

TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA

TEC | Tecnológico
de Costa Rica



Análisis de elemento finito y rediseño mecánico de una Boya Oceanográfica y de
Meteorología Marina del CIGoM

Informe de Práctica de Especialidad para optar por el Título de:

Ingeniero en Mantenimiento Industrial

Por el grado académico de:
Licenciatura

Adrián Hernández Quesada

Costa Rica- Heredia, mayo 2021



Carrera evaluada y acreditada por:

Canadian Engineering Accreditation Board
Bureau Canadien d'Accréditation des Programmes
d'Ingénierie.

Carta de entendimiento de SIBITEC

Hoja de información

Información del estudiante

Nombre completo: Adrián Hernández Quesada

Número de cédula: 1-17240409

Número de carné: 2016135741

Edad: 22 años

Números de teléfono: +506 89197041

Correos electrónicos: adrianh.2310@gmail.com / adrianh.2310@estudiantec.cr

Dirección exacta de domicilio: Heredia, San Rafael, Los ángeles. Esquina noroeste de la plaza de deportes.

Información del proyecto

Nombre del proyecto: “Estudio mecánico y rediseño por medio de análisis de elemento finito de una boya oceanográfica y de meteorología marina para el Golfo de México del CIGoM”

Profesor asesor: Ing. Carlos Otárola Zúñiga

Datos de la empresa

Nombre: Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE).

Actividad principal: Investigación, desarrollo científico y educación de posgrado.

Dirección: Carretera Ensenada - Tijuana No. 3918, Zona Playitas, CP. 22860, Ensenada, Baja California, México.

Contacto: Dr. Francisco Javier Ocampo Torres

Teléfono: +52 (646)1750500 x24051

Correo: ocampo@cicese.mx

*A todos mis compañeros de vida, familia y amigos,
que me han dado tanto, incluyendo su apoyo incondicional.*

Agradecimiento

Primeramente, agradezco al Dr. Francisco Javier Ocampo Torres, por brindarme la oportunidad de trabajar y aportar a una iniciativa tan enriquecedora, en una institución de tan alta calidad como lo es CICESE.

Al Ing. Carlos Rodríguez Hidalgo, por toda la ayuda durante la elaboración de esta investigación, y hacer que esta gran experiencia fuera tan amena y valiosa.

Agradezco a cada mentor que ha sido parte de mi formación personal, académica y profesional, cada uno ha aportado de forma única a forjar quien soy, y lo que me ha permitido realizar este trabajo.

A la familia que se escoge, con la que compartí tanto dentro como fuera de las aulas, por su increíble apoyo, ser pilares en incontables situaciones y hacer de cada momento memorable.

A mis padres y hermano, quienes son mi mayor inspiración, que han velado por mí desde siempre, me han permitido trazar mi camino y caminarlo con mis propios pies.

Finalmente, dedico un gran agradecimiento al grupo CIDEM y a su líder el Ing. Julio Rojas Gómez. Su trabajo y dedicación son de admirar e hicieron posible esta oportunidad excepcional.

Tabla de contenido

Resumen	15
Tabla de abreviaturas	¡Error! Marcador no definido.
Capítulo 1. Descripción de la empresa.....	18
1.1 Generalidades.....	18
1.2 Valores de la empresa	18
1.3 Estructura organizacional de la empresa	19
1.3.1 Departamento de Oceanografía Física	19
1.4 CIGoM	20
Capítulo 2. Definición del proyecto.....	22
2.1 Contexto operativo.....	22
2.1.1 BOMM	22
2.1.2 Condición actual	23
2.2 Justificación del proyecto	25
2.2.1 Interés de investigación.....	26
2.3 Planteamiento del problema.....	28
2.4 Objetivos	28
2.4.1 Objetivo general	28
2.4.2 Objetivos específicos	28
2.5 Metodología	29
2.5.1 Etapas del proyecto	29
2.5.2 Actividades.....	30
2.5.3 Cronograma de desarrollo del proyecto	32
2.6 Alcance	32
Capítulo 3. Marco teórico	34

3.1	Plataformas de observación oceanográficas	34
3.1.1	Plataformas fijas.....	34
3.1.2	Plataformas móviles.....	37
3.2	Condiciones de carga en estructuras marinas	41
3.2.1	Cargas gravitacionales	41
3.2.2	Cargas y fenómenos ambientales.....	42
3.2.3	Cargas temporales y funcionales.....	48
3.3	Principios de mecánica del sólido.....	48
3.3.1	Análisis estático	48
3.3.2	Esfuerzos en cuerpos estáticos.....	49
3.3.3	Teoría de falla-Von Mises.....	53
3.3.4	Análisis de elemento finito	54
3.3.5	CFD.....	55
3.3.6	Soldadura	57
Capítulo 4.	Condiciones de operación y cálculo cargas de diseño	63
4.1	Generalidades.....	63
4.1.1	Datos oceanográficos de la BOMM.....	64
4.1.2	Análisis cuasi estático	65
4.2	Viento.....	66
4.2.1	Cálculo de los parámetros de la fuerza de arrastre debida al viento	67
4.2.2	Validación	71
4.3	Corrientes.....	72
4.4	Oleaje	78
4.4.1	Teoría del oleaje.....	79
4.4.2	Elección de procedimiento de cálculo	83

4.4.3	Hidrodinámica de la partícula	86
4.4.4	Coeficientes hidrodinámicos	88
4.4.5	Fuerza por efecto simultáneo de oleaje y corrientes	88
4.4.6	Validación	90
4.5	Resumen.....	92
Capítulo 5.	Análisis estructural de la BOMM.....	94
5.1	Modelado geométrico	94
5.1.1	Simplificación del modelo geométrico.	96
5.2	Características del material y soldaduras	98
5.3	Sistema de anclaje.....	99
5.4	Determinación de esfuerzos ambientales por medio de FEA	100
5.4.1	Condiciones de frontera	101
5.4.2	Viento.....	102
5.4.3	Corriente.....	104
5.4.4	Oleaje y corriente	105
5.5	Cargas combinadas	107
5.5.1	Análisis direccional con cargas nominales	107
5.5.2	Condiciones extremas de operación.....	108
5.5.3	Estructura reforzada.	110
5.6	Fatiga	111
5.7	Soldadura	113
5.8	Análisis de fractura	117
5.8.1	Grietas en HAZ	118
5.8.2	Grietas sobre el cordón de soldadura.	119
Capítulo 6.	Alternativas de rediseño en la BOMM.....	122

6.1	Rediseño geométrico.....	122
6.1.1	Fuerza ejercida sobre cada configuración.....	124
6.1.2	Evaluación de esfuerzo en las propuestas de diseño.....	126
6.2	Soldadura	128
Capítulo 7.	Conclusiones y recomendaciones.....	129
7.1	Conclusiones.....	131
7.2	Recomendaciones	132
Capítulo 8.	Bibliografía.....	133

Índice de figuras

Figura 2.1.	Personal de CIGoM durante las operaciones de transporte de la BOMM en las instalaciones del puerto de Ensenada (Cruz y Durazo, 2017).....	23
Figura 2.2	Vista inferior del candelabro de la BOMM (CICESE, 2020).	24
Figura 2.3	Fracturas en candelabro de la BOMM-VER-2. Izquierda: Componente cilíndrico. Derecha: Falla en soldadura.	25
Figura 2.4	Diagrama de flujo de la metodología propuesta (Elaboración propia). ..	30
Figura 2.5	Diagrama tipo Gantt de la metodología propuesta para el desarrollo del proyecto (Elaboración propia).	32
Figura 3.1	Funcionamiento de radares HF (ICTS SOCIB, s.f.).....	36
Figura 3.2.	Despliegue de boya BOMM (Cruz y Durazo, 2017).	37
Figura 3.3	Buque oceanográfico (ICTS SOCIB, s.f.).....	38
Figura 3.4	Componentes fundamentales del gliders (IMEDEA, s.f.).....	40
Figura 3.5	Parámetros fundamentales de las olas (Ocampo et al., 2018).	43
Figura 3.6	Clasificación del oleaje según su periodo (Ocampo et al., 2018).	44
Figura 3.7	Perfil de velocidad de corrientes (American Petroleum Institute, 2002).46	
Figura 3.8	Perfil velocidad media del viento (Llorca et al., 1995).	47
Figura 3.9	Fuerzas internas en elementos estructurales (Hibbeler, 2016).	49

Figura 3.10 Estados de esfuerzo en un elemento del material. Izquierda: estado general de esfuerzo. Derecha: Esfuerzo plano (Hibbeler, 2011).....	52
Figura 3.11. Procedimiento previo del Análisis del elemento finito (González et al., 2019).....	55
Figura 3.12 Procedimiento de discretización y solución del análisis del elemento finito (González et al., 2019).....	55
Figura 3.13 Resultados de CFD a) presión de viento sobre elemento cilíndrico b) velocidad de las trayectorias de flujo del viento.....	57
Figura 3.14 Soldadura a tope en aleación de aluminio 6061.....	58
Figura 3.15 Elementos de la soldadura SMAW (ASM International, 1993).....	59
Figura 3.16 Tipos de soldadura según la posición de sus elementos. Izquierda: Soldadura a tope. Derecha: Soldadura de filete (Juvinall y Marshek, 2017).	60
Figura 3.17 Geometría del cordón de soldadura (Juvinall y Marshek, 2017).	60
Figura 3.18 Esfuerzos en la soldadura de filete (Dassault Systèmes, 2021).	61
Figura 4.1 Zona de despliegue de la BOMM (Windy: Wind Map y Weather Forecast, 2021).	65
Figura 4.2 Velocidad de viento promedio tomados por la BOMM durante el primer semestre del año 2019 en el Golfo de México (CICESE, 2019).....	68
Figura 4.3 Distribución de probabilidad en las velocidades de viento medidas in situ.	69
Figura 4.4 Caja y mástil de la BOMM (CICESE, 2019).....	69
Figura 4.5 C_f para elementos prismáticos uniformes con eje vertical (Llorca et al., 1995).....	70
Figura 4.6 Presión sobre la superficie de la BOMM para a) 8,4 m/s b) 17,08 m/s (Elaboración propia).	72
Figura 4.7 Densidad de agua marina medida por la BOMM durante el primer semestre del año 2019 en el Golfo de México (CICESE, 2019).....	74
Figura 4.8 Estructura inferior y candelabro de la BOMM (CICESE, 2019).	74
Figura 4.9 Velocidad de corriente superficial promedio en el Golfo de México en el mes de mayo del 2021. (Windy: Wind Map y Weather Forecast, 2021).....	76

Figura 4.10 Coeficiente de arrastre para una superficie cilíndrica lisa en flujo constante (Chakrabarti, 2005).....	77
Figura 4.11 Procedimiento de cálculo para fuerzas de oleaje y corriente en análisis estáticos (American Petroleum Institute, 2002).	79
Figura 4.12 Registro de periodos de ola tomados por la BOMM (CICESE, 2019). 80	
Figura 4.13 Registro de altura de ola significativa tomados por la BOMM (CICESE, 2019).....	81
Figura 4.14 Distribución de probabilidad de altura significativa (Elaboración propia).	82
Figura 4.15 Regiones de aplicación de teoría de oleaje (American Petroleum Institute, 2002).....	83
Figura 4.16 Límites de aplicación de difracción para estructuras grandes y pequeñas (Chakrabarti, 2005).....	85
Figura 4.17 Movimiento bidimensional de la ola según la teoría lineal de oleaje (Chakrabarti, 2005).....	87
Figura 4.18 Sección de la BOMM expuesta a la acción del oleaje superficial.....	89
Figura 4.19 Presión debida a corrientes sobre la superficie de la BOMM para a) 0,18 m/s b) 0,3m/s.	91
Figura 4.20 Presión debido al efecto del arrastre por oleaje y corrientes.	92
Figura 5.1 BOMM4 durante labores de transporte en noviembre de 2020 (CICESE, 2019).....	95
Figura 5.2 Modelo en SolidWorks de la BOMM-VER-2 (CICESE, 2019).	95
Figura 5.3 Simplificación del pie de la BOMM (Elaboración propia).	96
Figura 5.4 Simplificación del candelabro de la BOMM.....	97
Figura 5.5 Simplificación de la caja y mástil de la BOMM (Elaboración propia)..	98
Figura 5.6 Propiedades de Aluminio 6061 regular, O, T-4, T-6.	99
Figura 5.7 Sistema coordinado de orientación e inclinación en la BOMM (CICESE, 2019).....	100
Figura 5.8 Vista superior del candelabro.	101
Figura 5.9 Mapa de esfuerzos debido al viento en condiciones nominales.....	103
Figura 5.10 Mapa de esfuerzos debido a corrientes extremas.	105

Figura 5.11 Punto de mayor esfuerzo en estudio de esfuerzo por oleaje y corrientes (Elaboración propia).....	106
Figura 5.12 Perspectiva de diseño en estudio de esfuerzos por oleaje y corrientes.	106
Figura 5.13 Sistema de coordenadas de la BOMM (Elaboración propia).....	108
Figura 5.14 Mapa de esfuerzos debido condiciones extremas.	109
Figura 5.15 Zona de mayor esfuerzo en condiciones ambientales extremas.....	110
Figura 5.16 Zona de mayor esfuerzo debido a cargas ambientales extremas.....	111
Figura 5.17 Diagrama esfuerzo-ciclos para aleaciones de aluminio (Juvinall y Marshek, 2017).....	112
Figura 5.18 Mapa de vida en estudio de fatiga bajo condiciones ambientales extremas.....	113
Figura 5.19 Soldadura de filete en elementos tubulares (Budynas y Keith Nisbett, 2012).....	114
Figura 5.20 Estudio de soldaduras en la plataforma.....	115
Figura 5.21 Componentes direccionales de fuerza en la soldadura.....	116
Figura 5.22 Dimensiones requeridas a lo largo del cordón de soldadura. Izquierda: sin refuerzo. Derecha: con refuerzo.....	117
Figura 5.23 Grietas adyacentes al cordón de soldadura en el candelabro.	119
Figura 5.24 Agrietamiento inducido por perfil superficial de la soldadura (The James F. Lincoln Arc Welding Foundation, s.f.).....	120
Figura 5.25 Grieta longitudinal sobre soldadura en el candelabro (CICESE, 2019).	120
Figura 6.1 Alternativas geométricas de rediseño en la BOMM. Izquierda: geometría cuadrada. Derecha: geometría hexagonal.	123
Figura 6.2 Vista lateral de configuraciones de la BOMM.....	124
Figura 6.3 Esfuerzo resultante máximo en la configuración cuadrada.....	127
Figura 6.4 Esfuerzo resultante máximo en la configuración hexagonal.....	127

Índice de tablas

Tabla 4.1 Valores representativos de velocidad de viento.	69
Tabla 4.2 Área proyectada de mástil y caja bajo condiciones de viento.	69
Tabla 4.3 Fuerza aplicada por el viento sobre la BOMM en condiciones extremas y de operación.....	71
Tabla 4.4 Comparación de resultados de fuerza global obtenidos.	72
Tabla 4.5 Área proyectada de estructura inferior y candelabro.....	75
Tabla 4.6 Coeficiente de arrastre para los elementos de la BOMM.....	77
Tabla 4.7 Fuerzas inducidas en la BOMM generadas por corrientes estacionarias.	78
Tabla 4.8 Estadísticas de la altura de ola significativa tomadas por la BOMM.	82
Tabla 4.9 Recomendaciones de C_m y C_d en condiciones típicas de diseño (American Petroleum Institute, 2002).	88
Tabla 4.10 Resumen de parámetros en la ecuación de Morison (Elaboración propia).	89
Tabla 4.11 Fuerza de arrastre e inercia debido al oleaje y corrientes sobre la plataforma (Elaboración propia).....	90
Tabla 4.12 Fuerza de arrastre debido al efecto aislado de la corriente (Elaboración propia).....	90
Tabla 4.13 Comparación de Resultados de fuerza global obtenidos por corrientes.	91
Tabla 4.14 Comparación de resultados de fuerzas debido al oleaje (Elaboración propia).....	92
Tabla 4.15 Resumen de parámetros de fenómenos ambientales (Elaboración propia).	92
Tabla 4.16 Resumen de fuerzas sobre la estructura según condiciones ambientales (Elaboración propia).	93
Tabla 5.1 Esfuerzo de Von Mises producto del viento a 8,4 m/s (Elaboración propia).....	103
Tabla 5.2 Esfuerzo de Von Mises producto del viento a 17,08 m/s (Elaboración propia).....	104

Tabla 5.3 Esfuerzo de Von Mises producto de corrientes a 0,17 m/s (Elaboración propia).....	104
Tabla 5.4 Esfuerzo de Von Mises producto de Corriente a 0,3 m/s (Elaboración propia).....	104
Tabla 5.5 Esfuerzo de Von Mises producto del actuar en conjunto del oleaje y corrientes (Elaboración propia).	105
Tabla 5.6 Esfuerzos resultantes a distintas direcciones de velocidad de viento (Elaboración propia).	108
Tabla 5.7 Esfuerzo de Von Mises producto de cargas extremas combinadas (Elaboración propia).	109
Tabla 5.8 Esfuerzos de Von Mises producto de condiciones ambientales extremas en estructura reforzada (Elaboración propia).	110
Tabla 5.9 Fuerzas por unidad de longitud en la soldadura del elemento 4.....	115
Tabla 6.1 Fuerzas de arrastre debido al oleaje (Elaboración propia).....	125
Tabla 6.2 Fuerzas de inercia debido al oleaje (Elaboración propia).....	125
Tabla 6.3 Fuerzas de arrastre debido al viento (Elaboración propia).	125
Tabla 6.4 Comparación de esfuerzos máximos entre configuraciones de la BOMM (Elaboración propia).	126
Tabla 7.1 Costos de la instrumentación instalada en la BOMM (CICESE, 2019). 130	

Resumen

El Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada (CICESE), en colaboración con el Consorcio de Investigación del Golfo de México (CIGoM), diseñaron y manufacturaron un conjunto de Boyas Oceanográficas y de Meteorología Marina (BOMM) para el estudio de las condiciones ambientales en la región del Golfo de México como parte de su línea de investigación: plataformas de observación oceanográficas.

Luego de aproximadamente seis meses de operación en las costas de Veracruz, la unidad BOMM-VER-2 muestra evidencia de fracturas en soldaduras y elementos estructurales en una de las secciones de la boya, las cuales comprometen su operatividad y la seguridad de los equipos instalados en la plataforma.

Este trabajo final de graduación consiste en el estudio de esfuerzos mecánicos por medio del método de Análisis de Elementos Finitos (FEA) presentes en la BOMM-VER-2, con el fin de entender el comportamiento de la estructura mecánica de la boya bajo condiciones nominales de operación en el Golfo de México e identificar las condiciones potenciales que pueden ocasionar fallas estructurales.

Para llevar a cabo la investigación, se tomaron en cuenta el viento, la corriente y el oleaje en la costa de Veracruz como condiciones ambientales de diseño. Se calculó la fuerza que ejercen estos fenómenos sobre la BOMM por medios analíticos y se validaron haciendo uso de la Dinámica Computacional de Fluidos (CFD).

Adicionalmente, se analizaron diversas mejoras de diseño estructural para evitar la formación de fracturas en la plataforma durante su funcionamiento. Como resultados, se obtiene un mapa de esfuerzos estáticos de la BOMM durante su operación donde se muestran las secciones que soportan mayor carga y un rediseño geométrico que reduce el máximo esfuerzo presente en la estructura en un 31 %.

Palabras clave: boya de observación oceanográfica, condiciones ambientales de diseño, análisis de elemento finito, dinámica computacional de fluidos.

Abstract

Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada (CICESE), in collaboration with Consorcio de Investigación del Golfo de México (CIGoM), manufactured a set of Oceanographic and Marine Meteorological Buoys (BOMM) for the study of environmental conditions in the Gulf of Mexico region as part of their research line: oceanographic observation platforms.

After approximately six months of operation off the coast of Veracruz, the BOMM-VER-2 unit shows evidence of fractures in welds and structural elements in one of the buoy sections, which compromise its operability and the safety of the equipment installed on the platform.

This final graduation work consists of the study of mechanical stresses by means of the Finite Element Analysis (FEA) method present in the BOMM-VER-2, to understand the behavior of the buoy's mechanical structure under nominal operating conditions in the Gulf of Mexico and to identify potential conditions that may cause structural failures. For this purpose, static, fatigue and welding tests were performed in SolidWorks design software.

