA-Interim contiene datos globales de los estados del océano usando estadísticas de largo plazo con una resolución de 100 km, y registrados desde 1979 hasta 2015. Estos datos se visualizan en un atlas interactivo, como lo hace el proyecto

GLOSWAC que muestra el espectro direccional y los sistemas de olas más recurrentes. Las características relevantes que se obtienen son: la altura significativa por cada sistema de olas y velocidad del viento que son útiles describir los estados de mar reales en las distintas ubicaciones geográficas. (MODEMAT, 2023), un ejemplo de la representación se ve en la Figura 2.9

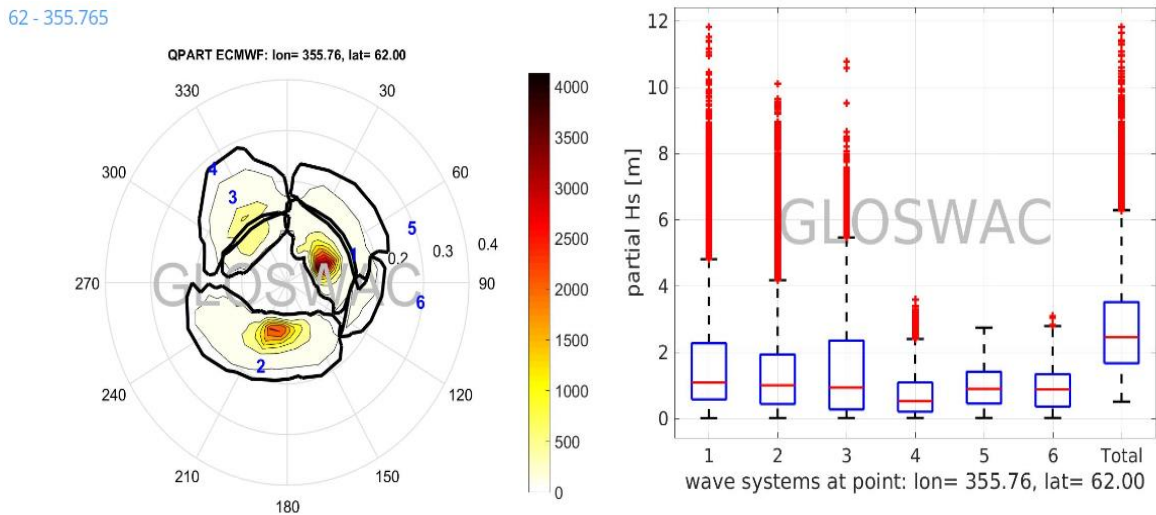


Figura 2.9. Espectro direccional del Atlántico Norte en las costas de Noruega (MODEMAT, 2023)

2.5 Modelamiento numérico del FPSO

La geometría y la naturaleza de las superficies límite en el FPSO o las placas pueden inducir a no linealidades. Por lo tanto, es necesario emplear métodos computacionales para estudiar las respuestas dinámicas y las fuerzas hidrodinámicas que puedan afectar a la unidad flotante.

Es importante conocer cuáles son las ecuaciones de movimiento, las fuerzas hidrodinámicas que afectan al barco y los métodos numéricos que se utilizan para el análisis. En primer lugar, las fuerzas hidrodinámicas incluyen todas las fuerzas a las que las estructuras marinas son expuestas debido a los movimientos causados por olas (Naudascher, 2017). Estas fuerzas pueden variar por las olas o ser constantes por corrientes estables. El tipo de fuerzas provocadas por las olas se clasifican en viscosas o no viscosas como se puede ver en la Figura 2.10.

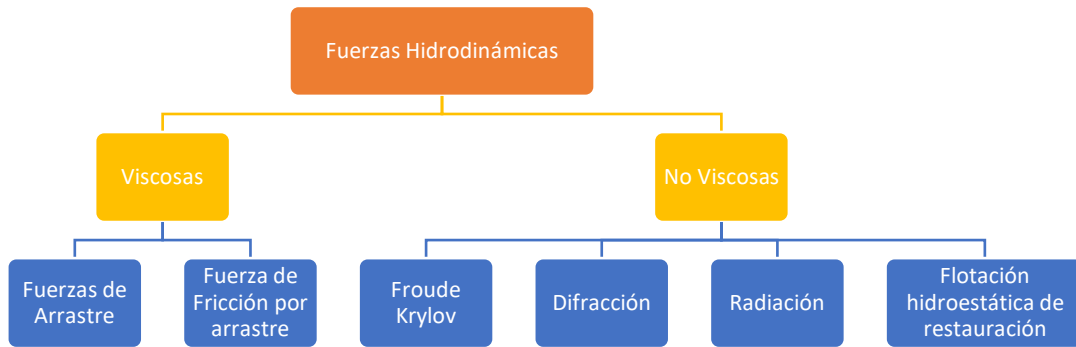


Figura 2.10 Fuerzas hidrodinámicas (Fuente: Propia)

2.5.1 Fuerzas Hidrodinámicas Viscosas

Las fuerzas viscosas son generalmente pequeñas por lo que llegan a ser despreciables, (Brosna, y otros, 2012) e incluyen principalmente a las fuerzas de arrastre y fricción por arrastre:

Fuerza de Arrastre: es una fuerza que depende de la velocidad del fluido además de la forma de objeto especialmente de la sección transversal. (Ver Figura 2.11). Si se tiene una gran sección transversal se va a tener una mayor fuerza de arrastre (Cadence CFD Solutions, 2023): En general la fuerza de arrastre puede estar definida por:

$$F_{arrastra} = -\frac{1}{2} C_f \rho v^2 A \quad (4)$$

Para cuantificar la fuerza de arrastre se utiliza la Ecuación 4, donde el C_f el coeficiente de arrastre que cambia dependiendo el tipo de régimen laminar o turbulento, ρ es la densidad del fluido, v^2 es el cuadrado de la velocidad media en el fluido y A el área de la sección transversal del objeto

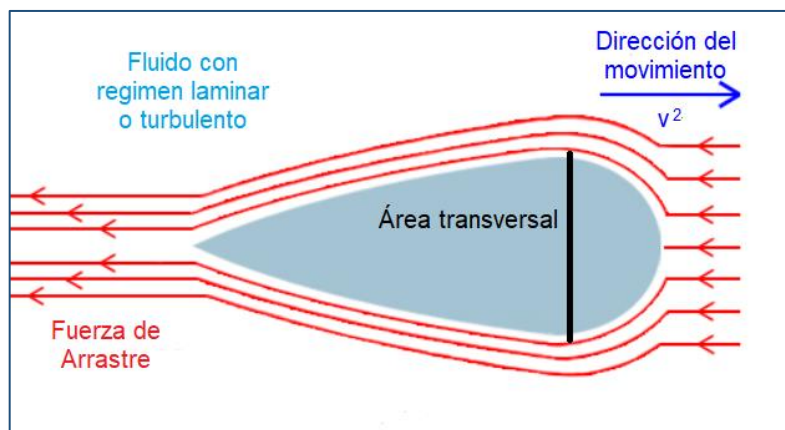


Figura 2.11. Representación de la fuerza de arrastre. Modificado: (SCIENCE FACTS, 2023)

Fuerza de fricción por arrastre: es provocada por las fuerzas viscosas de arrastres en la capa límite alrededor del cuerpo

Es importante indicar que las fuerzas de arrastre y fricción por arrastre pueden representarse en términos de una fuerza de Morrison, ya que esta es una ecuación semi empírica para las fuerzas hidrodinámicas en cilindros circulares que contiene componentes de la fuerza inercial y de la fuerza de arrastre en función de las direcciones de las olas. (Zhao et al, 2019).

2.5.2 Fuerzas Hidrodinámicas no Viscosas

Las fuerzas no viscosas de excitación son: las fuerzas hidrodinámicas compuestas por la suma de las fuerzas de Froude Krylov y las de difracción, por otro lado, las fuerzas de radiación producidas por el movimiento del cuerpo.

Fuerza de Froude Krylov: es una fuerza inducida por las olas en el cuerpo fijo y no toman en cuenta los efectos de la presencia del cuerpo en el campo de presión. Es importante recalcar que esta simplificación una linealización (Faltinsen , 1990).

$$F_{FK} = \frac{A\rho gH}{2} \quad (5)$$

La forma de parametrizar las fuerzas de Froude Krylov es con la Ecuación (5), donde A representa el área del cuerpo donde se aplica el campo de presión, H la altura de las olas, ρ la densidad del fluido y g es la aceleración debido a la gravedad.

Fuerzas de difracción: es la sumatoria de las fuerzas difracción y la reflexión de las olas. Sin embargo, las medidas de longitud lateral y transversal de un barco son suficientemente más grandes que la amplitud de las olas que actúan en el cuerpo por lo que se las puede despreciar (Brosna, y otros, 2012)

Fuerzas de radiación es consecuencia del movimiento de la estructura y es el resultado de la sumatoria de fuerzas de amortiguamiento por masa añadida y por radiación, donde:

- Fuerza de amortiguamiento por masa añadida: es un componente que está en fase con el movimiento del cuerpo. Puede ser considerada como la inercia añadida por el fluido en oscilación armónica que rodea al cuerpo
- Fuerza de radiación: es un componente que está en desfase con el movimiento del cuerpo. Esta fuerza es causada por el movimiento del cuerpo en el fluido, genera olas de disipación de energía y actúa como un amortiguador proporcional a la velocidad

Fuerza de flotación hidrostática de restauración: se trata de una fuerza que busca retornar al equilibrio hidrostático al cuerpo y se origina por la presión estática sobre la superficie del cuerpo sumergido

2.5.3 Análisis en el dominio del tiempo

El registro de posiciones, velocidades y aceleraciones a lo largo del tiempo se obtiene resolviendo la ecuación fundamental del movimiento. Esta ecuación (6) consta de tres términos que son: vector de aceleración multiplicado por términos de masas, vector de velocidad multiplicado por términos de amortiguamiento y vectores de desplazamiento multiplicado por términos de rigidez. Los términos se igualan a las fuerzas externas en el sistema:

$$(M + A_{\infty})\ddot{x}(t) + B\dot{x}(t) + Cx(t) = F_a e^{-j\omega t} \quad (6)$$

En esta ecuación los términos son matrices de 6x6 y vectores 6x1 (Hughes & Kee Paik, 2010) donde:

- M : es la matriz de masa equivalente del sistema
- A_{∞} : es la matriz dinámica que representa la masa añadida de frecuencia infinita
- B : es la matriz de amortiguamiento potencial del sistema
- C : es la matriz de rigidez de las fuerzas de restauración, definida por efectos de la flotación.
- F_a : es la matriz de amplitud compleja de las fuerzas de excitación que incluyen las fuerzas hidrodinámicas viscosas y no viscosas además de las fuerzas de acoplamiento
- $\ddot{x}(t)$, $\dot{x}(t)$, $x(t)$ son vectores de aceleración, velocidad y desplazamiento en función del tiempo.

Las respuestas dinámicas de un cuerpo rígido, o de un sistema acoplado que presenta no linealidades en su espectro de respuesta debe ser representado utilizando la ecuación fundamental del movimiento. (Ribadeneira et al, 2022)

2.5.4 Análisis espectral en dominio de la frecuencia

Un análisis en el dominio de la frecuencia utiliza una ecuación de movimiento en términos de la frecuencia. Una forma de obtener esta ecuación es aplicando la transformada de Laplace a la ecuación (6) de movimiento en el dominio de tiempo, lo que nos lleva a la

ecuación (7) donde se utilizan las mismas matrices para representar valores en los 6 grados de libertad, pero los vectores están en términos de frecuencia:

$$s^2(M + A_\infty)\ddot{x}(s) + sB\dot{x}(s) + Cx(s) = \frac{F_a}{s + jw} \quad (7)$$

En la ecuación (7) M es la matriz de masa, A la matriz de masa añadida, B la matriz de amortiguamiento y C la matriz de rigidez. Los términos $\ddot{x}(s)$, $\dot{x}(s)$ y $x(s)$ son vectores de aceleración, velocidad y desplazamiento en función de la frecuencia. Finalmente, el término F_a representa las fuerzas hidrodinámicas y de acoplamiento del sistema.

Para describir las interacciones de las fuerzas hidrodinámicas con el barco se puede utilizar un análisis espectral en el dominio de la frecuencia. Este análisis se basa en métodos iterativos que resuelven la Ecuación (7), para sistemas lineales y puede ser representado usando una función de densidad espectral.

Para esto se define un sistema del barco donde las señales de entrada son las señales aleatorias de la superficie marina a partir de superposiciones de olas regulares con amplitudes y frecuencias conocidas en términos de espectros de olas (Hughes & Kee Paik, 2010) La salida del sistema es la repuesta son, movimientos, distribución de esfuerzos o momentos a lo largo de la cubierta.

Funciones de transferencia

La función de transferencia es una herramienta matemática que relaciona las señales de entrada y las de salida en el dominio de la frecuencia. Cuando este concepto es aplicado a sistemas hidrodinámicos con excitación armónica, a estas funciones se las denomina operadores de amplitud de respuesta.

Operadores de amplitud de repuesta o RAO

Los operadores de amplitud de repuesta o RAO (*Response Amplitude Operator*) son funciones de transferencia que se utilizan para obtener las respuestas en el FPSO a partir de los movimientos de la superficie marina.

Debido a que las señales de entrada son una superposición de funciones sinusoidales, el proceso se puede describir en términos de frecuencia y representaciones espectrales, donde el espectro de respuesta se define en la Ecuación (8).

$$S_Y(\omega) = |H(\omega)|^2 S_X(\omega) \quad (8)$$

En la ecuación, las representaciones espectrales de las señales de entrada $S_X(\omega)$ se multiplican por el operador de amplitud de respuesta $|H(\omega)|^2$ para obtener las representaciones espectrales de las señales de salida $S_Y(\omega)$.

En general, los RAO son determinados al inicio de las etapas de diseño de un barco con el objetivo de mejorar su desempeño de manera temprana para cada uno de los seis grados de libertad que posee una embarcación (Baghfalaki & Das, 2013). Estas funciones pueden variar en función de los coeficientes de amortiguación o rigidez utilizados para resolver la ecuación (7) y (8) como se puede ver en la Figura 2.12.

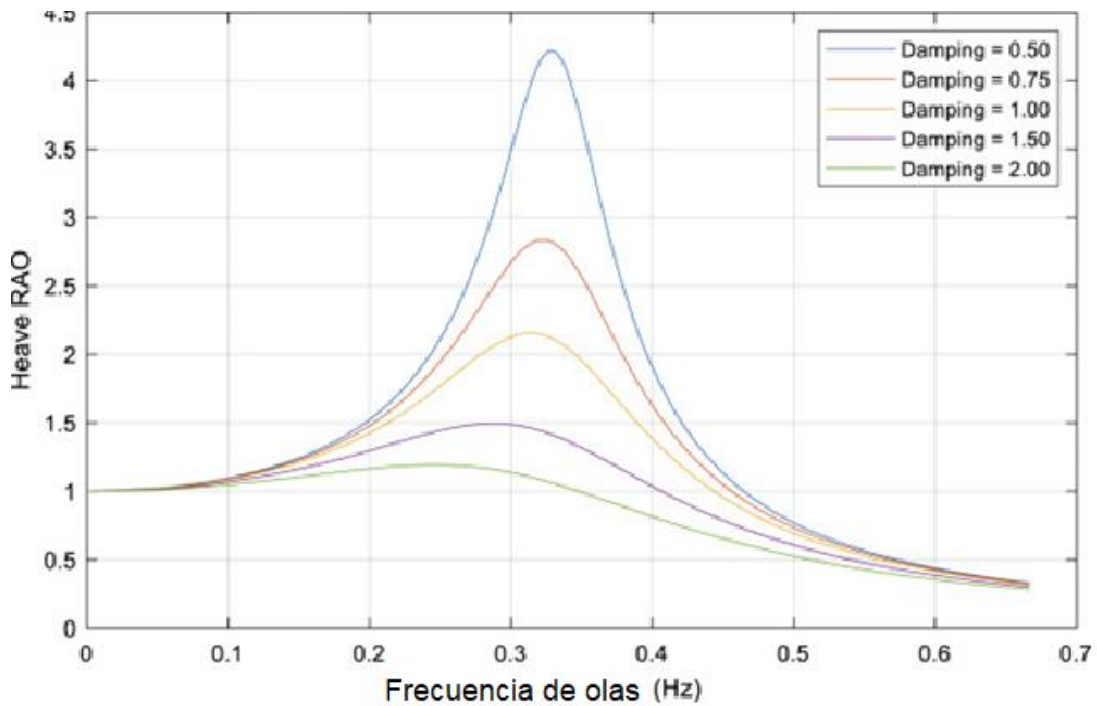


Figura 2.12 RAO para movimientos al rededor del eje z ("heave") en función de parámetros de amortiguamiento (Whittaker et al,2020)

3 METODOLOGÍA

En esta sección se presenta la metodología utilizada para encontrar las aceleraciones y ángulos de rolido en el punto de sujeción de las tuberías submarinas con el FPSO. En la Figura 3.1 se aprecia el proceso donde el paso 1 es seleccionar el modelo geométrico del FPSO (sección 3.1)

Posteriormente, en el paso 2 se estima el periodo natural del FPSO sin placas, y luego se calcula la mejora en el periodo natural deseado dando como resultado las dimensiones de la placa que se necesitaría para tal propósito (sección 3.1.2).

En el paso 3 se inicia con el modelo geométrico de las placas compensadoras de rolido (sección 3.1.3) y en el paso 4 se acopla en software AQWA-ANSYS (Century Dynamics Ansys Inc, 2012) el sistema de FPSO en conjunto con las placas. (sección 3.2)

A continuación, en el paso 5 se establece el modelo numérico hidrodinámico del sistema para realizar el análisis en el dominio del tiempo (sección 3.3) y en el dominio de la frecuencia. (sección 3.4)

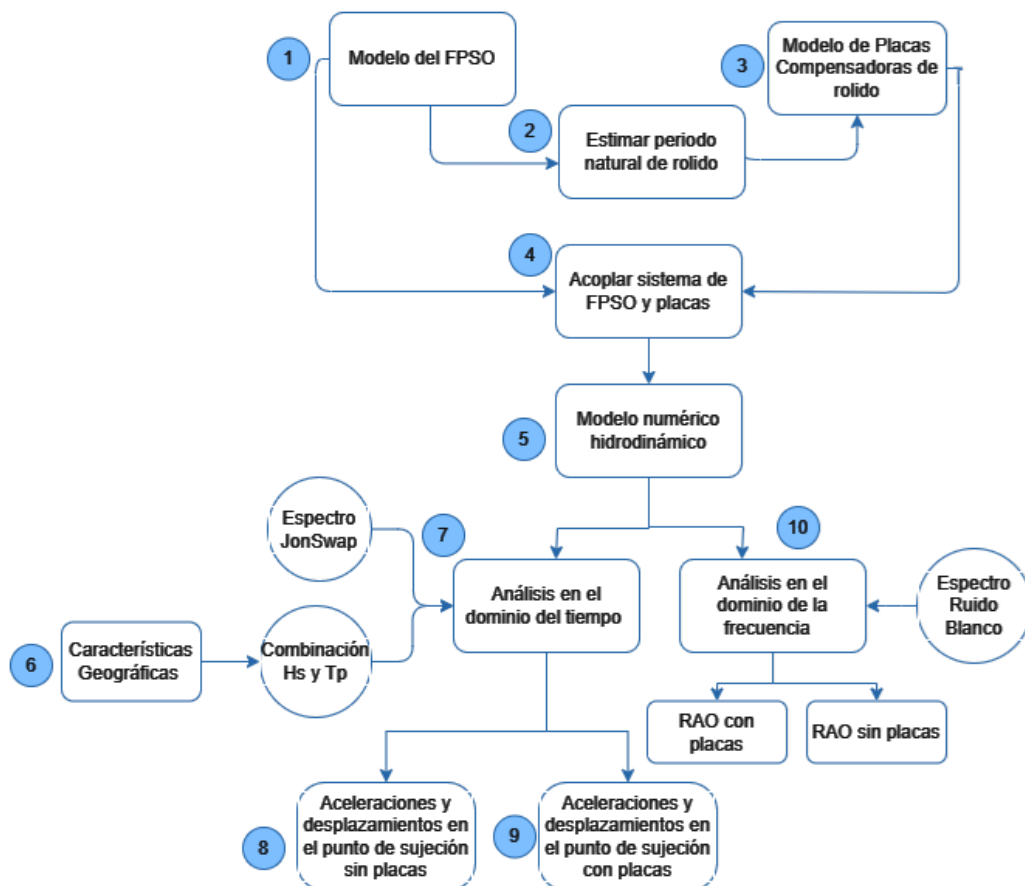


Figura 3.1. Metodología para obtención de aceleraciones y desplazamientos en el FPSO. (Fuente: Propia)

Luego en el paso 6 se definen las condiciones geográficas críticas del FPSO que permiten definir la combinación de altura de olas H_s y de periodo T_p . A continuación, se realiza la caracterización del espectro Jon Swap para el análisis en el dominio del tiempo (ver paso 7), para obtener las aceleraciones en los puntos de sujeción con y sin placas compensadoras de rolido en el paso 8 y 9.

Finalmente, en el paso 10 se realiza un análisis en el dominio de la frecuencia utilizando un espectro de ruido blanco para evidenciar en cada RAO la mejora en el periodo natural de rolido estimado en un principio en el paso 2.