For the study, wind, current and tidal phenomena were considered as environmental design conditions. The force exerted by these phenomena on the BOMM was calculated by analytical means and validated using Computational Fluid Dynamics (CFD).

Additionally, structural design alternatives were carried out to avoid the formation of fractures in the platform during its operation. As a result, a static stress map of the BOMM during its operation is obtained, showing the sections that support the highest load and a geometric redesign that reduces the maximum stress present in the structure by up to 31%.

Keywords: oceanographic and marine metrology buoy, environmental design conditions, finite element analysis, computational fluid dynamics.

Capítulo 1. Descripción de la empresa

1.1 Generalidades

El CICESE o Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada se encuentra ubicado en la ciudad de Ensenada, Baja California, México. Es una institución gubernamental creada en 1973, con el objetivo primordial de descentralizar las actividades científicas y modernizar el país por medio de la investigación y actividades docentes en los niveles de maestría y doctorado. Actualmente, funge como uno de los principales centros científicos de México y es el Centro Público de Investigación más grande perteneciente al sistema del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT).

Su desarrollo institucional y alto nivel académico le ha permitido al CICESE colocarse como una institución de referencia con más de cuatro décadas de aportes en el contexto científico nacional e internacional. Cuenta con personal científico y técnico altamente calificado, con experiencia de alta relevancia, especialmente en los campos de ciencias aplicadas como son la geofísica y oceanografía física.

Evocando una verdadera ciudad universitaria, este campus es sede de varias facultades e institutos como el Instituto de Astronomía y el Centro de Nanociencias y Nanotecnología de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), y de las cuatro divisiones académicas de CICESE (Biología Experimental y Aplicada, Ciencias de la Tierra, Física Aplicada y Oceanología) (CICESE, 2021)

Al ser un ente federal de gran renombre, su excelencia académica apoya el desarrollo nacional, la formación de recurso humano y el fortalecimiento del vínculo entre los sectores público y privado a través de proyectos de investigación y desarrollo, consultorías técnicas y servicios tecnológicos especializados.

1.2 Valores de la empresa

Como centro académico de alto nivel y prestigio, CICESE cuenta con objetivos clave que reflejan el motivo de su creación y funcionamiento, estos se encuentran basados en su misión y visión como empresa, descritos a continuación:

Misión:

Generar conocimiento y tecnología que contribuya a la solución de problemas universales, nacionales y regionales, realizando investigación básica y aplicada y formando recursos humanos a nivel posgrado en ciencias biológicas, físicas, de la información, del mar y de la Tierra, dentro de un marco de responsabilidad, ética y liderazgo en beneficio de la sociedad.

Visión:

Ser el centro público de investigación con mayor impacto transformador en la sociedad a través de sus investigaciones y de la formación de recursos humanos de alta calidad.

1.3 Estructura organizacional de la empresa

Aunque sus instalaciones albergan una variedad de centros de investigación, el CICESE se encuentra enfocado en el estudio de sus cuatro divisiones académicas: Ciencias de la Tierra, Física Aplicada, Biología Experimental y Aplicada y Oceanología. Cada una de sus divisiones cuenta con distintos departamentos especializados, con un total de quince en toda la institución.

La división de Oceanología se encuentra conformada por cinco departamentos los cuales son: Ecología marina, Acuicultura, Embarcaciones Oceanográficas, Oceanografía Biológica y Oceanografía física. Las BOMM y este proyecto se desarrolla a partir del trabajo realizado en el departamento de la oceanografía física, gracias a su colaboración con el Consorcio de Investigación del Golfo de México (CIGoM).

1.3.1 Departamento de Oceanografía Física.

En este departamento, se estudia el medio marino como un sistema físico. La misión del departamento es investigar la física del océano en general y de los mares mexicanos en particular, mediante proyectos directamente desarrollados por miembros del personal académico, así como a través de la formación de recursos humanos a través de los tres

niveles profesionales; es decir, mediante dirección de tesis de licenciatura y por medio de los programas de maestría y doctorado (CICESE, 2021).

El departamento de Oceanografía Física cuenta con sesenta proyectos vigentes agrupados en nueve líneas de investigación entre las que se encuentra “Oleaje y tsunamis: simulaciones numéricas, predicción y observaciones”, dirigida por el Dr. Francisco Javier Ocampo Torres. En la actualidad, este departamento se encuentra trabajando en conjunto con CIGoM, para el desarrollo de diversos proyectos multidisciplinarios.

1.4 CIGoM

Dado que la investigación y vinculación son parte de los objetivos esenciales de la organización, el CICESE mantiene estrechas relaciones de colaboración con distintas instituciones, entre las que se encuentra el CIGoM. CIGoM fue fundado en el 2015 como iniciativa de diversos grupos científicos y personal de PEMEX, debido a la escasa información disponible para comprender el comportamiento de los posibles accidentes y derrames de petróleo a gran escala en Golfo de México y sus consecuencias en los ecosistemas marinos de esta zona.

En la actualidad, el CIGoM desarrolla el proyecto “Implementación de redes de observación oceanográficas (físicas, geoquímicas, ecológicas) para la generación de escenarios ante posibles contingencias relacionadas con la exploración y producción de hidrocarburos en aguas profundas del Golfo de México” (CIGoM, 2021). Con esta red, se estima desplegar un sistema de monitoreo robusto, con el cual comprender el comportamiento de las corrientes del golfo y del petróleo en caso de derrames.

Este proyecto se compone por cinco líneas de investigación: plataformas de observación oceanográfica, línea base y monitoreo ambiental, modelos de circulación y biogeoquímica, degradación natural de hidrocarburos y escenarios de derrame. La línea de plataformas de observación oceanográfica es la encargada de realizar mediciones in situ y remotas del ambiente marino del golfo, a través de diversas tecnologías como son las Boyas Oceanográficas Costeras (BOC), planeadores submarinos, sensores remotos y Boyas

Oceanográficas y de Metrología Marina (BOMM), las cuales son el objeto de estudio principal de este proyecto.

Capítulo 2. Definición del proyecto

2.1 Contexto operativo

La colaboración entre el CICESE y el CIGoM y su interés común de comprender los fenómenos y procesos de las aguas en el Golfo de México, los llevó a desarrollar tecnologías y dispositivos de monitoreo de variables ambientales, entre estas iniciativas se encuentran las BOMM, pertenecientes a la primera línea de investigación del CIGoM, llamada plataformas de observación oceanográficas.

Seis de estas plataformas fueron construidas al iniciar el año 2018, con el propósito de medir los procesos de interacción entre la atmósfera y el océano. Dentro del protocolo de despliegue, se determina que estas estructuras serán utilizadas en las zonas de interés con mayor profundidad (área de Perdido y Cuenca de Coatzacoalcos) en el Golfo de México (Cruz & Durazo, 2017).

2.1.1 BOMM.

Las BOMM son plataformas diseñadas para la medición y registro datos *in situ* de los procesos de interacción entre la atmósfera y el océano. Estas mediciones se realizan por medio de un conjunto de sensores e instrumentación especializada en el registro de variables ambientales como temperatura, pH, y espectros dimensionales del oleaje y corriente.

Estas estructuras son construidas en su gran mayoría con aluminio 6061, tienen una longitud aproximada de 13,4 metros y se componen de tres secciones, el mástil, caja y el pie. Son manufacturadas en el taller metalmecánico del CICESE, recreando el diseño de una boya adquirida hace aproximadamente 20 años por esta institución, lo que representó un ahorro significativo en la inversión necesaria para la ejecución del proyecto.

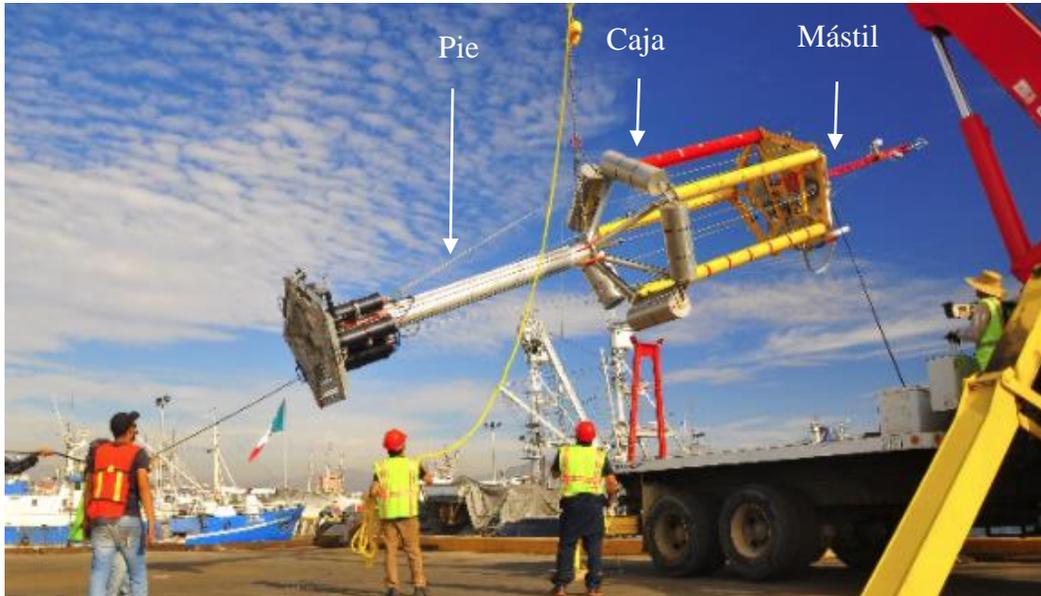


Figura 2.1. Personal de CIGoM durante las operaciones de transporte de la BOMM en las instalaciones del puerto de Ensenada (Cruz & Durazo, 2017).

Una de las características destacada de estas boyas es su capacidad de funcionar de manera autónoma por largos periodos de tiempo, por lo que, además de la instrumentación y electrónica relacionada a la toma de datos, se instalan en la estructura una serie de paneles solares y baterías de almacenamiento energético para poder alimentar los sensores y garantizar un muestreo continuo de las zonas de interés.

Para que la BOMM fuese capaz de cumplir con los objetivos de medición del proyecto, se ejecutó un proceso de adaptación a la estructura original, con el fin de adecuarlo a las necesidades de instrumentación a instalar, sin embargo, la caracterización y el análisis mecánico formal, el cual validara la capacidad de la boya de soportar las condiciones ambientales de vientos, corrientes y oleaje del medio oceánico, no se contempló en este proceso.

2.1.2 Condición actual.

Una vez concluida su construcción en el CICESE y terminado un periodo de pruebas en las cercanías de la Isla de Todos los Santos, en Ensenada, el grupo de boyas fue transportada y desplegada en diferentes áreas de interés en el Golfo de México. Estas

unidades se encuentran constantemente registrando datos en tiempo real que suministran los datos empleados en los estudios realizados por el equipo del CIGoM y se someten a procedimientos de mantenimiento periódicos para garantizar su óptima condición y funcionamiento.

La unidad BOMM-VER-2 fue transportada y desplegada en el mes de febrero del 2019 en el golfo de Campeche, en las cercanías de la ciudad de Veracruz y se mantuvo en operación hasta finales del mes de julio de este mismo año, momento en que la boya se transportó a tierra por motivos de mantenimiento y monitoreo. Aunque los datos adquiridos durante su funcionamiento fueron satisfactorios, en el proceso de inspección de la plataforma se observó una serie de fracturas en la sección del candelabro, la cual es la encargada de unir la sección del pie con la caja y darle estabilidad a la plataforma por medio de los flotadores.



Figura 2.2 Vista inferior del candelabro de la BOMM (CICESE, 2020).

El candelabro consta de cinco secciones tubulares, colocadas en un arreglo pentagonal, en su centro, este ensamble comparte un mismo punto de unión para los radios del pentágono, es en esta sección donde se presentaron la mayoría de las grietas, especialmente en los cordones de soldadura.



Figura 2.3 Fracturas en candelabro de la BOMM-VER-2. Izquierda: Componente cilíndrico. Derecha: Falla en soldadura (CICESE, 2020).

2.2 Justificación del proyecto

Tanto CICESE como CIGoM tienen como misión en común el comprender a profundidad el ecosistema del GoM y sus procesos químicos físicos, biológicos. Especialmente para determinar el posible impacto ambiental de la industria del gas y petróleo en esta región y generar escenarios ante posibles contingencias relacionadas con la exploración de este recurso. La iniciativa de CIGoM cuenta con el financiamiento de la Secretaría de Energía (SENER) y el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología para generar un estado del arte sobre el comportamiento del Golfo de México.

Por ese motivo, ambas instituciones se encuentran dedicadas al desarrollo de proyectos y procesos de investigación oceanográfica, con el objetivo de ampliar el conocimiento del comportamiento de este gran cuerpo de agua. Con el fin de llevar a cabo los estudios necesarios para analizar el funcionamiento del Golfo de México, se ha priorizado el desarrollo de tecnologías que permitan la obtención de datos y variables oceanográficas y meteorológicas de los respectivos sitios de estudio para generar información de valor para las investigaciones realizadas. Esta necesidad fue la que dio paso

al establecimiento de la línea de acción uno de CIGoM, plataformas de observación oceanográfica, y por lo tanto llevo a la construcción de las boyas BOMM.

Como una de las principales herramientas en la medición de procesos océano-atmósfera, estas plataformas son esenciales para obtener parámetros meta oceánicos requeridos por el CIGoM. Desafortunadamente, al menos una de las BOMM ha presentado fracturas en su estructura hasta la fecha, lo que compromete su capacidad operativa y, por lo tanto, la continuidad y fluidez de las mediciones.

Por ello, ambas instituciones involucradas desean conocerlos efectos de los fenómenos ambientales sobre la plataforma con el objetivo de determinar la causa de las fallas mecánica y así poder predecir las condiciones en las que se presentaron daños en la boya, con el fin de realizar acciones correctivas inmediatas. Además, se desea garantizar el óptimo funcionamiento de la boya, al generar adaptaciones y mejoras al diseño original le permitan operar apropiadamente bajo las condiciones nominales de funcionamiento en el Golfo de México.

Al realizar este proyecto, se logra comprender el impacto que tendrán los fenómenos ambientales en la estructura y es posible conocer la distribución de esfuerzos internos a lo largo del material por medio del análisis de elemento finito, sobre todo cuando se tienen estímulos ambientales tan fluctuantes como los presentes al estar en una interfaz atmósfera-océano. Con lo cual, se espera identificar de forma prematura las condiciones bajo las cuales la estructura podría fallar y, a su vez, optimizar el diseño existente para evitar que este fenómeno de fractura estructural se llegue a presentar en futuras boyas desplegadas como parte de las actividades de investigación realizadas por CIGoM.

2.2.1 Interés de investigación.

La investigación científica de calidad requiere, en muchas ocasiones, de herramientas y equipos específicos. Estos insumos pueden representar un aumento significativo en el costo de los proyectos académicos, considerando que, estas

adquisiciones se realizan en repetidas ocasiones con proveedores extranjeros, fomentando una dependencia que lastra el desarrollo integral de cualquier economía que quiera basarse en el uso del conocimiento (Cruz & Durazo, 2017).

A pesar de la posibilidad de subcontratar el servicio de diseño de las BOMM o, por otro lado, aumentar la frecuencia de mantenimiento para detectar fallas en las estructuras de forma pronta, CICESE, dedicada a la investigación científica y a la formación de recursos humanos, considera que existe una gran oportunidad de aprendizaje y creación de conocimiento, al internalizar la caracterización y rediseño de las boyas.

Por medio del análisis mecánico de la BOMM, se profundiza la comprensión de cómo las condiciones ambientales en el Golfo de México afectan a las plataformas de observación oceanográficas instaladas en la zona. Además, permite optimizar las plataformas de observación a construir en un futuro, con lo que se desarrollan equipos que robustecen la red de monitoreo en la región y aporta al desarrollo de próximos proyectos asociados.

Adicionalmente, el internalizar el proceso de diseño conlleva la expansión de conocimiento la multidisciplinariedad. Por otro lado, la subcontratación del diseño presenta algunas desventajas, las cuales justifican el internalizar este proceso, por ejemplo:

1. Tercerizar un proceso de modelado y diseño implica pérdidas en términos de conocimiento, capacitación de recurso humano y desarrollo de competencias dentro de la Institución.
2. El elevado costo que representa el adquirir equipos y contratar procesos de diseño con proveedores externos
3. No es posible documentar el proceso de modelado a detalle, lo que provoca la omisión de información relevante y limita las posibilidades de generar investigación científica y técnica relacionada al diseño.

4. La dependencia generada hacia la empresa contratada a la hora de realizar cualquier operación, modificación o mantenimiento al equipo, además del desarrollo intelectual del equipo.

Desde un punto de vista económico, contratar consultorías y mantenimiento en cada etapa del proyecto conlleva dedicar una parte importante de los recursos, que podrían ser invertidos en aspectos de la investigación o en el desarrollo de tecnología propia e innovadora.

2.3 Planteamiento del problema

Se desean conocer las condiciones de esfuerzo mecánico a la cual se encuentran sometidas las BOMM por medio de la herramienta de análisis de elemento finito para conocer la causa de las fallas en la estructura. Esto con el fin desarrollar mejoras en el diseño, prevenir fallas estructurales del mecanismo y así evitar la pérdida de funcionalidad operativa de la boya.

2.4 Objetivos

2.4.1 Objetivo general.

Realizar un estudio mecánico y optimización por medio de análisis de elemento finito de una Boya Oceanográfica y de Meteorología Marina capaz de adaptarse a las condiciones de carga ambiental generadas en el Golfo de México para el proyecto CIGoM.

2.4.2 Objetivos específicos.

- Definir las condiciones oceanográficas nominales a las que se encuentra expuesta la estructura durante su funcionamiento.
- Determinar los estados críticos de carga mecánica a la que se encuentra sometida la boya bajo su estado de operación regular, debido a la interacción del sólido con el medio.

- Validar el diseño de los componentes del sistema estructural por medio de software especializado como lo es SolidWorks, utilizando herramientas de análisis de elemento finito.
- Optimizar el diseño de la BOMM de forma se reduzca el esfuerzo en puntos críticos, evitando así el estado de falla bajo condiciones normales de funcionamiento.

2.5 Metodología

La metodología planteada surge a partir de los objetivos del proyecto, los cuales describen un proceso de caracterización y optimización de la BOMM-VER-2. Como se propone mejorar el diseño original, se utiliza el método iterativo e incremental, con la intención de que los resultados obtenidos en las primeras etapas retroalimenten el proceso de diseño hasta que se obtengan resultados satisfactorios para las condiciones límites.

El método desarrollo interactivo e incremental fue planteado por Alistar Cockburn en las metodologías ágiles de las ciencias computacionales y describe que el desarrollo incremental brinda las oportunidades para añadir mejoras, así como ajustar los requerimientos de cualquier proyecto. Por su parte, el desarrollo iterativo permite mejorar el rendimiento y calidad del producto al refinar los resultados(Cockburn, 2008).

El método se fundamenta en la descomposición del proyecto en secciones. Después de estas secciones, se desarrollan por primera vez y, luego, son examinadas y trabajadas nuevamente hasta obtener el resultado adecuado, para concluir con la integración de los productos de cada sección en un producto final.

2.5.1 Etapas del proyecto

Estas secciones o etapas se detallan en la figura 2.3, posteriormente, se profundiza en las actividades específicas de cada una de ellas, con el fin de obtener resultados que le añadan valor al progreso del proyecto y que faciliten su organización. De esta forma, se

puede determinar con claridad los requerimientos de cada etapa y los resultados a obtener en cada una de ellas.