3.1 Modelado del Sistema

El sistema que se va a analizar comprende al FPSO desacoplado de las tuberías submarinas, con y sin el uso de placas compensadoras de rolido. Para tal propósito es importante modelar cada elemento de manera individual y después se procede a acoplarlos en el modelo numérico hidrodinámico

En el siguiente apartado se detallan las propiedades que son necesarias definir para cada elemento del sistema, estas propiedades pueden dividirse en geométricas y de masa. Las propiedades geométricas incluyen todas las dimensiones necesarias para definir al elemento, por otro lado, las propiedades de masa incluyen propiedades como: masa desplazada, peso además de propiedades relacionadas como inercia y radio de giro del elemento así como el periodo natural característico.

3.1.1 Parámetros del FPSO

La unidad FPSO que se utilizó es la misma del estudio de Tahar & Kim (2003), una unidad tanquera de una capacidad de almacenamiento de 1 millón 440 mil barriles de petróleo. El modelo se obtuvo a partir de una representación de líneas de nivel del barco, esta representación estandarizada divide de forma transversal en el plano YZ a la embarcación. (Ver Figura 3.2)

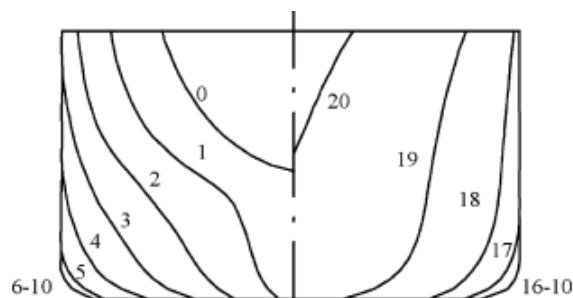


Figura 3.2. Plano de formas de un FPSO (Tahar & Kim, 2003)

Las propiedades geométricas están relacionadas con las dimensiones como se puede ver en la Figura 3.3 donde la longitud entre perpendiculares representa la distancia entre las perpendiculares de proa y popa en la dirección de “Surge” (x), la envergadura es la distancia de estribor a babor en la dirección de “Sway” (y), finalmente la profundidad es la distancia desde la parte superior a la parte inferior de la embarcación en la dirección “Heave” (z).

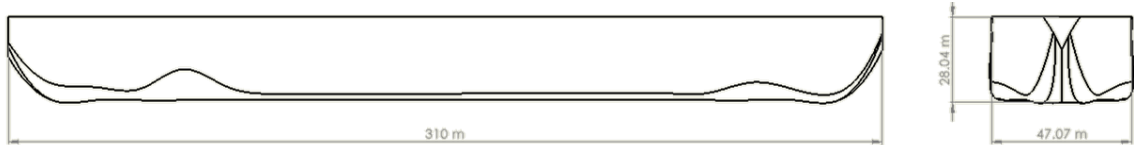


Figura 3.3. Dimensiones del FPSO. (Fuente: Propia)

Las propiedades relacionadas a la masa incluyen: la masa desplazada, la altura del metacentro, posición del centro de gravedad sobre la quilla y el radio de giro. La masa desplazada es el peso del volumen de agua desplazado por el FPSO y representa a la fuerza de flotación (Vite, 2023), la altura del metacentro es la distancia entre la parte inferior de una embarcación y el eje sobre el cual la unidad se inclina en un movimiento de rolido y se encuentra por encima del centro de gravedad del barco. Finalmente, el radio de giro está relacionado con el brazo de palanca donde se puede concentrar la masa para obtener un momento de inercia.

Las propiedades de masa y geométricas están resumidas en la Tabla 3.1 donde se encuentra el símbolo con la que se las representa y la magnitud conforme al sistema internacional de unidades.

Tabla 3.1 Parámetros de masa del FPSO (Tahar & Kim, 2003)

Denominación	Símbolo	Valor	Unidad
Longitud entre perpendiculares	L_{pp}	310	m
Masa desplazada	∇	2.38×10^8	Kg
Envergadura	B	47.17	m
Calado	T	18.90	m
Profundidad	H	28.04	m
Altura del Metacentro	MG_t	5.78	m
Posición de COG sobre la quilla	KG	13.32	m
Radio de giro transversal	K_{xx}	14.77	m
Radio de giro longitudinal	K_{yy}	77.47	m
Radio de giro en el eje vertical	$K_{\psi\psi}$	79.30	m
Periodo Natural del FPSO	T_n	13.08	s

3.1.2 Estimación del Periodo Natural de Rolido

El periodo natural o también llamado periodo de resonancia es un parámetro dependiente de la masa y la geometría de la embarcación. Este valor es relevante debido a que si el movimiento de olas se sincroniza con el periodo natural de la estructura puede causar movimientos con valores excesivamente elevados producto de la resonancia.

En un sistema que cuenta con los 6 grados de libertad cada uno de los movimientos tiene un periodo natural. En específico para determinar el periodo natural de rolo se necesita recurrir a modelos hidrodinámicos, sin embargo, es posible realizar una estimación inicial.

Periodo Natural de rolo del FPSO

El cálculo preliminar del periodo natural de rolo del FPSO se lo puede realizar con la estimación utilizada por Faltinsen (1990) resumida en la Ecuación (9).

$$T_{n4} = 2\pi \sqrt{\frac{Mr_{44}^2 + A_{44}}{\rho g VM G_t}} = 2\pi \sqrt{\frac{I_{44}}{\nabla M G_t g}} \quad (9)$$

En donde:

- T_{n4} es el periodo natural de rolo en segundos
- M es la masa efectiva del FPSO [kg]
- r_{44} es el radio de giro de rolo respecto al eje paralelo al eje x a través de centro de gravedad en [m]
- A_{44} es el momento añadido de rolo en [Kgm^2]
- MG_t es la altura del metacentro en dirección transversal en [m]
- $\nabla = \rho V$ es la masa de agua desplazada equivalente al volumen multiplicado por la densidad del fluido
- $I_{44} = Mr_{44}^2 + A_{44}$ es la inercia de masa para rolo que se puede consultar de la matriz de rigidez para el FPSO

Los valores que se usaron para obtener el valor del periodo natural de rolo en conjunto con su resultado se presentan en la Tabla 3.2. La distancia del metacentro y el volumen de agua desplazado es un valor característico de la embarcación que se obtuvo a partir de la bibliografía consultada. Por otro lado, el valor de la inercia alrededor del eje x se consigue utilizando un análisis de difracción y en la matriz de rigidez se toma el valor correspondiente al eje de rolo que se ubica en el cuarto elemento de la diagonal.

Tabla 3.2. Valores utilizados para estimar el periodo natural de rolido (Fuente: Propio)

Denominación	Símbolo	Valor	Unidad
Inercia de masa para rolido	I_{44}	5.31×10^{10}	Kgm ²
Masa desplazada	∇	2.38×10^8	Kg
Altura del Metacentro	MG_t	5.78	m
Gravedad	g	9.81	m/s ²
Periodo Natural estimado del FPSO	T_{n44}	12.5	s

El valor del periodo natural de rolido es $T_{n4} = 12.5$ [s] utilizando la Ecuación 9, dándonos una frecuencia natural $w_{n4} = 2\pi/T_{n4} = 0.5$ [rad/s], esta información puede ser comprobada con un análisis de dispersión y con la obtención de las RAO para rolido del FPSO.

Periodo Natural de rolido del FPSO con placas compensadoras de rolido

El propósito de utilizar las placas compensadoras de rolido es aumentar el periodo natural de rolido para evitar posibles resonancias, esto se logra aumentando el valor de la inercia de masa para rolido con placas compensadoras en un costado de la embarcación como se ve en la Figura 3.4

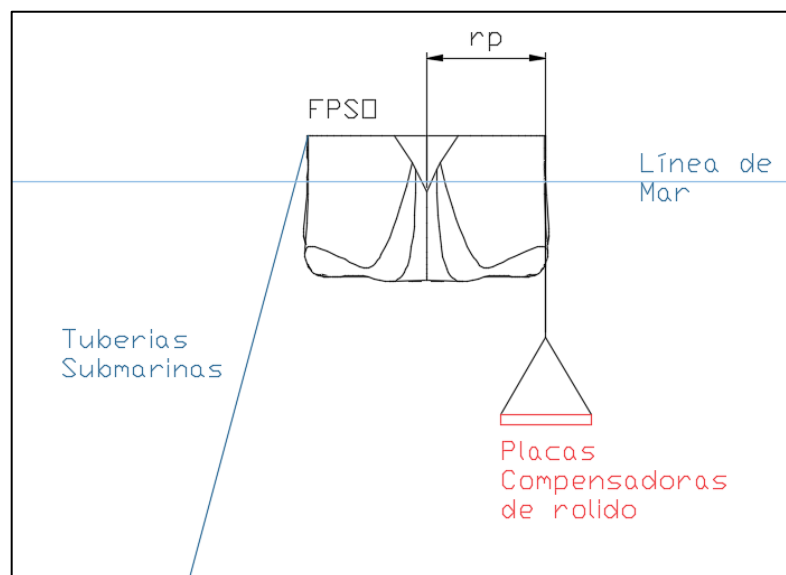


Figura 3.4. Esquema conceptual de FPSO con placas compensadoras de rolido. (Fuente: Propio)

Una estimación inicial para el tamaño y peso de las placas en conjunto con el efecto que se tendrá en el periodo natural de rolido puede ser calculado utilizando la Ecuación 9 y aumentando la inercia con la que contribuyen las placas compensadoras de rolido. Para

tal propósito se considera el radio de giro de las placas compensadoras de rolido en conjunto con la masa efectiva de las mismas

$$T_{npc} = 2\pi \sqrt{\frac{I_{44} + I_{placas}}{\nabla M G_t g}} = 2\pi \sqrt{\frac{I_{44} + n \times r_p^2 (m_{placa} + m_{añadida})}{\nabla \cdot M G_t \cdot g}} \quad (10)$$

Los términos utilizados tienen la misma nomenclatura que en la Ecuación 9, además se añaden:

- T_{npc} periodo natural del FPSO con placas compensadoras
- m_{placa} corresponde a la masa del cuerpo sin estar sumergido
- $m_{añadida}$ es la masa del volumen de agua desplazado por las placas
- n es el número de placas que se desea utilizar
- r_p es el radio de giro de las placas desde el centro de gravedad del FPSO

En un primer paso, se propone aumentar el valor del periodo en 3 segundos, si se despeja la ecuación (10) con un valor de $T_{npc} = 15$ [s], se obtienen parámetros para definir la masa de la placa compensadora de rolido

3.1.3 Parámetros de las placas de estabilización de rolido

Los cuerpos utilizados para la estabilización de rolido pueden adoptar varias formas, desde cilindros, baldes o placas. Para la simulación se utiliza una simplificación de las placas de estabilización de rolido propuestas en el artículo de Ribadeneira et al (2022). Para tal propósito se propone utilizar una placa que cumpla con la masa calculada al despejar la ecuación (10), obteniendo la Tabla 2.3.

Tabla 3.3 Datos de placas compensadoras de rolido

Denominación	Símbolo	Valor	Unidad
Masa de placas	m_{placa}	8×10^5	Kg
Masa añadida	$m_{añadida}$	1.49×10^6	Kg
Longitud	L	36	m
Ancho	a	18	m
Profundidad	t	2.25	m

Estas placas compuestas por una estructura de acero y rellena de concreto como se aprecia en la Figura 3.5, la estructura de las placas incluye: planchas de acero, orejas de

izaje, resortes tipo ballesta, losas de concreto, fenders y bisagras. Además, se tiene un mecanismo de izaje desde las orejas gracias a las bisagras instaladas en la parte inferior de la placa.

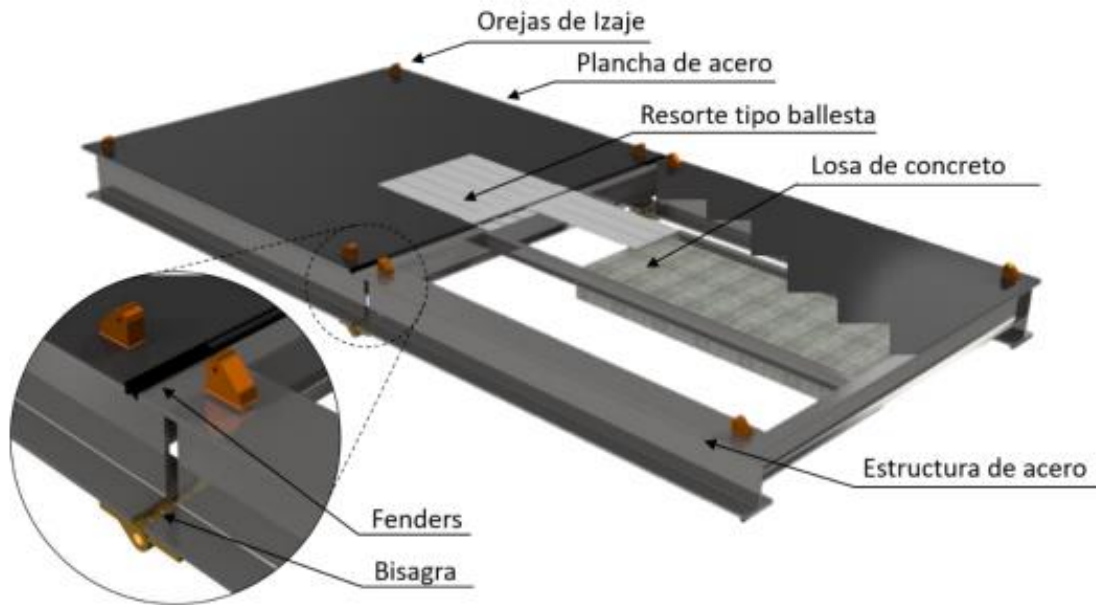


Figura 3.5 Diseño conceptual de una placa de estabilización de rolido (Ribadeneira et al, 2022)

3.1.4 Condiciones Medioambientales

El análisis hidrodinámico del FPSO se va a realizar en Campos Basin, en las costas de Brasil debido a que es uno de los principales yacimientos marinos de petróleo de Sudamérica, además Brasil junto con México son pioneros en el uso de estas tecnologías de FPSO con balcones.

Campos Basin está ubicado en las costas del sureste de Brasil, cerca de las costas de los estados de Rio de Janeiro y Espírito Santo en las coordenadas (-22.48,-34.833) y comprende un área de 115 000 km² (Bruhn, Jose , & Johann, 2015) este campo ha sido explotado desde 1959 con múltiples perforaciones para determinar las reservas de petróleo presentes en la zona. Las explotaciones de petróleo comenzaron en 1977 y estas reservas representaron el 89 % del total de la producción total de Brasil en las últimas décadas con una producción anual de 8.5 mil millones de barriles de petróleo.

Para este campo los espectros de olas que se obtiene en MODEMAT (2023), muestran cinco sistemas de olas principales como se ve en la Figura 3.6. El primer grupo en el noreste se encuentra a 30° del Norte y sus olas presentan un periodo pico T_p de 12.5

segundos, el segundo grupo al Oeste tiene un periodo pico de 8.33 segundos, por último, el tercer, cuarto y quinto grupo en la dirección Sur tienen periodos pico de 10, 5 y 4 segundos respectivamente.

El valor de H_s total para los cinco grupos de olas toma valores de 1 a 5 metros, en donde el primer grupo de olas tiene el mayor rango de variación de la altura promedio de olas que va de 0 a 5 metros. Finalmente, la altura de las olas por mes muestra que la mayor altura promedio es en el mes de mayo para el primer grupo de olas, agosto para el segundo grupo además de enero y diciembre para el tercer, cuarto y quinto grupo.

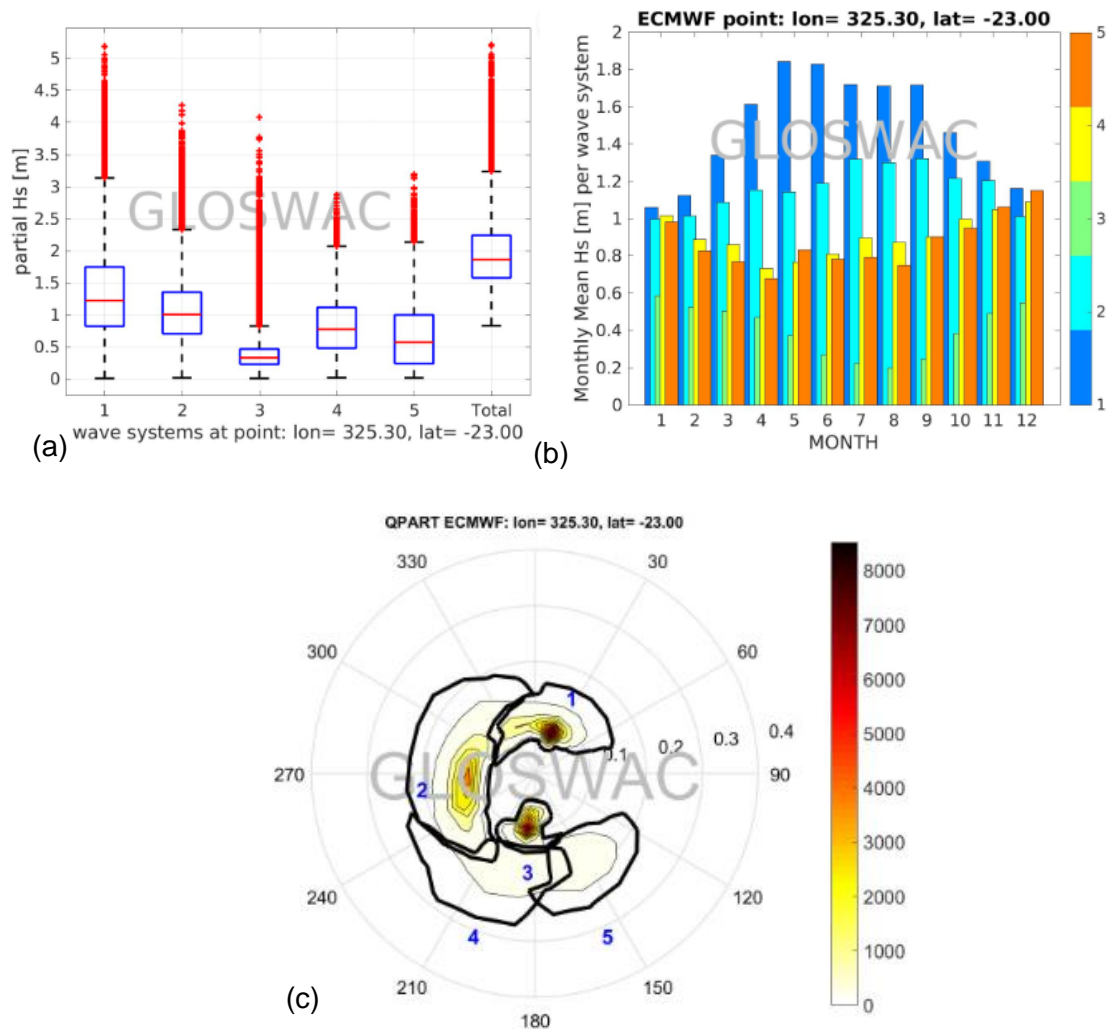


Figura 3.6 Altura significativa de olas (a), alturas promedio de las olas por cada mes en Campos Basin (b) y diagrama de dispersión de frecuencias(c) (MODEMAT, 2023)

La información de la Figura 3.6 se encuentra en la Tabla 3.4, donde se resume el periodo T_p para ese grupo de olas, la altura promedio de las olas H_s , en conjunto con el máximo y mínimo valor de las olas. De igual manera en la tabla se incluye información como la dirección en la que se encuentra las olas.

Tabla 3.4 Tabla de datos característicos de cada grupo de olas de Campos Basin

	Grupos de Olas				
	1	2	3	4	5
Tp [s]	12.5	8.33	10	5	4
Dirección	32°	270°	180°	210°	150°
Hs promedio [m]	1.25	1	0.3	0.75	0.6
Hs 25% [m]	0.8	0.75	0.25	0.5	0.25
Hs 75% [m]	1.75	1.4	0.5	1.1	1

De los espectros de olas del lugar se puede inferir que el rango de periodo pico para este sitio va de 4 segundos a 12.5 segundos, con respecto a las direcciones, y las direcciones más representativas son las de 32° y 270°. Esta información será útil para determinar las combinaciones H_s y T_p a utilizar en el análisis en el dominio del tiempo del modelo hidrodinámico.

3.2 Modelo Hidrodinámico del Sistema

Con los parámetros establecidos del FPSO, de la placa compensadora de rolido y las condiciones geográficas para determinar los parámetros de análisis se procede a acoplar el sistema del FPSO con la placa compensadora de rolido calculada en la sección 3.1.3.

Para tal propósito el centro de gravedad del FPSO se utiliza como origen para el sistema y se utilizan como punto de referencia global. El sistema con las placas de rolido consta de dos cuerpos rígidos, el FPSO y las placas compensadoras de rolido. Además, se utilizan líneas de anclaje con el único objetivo de que se realicen análisis de equilibrio y difracción adecuadamente (Figura 3.7). Los dos cuerpos rígidos del sistema están unidos por cables, en dos puntos al costado del FPSO y en las cuatro esquinas de las placas compensadoras de rolido.

El FPSO consta de 5040 nodos que forman 4941 elementos de paneles cuadrilaterales con un área menor a 1 m² y la placa de compensación de rolido tiene 240 nodos que conforman 238 paneles cuadrilaterales de 1 m².

La placa está anclada a 18 metros del centro del costado lateral del FPSO y es unida por cables de izaje con rigidez de $1.44 \times 10^7 N/m$ y longitud de 30 metros. Estos cables de izaje están unidos a cables que sostienen la placa desde sus vértices. Además, la placa consta de un disco de Morrison para representar las fuerzas de arrastre que tiene un área similar de la placa con un radio de 41 metros.