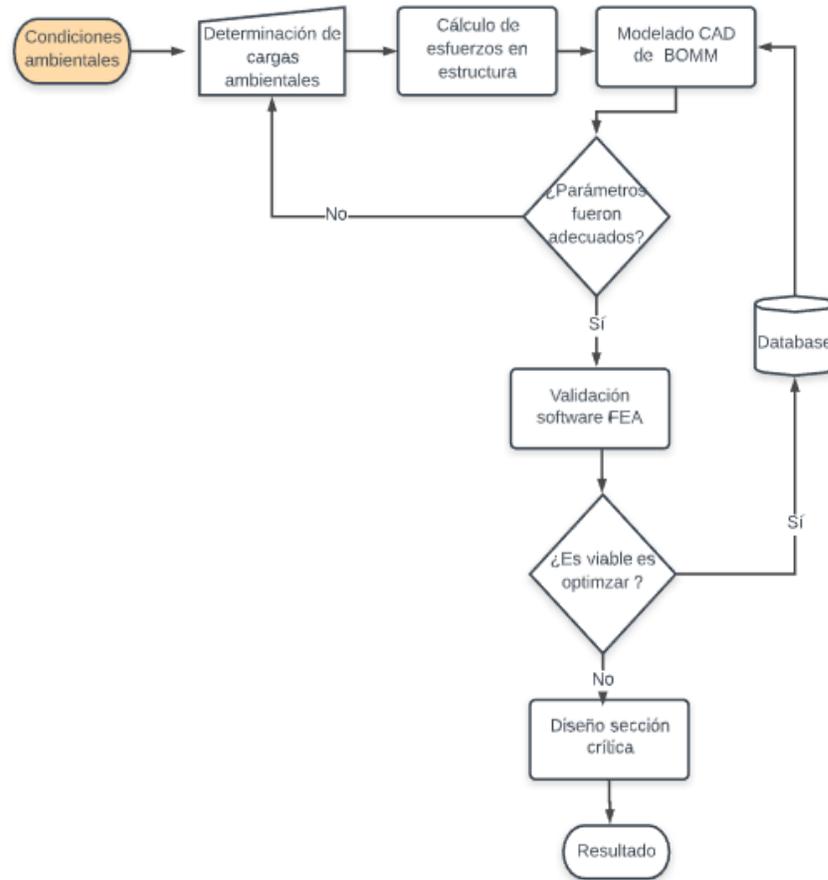


Figura 2.4 Diagrama de flujo de la metodología propuesta (Elaboración propia).

2.5.2 Actividades.

Con base en las etapas anteriormente descritas, a continuación, se plantean las tareas necesarias para el desarrollo del proyecto y el cumplimiento objetivos específicos planteados.

A) Definir criterios físicos a considerar para el diseño de la BOMM.

- Análisis de las series de tiempo de oleaje regular e irregular.
- Investigar condiciones de marea y vientos existentes en los sitios de despliegue de la boya

- Estudiar sobre el estado del arte de boyas oceanográficas, criterios de diseño de ingeniería marina y normas de plataformas flotantes.
- Producto: listado de fuerzas que afectan a la estructura en condiciones normales de operación.

B) Determinar cargas aplicadas a la estructura.

- Determinar las cargas ambientales de oleaje, vientos y marea que afectan la plataforma por métodos analíticos.
- Cálculo de fuerzas y esfuerzos existentes en el estado de carga crítico de la estructura.
- Modelado en 3D detallado y actualizado de la BOMM.
- Producto: mapa de los estados de carga de la estructura en software SolidWorks.

C) Validación el diseño con herramientas FEA.

- Definición de la malla de cálculo 2D.
- Simulación de la propuesta mediante software FEA 2D en las secciones críticas del diseño.
- Definición de la malla de cálculo 3D.
- Simulación de la propuesta mediante software FEA 3D de la sección de análisis.
- Postproceso de los datos y visualización gráfica
- Producto: visualización de áreas de mayor esfuerzo a ser optimizadas.

D) Optimización de diseño

- Definir aspectos de mejora en el diseño original de la BOMM
- Propuesta de rediseño considerando los resultados obtenidos anteriormente
- Verificación de nuevo diseño por medio de herramientas FEA.
- Generación de planos de la propuesta.
- Producto: archivo CAD optimizado y validado.

2.5.3 Cronograma de desarrollo del proyecto.

Para la oportuna ejecución del proyecto, se plantea un cronograma en el formato Diagrama de Gantt, este se extiende desde el lunes 15 de febrero, considerada como la primera semana de elaboración del proyecto, hasta el 17 de mayo, fecha de entrega del documento a los profesores lectores, además, se incorporan las etapas y las actividades planteadas en la sección de metodología de este documento.

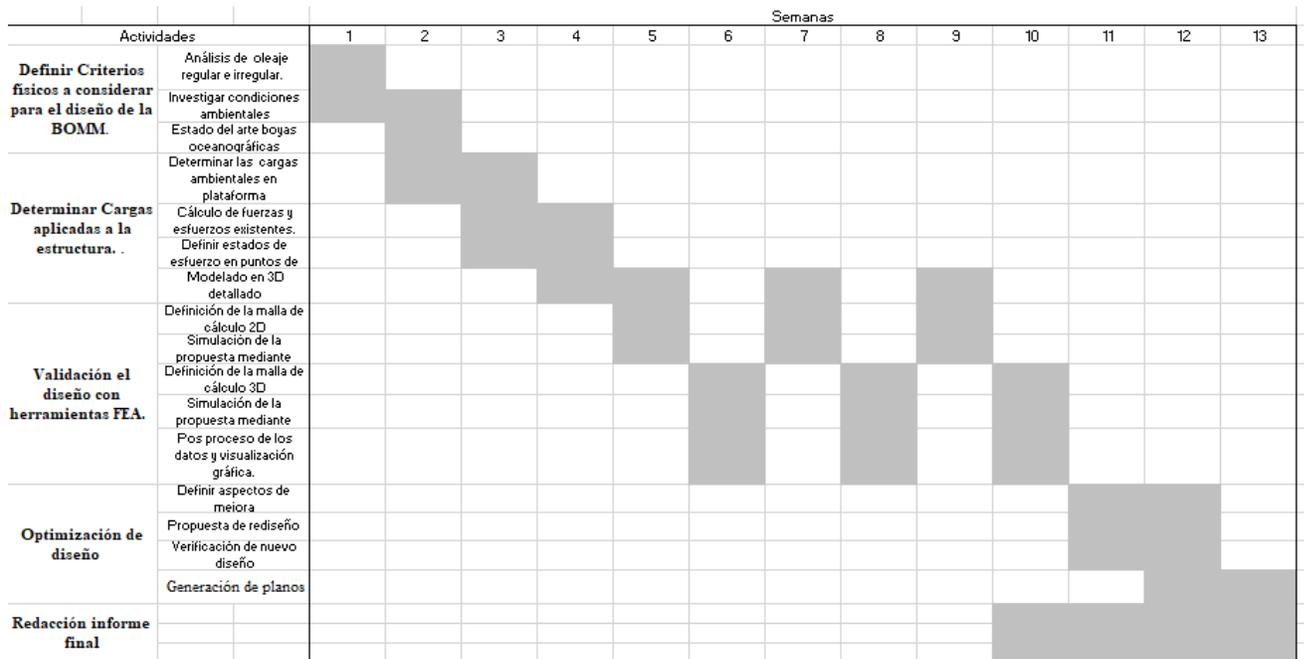


Figura 2.5 Diagrama tipo Gantt de la metodología propuesta para el desarrollo del proyecto (Elaboración propia).

2.6 Alcance

Este proyecto se limita al análisis y optimización del diseño de una boya oceanográfica y de meteorología marina, la cual debe operar adecuadamente bajo condiciones similares a las existentes en las aguas del Golfo de México. Lo que incluye:

- Determinación de cargas ambientales en sitios específicos del Golfo de México, según datos recopilados con anterioridad.
- Análisis de esfuerzos estructurales en las BOMM, lo que se reduce únicamente a sus tres secciones anteriormente descritas.

- Modificación de la sección crítica o de mayor esfuerzo de la plataforma.

Algunos de los aspectos que quedan fuera de los alcances de este proyecto son: a) efectos de la instrumentación y equipos instalados en estructura en las cargas b) el estudio y análisis de escenarios accidentales o fuera de las condiciones regulares de operación.

Capítulo 3. Marco teórico

3.1 Plataformas de observación oceanográficas

Las plataformas de observación oceanográfica pueden definirse como sistemas de medición, ya sea *in situ* o remoto para el estudio de las características de una masa de agua. Los diseños y características de estos dispositivos usualmente se ven definido por la tecnología que ejecutan y las variables objetivo del estudio realizar.

Los sistemas integrados de observación de vanguardia comprenden plataformas de observación fijas (radares, boyas, anclajes, cables submarinos, estaciones meteorológicas costeras y otros) y plataformas móviles (embarcaciones voluntarias, satélites, planeadores marinos, boyas a la deriva, vehículos no tripulados, entre otros.(Farías et al., 2019). A continuación, se detallan algunos ejemplos.

3.1.1 Plataformas fijas.

3.1.1.1 Estaciones de investigación

Instalación donde se realiza toma de mediciones y también suele ser donde converge información recopilada de distintas plataformas y medios de captación de datos. La estación meteorológica suele ser la base de instrumentación en estas instalaciones, destinada a medir y caracterizar las condiciones meteorológicas para alimentar los modelos de predicción, compuesta por una base de registro de datos y sensores como veletas, anemómetros y barómetros ubicados en puestos elevados mediante un mástil.

Según el Sistema de Observación y Predicción Costero de las Islas Baleares (SOCIB), estas infraestructuras pueden dividirse según su zona de despliegue y objetivos de estudio en estaciones costeras a nivel del mar. Las estaciones costeras se especializan en la monitorización de la playa y zonas circundantes por distintos métodos, por ejemplo, estaciones de MEDCLIC¹ utilizan sistemas de video vigilancia, perfiladores de corrientes Doppler y campañas batimétricas y de recolección de sedimentos (ICTS SOCIB, n.d.) . De

¹ <http://medclic.es/es/instrumentos/>

esta forma, es posible recopilar información de forma continua, con una serie temporal alta y de alta resolución sobre la evolución del comportamiento de la costa, oleaje, corrientes y topografía.

A diferencia de las estaciones costeras, las ubicadas a nivel del mar tienen como objetivo principal proporcionar medidas del nivel del mar y, por lo tanto, se encuentran regularmente en muelles, donde se pueda desplegar instrumentación, como mareógrafos en el medio oceánico para la toma de datos de presión.

3.1.1.2 Radars HF.

Los radares marinos de alta frecuencia se basan su principio de funcionamiento en la emisión de ondas electromagnéticas, cuando estas ondas impactan la superficie marina, se capta la reflexión o eco producida bajo el contexto de la dispersión de Bragg y esta señal es la que se somete a estudios posteriores para determinar diferentes variables oceanográficas superficiales, en extensas áreas con alta resolución espaciotemporal.

Un sistema de radares HF se encuentra compuesto por dos estaciones identificadas como maestra y esclava, localizadas a una distancia la una de la otra en función de la frecuencia de trabajo del radar y construida por un arreglo de radares (Toro, 2014). La frecuencia de trabajo de estos radares puede variar entre los 5 y 40 MHz, y es inversamente proporcional a la longitud de la señal transmitida.

Algunas de las ventajas de los radares HF es su capacidad de medición remota, es decir, pueden encontrarse a kilómetros de distancia del punto de interés y realizar tomas de datos precisas. Además, son capaces de determinar la dirección y magnitud de fenómenos vectoriales como corrientes superficiales en el océano, trayectorias de embarcaciones y seguimiento de especies marinas o residuos flotantes.

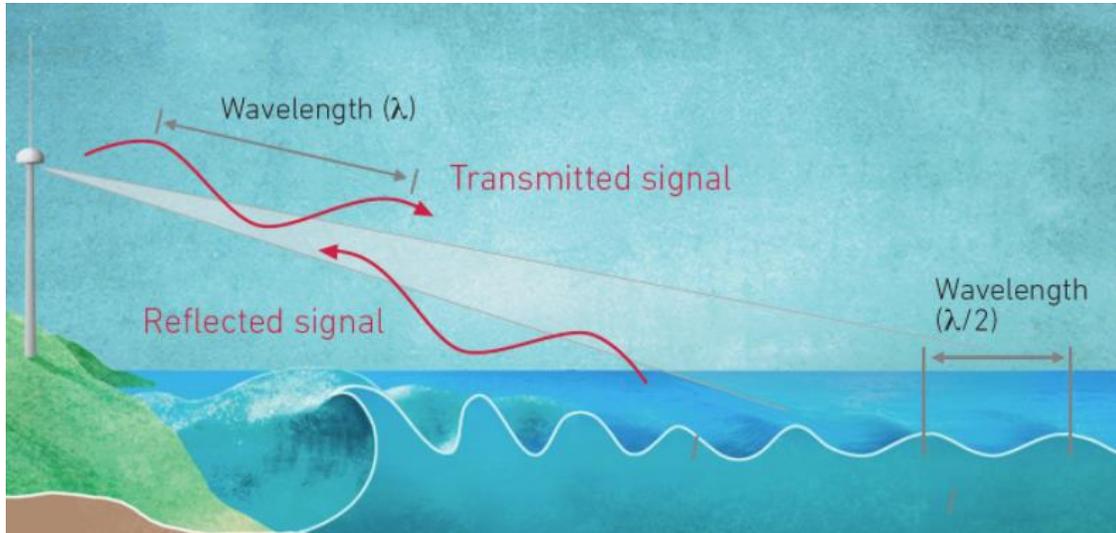


Figura 3.1 Funcionamiento de radares HF (ICTS SOCIB, n.d.).

3.1.1.3 Boyas oceanográficas fijas.

Una boya oceanográfica es un tipo de plataforma flotante, la cual aprovecha el principio de la fuerza boyante para mantenerse en la superficie marina, lo que la distingue de una boya regular es su capacidad de realizar mediciones y estudios de las condiciones del sitio por medio de sistemas de adquisición de datos. Estos sistemas se encuentran integrados por una diversidad de instrumentos de medición de las variables de interés, electrónica de procesamiento y almacenamiento de los datos. Las boyas oceanográficas cuentan también y equipos de transmisión satelital o radiofrecuencia, los cuales se encargan de enviar los datos captados a estaciones de análisis en tierra.

Se consideran boyas fijas cuando se anclan al lecho marino y se utilizan cuando existe un punto de interés clave que requiere de monitoreo constante y preciso, al tener que sujetarse al fondo, se limita la profundidad del área en la cual la boya puede ser desplegada, dependiendo de la longitud del anclaje.

Aunque el diseño de cada boya depende de su fabricante, existen algunos aspectos de diseño estándar y presentes en la mayoría de plataformas, entre ellas: a) la estructura o casco, la cual le da rigidez y carga los equipos e instrumentación, b) el flotador el cual se encarga de mantener la estructura en la superficie, generalmente están compuestas de materiales ligeros como espumas o gases, c) un mástil que carga con instrumentación y

electrónica necesaria para registrar y transmitir los datos y un módulo de alimentación eléctrica, el cual les permite a sus sensores funcionar por periodos largos de tiempo, dándole autonomía a la boya.

Todos estos elementos deben ser diseñados para funcionar en condiciones adversas, por lo que existen distintas normas y órganos dedicados a la guía de estructuras en alta mar entre ellas American Bureau of Shipping, American Petroleum Institute y The International Association of Marine Aids to Navigation and Lighthouse Authorities (IALA).

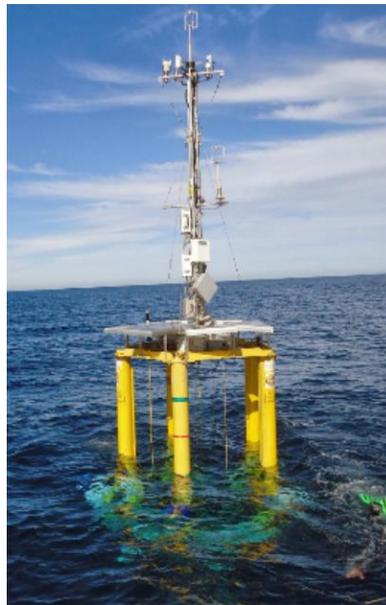


Figura 3.2. Despliegue de boya BOMM (Cruz & Durazo, 2017).

3.1.2 Plataformas móviles.

3.1.2.1 Buques oceanográficos.

Los buques oceanográficos son embarcaciones adaptadas para realizar estudios *in situ* según los objetivos científicos de cada misión. Suelen ser plataformas complejas e innovadoras, con equipamientos y tecnología sofisticada y pluridisciplinar (Instituto Español de Oceanografía, 2014). Al ser infraestructuras de gran tamaño, es posible utilizarlas como una estación móvil, en la cual se instalan sensores y equipos diversos, los cuales son manipulados por el personal especializado a bordo, optimizando de esta forma la

eficiencia en las tareas de investigación, ya que todo el proceso se realiza de forma casi inmediatamente en el mismo lugar.

Existen diversas formas de categorizar a los buques oceanográficos. Una de ellas es por zonas de navegación las cuales pueden ser a) locales, enfocados en misiones de corta duración, b) costeros, diseñados para investigaciones en aguas someras y c) oceánicos los cuales pueden navegar en aguas internacionales profundas durante varios días. Estas embarcaciones, además de poseer las áreas habituales de un buque (como lo son la cubierta, popa, puentes, comedor, camarotes, sala de máquinas), también suelen estar equipadas con laboratorios de electrónica y comunicación, antenas, estaciones meteorológicas y hangares para almacenar equipos a ser desplegados como pueden ser boyas o planeadores.

Para llevar a cabo sus tareas y obtener la mayor cantidad de datos posibles, los buques oceanográficos se preparan con instrumentación variada, como perfiladores de corrientes, sondas para determinar la morfología de fondo marino, redes para obtención de muestras, sondas para batimetría y rosetas oceanográficas para la medición de distintas variables como la temperatura, conductividad y profundidad de la zona de estudio. Los equipos a bordo de estas naves dependen de los objetivos de cada misión.



Figura 3.3 Buque oceanográfico(ICTS SOCIB, n.d.).

3.1.2.2 Planeadores y dispositivos automatizados.

Los planeadores o *gliders* submarinos se encuentran entre las más modernas soluciones de medición disponibles para estudios oceanográficos. Consiste en un vehículo autónomo encapsulado, similar a un submarino a escala, capaz de desplazarse bajo la superficie marina, con el objetivo de realizar un barrido a lo largo de una ruta o área específica, mientras ejecuta un monitoreo en tiempo real de las condiciones oceanográficas.

Según SOCIB², los *gliders* representan un gran avance en el desarrollo de plataformas de observación oceanográfica ya que, gracias a su movilidad, dan gran versatilidad al proceso de adquisición de datos. Como su nombre lo indica, estos dispositivos se desplazan planeando, debido al control sobre su flotabilidad mediante un sistema hidráulico de vaciado y llenado, que le permite regular su posición vertical emergiendo o sumergiéndose. Este movimiento sumado al control de las alas genera traslación horizontal, por lo que no existe necesidad de hélices u otro medio de propulsión, lo que reduce en gran medida el peso, complejidad y consumo energético(SOCIB, 2010).

Otra de sus ventajas es su operación remota, en la cual se introducen las instrucciones de la expedición en un sistema operativo sin necesidad de un piloto a bordo o un ingeniero pendiente del dispositivo de forma constante, lo que reduce costo y recurso humano para su operación. Este proceso se puede repetir cada vez que el vehículo emerge a la superficie oceánica, donde es posible realizar la transferencia de información, tanto de los datos como de los comandos de operación, gracias a su antena integrada.

Además, el planeador es capaz de trabajar de forma continua por periodos aproximados de dos meses, esta autonomía permite hacer misiones de larga duración, operar en condiciones poco convencionales y llegar a ubicaciones remotas, esto mientras se recolecta una cantidad de datos importantes. Por otro lado, los *gliders* tienen algunas limitaciones, como su velocidad reducida al no contar con un sistema integral de

² <https://www.socib.eu/>

propulsión, la resolución relativamente baja de sus sensores, sobre todo, al compararla con tecnología utilizada en embarcaciones y también que su profundidad de inmersión máxima no suele exceder los mil metros bajo la superficie marina.