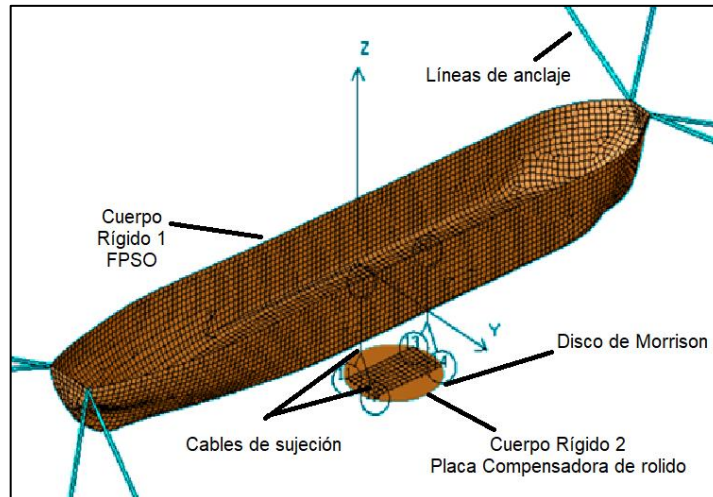


Figura 3.7 Partes del sistema de FPSO con placas compensadoras de rolido

El modelo numérico se resuelve en software de AQWA Ansys utilizando las ecuaciones (7) y (8) en intervalos de discretización de 0.02 segundos para completar una simulación de 2 horas con 15 minutos hasta alcanzar un proceso estacionario.

3.3 Análisis en el Dominio del Tiempo

Con el modelo numérico establecido se puede realizar un análisis de difracción en el dominio del tiempo. Para tal propósito es necesario establecer el espectro que se va a utilizar para el análisis y las combinaciones de H_s y T_p .

El espectro por utilizar es el de JonSwap porque a diferencia de Pierse Moskowitz incluye los espectros desde máximos pronunciados hasta estados totalmente desarrollados. El factor de altura de la ola que se va a utilizar es el típicamente utilizado de $\nu = 3$ para todas las combinaciones de H_s y T_p

La dirección de incidencia de las olas en la que se va a realizar el análisis es en la crítica de 90° con respecto a la transversal para los dos casos donde se tiene y no se tiene el sistema de compensación.

Las combinaciones de valores de periodo natural y altura significativa de las olas, es de acuerdo con las condiciones de mar que se presentan en Campos Basin. Los valores de periodo pico varían entre $4 < T_p < 16$ con un intervalo de 1 segundo, por otro lado, la altura significativa varía entre $1 < H_s < 5$ con intervalos de 1 metro. De esta forma se tienen 65 posibles combinaciones para las cuales se determina el valor de ángulo de rolido y aceleración en el punto de sujeción.

Para este proceso se calcula la medida de amplitud promedio (2RMS) de cada combinación de la tabla de dispersión en la dirección más crítica para todo el rango de alturas representativas de olas que se presentan para el sitio de análisis

Los datos RMS (media de raíz cuadrada) se calcula elevando cada registro al cuadrado, dividiendo para el número de valores y por último una raíz cuadrada de la suma total. Este valor es representativo para cada estado de mar y permite cuantificar los análisis realizados en el dominio del tiempo

3.3.1 Registro de Ángulos de Rolido

El registro del valor $2rms$ para el ángulo de rolido a partir del análisis de difracción para cada combinación de altura de olas significativa y periodos pico. Este procedimiento se lo realiza para cuando el FPSO tiene y no tiene el sistema compensador. Tal como se aprecia en la Figura 3.8 estos valores adoptan una forma de senoide como respuestas de la ecuación (7).

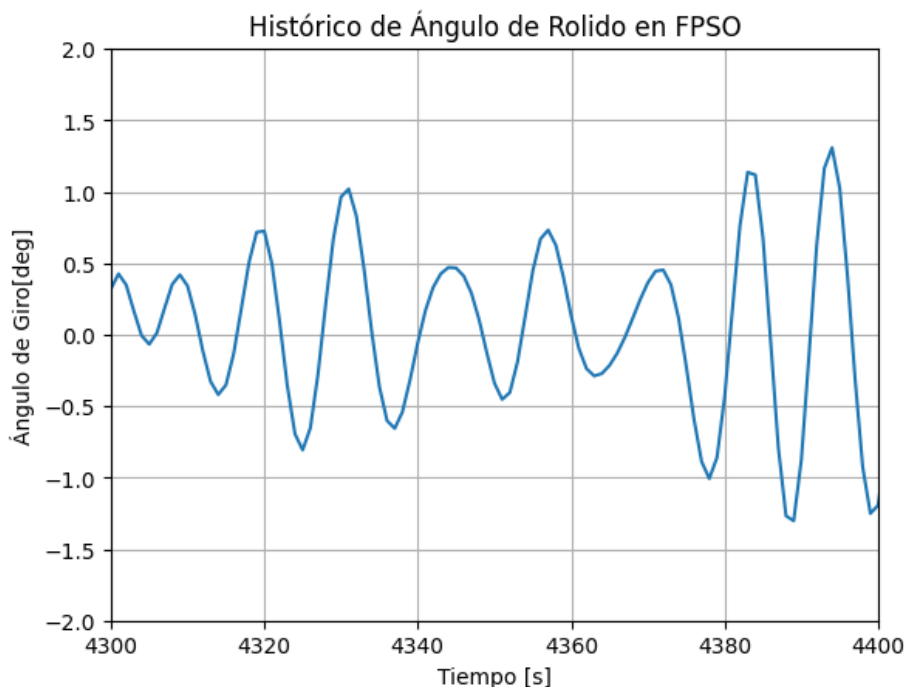


Figura 3.8. Fracción de ángulo de rolido para un FPSO sin sistema de compensación para condiciones $H_s = 4$ y $T_p = 10$

3.3.2 Registro de aceleraciones

El registro del valor $2rms$ para la aceleración del punto de sujeción de las tuberías se obtiene a partir del análisis de difracción para cada combinación de altura de olas significativa y periodos pico. Se registran los valores para el FPSO con y sin sistema

compensador, tal como en la Figura 3.9 se observa el registro de aceleraciones con el sistema compensador de rolido.

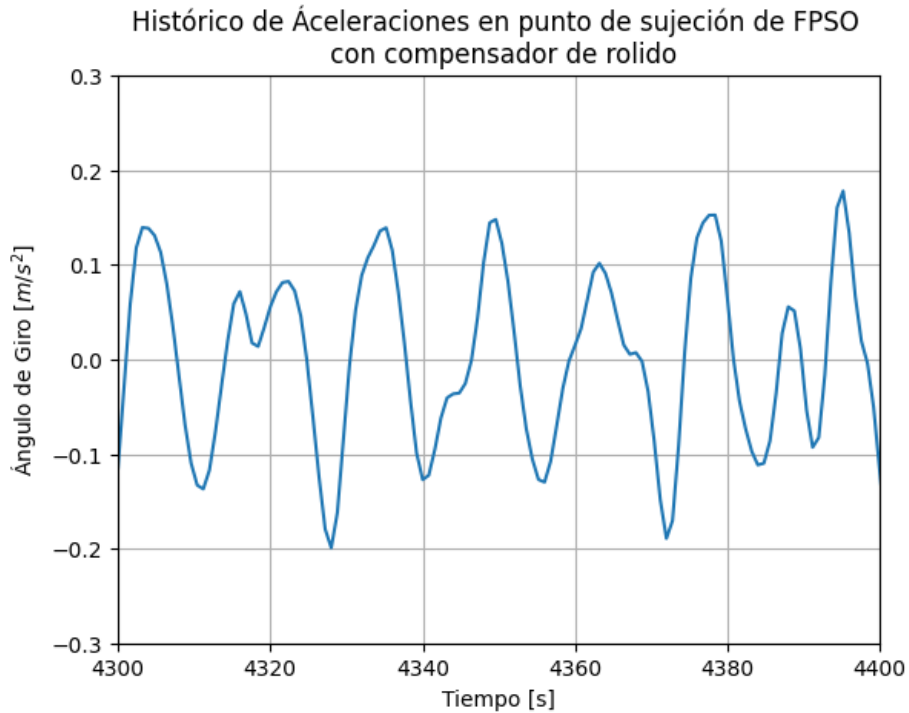


Figura 3.9 Fracción de aceleración en el punto de sujeción de un FPSO con compensador de rolido para condiciones $H_s = 4$ y $T_p = 10$

3.4 Análisis en el Dominio de la Frecuencia

Para obtener respuestas en el dominio de la frecuencia se resuelve la ecuación (8) en donde la señal de entrada es un espectro de Ruido Blanco. Este espectro es una función constante en el dominio de la frecuencia utilizando el mínima y máximo valor de las combinaciones de análisis. Esta función permite excitar de manera uniforme a la estructura en todas las bandas de frecuencia.

Para determinar la magnitud de la densidad espectral se utiliza la Ecuación (11) que relaciona una altura arbitraria de olas y la banda de frecuencias, a partir de los periodos naturales elegidos para el análisis.

$$H_s = 4\sqrt{a(w_2 - w_1)} \quad (11)$$

En donde:

- H_s es la altura representativa de la ola, escogida de manera arbitraria
- a es el nivel de energía para el espectro de ruido blanco

- $w_1 = 2\pi/T_{\text{mínimo}}$ y $w_2 = 2\pi/T_{\text{máximo}}$ son la frecuencia mínima y máxima respectivamente

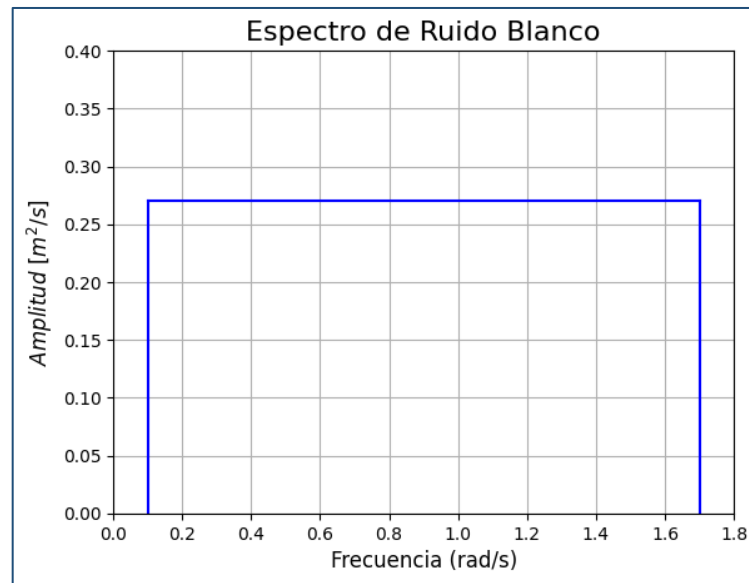


Figura 3.10 Espectro de Ruido Blanco

El espectro ruido blanco que se aprecia en la Figura 3.10 va a ser utilizada para obtener las funciones de transferencia para direcciones de incidencia de las olas de 90° y 45°, en el FPSO con y sin placas compensadoras de rolo y permitirá observar la variación del periodo natural conforme a lo estimado.

Para obtener la función de transferencias para el movimiento de rolo, se resuelve la ecuación (8), en donde la señal de entrada es el espectro de ruido blanco y la señal de salida es el espectro de respuestas de rolo, por lo que despejando la ecuación (8) obtenemos la ecuación (12):

$$RAO = \sqrt{\frac{S_{\text{rolo}}}{S_{\text{ruido blanco}}}} \quad (12)$$

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección del trabajo se presentan los resultados de rolo y aceleraciones en los puntos de sujeción de los ductos submarinos usando el software ANSYS AQWA. Además, se muestra la función de transferencia para un movimiento de rolo con el fin de comparar el periodo natural del FPSO con y sin placas de compensación. Estos resultados son de importancia para estimar las tensiones y los esfuerzos presentes en los risers.

4.1 Respuestas de Rolido en el dominio del tiempo

Se obtuvieron las respuestas de rolo del FPSO con y sin placas compensadoras de rolo a partir de las simulaciones en el dominio del tiempo con un espectro de olas Jon swap y para cada combinación de altura de olas significativa (H_s) entre 1 y 5 metros, en conjunto con periodo pico de las olas (T_p) entre 3.7 y 16 segundos para un ángulo de incidencia de las olas de 90°

4.1.1 Respuestas de rolo para un FPSO sin un sistema compensador

Los ángulos de rolo para el FPSO sin placas de compensación de rolo están en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1 Ángulos de rolo [deg] $2r_{rms}$ para un FPSO sin placas compensadoras de rolo a una dirección de 90° (Fuente: Propio)

Hs (m)	Tp (s)													
	3.7	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	0.01	0.06	0.07	0.09	0.15	0.27	0.76	1.58	2.25	3.81	4.75	4.00	3.25	2.28
2	0.22	0.21	0.23	0.28	0.38	0.60	1.55	3.16	4.26	7.76	9.49	8.05	6.53	5.44
3	0.46	0.47	0.46	0.61	0.75	1.05	2.39	4.67	7.92	11.16	14.27	12.98	9.84	8.21
4	0.84	0.85	0.84	1.10	1.18	1.62	3.29	6.48	10.54	14.70	19.23	16.15	13.01	10.91
5	1.27	1.24	1.31	1.75	1.82	2.26	4.37	8.31	13.45	18.25	23.97	20.24	16.36	13.79

Los ángulos incrementan conforme la altura significativa de las olas H_s también incrementa para todos los valores de periodo pico T_p . Los ángulos aumentan en mayor medida hasta que se alcanza el periodo de $T_p = 13 s$ y luego decrecen. El menor ángulo de rolo sucede para la combinación de $H_s = 1m$ y $T_p = 3.7s$, donde el ángulo de rolo toma el valor de 0.01° , y por otro lado el mayor valor toma para la combinación de $H_s = 5m$ y $T_p = 13s$ donde toma un valor de 23.97° .

Estos valores son representados en una gráfica bidimensional de curvas de nivel como en la Figura 4.1 que representa una superficie tridimensional de valores de ángulos de rolido en función de dos variables como lo es H_s y T_p y se marca de un mismo color las regiones para las que el ángulo tiene igual valor, con colores cálidos para valores de mayor magnitud.

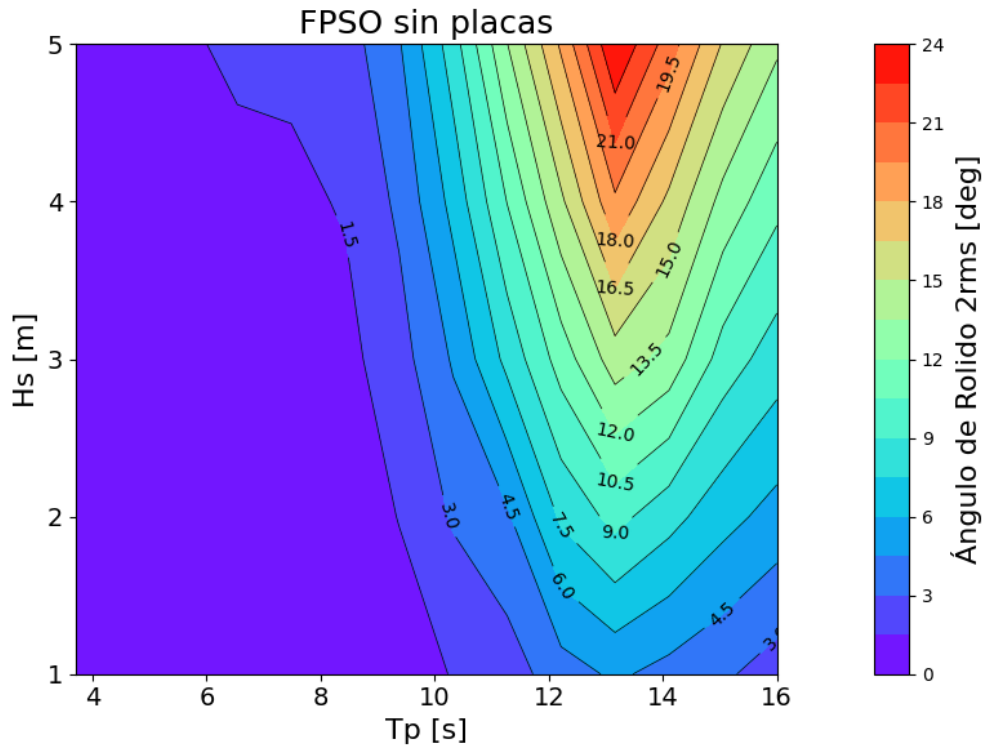


Figura 4.1. Mapa de colores y curva de nivel para valores de ángulo de rolido 2rms de un FPSO sin placas compensadores a una dirección de 90° (Fuente: Propio)

En la Figura 4.1 se puede observar cómo cerca del periodo natural del FPSO los valores de ángulo de rolido son mayores en todas las alturas, además para combinaciones con un valor de periodo pico de ola menor a 10 segundos los valores de ángulo de rolido son menores a 1.5°.

4.1.2 Respuestas de rolido para un FPSO con un sistema compensador

Los ángulos de rolido para un FPSO usando placas compensadoras de rolido se pueden observar en la Tabla 4.2. De manera general se puede apreciar que la mayoría de los ángulos son menores comparados con el FPSO sin el sistema de compensación, además se conserva la tendencia de que el valor incrementa a medida que la altura significativa de las olas H_s incrementa para todos los valores de periodo pico T_p .

Los valores de ángulo rolido incrementan en mayor medida hasta que se alcanza el periodo de $T_p = 14 s$ y luego decrecen. El menor ángulo de rolido sucede para la combinación de

$H_s = 1m$ y $T_p = 3.7s$, donde el ángulo de rolido toma el valor de 0.05° , y por otro lado el mayor valor toma para la combinación de $H_s = 5m$ y $T_p = 14s$ donde toma un valor de 12.37°

Tabla 4.2 Ángulos de rolido 2rms para un FPSO con placas compensadoras de rolido a una dirección de 90° (Fuente: Propio)

Hs (m)	Tp (s)													
	3.7	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	0.05	0.06	0.07	0.10	0.07	0.25	0.47	1.00	1.46	2.02	2.61	3.03	3.22	2.81
2	0.19	0.21	0.22	0.28	0.38	0.59	0.97	1.99	2.27	3.55	4.20	4.23	4.45	4.23
3	0.39	0.43	0.46	0.57	0.70	0.97	1.55	2.87	3.84	5.62	6.37	6.07	5.73	5.22
4	0.66	0.75	0.76	0.90	1.09	1.43	2.20	3.65	5.32	8.11	9.22	9.33	7.58	6.46
5	0.76	1.11	1.13	1.27	1.54	1.98	2.83	4.49	7.31	10.59	12.51	12.79	9.46	8.09

En la Figura 4.2 se puede observar cómo cerca del periodo natural del sistema FPSO con las placas, los valores de ángulo de rolido son mayores en todas las alturas además para combinaciones con un valor de periodo natural de ola menor a 12 segundos los valores de ángulo de rolido son menores a 1.6° .

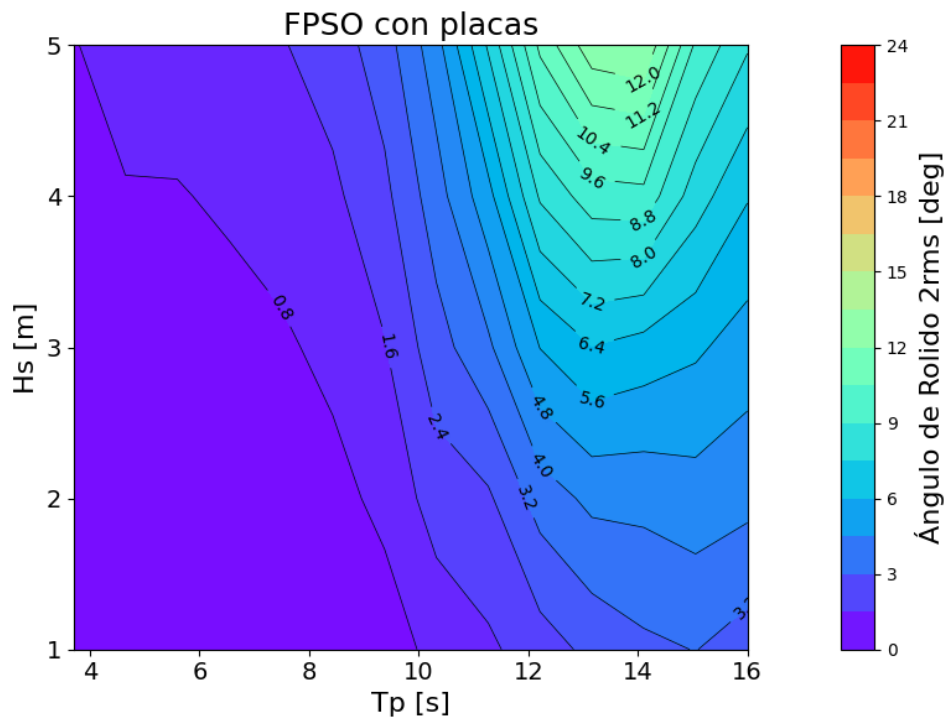


Figura 4.2. Mapa de colores y curva de nivel para valores de ángulo de rolido 2rms de un FPSO con placas compensadoras a una dirección de 90° (Fuente: Propio)

Al comparar los ángulos de rolido del FPSO con y sin placas se observa que, al usar las placas compensadoras, el valor de los ángulos de rolido disminuye en un 46% además de que el rolido de mayor magnitud ocurren cerca de los 14 [s]

4.2 Respuestas de Funciones de Transferencia

Las funciones de transferencia para el FPSO con y sin placas compensadoras de rolido se determina a partir de un análisis en el dominio de la frecuencia. Para tal análisis la señal de entrada fue un espectro de ruido blanco y se procesaron los datos para las direcciones de incidencia de las olas de 45° y 90°

En la Figura 4.3 se puede observar las funciones de transferencia (RAO) para un FPSO con un ángulo de incidencia de 45°, en azul se puede observar la RAO para el FPSO sin un sistema de compensación de rolido y en verde es el FPSO con el sistema. El periodo natural sin placas compensadoras es 13 segundos, y el con el sistema el periodo natural aumenta 14.5 segundos.