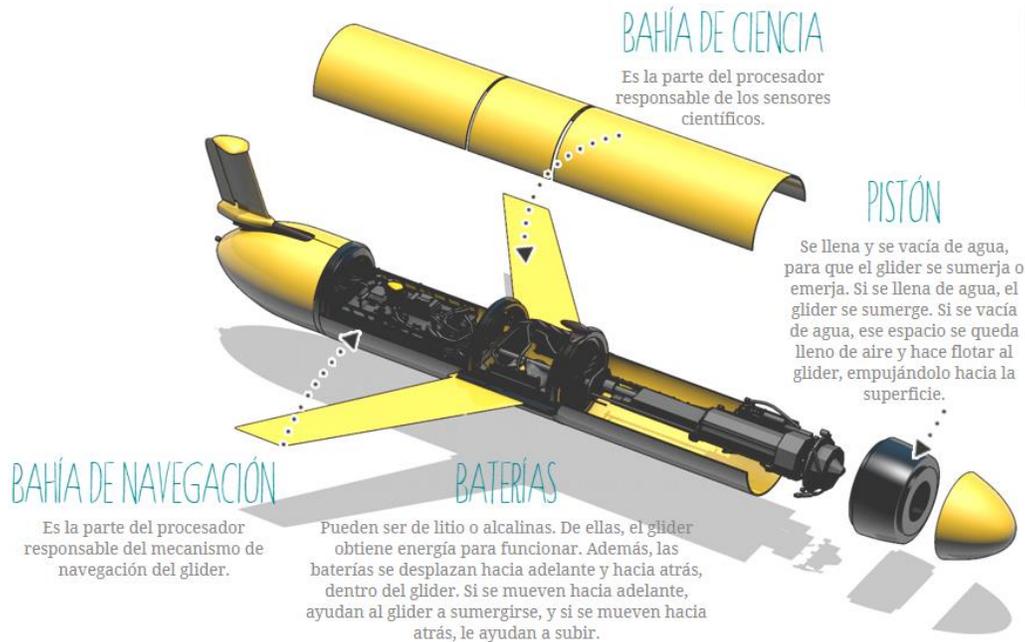


Figura 3.4 Componentes fundamentales del gliders (IMEDEA, n.d.).

3.1.2.3 Boyas a la deriva y plataformas lagrangianas.

Prácticamente idénticas a las boyas fijas, las boyas a la deriva se diferencian, ya que no se encuentran atadas a un solo punto en el océano, sino que se trasladan debido a las fuerzas del viento, oleaje y corrientes. Este desplazamiento da la capacidad a las boyas a la deriva de representar las corrientes oceánicas se ve aumentada considerablemente, pues permite incrementar la superficie de la muestra representativa. Sin embargo, la deriva de estas plataformas puede generar errores considerables en la medición, debido a las diferencias de dirección que existen entre las corrientes de la superficie y las existentes a la profundidad en la que se encuentra la boya, dificulta la toma de datos precisos.

También existen plataformas que se dejan derivar libremente, como los perfiladores de los cuales se establece un seguimiento del movimiento dirigido por las corrientes superficiales mediante el posicionamiento por satélite para establecer trayectoria y velocidad.

3.2 Condiciones de carga en estructuras marinas

Con el fin de realizar una obra robusta y confiable, es necesario conocer las condiciones a las cuales se encontrará expuesta la estructura durante su operación. Las construcciones marítimas cuentan con particularidades, tanto en sus funciones como en la naturaleza de sus puntos de despliegue e instalación, que las diferencian en gran medida de sus contrapartes terrestres. Esto hace que el modelo de análisis para sus condiciones de diseño difiera de aquellos aplicados para infraestructuras en tierra firme.

Por esta razón, existen diversas sociedades clasificadoras, las cuales brindan guías de diseño y construcción para estructuras de toda clase, ubicadas mar adentro, estas agencias comparten como objetivo común el generar pautas y requerimientos técnicos mínimos para generar estructuras marinas seguras, lo que incluye estimación de cargas, materiales, procedimientos de trabajo, clasificación de estructuras y metodologías de diseño. Entre estas agencias se encuentran: American Bureau of Shipping (ABS), Recomendaciones para Obras Marinas (R.O.M), Det Norske Veritas (DNV³) y Lloyds Register. Además de otras instituciones y textos especializados, por ejemplo, American Petroleum Institute.

Estas instituciones se dedican, en gran medida, a comprender cómo afecta el medio a la estructura y en detallar las cargas de diseño se deben considerar a la hora de instalar plataformas alejadas de la costa, A pesar de que cada código clasifica de distintas formas estas cargas, de forma genérica, se pueden distinguir por su naturaleza en estáticas y dinámicas, es decir, que varían en el tiempo. Además, por su origen, se pueden clasificar los grupos descritos en subsecciones siguientes.

3.2.1 Cargas gravitacionales.

Según Chakrabarti (2005), en *Handbook of OffShore Engineering*, las cargas gravitacionales se encuentran compuestas por las cargas muertas y cargas vivas. Las cargas

³ <https://imedea.uib-csic.es/?lang=en>

muertas se definen como el peso propio de la plataforma, el cual asocia al peso de los elementos principales y secundarios que forman el modelo estructural, y también de cualquier equipo y estructura permanente que no varía durante el modo de operación, además, se puede incluir en esta categoría la fuerza hidrostática que actúa en las secciones sumergidas, como la presión externa y la fuerza boyante que mantiene a plataforma a flote como cargas muertas.

Por otro lado, las cargas vivas son aquellas referidas al personal que labora sobre las plataformas, juntos con herramientas, equipo menor y almacenamiento de líquidos (Frias & Maciá, 2015). Se definen como cargas impuestas en las plataformas durante su uso y que pueden variar durante su funcionamiento. Es importante considerarlas especialmente en aquellas embarcaciones de gran tamaño, en donde se tiene una tripulación con suministros, combustibles y, en ocasiones, vehículos de transporte como helicópteros.

3.2.2 *Cargas y fenómenos ambientales.*

Las cargas ambientales son cargas impuestas sobre la plataforma por fenómenos naturales como el viento, las corrientes, las olas, los terremotos, la nieve, el hielo y el movimiento de la tierra. Las cargas ambientales también incluyen la variación en la presión hidrostática y la flotabilidad en los miembros causada por cambios en el nivel del agua debido a las olas y las mareas. Las cargas ambientales deben anticiparse desde cualquier dirección, a menos que el conocimiento de condiciones específicas haga más razonable una suposición diferente (American Petroleum Institute, 2002).

De acuerdo con DNV (2010), los fenómenos naturales que pueden contribuir de manera más importante en la operación y fallo de estructuras marinas son el oleaje, el viento, las corrientes y mareas. Estos fenómenos se detallan a continuación:

3.2.2.1 Oleaje.

Se conoce como oleaje a la formación de ondulaciones periódicas de agua en las capas más superficiales del océano, se puede describir de forma simple el movimiento de las olas, por medio de una onda sinusoidal de cresta larga, lo que sugiere que el oleaje es

una serie de crestas largas y paralelas, de altura equivalente y equidistante entre ellas (Ocampo et al., 2018).

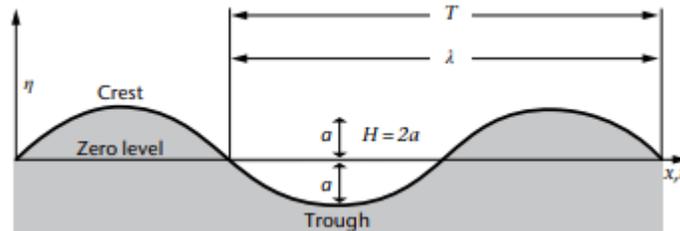


Figura 3.5 Parámetros fundamentales de las olas(Ocampo et al., 2018).

Los principales parámetros para describir una ola, tal como se ven en la Figura 3.5, son:

- Altura (H): diferencia en la elevación entre una cresta y un valle. Por su parte, la amplitud (a) es la magnitud de desplazamiento máximo desde el nivel medio de la superficie.
- Período (T): intervalo de tiempo en segundos entre el paso sucesivo de las crestas sobre un punto fijo. Su inverso es la frecuencia, medida en Hertz.
- Longitud de onda (λ): la distancia horizontal entre dos crestas sucesivas.
- Tasa de propagación (c): velocidad a la cual el perfil de ola viaja, comúnmente se conoce como velocidad de ola.

Las olas se pueden clasificar por su periodo. Las olas gravitacionales generadas por el viento casi siempre se encuentran presentes en el mar, son creadas por vientos en algún lugar en el océano, de manera local o a miles de kilómetros de distancias. Debido a su energía relativa, tienen un amplio impacto en gran cantidad de actividades y procesos de intercambio de calor y energía, por lo que son la clase frecuentemente consideradas como oleaje ordinario.

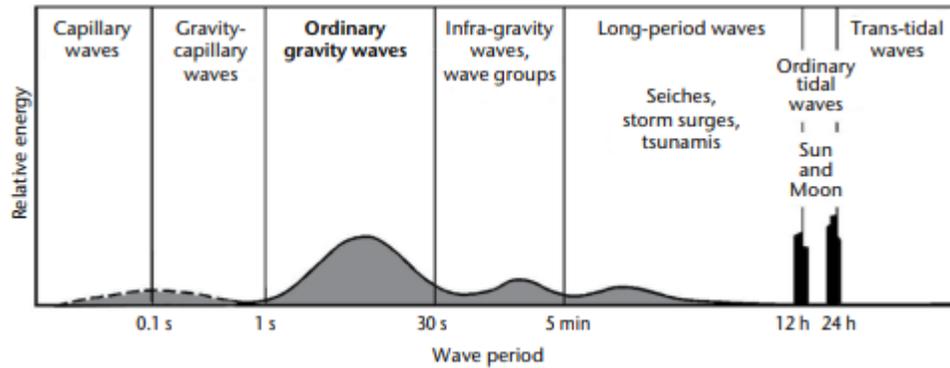


Figura 3.6 Clasificación del oleaje según su periodo (Ocampo et al., 2018).

La energía que absorbe la ola del viento depende de tres factores principales: a) la velocidad del viento, b) el tiempo que dura soplando el viento sobre el agua y c) el alcance o superficie sobre la cual es aplicado. Sin embargo, la superficie del mar no se compone de una única onda senoidal, sino que, de la superposición de estas, las cuales presentan distintas frecuencias, direcciones, amplitudes y fases. Esto provoca que la superficie libre del mar sea desordenada y difícil de analizar en términos del tiempo.

Al ser un fenómeno complejo, una alternativa para formalizar y comprender este concepto es a través de la descripción estadística de los registros de oleaje. Uno de los parámetros estadísticos fundamentales del oleaje se denomina altura de ola significativa, la cual es la media aritmética de la altura del tercio de olas más altas registradas en una ventana de tiempo. Al determinar los parámetros fundamentales de las olas, es posible aproximar su comportamiento por medio de una teoría del oleaje apropiada.

3.2.2.2 Corrientes marinas.

Las corrientes marinas son movimientos de arrastre o traslado de aguas oceánicas producidas por la acción combinada del viento, mareas y densidad del agua, las que, a su vez, originan variaciones de temperatura de las masas de agua de diversas latitudes (Álvarez, 2005). A una escala local, las corrientes pueden ser inducidas por múltiples factores como la topología de la zona, comportamiento de vientos o mareas localizadas, sin embargo, este fenómeno se caracteriza según su causa de origen a gran escala, con lo cual se pueden clasificar en tres:

- Corrientes de gradientes o marea, las cuales son provocadas por el movimiento armónico de los astros, lo que provoca que también se les conozca como corrientes astronómicas. Las corrientes de marea se encuentran directamente relacionadas con la mayor marea astronómica (HAT) o menos marea astronómica (LAT) y, generalmente, son débiles en aguas profundas, pero se intensifican en aguas someras y zonas costeras (Norske Veritas, 2010).
- Corrientes circulantes o termohalinas, corrientes de gran escala de circulación oceánica general (p. ej., La Corrientes del Golfo en el Océano Atlántico). Se encuentran asociadas a la variación de temperatura y densidad en los cuerpos de agua, lo que genera desplazamientos de gran volumen. Partes de las corrientes de circulación pueden romperse de la circulación principal para formar remolinos a gran escala, las velocidades en tales remolinos pueden exceder el de la corriente de circulación principal (Det Norske Veritas, 2010).
- Corrientes generadas por tormentas, se encuentran compuestas por la combinación de los efectos de las tormentas y por los diferenciales de presión atmosféricos.

La corriente total es el vector suma de estos tres componentes, al igual que el viento, se puede observar el perfil de velocidad de las corrientes en la Figura 3.7, donde es observable cómo la suma de estas tres componentes aporta al vector resultante. Es posible apreciar el efecto de las corrientes generadas por tormentas, por esta razón, es que la velocidad en la superficie es mayor.

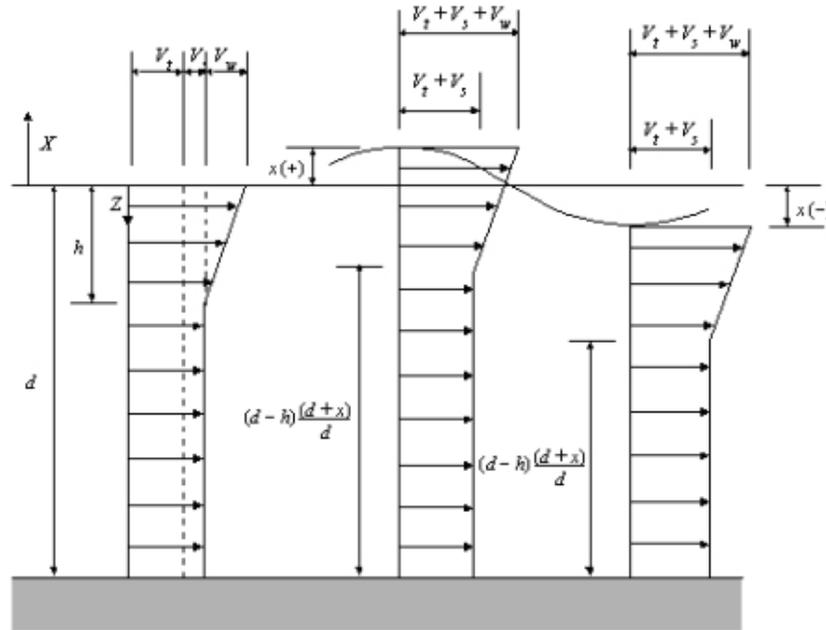


Figura 3.7 Perfil de velocidad de corrientes (American Petroleum Institute, 2002).

A pesar de ser un fenómeno variable, en el diseño de estructuras marinas generalmente se considera como invariable en el tiempo y se representa por su valor medio, que se traducen en una carga distribuida y que provoca diferencias de presión sobre la superficie de estructuras sumergida. Como la distribución de la presión puede no ser simétrica en la dirección del flujo, una fuerza transversal también es generada en el miembro estructural (Chakrabarti, 2005).

3.2.2.3 Viento.

Se denomina propiamente viento a la corriente de aire que se desplaza en sentido horizontal, reservándose la denominación de “corriente de convección” para los movimientos de aire en sentido vertical (Álvarez, 2005). Aunque se suele observar como un fenómeno desordenado y turbulento, el viento se define por dos parámetros sencillos: su dirección en el plano horizontal y su rapidez, los que, en conjunto, lo convierten en un fenómeno vectorial.

La dirección del viento se calcula tomando como origen el norte, utilizando la rosa de los vientos, la cual está dividida en 360°, a partir de este punto de referencia, se cuentan

los grados en sentido horario siendo 90° el este, 180° el sur y 270° el oeste. Para medir este valor, se utiliza una veleta, la cual marca la dirección en grados en la propia rosa, esta debe ser instalada según procedimientos y condiciones del sitio de estudio para evitar la mayor cantidad de perturbaciones posibles.

Por su parte, la velocidad del viento en el sistema internacional se mide en metros por segundo (m/s). Sin embargo, en el contexto naval preferentemente se hace uso de los nudos o milla náutica por hora, la cual tiene un valor aproximado de 0,51 metros por segundo. El instrumento utilizado para la medición de este parámetro es el anemómetro, el cual consta de un eje vertical con tres brazos equidistantes del centro y separados uniformemente entre ellos.

Como otros datos meteorológicos, el viento posee un régimen variable en función del tiempo y de la ubicación geográfica, es decir, el viento varía con el tiempo y también varía con la altura sobre la superficie del mar. Por estas razones, el tiempo promedio para las velocidades de viento y la referencia de altura deben ser especificados. Una referencia comúnmente usada para la altura es $H=10\text{m}$ y para intervalos de tiempos se usa 1 minuto, 10 minutos y 1 hora, a la velocidad comprendida en este intervalo se le conoce como “velocidad sostenida” (Det Norske Veritas, 2010).

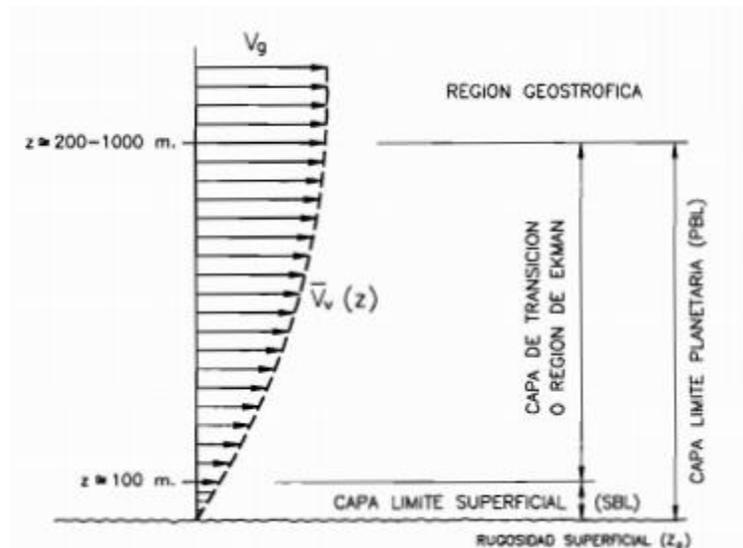


Figura 3.8 Perfil velocidad media del viento (Llorca et al., 1995).

3.2.3 Cargas temporales y funcionales.

Condiciones temporales de carga que ocurren comúnmente durante fabricación, transporte y procedimientos de instalación deben ser consideradas para un análisis de condiciones integral de cualquier estructura marina. Para estos casos, se suele utilizar una combinación apropiada de condiciones de carga muerta, cargas temporales máximas y en caso de aplicar, cargas ambientales.

Los efectos de las cargas debido a operaciones como perforaciones, cargas giratorias y trabajos realizados sobre el objeto de interés también deben tenerse en cuenta. Para todos los modos de operación, la combinación de las cargas gravitacionales y funcionales deben ser especificadas, tomando las combinaciones menos favorables de carga para efectos de esfuerzos en el diseño (American Bureau of Shipping, 2013).

3.3 Principios de mecánica del sólido.

3.3.1 Análisis estático

La mecánica del sólido se divide en dos áreas, la dinámica y la estática, esta última estudia el equilibrio de los cuerpos rígidos, es decir, aquellos que están en reposo o se mueven a una velocidad constante, lo cual es equivalente a aceleración nula (Hibbeler, 2016). Para que se cumplan estas condiciones de equilibrio debe existir tanto un balance de fuerzas que impida la traslación del objeto (1), como un balance de momento que impida su rotación (2), estas condiciones se pueden expresar matemáticamente por medio de las ecuaciones:

$$\sum F = 0 \quad (1)$$

$$\sum M = 0 \quad (2)$$

Donde:

$\sum F$ = suma fuerzas incidentes en el cuerpo rígido.

$\sum M$ = suma de los momentos que actúan sobre el sólido.

Un cuerpo puede estar sometido a distintos tipos de cargas externas, aquellas causadas por contacto directo de un cuerpo con la superficie de otro son conocidas como

fuerzas de superficie. Estas fuerzas se distribuyen en la superficie de contacto de los objetos. Si esta área es pequeña en comparación con la superficie total del cuerpo, entonces la fuerza se puede idealizar como fuerza concentrada, en caso contrario, si la carga se aplica a lo largo de la superficie de contacto, la carga puede idealizarse como una carga distribuida (Hibbeler, 2011), como en el caso de corrientes de fluido como viento o mareas.

Según Hibbeler (2011), en el primer capítulo de su libro *Mecánica del sólido*, con tal de que se mantenga el equilibrio en el sólido cuando se somete a cargas se necesita de un punto de contacto o soporte. Como regla general, si el soporte impide la traslación, debe desarrollarse una fuerza sobre el elemento en esa dirección. Del mismo modo, si se impide la rotación debe ejercerse un momento sobre el elemento.