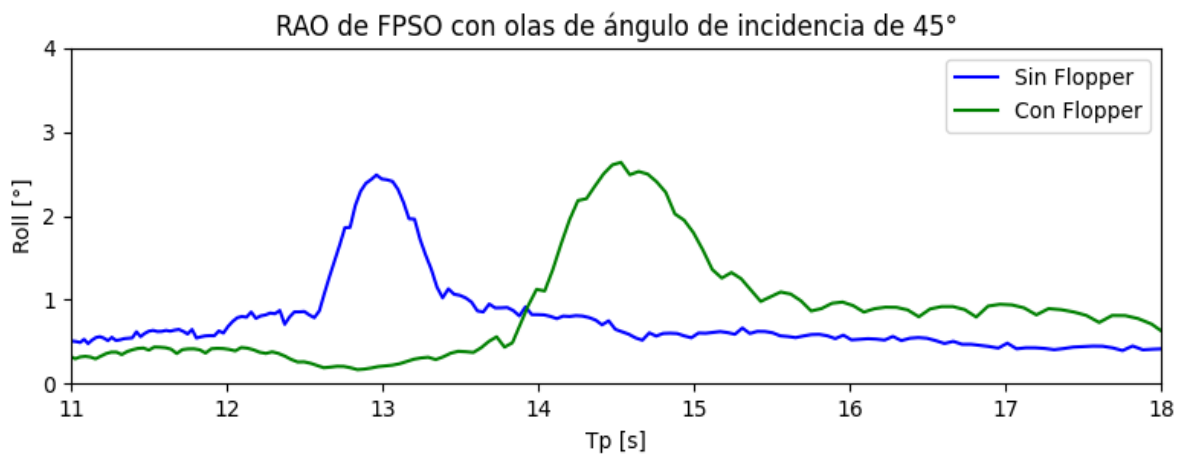


Figura 4.3. RAO de FPSO para olas con ángulos de incidencia a 45°

En la Figura 4.4 se puede observar las funciones de transferencia (RAO) para un FPSO con un ángulo de incidencia de 90°, en azul se puede observar la RAO para el FPSO sin un sistema de compensación de rolido y en verde es el FPSO con el sistema. De igual forma el periodo natural sin placas compensadoras es 13 segundos, y el con el sistema el periodo natural aumenta 14.5 segundos. Además, se puede observar que cuando se usa el sistema de compensación de rolido disminuye la respuesta del movimiento de rolido.

Al comparar las dos figuras, se puede observar que para ambos casos el valor del periodo natural de rolido aumento al usar el sistema de placas. Además, el periodo con el que se estimó difiere en 3% con el periodo obtenido del modelo hidrodinámico.

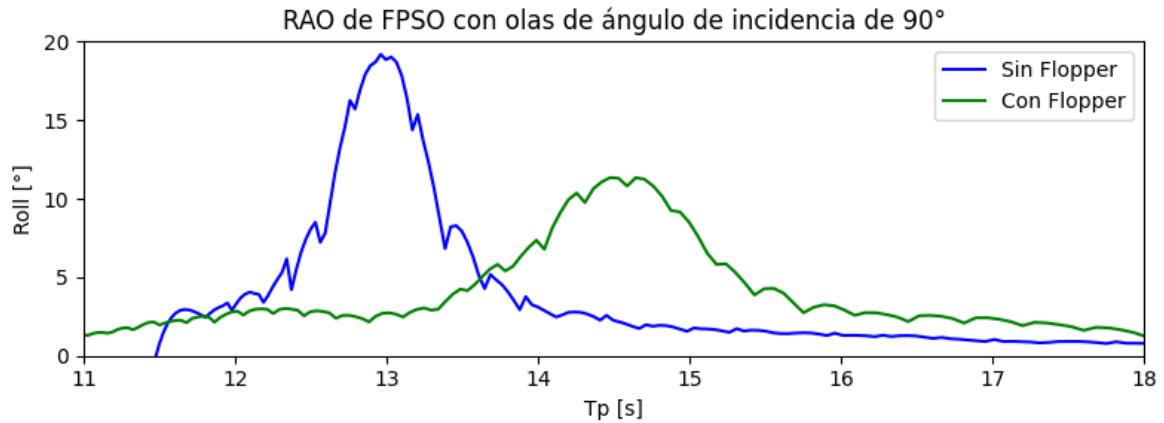


Figura 4.4 RAO de FPSO para olas con ángulos de incidencia a 45°

4.3 Respuestas de Aceleración

Se obtuvieron las respuestas de aceleración del FPSO con y sin placas compensadoras de rolido a partir de las simulaciones en el dominio del tiempo con un espectro de olas Jon swap y para cada combinación de altura de olas significativa (H_s) entre 1 y 5 metros, en conjunto con periodo pico de las olas (T_p) entre 3.7 y 16 segundos para un ángulo de incidencia de las olas de 90°. Aceleración para un FPSO sin sistema de compensación de rolido

Las aceleraciones en el punto de sujeción para el FPSO sin placas de compensación de rolido están en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3 Aceleraciones [m/s^2], $2rms$ para un FPSO sin placas compensadoras de rolido a una dirección de 90° (Fuente: Propio)

Hs (m)	Tp (s)													
	3.7	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.07	0.14	0.22	0.33	0.42	0.36	0.30	0.25
2	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	0.05	0.13	0.27	0.45	0.66	0.84	0.72	0.59	0.49
3	0.05	0.05	0.05	0.06	0.07	0.09	0.21	0.41	0.70	0.97	1.27	1.10	0.88	0.74
4	0.09	0.09	0.09	0.11	0.11	0.14	0.30	0.57	0.94	1.29	1.71	1.45	1.20	0.99
5	0.13	0.12	0.13	0.17	0.17	0.20	0.37	0.76	1.18	1.60	2.14	1.82	1.49	1.27

Las aceleraciones incrementan en proporción con la altura significativa de las olas H_s para todos los valores de periodo pico. Las aceleraciones incrementan en mayor medida hasta que se alcanza el periodo natural del FPSO de $T_n = 13 s$ y luego decrecen. La mínima aceleración es en la combinación de $H_s = 1m$ y $T_p = 3.7s$, donde toma el valor de $0.01 [m/s^2]$, y por otro lado el mayor valor toma para la combinación de $H_s = 5m$ y $T_p = 13s$ donde toma un valor de $2.14 [m/s^2]$.

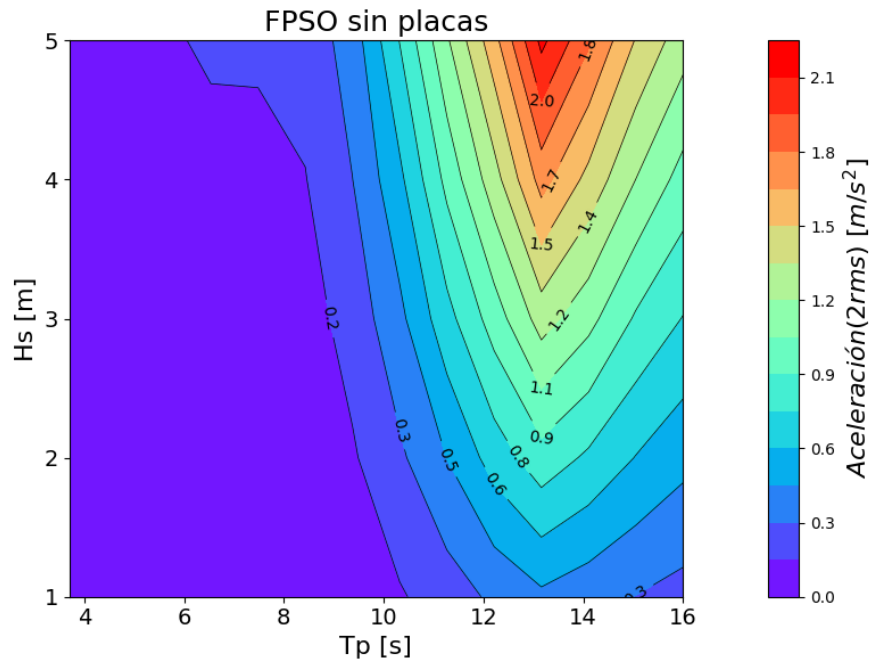


Figura 4.5. Mapa de colores y curva de nivel para valores de ángulo de rolido 2rms de un FPSO sin placas compensadores a una dirección de 90° (Fuente: Propio)

En la Figura 4.5 se puede observar cómo cerca del periodo natural del FPSO las aceleraciones son mayores en todas las alturas de ola, además para combinaciones con un periodo pico menor a 10 segundos la aceleración es menor a $0.2 \text{ [m/s}^2\text{]}$,

4.3.1 Aceleración para un FPSO con un sistema de compensación de rolido

Las aceleraciones en un FPSO usando placas compensadoras de rolido se pueden observar en la Tabla 4.4. En esta tabla se puede apreciar aceleraciones menores comparados los valores del FPSO sin el sistema de compensación de la Tabla 4.3. Además, se conserva la tendencia observada en el caso sin placas de compensación que conforme incrementa la altura significativa de las olas H_s las aceleraciones también incrementan

Los valores de aceleración incrementan en mayor medida hasta que se alcanza el periodo natural del sistema de $T_n = 14.5 \text{ s}$ y luego decrecen. La mínima aceleración sucede para la combinación de $H_s = 1 \text{ m}$ y $T_p = 3.7 \text{ s}$, donde toma el valor de $0.01 \text{ [m/s}^2\text{]}$, y por otro lado el mayor valor para la combinación de $H_s = 5 \text{ m}$ y $T_p = 14 \text{ s}$ con un valor de $0.97 \text{ [m/s}^2\text{]}$,

Tabla 4.4 Aceleraciones $2rms$ para un FPSO con placas compensadoras de rolo a una dirección de 90° (Fuente: Propio)

Hs (m)	Tp (s)													
	3.7	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	0.01	0.01	0.02	0.02	0.03	0.02	0.03	0.07	0.09	0.14	0.18	0.21	0.24	0.21
2	0.02	0.03	0.03	0.05	0.05	0.05	0.06	0.13	0.17	0.21	0.26	0.26	0.31	0.31
3	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.08	0.09	0.18	0.22	0.34	0.41	0.41	0.41	0.37
4	0.07	0.07	0.08	0.09	0.10	0.11	0.14	0.21	0.29	0.52	0.61	0.63	0.55	0.47
5	0.08	0.10	0.11	0.13	0.14	0.15	0.19	0.25	0.43	0.69	0.92	0.91	0.71	0.60

En la Figura 4.6 se puede observar cómo cerca del periodo natural del sistema los valores de aceleración son mayores en todas las alturas de ola. Además, para combinaciones con un valor de periodo pico menor a 12 segundos las aceleraciones son menores a $0.2 [m/s^2]$.