3.3.2 Esfuerzos en cuerpos estáticos.

Cuando se diseña un elemento estructural, es necesario conocer su comportamiento interno al aplicar una fuerza o momento para asegurarse que el material pueda resistirla las condiciones a las que se le somete. Estas cargas internas son conocidas como esfuerzo. Para esto, se puede analizar el elemento de interés por medio de varios métodos, uno de ellos es el método de las secciones, el cual separa los elementos en segmentos para poder analizar la sección transversal de la pieza (Hibbeler, 2011). Al realizar este ejercicio, es posible detectar las cargas resultantes en el interior del segmento descritas en la Figura 3.14

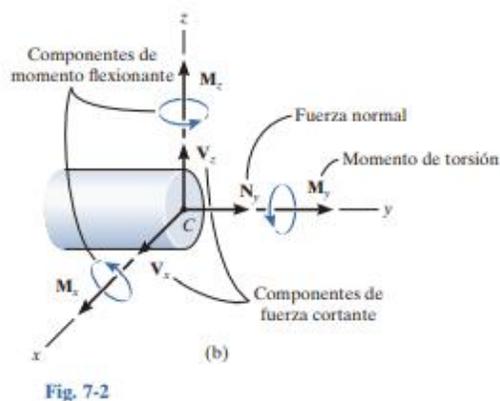


Figura 3.9 Fuerzas internas en elementos estructurales (Hibbeler, 2016).

3.3.2.1 Fuerza normal.

La fuerza normal actúa perpendicularmente a la sección transversal, se desarrolla cuando las cargas externas tienden a empujar para causar compresión o jalar para generar tensión sobre los segmentos del cuerpo. Cuando la carga se encuentra uniformemente distribuida (lo que sucede cuando el material mantiene sus propiedades en todo su volumen y no existen concentradores de esfuerzo), el esfuerzo axial se puede calcular como:

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (3)$$

Donde:

σ = esfuerzo axial.

P= carga normal al área de sección transversal.

A= área de sección transversal.

3.3.2.2 Esfuerzo cortante.

Se define como la fuerza por unidad de área actuando en el plano de la sección transversal y se desarrolla cuando las cargas externas tienden a ocasionar que los dos segmentos se deslicen uno sobre el otro. En su forma más sencilla, se le conoce como cortante simple, ya que la componente de esfuerzo se debe a la acción directa de la carga aplicada. El esfuerzo cortante promedio en la sección transversal se describe por medio de la siguiente ecuación:

$$\tau_{prom} = \frac{V}{A} \quad (4)$$

Donde:

τ_{prom} = esfuerzo cortante promedio

V= fuerza cortante interna

A= Área de sección transversal

3.3.2.3 Momento de torsión.

Un par de torsión es un momento que tiende a torcer un elemento sobre su eje longitudinal, se presenta sobre todo en ejes y arboles de transmisión. En materiales dúctiles, se puede suponer que, si el ángulo de giro es pequeño, la longitud del eje y su radio se mantendrán sin cambio. El momento de torsión máximo se presenta siempre en la superficie del elemento y se obtiene por medio de la siguiente ecuación:

$$\tau_{m\acute{a}x} = \frac{Tc}{J} \quad (5)$$

Donde:

T= par de torsión interno

J= momento polar de inercia del área de sección transversal

c= radio exterior del eje

Debido a la propiedad de complementaria de la fuerza cortante, no solo el par de torsión desarrolla una distribución lineal de esfuerzo cortante a lo largo de cada línea radial, sino que también se desarrolla una distribución de esfuerzo cortante asociada a lo largo del plano axial (Hibbeler, 2011).

3.3.2.4 Momento flector.

Los elementos delgados que soportan cargas aplicadas en forma perpendicular a su eje longitudinal se denominan vigas. Debido a las cargas aplicadas, las vigas suelen desarrollar una fuerza cortante y momento flector que, en general, varían de un punto a otro a lo largo del eje del elemento (Hibbeler, 2011). La fórmula de flexión (Ecuación 6) se basa en el requisito de que el momento resultante interno en la sección transversal debe ser igual, al momento producido por la distribución de esfuerzos normales respecto al eje neutro.

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{Mc}{I} \quad (6)$$

Donde:

$\sigma_{m\acute{a}x}$ = esfuerzo máximo en el elemento, producido en el punto más alejado del eje neutro.

M= momento interno resultante.

c = distancia perpendicular desde el eje neutro al punto más alejado.

I = momento de inercia del área de sección transversal, respecto al eje neutro

3.3.2.5 Cargas combinadas.

Generalmente, las cargas no se presentan de forma aislada sobre los elementos, por el contrario, estos frecuentemente se encuentran sometidos a varias de las cargas de manera simultánea. Cuando esto sucede, se deben calcular todas las componentes de esfuerzo para cada carga y hacer el uso del principio de superposición para determinar el esfuerzo resultante en la pieza.

Al observar la Figura 3.10, es posible apreciar que el estado de esfuerzo en un punto se representa con seis componentes de esfuerzo normal y cortante. Sin embargo, este estado no es común en la práctica, por lo que se realizan transformaciones de esfuerzo, con el fin de que una estructura pueda analizarse en un solo plano. Cuando esto sucede, se dice que el material está sometido a esfuerzo plano.

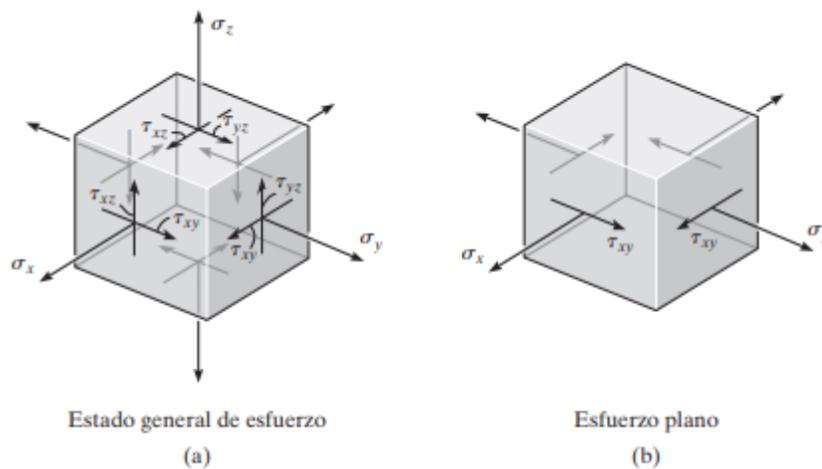


Figura 3.10 Estados de esfuerzo en un elemento del material. Izquierda: estado general de esfuerzo. Derecha: Esfuerzo plano (Hibbeler, 2011).

Al utilizar métodos de transformación de esfuerzos, es posible reducir sus efectos a dos tipos de tensiones: normales y tangenciales. Además, es posible determinar el esfuerzo normal máximo o mínimo que actúa en un punto del plano, a estos efectos se les llama los

esfuerzos principales en el plano, y se presentan cuando ningún esfuerzo cortante actúa sobre los planos principales (Hibbeler, 2011). A través de estos esfuerzos principales, es posible predecir fallas en el material por medio de teorías de falla.

3.3.3 Teoría de falla-Von Mises.

Al momento de diseñar usando un material específico, es necesario establecer un límite máximo en sus estados de esfuerzo, en el cual se defina el momento de falla del material, en otras palabras, predecir la capacidad del material de soportar una combinación de cargas a las que estará sometido. Esto con el fin de darle confiabilidad al producto y evitar que se encuentre sobre diseñado al punto de hacerlo innecesariamente costoso o sobredimensionado (Juvinall & Marshek, 2017).

Si el elemento de estudio se encuentra sometido a esfuerzos compuesto, el criterio de falla es difícil de definir, por lo que se presentan teorías de fallas. Estas teorías predicen la capacidad de los materiales de soportar diferentes tipos de cargas a las que se encuentran sujetas.

Para aplicar estas teorías, es necesario conocer si la naturaleza del material es frágil o dúctil. La mayoría de los materiales metálicos posee un comportamiento dúctil, en los cuales la teoría de la máxima energía de distorsión, comúnmente conocida como Von Mises, es ampliamente aceptada para predecir la falla del material cuando este se somete a cargas internas estáticas.

Esta teoría propone que la deformación de un material provoca que almacene energía elástica, conocida como energía de distorsión en su interior, la cedencia de un material dúctil se produce cuando la energía de distorsión por unidad de volumen es igual o superior a la energía de distorsión por unidad de volumen del mismo material cuando se llega a la cedencia en una prueba de tensión simple (Hibbeler, 2011).

Al usar esta teoría, es conveniente trabajar con un valor de esfuerzo equivalente, definido como el valor de tensión uniaxial que produce la misma magnitud de energía de

distorsión que la combinación de esfuerzos que actúan realmente en el elemento (Juvinall & Marshek, 2017). En términos de esfuerzos principales, la ecuación general para esfuerzo equivalente es:

$$\sigma_e = \frac{\sqrt{2}}{2} [(\sigma_2 - \sigma_1)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 + (\sigma_3 - \sigma_2)^2]^{1/2} \quad (7)$$

Una vez obtenido el esfuerzo equivalente, este es comparado con el esfuerzo de cedencia de la prueba de pruebas de tensión, si este valor es superado, se predice el fallo. La aplicación de Von mises facilitara la identificación de esfuerzos máximos generados en la estructura durante la aplicación de las cargas originadas por las fuerzas ambientales. Las deformaciones en la plataforma generadas por los esfuerzos, evidenciará la respuesta del material bajo las condiciones de carga generadas en el medio marítimo (Rueda, 2015).

3.3.4 *Análisis de elemento finito.*

La técnica de análisis por elemento finito (FEA, por sus siglas en inglés) consiste en el uso de unos métodos numéricos para la resolución de problemas físicos complejos. El método se basa en la división del sólido de interés en pequeños elementos, en los cuales se resuelven las ecuaciones correspondientes de cada uno en forma discreta e iterativa hasta que se alcanza la convergencia en la solución. Como este es un proceso con gran volumen de cálculos, regularmente se utiliza solo con el apoyo de herramientas de software, ya que resolverlo de forma manual tomaría mucho tiempo.

El análisis de elementos finito es especialmente útil en problemas donde la componente geométrica es compleja y no puede ser modelada de forma precisa con análisis estándar de resistencia de materiales (Juvinall & Marshek, 2017)El análisis de elemento finito requiere de formulación para realizar los cálculos que lleven a la solución, en la mayoría de casos, la teoría de Von Mises es aceptada para una amplia cantidad de aplicaciones, además, se necesita de una representación de los materiales, geometría, condiciones de frontera (apoyos y tipo de contacto) y cargas para poder obtener resultados de esfuerzo y deformación en la estructura.

González et al. (2019) definen una serie de etapas y procedimientos generales para la aplicación del FEA las cuales se pueden resumir en: 1) Geometría. Definir el objeto de estudio, realizar simplificaciones e idealizaciones en caso de ser necesario, luego dividirlo en pequeños elementos formando una malla donde los espacios límites de cada elemento son llamados nodos. 2) Procesamiento previo. El tipo de análisis (por ejemplo, estático, térmico, frecuencia), propiedades del material, cargas y restricciones se definen y el modelo se divide en elementos finitos, soluciones deseadas. 3) Aplicación del método y resultados. Ejecución del FEA como tal, análisis de resultados.

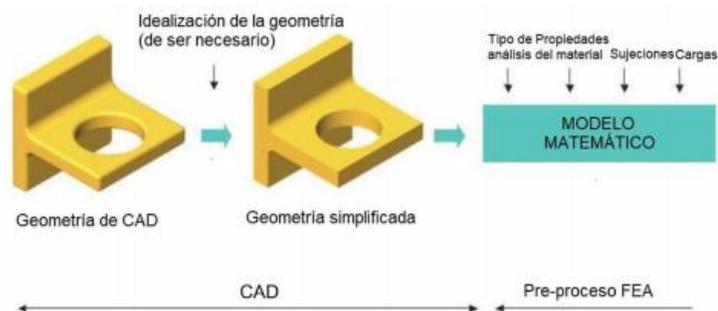


Figura 3.11. Procedimiento previo del Análisis del elemento finito (González et al., 2019).

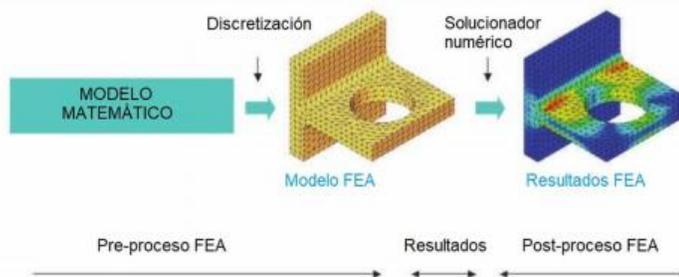


Figura 3.12 Procedimiento de discretización y solución del análisis del elemento finito (González et al., 2019).

3.3.5 CFD.

La dinámica de fluidos computacionales (CFD por sus siglas en inglés) es una herramienta matemática para explicar el comportamiento de fluidos como el agua y el aire

por medio del uso de métodos numéricos en software especializados. Anteriormente, existían dos formas de estudiar los fenómenos de los fluidos en movimiento, la forma analítica y la experimental.

Los cálculos analíticos requieren de un conocimiento profundo de la materia y que, además, se ve limitada por las suposiciones que deben realizarse para resolver los casos. Los métodos experimentales suelen demandar gran cantidad de recursos, equipos de alto costo, monitoreo y procesado de datos, lo que los hace poco viables, en caso de contar con un presupuesto limitado. Con el tiempo, avances en las ciencias computacionales y en métodos numéricos dieron paso a la creación de Métodos CFD que, en resumen, permiten al usuario realizar experimentos de forma virtual, que serían costosos, difíciles, peligrosos o imposibles de realizar en la realidad (van Leer & Powell, 2010).

De forma muy similar al principio de discretización aplicado en el FEA, en CFD el modelado de las ecuaciones gobernantes se discretiza en una malla computacional llevando a aproximaciones en cada elemento finito. Las ecuaciones gobernantes en la dinámica de fluidos son conocidas como Navier-Stokes, y su base reside en la suposición de que la partícula de un fluido se deforma bajo esfuerzos cortantes. Luego, usando la segunda ley de movimiento y conservación de la energía, se describe la dinámica de la partícula por su masa, momento y energía. En principio, estos tres parámetros se deben mantener, conservación de la masa, conservación de la inercia y conservación de la energía (Jamshed, 2015)

El proceso de CFD es también similar al de FEA, consiste en tres etapas: a) preprocesamiento, b) solución y c) post procesamiento. El procesamiento consiste en definir propiedades del fluido, las condiciones de frontera y el volumen de control sobre el cual se monitorean las variables de interés, la solución de las ecuaciones diferenciales es llevada a cabo por los procesadores computacionales. Finalmente, el post procesamiento consiste en la interpretación de los resultados obtenidos, el validarlos por medio de otros métodos y su uso para el diseño o la optimización.

Los tres procesos son interdependientes, y es crucial para el estudio que se realice un preprocesamiento minucioso, ya que errores en la malla se propagan en la solución. Existe una gran gama de variables que pueden ser datos de salida al realizar CFD como la velocidad de flujo, la tasa de flujo volumétrico o las fuerzas que ejerce el fluido sobre un sólido al impactar con él (ver Figura 3.13).

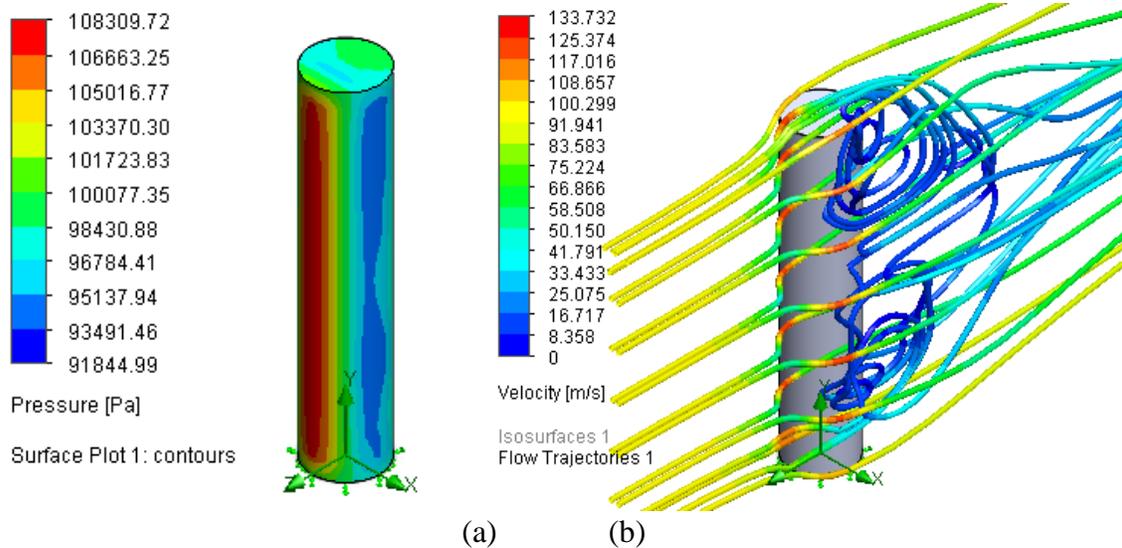


Figura 3.13 Resultados de CFD a) presión de viento sobre elemento cilíndrico b) velocidad de las trayectorias de flujo del viento.

3.3.6 Soldadura.

La soldadura se encuentra entre los métodos de sujeción más utilizados en la industria, consiste en la unión de dos o más piezas por medio de la fusión del material. La soldadura de metales requiere calentar el material hasta un estado de fundición de forma que puedan fusionarse ambas partes (Oberger et al., 2008). Usualmente, en el proceso de soldadura, se añade material durante la fusión para asegurar la debida unión de las piezas. Cuando se trata de metales, al material añadido se le conoce como metal de aporte, mientras que el material de las piezas a soldar se le conoce como metal base.

Según Oberger et al. (2008), la mayoría de los procesos de soldadura actuales usan un arco eléctrico, sin embargo, métodos como la antorcha de oxiacetileno y la soldadura laser se utilizan en algunas operaciones. En la soldadura de arco eléctrico, un arco de bajo voltaje

y alta corriente es provocado entre el final del electrodo y la pieza de trabajo, generando temperaturas intensas que inmediatamente funden la superficie. En la Figura 3.14, se puede observar el producto final de la fusión entre el metal base y de aporte al elemento resultante se le conoce como cordón de soldadura.



Figura 3.14 Soldadura a tope en aleación de aluminio 6061.

3.3.6.1 Soldadura con arco eléctrico.

De acuerdo con Juvinal y Marshek (2017), la soldadura de arco eléctrico toma diferentes formas dependiendo de: 1) como el material de aporte es aplicado y 2) la forma en la que el metal base es protegido de la superficie. A continuación, se describen brevemente algunos métodos de soldadura de arco eléctrico.

- Soldadura de arco eléctrico con electrodo revestido (SMAW): el soldador utiliza un electrodo revestido con material fundente el cual libera gases que protegen la soldadura de la atmósfera durante el proceso de fusión.
- Soldadura a gas y arco metálico (GMAW): el electrodo consumible no se encuentra recubierto, pero se sobresale de la boquilla que supe gas para la protección de la soldadura.

- Soldadura a gas y arco de tungsteno (GTAW): emplea un electrodo no consumible con material de aporte alimentado de forma separada. La boquilla que rodea el electrodo provee helio o argón para la protección de la soldadura.

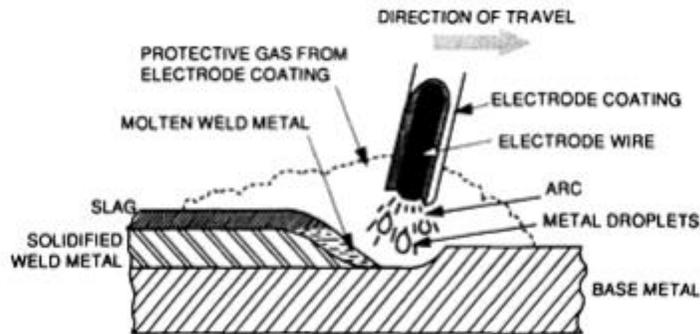


Figura 3.15 Elementos de la soldadura SMAW (ASM International, 1993).

3.3.6.2 Cordón de soldadura y material de aporte.

Según Juvinal y Marshek (2017), el concepto básico de la soldadura es el de fusionar dos materiales en uno solo, de la manera más homogénea posible. Idealmente, los análisis de fuerza y esfuerzos se ejecutarían como si se tratase de una única pieza, sin embargo, este escenario dista de la realidad. Por lo tanto, es necesario conocer las características del cordón de soldadura para poder analizar casos de esfuerzo en elementos soldados.

Para definir las características del cordón de soldadura, es conveniente conocer primero los principales tipos de soldadura según la posición de las partes soldadas. Cada configuración se aprecia en la figura 3.16 y se dividen en a) soldadura a tope, cuando las piezas se encuentran a un mismo nivel y b) soldadura de filete, cuando las piezas se posicionan perpendicularmente una respecto a la otra.

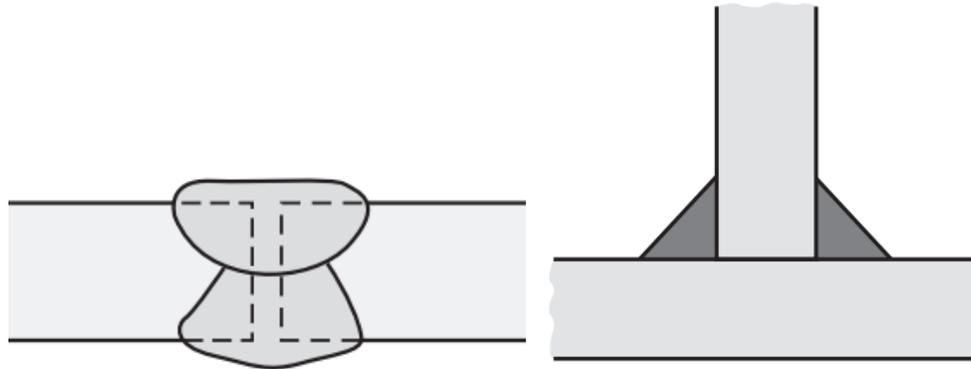


Figura 3.16 Tipos de soldadura según la posición de sus elementos. Izquierda: Soldadura a tope. Derecha: Soldadura de filete (Juvinall & Marshek, 2017).

El tamaño de la sección transversal de un cordón de soldadura se define por dos dimensiones esenciales a) las piernas o altura y b) la garganta. En la Figura 3.17 se observa la geometría del cordón de soldadura, donde h representa la altura y t la longitud del cordón de soldadura. Generalmente, se considera que el valor de h es el mismo para el eje vertical y horizontal y de esta forma se define que $t = \sqrt{2}h$. El tamaño de la garganta es de especial interés, debido a que los esfuerzos en de esta sección son los empleados en el diseño.

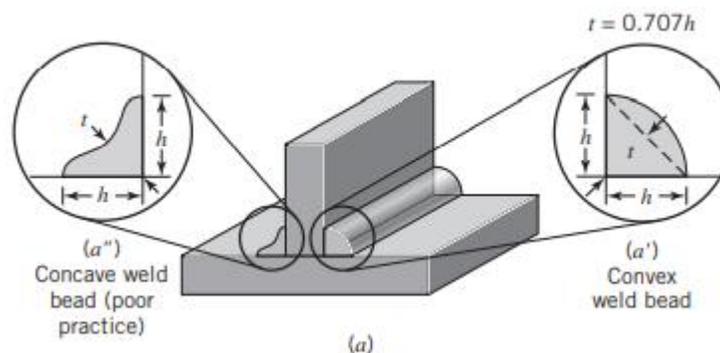


Figura 3.17 Geometría del cordón de soldadura (Juvinall & Marshek, 2017).

3.3.6.3 Esfuerzos en la soldadura.

Al calcular los esfuerzos en la soldadura, es importante observar que, con frecuencia, el material del electrodo es el material presente más fuerte. Como en la operación de soldadura se emplea calor, se experimentan cambios metalúrgicos en el metal de base, cerca de la soldadura. Asimismo, se introducen esfuerzos residuales a causa de la

sujeción o unión de las piezas o, algunas veces, debido al orden de la soldadura (Budynas & Keith Nisbett, 2012).

Según el Comité Europeo de Normalización en su norma, Eurocódigo EN 1993-1-8: 2002, existen dos métodos para el diseño de la resistencia en soldadura de filete, estos dos métodos son a) el direccional y b) simplificado. En el método direccional, las fuerzas transmitidas por una unidad de longitud de soldadura se solucionan en componentes paralelos y transversales al eje longitudinal de la soldadura, y normal y transversal al plano de la garganta de soldadura. En la Figura 3.18, se observan los esfuerzos en el cordón de soldadura, donde:

σ_{\perp} = esfuerzo normal perpendicular a la garganta (N/m).

$\sigma_{//}$ = esfuerzo normal paralelo al eje de la soldadura (N/m).

τ_{\perp} = esfuerzo cortante en el plano de la garganta, perpendicular al eje de la soldadura (N/m).

$\tau_{//}$ = esfuerzo cortante en el plano de la garganta, paralelo al eje de la soldadura (N/m).

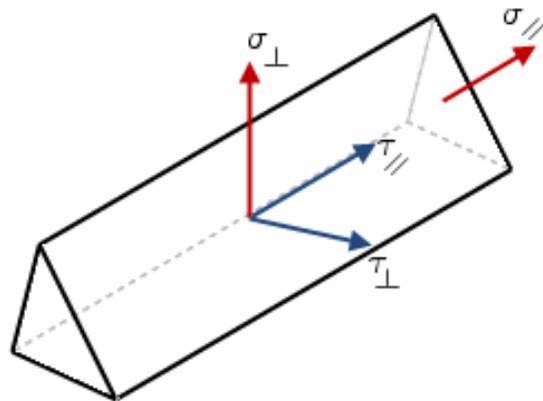


Figura 3.18 Esfuerzos en la soldadura de filete (Dassault Systèmes, 2021).

La resistencia del diseño de la soldadura será suficiente si se satisfacen las Ecuaciones 8 y 9:

$$[\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{//}^2)]^{0,5} \leq f_u/\gamma_{M2}\beta_w \quad (8)$$

y

$$\sigma_{\perp} \leq f_u/\gamma_{M2} \quad (9)$$

Donde:

f_u = límite de tracción máximo de la pieza unida más frágil (Pa).

γ_{M2} = factor de seguridad parcial según el Euro código EN 1993-1-8: 2002, tabla 4.1.

β_w = factor de correlación según el Euro código EN 1993-1-8: 2002, tabla 2.1.

Capítulo 4. Condiciones de operación y cálculo cargas de diseño

4.1 Generalidades

En el presente capítulo, se describen y analizan las condiciones meta oceánicas presentes en la zona de despliegue de la BOMM, con el objetivo de comprender las características de las fuerzas que inciden en la estructura. Cada plataforma debe ser diseñada para las apropiadas condiciones de carga que generen los efectos más severos en la estructura. De acuerdo con el American Petroleum Institute (2002), las condiciones de carga deben incluir combinaciones de los siguientes escenarios:

- Cargas ambientales de operación, combinadas con cargas máximas vivas y muertas en funcionamiento normal de la plataforma.
- Cargas ambientales de operación, combinadas con carga muerta máximas y cargas vivas mínimas en funcionamiento normal de la plataforma
- Ambos casos anteriores bajo condiciones ambientales extremas combinadas.

Se consideran como condiciones extremas cuando se debe limitar la operación de la estructura, debido a que se presentan condiciones de carga, regularmente ambientales, que superan los límites de diseño. Estas condiciones climáticas suelen presentarse durante tormentas y procesos accidentales como colisiones con embarcaciones.

En esta sección, se desarrollan los cálculos de las cargas de mayor importancia que inciden en la Boya Oceanográfica de Metrología Marina (BOMM), como esta plataforma no lleva a cabo operaciones mecánicas como taladro o carga de suministros, las cargas que predominan durante su funcionamiento son aquellas de origen ambiental: viento, corrientes y oleaje.

Para ello, se plantea inicialmente una metodología analítica con la cual se desarrolla el cálculo de fórmulas y modelos que describen el comportamiento de los fenómenos del viento, corrientes y oleaje de forma conjunta. Esto permite realizar una aproximación de las variables de interés en el cálculo de cada una de las cargas, para, luego, tomar estas como

datos de entrada en los métodos numéricos aplicados en la herramienta computacional de dinámica de fluidos (CFD), por medio de la extensión del software SolidWorks y validar los resultados obtenidos.

El simular el comportamiento de estos fluidos y su interacción con la plataforma provee resultados precisos y próximos a los esperados en la realidad, ya que somete a la estructura a la acción directa de estos fenómenos naturales. En estas simulaciones, se considera la geometría, interacciones entre el fluido y el sólido y distribuciones de fuerzas y presiones más específicas y particulares del caso de estudio.

4.1.1 Datos oceanográficos de la BOMM.

En el primer semestre del 2019, la BOMM fue desplegada en las cercanías de la ciudad de costera de Veracruz, específicamente en las coordenadas $95^{\circ}47'53.64''W$, $19^{\circ}8'51.84''N$. Al retirarse del océano para ser sometida a labores de mantenimiento, se identificó un agrietamiento en la estructura del candelabro de la boya. A pesar de que no se conoce el momento exacto en el que tuvo lugar esta falla en el material, CICESE cuenta con la base de datos donde se almacenan las mediciones tomadas por los equipos instalados en la BOMM, en la misma ventana de tiempo en la que se provocó la falla, entre el 23 de febrero y el 31 julio del 2019.



Figura 4.1 Zona de despliegue de la BOMM (*Windy: Wind Map & Weather Forecast, 2021*).

Debido al gran volumen de muestras, los datos de las variables se promedian cada 30 minutos y el registro se mantiene en netCFD (formulario de datos comunes en red). Este formato de archivo es empleado para almacenar datos científicos multidimensionales (variables) como la temperatura, la humedad, la presión, la velocidad del viento y la dirección del oleaje, durante los meses de funcionamiento.

Mediante el uso del software de manejo de datos Panoply⁴, es posible acceder a los valores de las mediciones almacenados, de forma que se tenga información detallada de parámetros de interés. Esto permite el uso de aproximaciones más confiables y exactas en el cálculo de cargas de diseño a las cuales se encontraba sometida la plataforma.

4.1.2 *Análisis cuasi estático.*

Los fenómenos ambientales como corriente, oleaje y viento son naturalmente dinámicos, ya que varían constantemente en el tiempo, sin embargo, para un diseño preliminar, pueden ser aplicadas de forma cuasi estática a la estructura junto con las cargas muertas (Chakrabarti, 2005). Para esto, se asume un largo periodo de acción de las cargas en relación con el periodo natural de la estructura y también que el modelo de estudio se mueve tan lentamente que es prácticamente estático. Esta última suposición implica que su posición no varía en el tiempo, se encuentra en equilibrio estático y no considera en su análisis la inercia y amortiguamiento que puede tener la plataforma.

En el caso de la BOMM, el análisis cuasi estático se traduce en considerar la plataforma como una estructura fija en lugar de una móvil como realmente sucede. Esta suposición se ve respaldada por el mecanismo de anclaje de peso muerto que se utiliza, el cual, al encontrarse en aguas profundas, no se somete a los efectos de viento ni oleaje.

⁴ <https://www.giss.nasa.gov/tools/panoply/>

Según Álvarez (2005), este procedimiento de cálculo se encuentra bien documentado y es aceptado por las sociedades de clasificación, su inconveniente radica en que necesita de información fiable, para obtener resultados válidos, particularmente de las condiciones climatológicas y ambientales de la localización de la instalación.

4.2 Viento

El viento, en conjunto con el oleaje, es uno de los fenómenos con mayor efecto e incidencia en proyectos de ingeniería marina, especialmente en aquellos de naturaleza flotante. Existen distintas casas clasificadoras las cuales extienden recomendaciones de diseño de estructuras navales, Por ejemplo, la normativa norteamericana American Petroleum Institute (2002) establece que, para la estimación de cargas generadas por el viento, se debe considerar dos casos principales de velocidad de viento: a) ráfagas de viento de menos de un minuto de duración y b) vientos sostenidos durante un minuto o más.

Además, la misma institución recalca que, para delimitar el estudio, se debe ajustar la elevación y tiempo promedio, usando factores de perfiles y ráfagas estandarizados. Las propiedades del viento varían notablemente con la altitud, como línea base se determina que la mínima elevación estándar utilizada para estudios eólicos es de diez metros. En el caso de la BOMM, su altura máxima sobre la superficie del mar ronda los siete metros por lo que se tendría que adaptar los datos de perfiles de viento estandarizados, por medio de la Ley Exponencial de Hellman (Rodríguez, 2015).

Sin embargo, debido a que en la estructura sobresale solo unos cuantos metros sobre la superficie del océano, se asumirá que las características del viento mantienen constantes. Adicionalmente, con las mediciones realizadas por el anemómetro y la veleta instalada en la BOMM, es posible conocer de primera mano el comportamiento del viento que incide en la plataforma.

Con el fin de determinar la fuerza ejercida por el viento, la normativa española R.O.M (Recomendaciones para Obras Marítimas), en su documento *ROM 0.4-95 Acciones*

Climáticas II: Viento, define carga de viento como aquella carga de naturaleza variable producida por la actuación directa del viento sobre una estructura. Se considera que esta carga, a pesar de poseer características variables y dinámicas en el tiempo, se puede analizar, en la mayor parte de los casos como una carga estática horizontal.

Esta consideración es posible gracias a una serie de simplificaciones, las cuales describen el comportamiento del viento en un tiempo y altura determinada, a las cuales se les conoce como “estados de viento”, que aproximan un valor representativo de la carga obtenida del viento asociado a una “velocidad de proyecto”. La expresión general para el cálculo acción del viento sobre cualquier estructura, según Chakrabarty (2005), viene dada por:

$$F_v = C_f \cdot \frac{\rho}{2} \cdot V_v^2 \cdot A_v \quad (10)$$

Donde:

F_v = Fuerza generada por el empuje del viento(N).

C_f = Coeficiente Eólico del sólido de interés.

ρ = Densidad del aire (kg/m³).

V_v = Velocidad de viento (m/s).

A_v = Área proyectada del elemento sobre un plano normal a la dirección de actuación del viento(m²).

4.2.1 Cálculo de los parámetros de la fuerza de arrastre debida al viento.

Los valores de densidad del aire son usualmente bien conocidos para magnitudes de temperatura, humedad y presión dadas, cuando existe una interfaz aire-agua como lo es la superficie libre del océano. Se conoce que, cuando se presentan condiciones turbulentas de oleaje, la densidad del aire puede aumentar hasta llegar a los 15 kg/m³, gracias a la alta concentración de partículas de agua en la atmósfera, a través del fenómeno conocido como rocío. Sin embargo, para usos generales, se puede tomar un valor simplificado de 1,225kg/m³ (Llorca et al., 1995).

En cuanto a la velocidad del viento, es posible analizar estadísticamente los datos obtenidos por la BOMM para definir valores representativos en la zona de despliegue.

Como la instrumentación en la plataforma realiza mediciones cada 30 minutos, no es posible conocer con precisión la duración de las ráfagas, por lo tanto, se tomará el valor máximo obtenido como el escenario de ráfagas de viento de menos de un minuto de duración y la condición de “velocidad de proyecto” como el valor máximo que predomina durante la operación. Para este estudio, será aquel que cubre el 90 % de las condiciones de viento posibles.

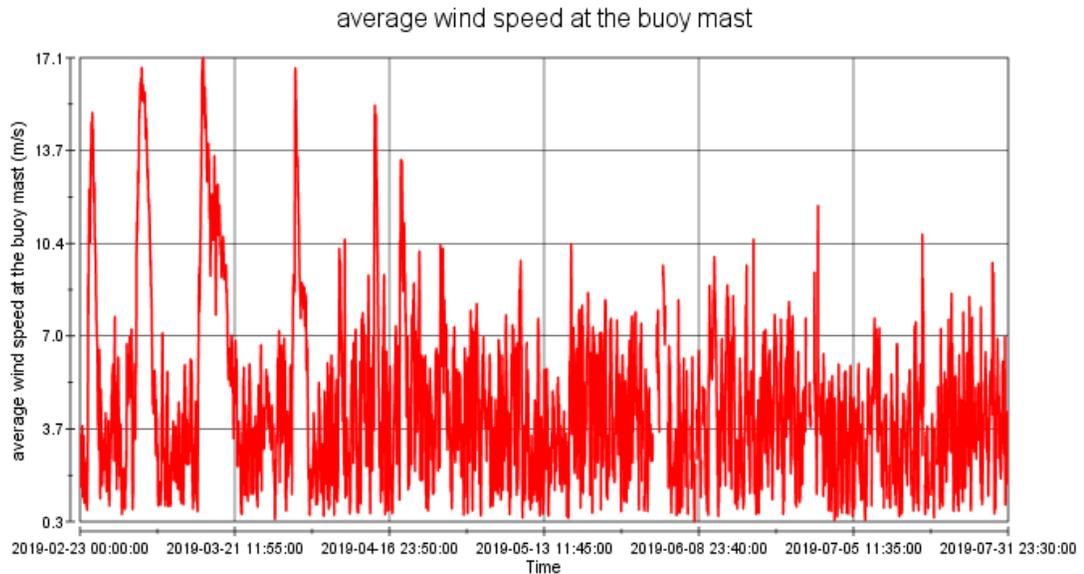


Figura 4.2 Velocidad de viento promedio tomados por la BOMM durante el primer semestre del año 2019 en el Golfo de México (CICESE, 2019).

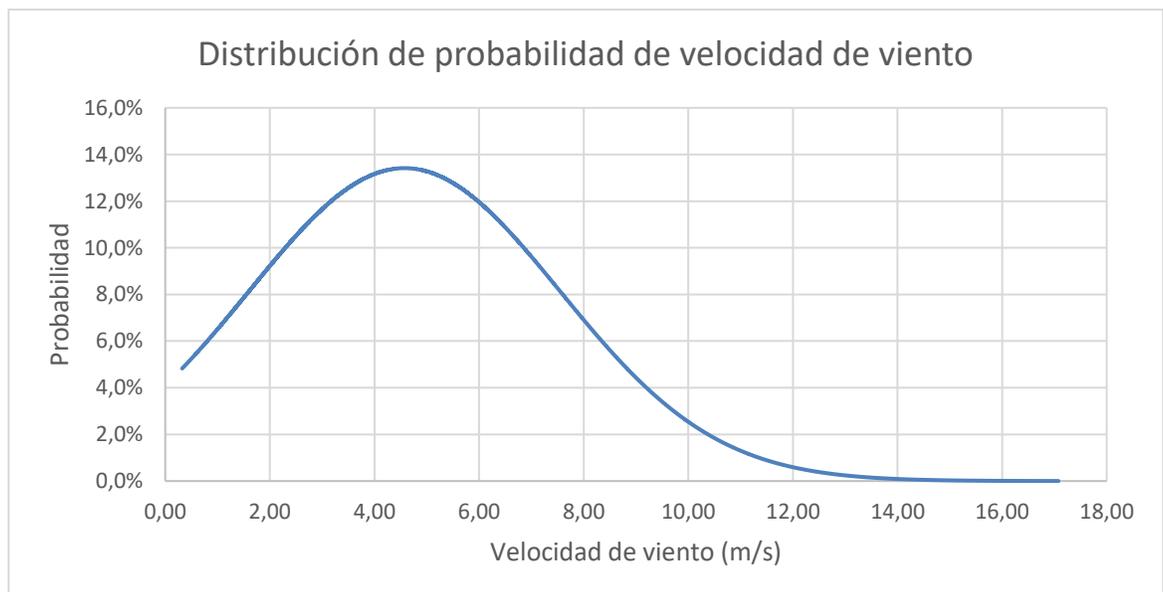


Figura 4.3 Distribución de probabilidad en las velocidades de viento medidas in situ.

Tabla 4.1 Valores representativos de velocidad de viento.

Estadística	V_v (m/s)	V_v (km/h)
Media aritmética	4,57	16,47
Velocidad de proyecto (90 %)	8,40	30,24
Velocidad máxima	17,08	61,48

Para el cálculo del área, se tomará toda la sección del mástil compuesta por tres cilindros esbeltos con su respectiva base, y la caja, conformada por cinco secciones cilíndricas verticales y de mayor tamaño. Estos elementos sobresalen de la superficie marina y tienen una geometría cilíndrica lo que los hace radialmente simétricos respecto eje vertical. Como consecuencia, el área proyectada sobre el plano normal a la acción del viento siempre toma una forma rectangular, sin importar la dirección del flujo, por lo que su magnitud depende exclusivamente de su diámetro externo y de su altura.



Figura 4.4 Caja y mástil de la BOMM (CICESE, 2019).

En el caso de la base pentagonal del mástil, también cuenta con cierta simetría radial y se puede asumir que la mitad de su área será la impactada por el viento. El detalle de las dimensiones y área proyectada por cada elemento puede observarse en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2 Área proyectada de mástil y caja bajo condiciones de viento.