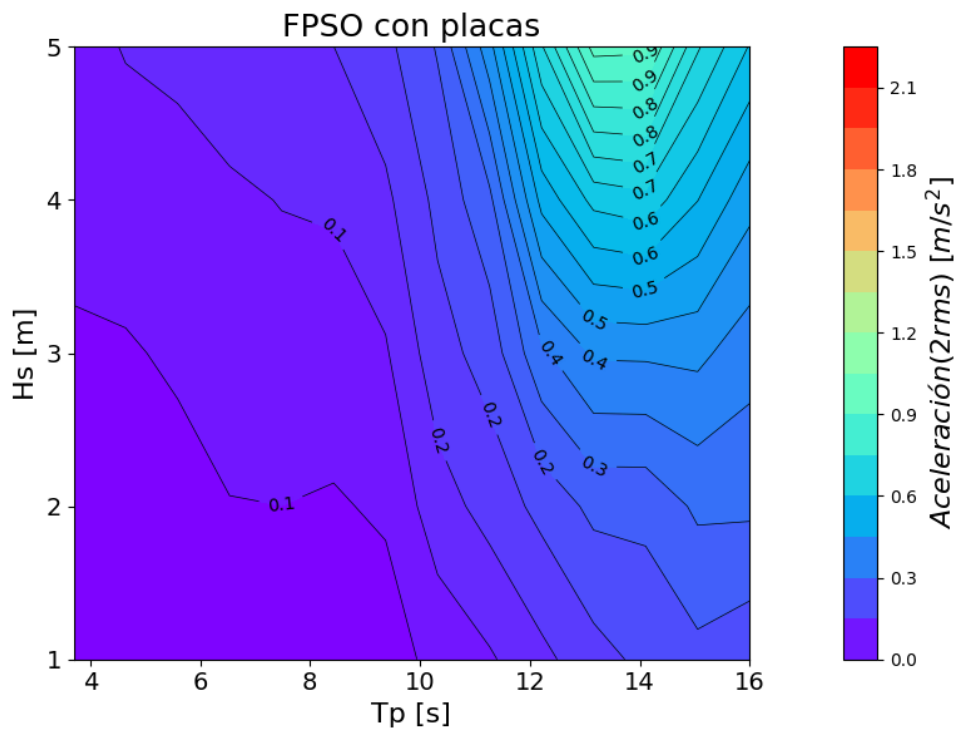


Figura 4.6. Mapa de colores y curva de nivel para valores de ángulo de rolo $2rms$ de un FPSO con placas compensadoras a una dirección de 90° (Fuente: Propio)

Al comparar las aceleraciones del FPSO con y sin placas se observa que, al usar las placas compensadoras, el valor de aceleración disminuye en un 62% donde la mayor magnitud ocurre cerca del periodo del sistema de 14.5 segundos

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este capítulo se plantean las conclusiones del trabajo, a partir de los resultados obtenidos para aceleraciones y ángulo de rolido. Adicionalmente se proporcionan recomendaciones para trabajos futuros relacionados con el tema de estudio.

5.1 Conclusiones

- En este trabajo se realizó un análisis de aceleraciones en el punto de sujeción del “riser” para un FPSO con y sin un sistema pasivo de compensación de rolido
- El presente trabajo se enfocó en el análisis cinemático del FPSO desacoplado de risers, con y sin el uso de un sistema compensador de rolido para la dirección crítica de incidencia de olas
- A partir de las funciones de transferencia se obtuvo el periodo natural del FPSO de 13 segundos, un valor menor comparado con el periodo del sistema FPSO con compensación de rolido de 14.5 segundos. Para el modelo estudiado en este trabajo el incremento de periodo natural no es significativo
- En base a el análisis en el dominio de tiempo, se concluye que el valor $2rms$ del ángulo de rolido en el estado de mar crítico ($H_s = 5 m$ y $T_p = 13 s$) es de 23.97° que disminuye un 47% usar el sistema de compensación a un valor de 12.57° .
- El análisis de las aceleraciones en el dominio de tiempo, muestran que, en el estado de mar crítico, el valor $2rms$ es de $2.14 m/s^2$ y disminuye un 57% cuando el FPSO presenta compensación de rolido con un valor de $0.92 m/s^2$
- En conclusión, las aceleraciones y el ángulo de rolido disminuyen con el uso de un sistema de compensación de rolido para olas con un ángulo de incidencia de 90° , en las combinaciones de altura significativa de olas $3.7 < H_s < 16$ y periodo pico de $1 < T_p < 5$, presentes en Campos Basin-Brasil.

5.2 Recomendaciones

- Se sugiere realizar un estudio cinemático del FPSO acoplado con los risers y compensadores de rolido y comparar los resultados con los que se muestran en este trabajo.

- Se recomienda realizar un estudio paramétrico de las placas compensadoras variando sus dimensiones, y ver el impacto en el valor de aceleraciones en el punto de sujeción del riser
- En base a los datos obtenidos, las aceleraciones en el punto de sujeción de los risers disminuyen para Campos-Basin, por lo que se sugiere realizar este estudio en otros yacimientos donde se utilicen FPSO's.

6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abankawa, N. O., Johnston, S. J., Scott, M., & Cox, S. J. (2015). Ship Motion Measurement Using a Inertial measurement unit. 1-6.
- Baghfalaki, M., & Das, S. K. (2013). Analytical model to determine response amplitude operator of floating body for coupled roll and yaw motions and frequency-based analysis. *International Journal of Applied Mechanics*, 20-40.
- Brosna, B., Zhang, Z., Ted, B., Ozkan-Haller, H., Mcnatt, C., & Yim, S. (2012). Wave Energy Converter Modeling in the Frequency. *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2099-2106.
- Bruhn, H. C., Jose , A. G., & Johann, R. P. (2015). Campos Basin: Reservoir Characterization and Management – Historical Overview . *Offshore Technology Conference*, 15.
- Cadence CFD Solutions. (01 de 05 de 2023). *The Science Behind Hydrodynamic Drag*. Obtenido de <https://resources.system-analysis.cadence.com/blog/msa2022-the-science-behind-hydrodynamic-drag>
- Carvajal, L. (2006). *Metodología de la Investigación Científica. Curso general y aplicado* (28 ed.). Santiago de Cali: U.S.C.
- Century Dynamics Ansys Inc. (2012). *AQWA Reference Manual*.
- Faltinsen , O. M. (1990). *Sea Loads on Ships and Offshore Structures* . Cambridge: Cambridge University Press.
- Ferreira, D., Oliveira, M., Carvalho, R., & Sphaier, S. (2012). Asymmetric FPSO roll response due to the influence of lines arrangement. *International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*. Rio de Janeiro .
- Hughes, O., & Kee Paik, J. (2010). *Ship Structural Analysis and Design*. New Jersey : The Society of Naval Architects.
- Keprate, A. (2013). *Appraisal of Riser Concepts for FPSO in Deepwater*. Stavanger: University of Stavanger.
- Kwang- Kyu, Y., & Youngseok , J. (2017). Sensitivity Study on SCR Design for Spread-Moored FPSO in West Africa. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 111-120.

- Lee, W. T., & Bales, S. L. (1980). *A modified Jonswap Spectrum Dependent only on Wave height and period*. Maryland : Ship Performance Department.
- Lenci, S., & Callegari, M. (2005). Simple Analytical models for the J-Lay problem. *Acta de Mechanica*, 178, 23-39.
- Mackency, E. (22 de 07 de 2023). Reduce Boat Roll with Flopper-Stopppers. págs. <https://www.cruisingworld.com/how/reduce-boat-roll-flopper-stoppers/>.
- McCreight, W. R., & Jones , H. D. (1978). *Prediction of the effectiveness of a flopper-stopper roll damping devide*. Maryland : Naval Ship Engineering Center Washington, D.C. .
- Mentes, A., & Mollaahmetoglu, E. (2019). Floating Production storage and offloading units and topside facilities. (U. P. Estambul, Ed.) *GiDB*, 17, 15-32.
- MODEC. (22 de 04 de 2023). *Mooring System*. Obtenido de <https://www.modec.com/business/mooring/>
- MODEMAT. (2023). *The Global Signature of Ocean Wave Spectra*. (MODEMAT EPN) Recuperado el 25 de 03 de 2023, de <https://modemat.epn.edu.ec/nereo/>
- Naudascher, E. (2017). *Hydrodynamic Forces: IAHR Hydraulic Structures Design Manuals 3*. Routledge: International Association for Hydraulic Research.
- Nortek. (24 de 04 de 2023). *Your guide to understanding and measuring ocean waves*. Obtenido de <https://www.nortekgroup.com/knowledge-center/wiki/new-to-waves>
- Olmo, M., & Nave, R. (22 de 05 de 2023). *Hyperphysics*. Obtenido de Péndulo Físico: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/pendp.html>
- Ribadeneira, B., Benalcazar, S., & Guachamin-Acero, W. (2022). Feasibility study of flopper stopppers as a passive roll compensation system for offshore construction vessels. *Ocean Engineering*, 264(112380).
- Ringwood, J. V., Bacelli, G., & Fusco, F. (2014). Control, forecasting and optimisation for wave energy conversion. *International Federation of Automatic Control*.
- SCIENCE FACTS. (05 de 08 de 2023). *Drag Force*. Obtenido de <https://www.sciencefacts.net/drag-force.html>
- Sousa , J. R., Sousa , F., Siqueira , M. Q., Sagrilo, L. V., & de Lemos , C. A. (2012). A Theoretical Approach to Predict the. *Journal of Applied Mathematics* , 2012, 29.

- Tahar, A., & Kim, M. H. (2003). Hull/mooring/riser coupled dynamic analysis and sensitivity. *Applied Ocean Research* , 367-382.
- Vite, L. (30 de 07 de 2023). *Principio de Arquímedes*. Obtenido de Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo: <https://www.uaeh.edu.mx/scige/boletin/prepa4/n3/m4.html>
- Whittaker, T., Folley, M., & Hancock, J. (2020). Chapter 5 - Environmental Loads, Motions, and Mooring Systems. *Floating PV Plants*, 47-66.
- Zhao, D., Han, N., Goh, E., Cater, J., & Reinecke, A. (2019). Offshore wind turbine aerodynamics modelling and measurements. *Wind Turbines and Aerodynamics Energy Harvesters*, 373-400.