Elemento	Diámetro(m)	Altura(m)	Área unitaria proyectada (m²)	Área total proyectada (m²)
Caja	0,219	3,450	0,755	3,778

Mástil	0,051	3,987	0,203	0,610
Base	1,111	0,092	0,102	0,256

Por último, el coeficiente eólico de fuerza varía en función de los siguientes parámetros: a) la rugosidad de la superficie, b) el comportamiento del flujo alrededor de la estructura, c) la geometría de la estructura y d) dirección de actuación del viento. Al igual que en el cálculo del área proyectada, al ser elementos radialmente simétricos, la geometría de la estructura no varía alrededor del eje vertical, por lo tanto, el coeficiente de fuerza eólico de la BOMM no se ve afectado por los cambios de dirección del viento.

Para estimar C_f con mayor precisión, se hace uso del parámetro $\bar{V}_v \cdot b$, el cual se deriva de la formulación del número de Reynolds. Este parámetro es un indicador de las características del flujo del aire a través de la estructura (Llorca et al., 1995). Utilizando este valor en conjunto con las características geométricas de la plataforma como datos de entrada a las tablas de diferentes normas, es posible determinar el coeficiente eólico.

TABLA 3.2.2.3.3. COEFICIENTES EOLICOS DE FUERZA, C_f , PARA DIVERSAS CONSTRUCCIONES MACIZAS PRISMATICAS DE SECCION UNIFORME Y EJE VERTICAL

PLANTA	$\bar{V}_v \cdot b^{(3)}$ (m ² /s)	ESBELTEZ $\lambda = h/b$ (2)						
		$\leq 0,5$	1	2	5	10	20	∞
	CUALQUIER SUPERFICIE <6							
	SUPERFICIE RUGOSA ≥ 6	0,70	0,70	0,70	0,8	0,9	1,0	1,2
	SUPERFICIE LISA ≥ 6	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6

Figura 4.5 C_f para elementos prismáticos uniformes con eje vertical (Llorca et al., 1995).

Una vez definidos todos los parámetros, es posible realizar el cálculo de la fuerza ejercida en la plataforma por el viento.

Tabla 4.3 Fuerza aplicada por el viento sobre la BOMM en condiciones extremas y de operación.

Ensamble	Esbeltez	$\bar{V}_v b$	C_f	Área proyectada(m ²)	Fuerza a 8 m/s (N)	Fuerza a 17 m/s (N)
Caja	15,75	1,84	1	3,78	163,27	675,02
Mástil	78,18	0,43	1,2	0,61	31,64	130,80
Base	0,08	0,25	0,7	0,26	7,73	31,97
Total					202,64	837,78

4.2.2 Validación.

Con la intención de respaldar los resultados obtenidos por medio del método analítico, se realiza un estudio mediante la herramienta FlowSimulation de SolidWorks, con las mismas condiciones y parámetros que los utilizados en el cálculo anterior.

Se utiliza un volumen de control que incluya la sección expuesta al viento, el cual tiene una dirección constante en -Z. Se ejecuta un estudio utilizando condiciones nominales de viento y un segundo estudio con la velocidad máxima de viento. Como resultado de los estudios, se obtienen dos resultados relevantes.

El primero es la distribución de fuerza sobre la estructura, esta se puede observar en la Figura 4.6, donde la indican las zonas con mayor incidencia del viento por metro cuadrado de superficie. Como este resultado está dado por la relación de fuerza entre superficie, se hace uso de las unidades de presión Pascales para representar la magnitud de la presión de viento.

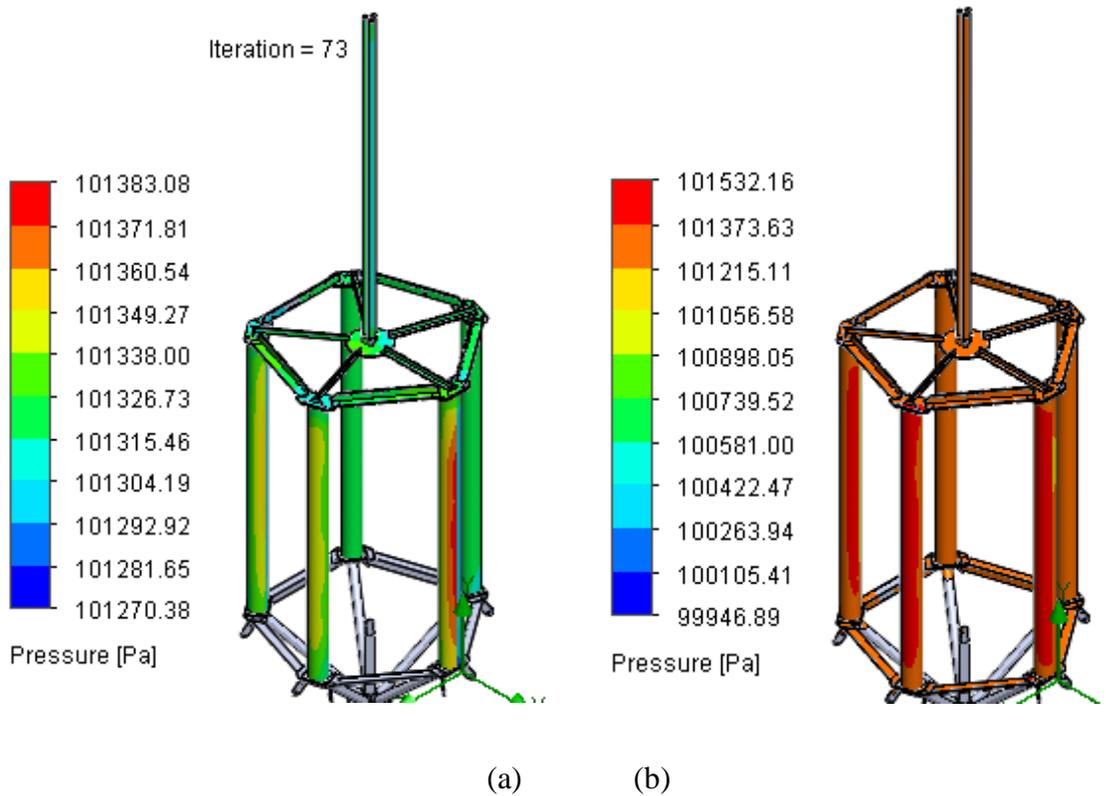


Figura 4.6 Presión sobre la superficie de la BOMM para a) 8,4 m/s b) 17,08 m/s (Elaboración propia).

El segundo resultado de valor es la fuerza total que ejerce el fenómeno del viento sobre la estructura, con este valor podemos determinar la desviación existente entre el método analítico y las simulaciones numéricas. El valor obtenido de fuerza de viento total en la estructura su comparación con el método analítico se observa en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4 Comparación de resultados de fuerza global obtenidos.

Método	Fuerza a 8 m/s (N)	Fuerza a 17 m/s (N)
Analítico	202,64	837,78
Simulación	186,59	773,55
% Error	7,90	7,66

4.3 Corrientes

Según American Petroleum Institute (2002), las corrientes marinas son un importante factor de diseño en plataformas marinas, ya que afectan no solo la orientación del dispositivo, sino también que genera fuerzas en este. Los tipos de corrientes marinas

más comunes son las provocadas por mareas, las circulatorias y las asociadas a tormentas. Para simplificar el fenómeno, se aplicarán las siguientes hipótesis al cálculo de fuerza de corriente:

1. La velocidad de la corriente no varía en el tiempo.
2. El perfil de velocidad será constante en toda la profundidad estudiada.
3. La dirección en la que la corriente incide sobre la plataforma será la misma que la del viento y el oleaje.
4. Por la metodología cuasi estática se desprecia la velocidad y aceleración de la plataforma.

De acuerdo con Chakrabarti (2005), para una estructura flotante, la fuerza a raíz de las corrientes marinas cuando actúan de manera aislada sobre una plataforma marina se determina por medio de la expresión (Chakrabarti, 2005):

$$F_c = \frac{1}{2} C_D \rho_s V_c^2 A_c \quad (11)$$

Donde:

F_c = Fuerza de la corriente (N).

C_D = Coeficiente de arrastre.

A_c = Área de la superficie que se opone a la corriente (m²).

V_c = Velocidad de la corriente (m/s).

ρ_s = Densidad del agua (kg/m³).

Según las mediciones *in situ* realizadas por la BOMM a lo largo del 2019, se puede observar la evolución en la densidad del agua del mar, este parámetro tiene una variación leve desde que inicio la toma de datos alrededor del mes de marzo. Al tomar el valor promedio, se obtiene una densidad de 1022,59 kg/m³, por lo que este será la cantidad representativa para utilizar.

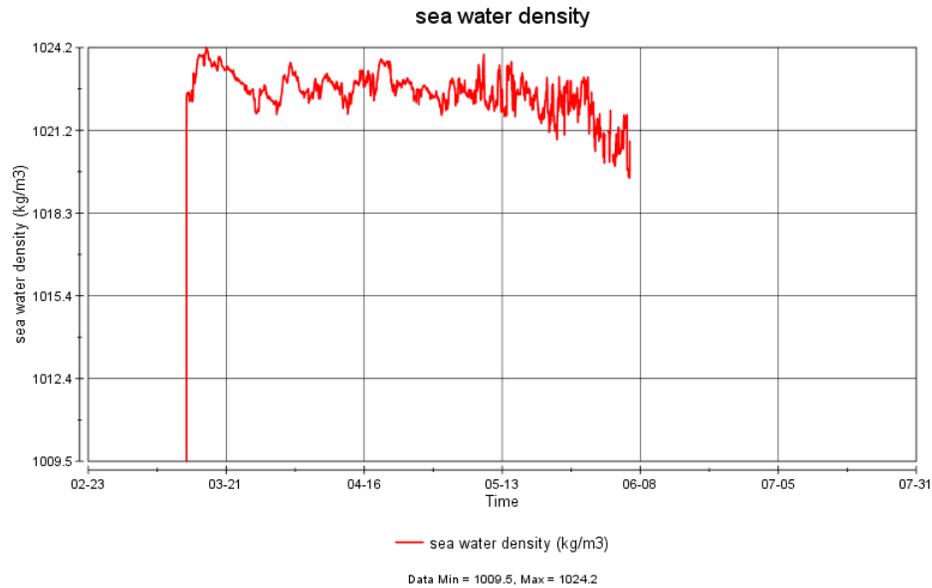


Figura 4.7 Densidad de agua marina medida por la BOMM durante el primer semestre del año 2019 en el Golfo de México (CICESE, 2019).

Para el cálculo del área transversal, se tomará la estructura inferior de la BOMM, la cual consta de un pie largo y esbelto en forma de cilindro y el candelabro que está compuesto por cinco secciones cilíndricas de diámetros idénticos. Además, se consideran los cinco encapsulado de equipo electrónico que se encuentran en la base del pie y los cinco flotadores ubicados en la sección superior del candelabro.



Figura 4.8 Estructura inferior y candelabro de la BOMM (CICESE, 2019).

Al igual que con el viento, en los flotadores y en los cilindros de electrónica, se asumirá que el flujo solo impacta la mitad del área proyectada por ellos, esto debido a que la otra mitad de su superficie se encuentra resguardada por elementos equivalentes, en los cuales la corriente ya ha incidido. Este efecto de escudo mitiga la velocidad del viento y, a la vez, la fuerza total resultante sobre la plataforma. En la Tabla 4.5, se especifica el área proyectada por cada elemento y la suma de las áreas en cada sección de la boya.

Tabla 4.5 Área proyectada de estructura inferior y candelabro.

Elemento	Diámetro(m)	Altura(m)	Área unitaria proyectada (m ²)	Área total proyectada (m ²)
Cilindros electrónica	0,21	0,86	0,18	0,46
Pie inferior	0,33	4,32	1,43	1,43
Candelabro	0,10	0,91	0,09	0,46
Flotadores	0,36	1,12	0,41	1,02
Total				3,36

Al momento de realizar este estudio, la información de velocidad de corrientes adquirida por la instrumentación en la plataforma no había sido calculada. Debido a esto, para los fines de este trabajo, se hace uso de la literatura y de sistemas de pronóstico meteorológico para estimar el valor máximo y de operación de velocidad de corrientes en la zona de despliegue. A partir de información recopilada por medio de sistemas de boyas lagrangianas distribuidas en la bahía de Campeche, en la cercanía de las costas de Veracruz, se determinó que las velocidades superficiales de las corrientes marinas se encuentran en el rango de 10 a 30 cm/s (Vazquez et al., 2005).

Adicionalmente, se hace uso de la información facilitada por la plataforma de pronóstico meteorológico “Windy© Colaboradores de OpenStreetMap”⁵ y del “Pronóstico Oceanográfico del Golfo de México: Corrientes, salinidad, temperatura y nivel del mar” realizado por División de Oceanografía Física del CICESE⁶, con lo cual se estima que la velocidad de corriente promedio ronda los 18 cm/s.

⁵ <https://www.windy.com/?19.968,-93.669,7,m:ec6advU>

⁶ <https://sisprogom.cicese.mx/>

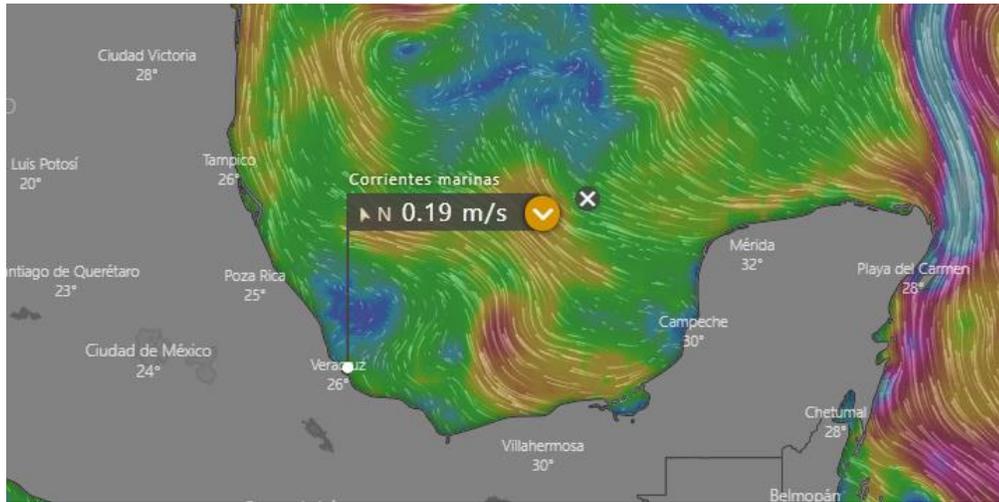


Figura 4.9 Velocidad de corriente superficial promedio en el Golfo de México en el mes de mayo del 2021. (Windy: *Wind Map & Weather Forecast*, 2021)

El coeficiente de arrastre es un valor empírico que cuantifica la resistencia al flujo que tendrá la estructura, es obtenido a través de pruebas físicas de laboratorio, en las cuales ha demostrado ser una función de tres parámetros: a) el número de Reynolds, b) la geometría de la estructura en un plano normal a la dirección de flujo y c) de la rugosidad superficial relativa. El número de Reynolds es utilizado en mecánica de fluidos para caracterizar el grado de desorden en el movimiento de un flujo, clasificándolo en turbulento o laminar. La siguiente Figura 4.10 describe el comportamiento del coeficiente de arrastre con la variación del número de Reynolds en estructuras cilíndricas lisas.

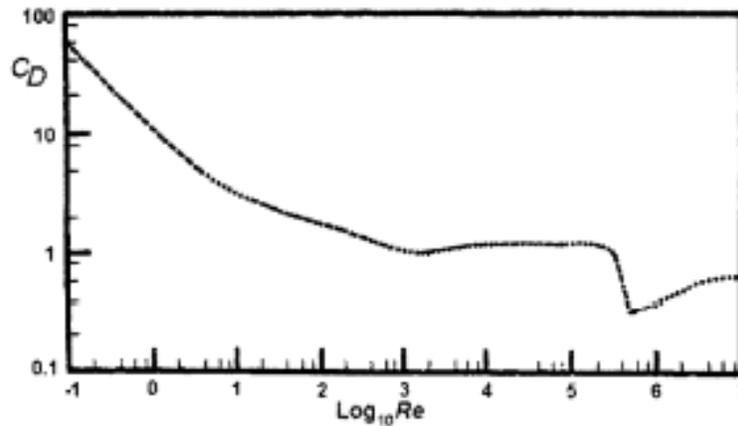


Figura 4.10 Coeficiente de arrastre para una superficie cilíndrica lisa en flujo constante (Chakrabarti, 2005).

El número de Reynolds se puede calcular por medio de la siguiente formulación(Cengel & Ghajar, 2011) :

$$Re = \frac{\text{Fuerzas de inercia}}{\text{Fuerzas viscosas}} = \frac{VD_H}{\nu} = \frac{\rho VD_H}{\mu} \quad (12)$$

Donde:

V=Velocidad de corriente (m/s).

D_H=Diámetro hidráulico, en caso de cilindros es equivalente al diámetro (m).

ρ= Densidad del fluido (1022,59 kg/m³).

μ= Viscosidad dinámica, para el caso del agua a 20 °C toma un valor de 0,0010 kg/ms.

ν: Viscosidad cinemática (m²/s).

Tabla 4.6 Coeficiente de arrastre para los elementos de la BOMM.

Elemento	Diámetro(m)	ν (m ² /s)	Re a 0,18 m/s	Re a 0,3 m/s	C _D
Cilindros electrónica	0,211	9,77E-07	3,88E+04	6,47E+04	1,05

Pie inferior	0,330	9,77E-07	6,07E+04	1,01E+05	1,05
Candelabro	0,102	9,77E-07	1,87E+04	3,11E+04	1,05
Flotadores	0,362	9,77E-07	6,66E+04	1,11E+05	1,05

Al observar la curva, es posible determinar que el coeficiente de arrastre adquiere valores prácticamente constantes cuando $10^3 \leq Re \leq 10^5$. Al sobrepasar este punto, hay una caída significativa en C_D , debido a que se entra en un rango de número de Reynolds se presenta un régimen de flujo crítico en la transición de laminar a turbulento.

Dadas estas condiciones de análisis, las casas clasificadoras API en su metodología de análisis se cargan sección 2.3 y DNV sección 6.7.1.5, plantean el uso de valores próximos a 1,05 para el coeficiente de arrastre en una superficie rugosa. En el presente trabajo, se siguió esta recomendación para todos los elementos.

Tabla 4.7 Fuerzas inducidas en la BOMM generadas por corrientes estacionarias.

Elemento	Por elemento		Total	
	Fuerza a 0,17 m/s (N)	Fuerza a 0,3 m/s (N)	Fuerza a 0,17 m/s (N)	Fuerza a 0,3 m/s (N)
Cilindros electrónica	3,17	8,80	7,92	22,01
Pie inferior	24,79	68,85	24,79	68,85
Candelabro	1,61	4,48	8,06	22,40
Flotadores	7,08	19,66	17,69	49,15
Suma			58,47	162,41

Sin embargo, se debe tener presente que el efecto de las corrientes generalmente actúa en conjunto con el oleaje, cuando esto sucede de forma alineada, las corrientes aumentan el periodo aparente de la ola de diseño, lo que se conoce como efecto Doppler. En estos casos, es posible describir el comportamiento de ambos fenómenos actuando en forma conjunta mediante la ecuación de Morison, la cual se detallará en la sección 4.4.

4.4 Oleaje

El oleaje comprende una variable compleja para la determinación de las fuerzas ejercidas sobre cualquier estructura en un ambiente marino. Con el objetivo de abordar el problema de una estructura móvil sometida a las olas una forma práctica, es conveniente

realizar la hipótesis de que la velocidad y aceleración de la oscilación de la BOMM serán despreciables, de tal forma que el modelo de análisis considerará que la estructura se encuentra fija en una posición durante todo el tiempo de análisis.

Para el análisis del oleaje, se utilizará la metodología propuesta por API, en la cual se toma en consideración la posible superposición en el actuar de las olas y corrientes. En estos casos, la corriente, con un efecto más intuitivo en la estructura, se suma vectorialmente a la velocidad de partícula de las olas, la cual tiene un cálculo más complejo. Finalmente, ser analizado como uno solo fenómeno en conjunto por medio de la ecuación de Morison.

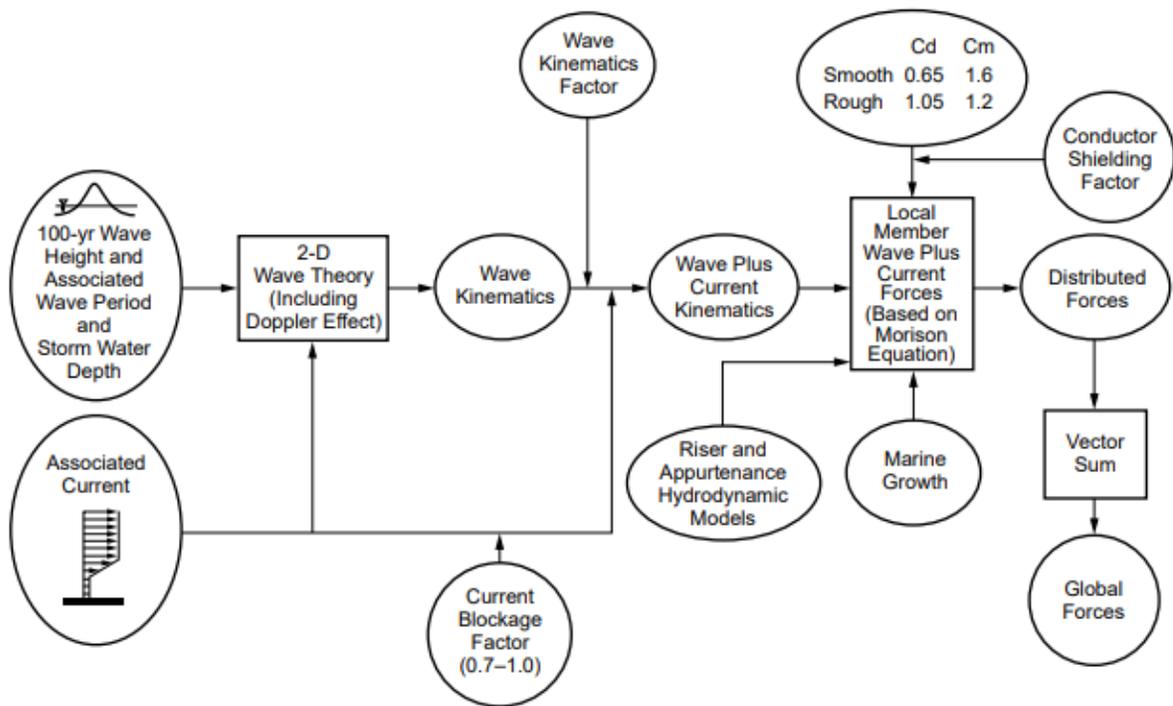


Figura 4.11 Procedimiento de cálculo para fuerzas de oleaje y corriente en análisis estáticos (American Petroleum Institute, 2002).

4.4.1 Teoría del oleaje.

Generalmente, las olas del océano se pueden considerar como aleatorias, sin embargo, las olas de mayor tamaño en una serie de oleaje pueden presentar patrones de forma regulares, la descripción de estas olas regulares por medio de una teoría determinística da como resultado las teorías del oleaje.

Para poder determinar las características hidrodinámicas de las olas, es necesario seleccionar una teoría del oleaje adecuada que defina su comportamiento. A su vez, tres parámetros fundamentales son necesarios para describir cualquier teoría del oleaje. Estos son:

H= Altura de ola (m)

T= Periodo de ola aparente asociado a la ola (s). Considerando el efecto Doppler.

d= profundidad del agua (m). Para definir la teoría, el fondo marino es considerado plano y horizontal.

Se hace uso de los datos recopilados por la BOMM para definir el periodo de la ola, al ser tomados in situ y considerar que la plataforma permanece estática, el valor obtenido de periodo se toma. a su vez. como el de periodo aparente. con lo cual se obtiene un valor máximo de 15,3 s.

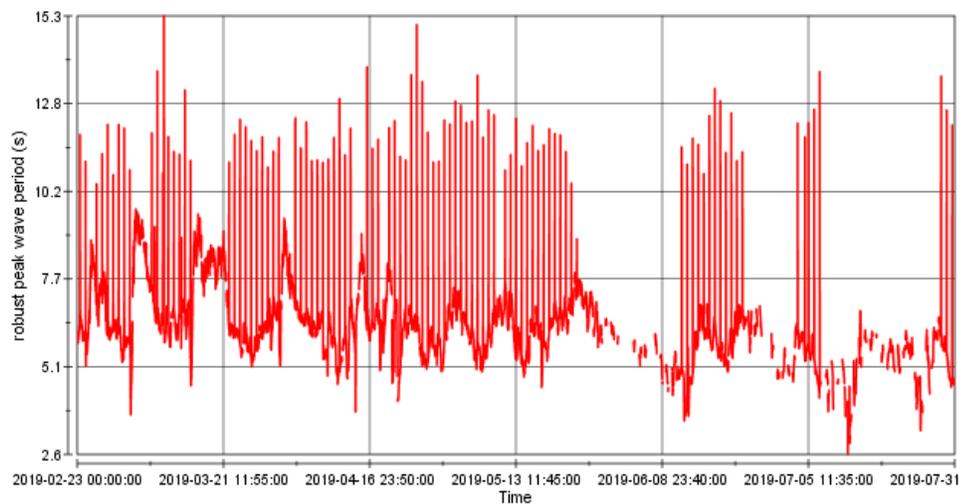


Figura 4.12 Registro de periodos de ola tomados por la BOMM (CICESE, 2019).

4.4.1.1 Ola de diseño.

Para el diseño de estructuras *offshore*, donde los efectos de carga pueden ser considerados de naturaleza cuasi estática, es común que se lleve a cabo la revisión del diseño por medio de la llamada ola de 100 años. Lo que se interpreta como aquella ola con

altura que supera la altura H en promedio una única vez cada 100 años (Chakrabarti, 2005). Aunque suele determinarse por medio de datos relevantes de la ubicación, las guías de diseño extienden aproximaciones de este cálculo, en caso de que no se cuente con información suficiente del sitio, por ejemplo:

$$H^{(100)} = 1,9 H_s \quad (13)$$

Donde:

H_s = altura significativa de ola (m). Definido como cuatro veces la desviación estándar de la superficie.

$H^{(100)}$ = altura de ola de cien años (m).

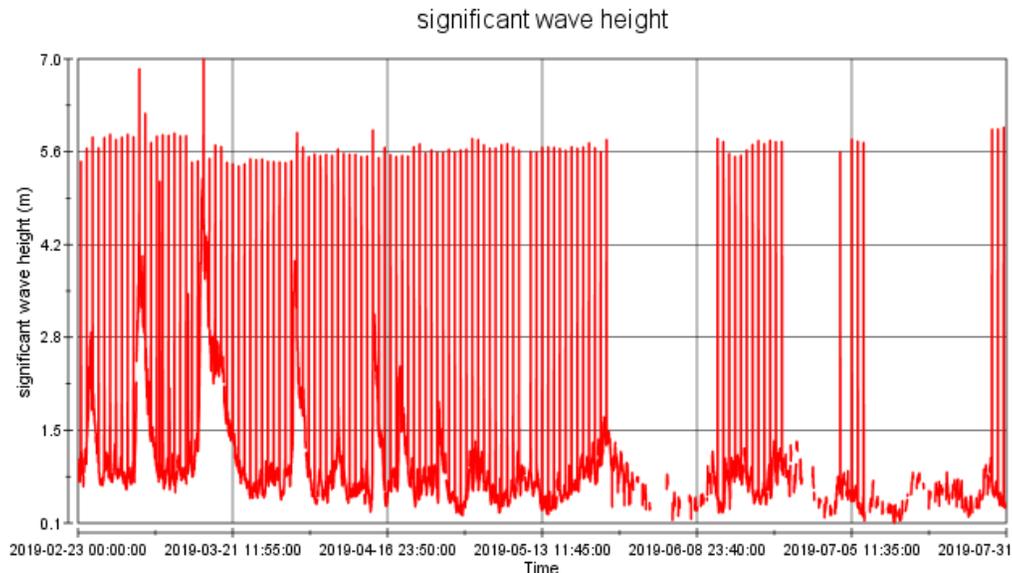


Figura 4.13 Registro de altura de ola significativa tomados por la BOMM (CICESE, 2019).

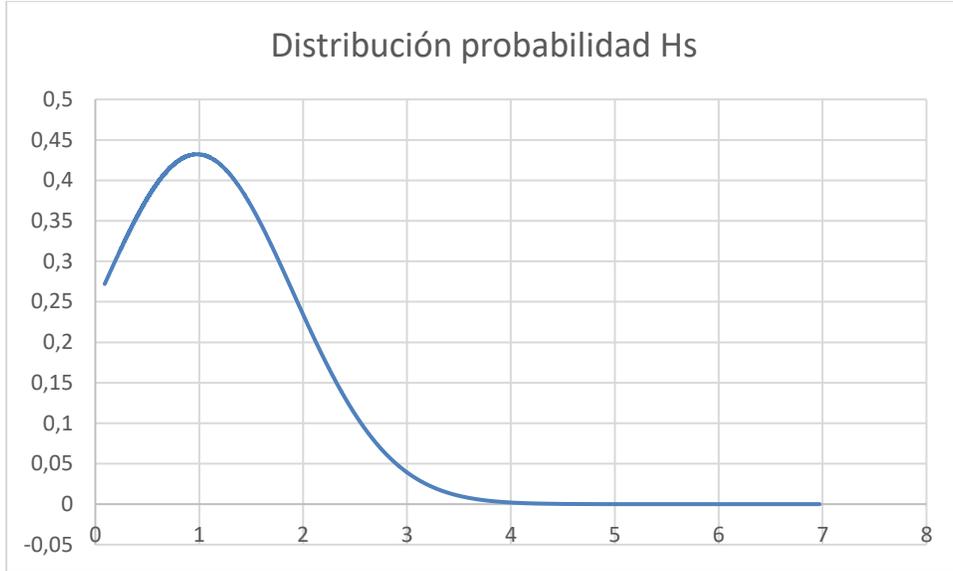


Figura 4.14 Distribución de probabilidad de altura significativa (Elaboración propia).

Tabla 4.8 Estadísticas de la altura de ola significativa tomadas por la BOMM.

Estadística	H_s (m)	H^{100} (m)
Promedio	0,98	
Desv. Estándar	0,92	
H(90 %)	2,16	4,11
Hmáx	6,97	13,25

American Petroleum Institute (2002) utiliza la Figura 4.15 para realizar la selección de teoría de oleaje a utilizar mediante el uso de los parámetros fundamentales de la ola de diseño. Debido a que no se tiene información sobre el periodo asociado a la ola con periodo de retorno de 100 años, se toman los valores máximos de altura significativa de ola y de periodo aparente, con lo cual se tiene:

$$\frac{H}{g T_{app}^2} = \frac{6,97m}{9,81 \frac{m}{s^2} * (15,3 s)^2} = 0,003 \quad (14)$$

$$\frac{d}{g T_{app}^2} = \frac{30 m}{9,81 \frac{m}{s^2} * (15,3 s)^2} = 0,013 \quad (15)$$

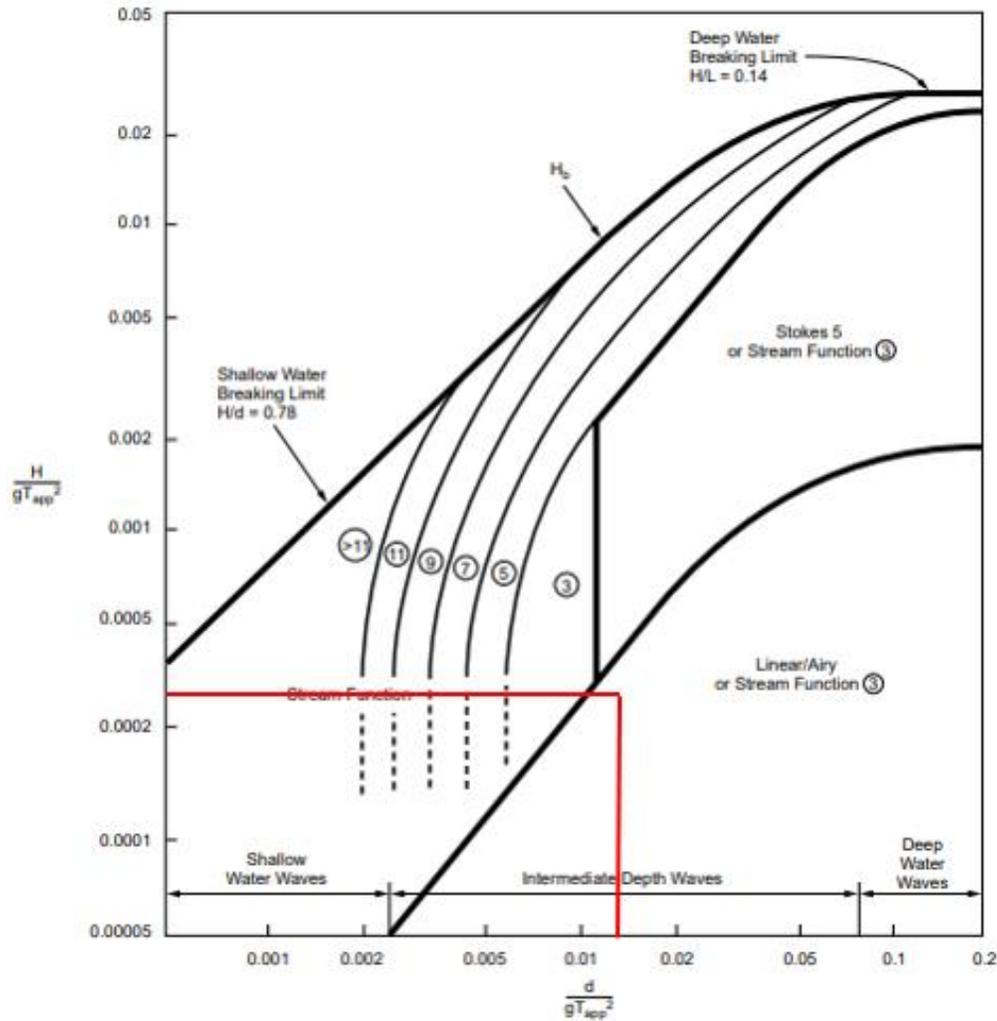


Figura 4.15 Regiones de aplicación de teoría de oleaje (American Petroleum Institute, 2002).

4.4.2 Elección de procedimiento de cálculo.

Con el objetivo de determinar una metodología de análisis adecuada para estructuras *offshore*, se debe realizar una distinción entre estructuras grandes y estructuras pequeñas, ya en esta distinción se encuentra implícita la importancia de los efectos de difracción, inercia y arrastre que afectan la estructura. Es ampliamente aceptado que al cuando el parámetro de difracción $\pi D/L$ es mayor que 0.5, donde D es la dimensión significativa de la estructura y L es la longitud de la onda de la ola de cálculo, la estructura es considerada grande (Rodríguez, 2015). Se asume que la BOMM es una estructura pequeña, debido a sus dimensiones relativamente pequeñas en comparación con las longitudes de onda comunes.

La Figura 4.16 muestra los límites de aplicación de los fenómenos de arrastre, inercia y difracción para estructuras grandes y pequeñas. Para poder utilizar esta figura, es necesario definir una dimensión significativa en el plano normal a la ola incidente. Para el caso de la BOMM, no es sencillo estimar la dimensión significativa, debido a que se trata de una plataforma compuesta de varios sólidos con distintos diámetros. Por lo que, para definir en qué región se debe encontrar el análisis, se toma primero la altura de la ola de diseño (H), 13,25 m, y con este se realizan estimaciones del diámetro según las regiones de análisis.

Como se puede observar en la Figura 4.16, el límite que divide la región IV y V se da cuando la relación H/D es equivalente a 30. Con lo cual, se tiene que, si el diámetro significativo es menor a 0,44 m, se encuentra en la región IV y experimentará grandes fuerzas de arrastre, si, por el contrario, el diámetro significativo se encuentra entre 0,44 m y 8,83 m, se considera que la región V que contempla tanto efectos de arrastre como de inercia, es la más adecuada para el cálculo.

En la BOMM, la sección inferior presenta un diámetro de 0,33 m. Sin embargo, debido a la geometría pentagonal de las secciones superiores, el diámetro total de la estructura aumenta, tomando un valor máximo de 2,3 m si contemplamos a los flotadores, por lo tanto, se asume que las dimensiones representativas de la BOMM son mayores a 0,44 m y el análisis se lleva a cabo en la región V. Este resultado permite utilizar la ecuación de Morison, ya que no existe difracción y tanto la inercia como el arrastre se deben considerar.

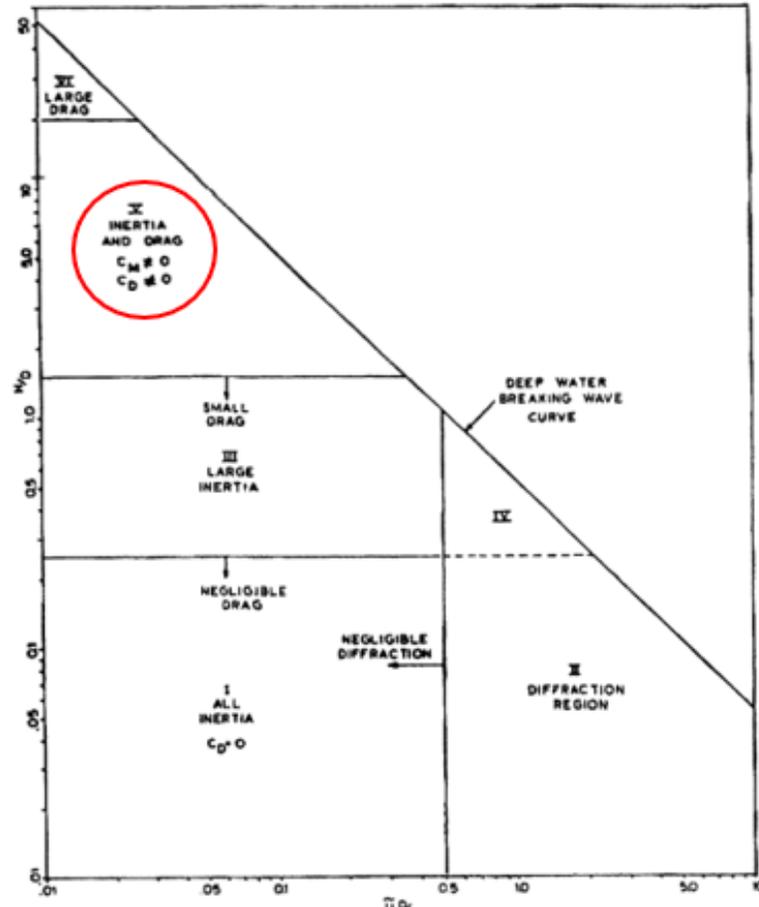


Figura 4.16 Límites de aplicación de difracción para estructuras grandes y pequeñas (Chakrabarti, 2005).

4.4.2.1 Ecuación de Morison.

Bajo la presencia de corrientes, la velocidad total de la partícula de agua en la ola se ve modificada. En el caso en el que estos dos fenómenos se encuentren alineados, ambas magnitudes de velocidad se suman, lo que genera un efecto en conjunto (Chakrabarti, 2005). Además de esta adición, el oleaje también tiene un efecto inercial sobre la estructura, lo que le añade una segunda componente al modelo, el cual se describe por medio de la Ecuación 14

$$f = \rho C_M \frac{\pi D^2}{4} a + \frac{1}{2} \rho C_D |u + U|(u + U) \quad (16)$$

Donde:

f = fuerza por unidad de altura (N/m).

- U=velocidad de corriente (m/s).
- u=velocidad de la partícula de la ola (m/s).
- a=aceleración de la partícula de la ola (m/s²).
- c_D=Coeficiente adimensional de arrastre.
- c_M=Coeficiente adimensional de inercia.

Para determinar los parámetros hidrodinámicos de las olas, es necesario definir una teoría de oleaje que describa apropiadamente el comportamiento del fenómeno.

4.4.3 Hidrodinámica de la partícula.

Utilizando la teoría de oleaje lineal, para aguas intermedias, es posible obtener otras cantidades importantes para describir el comportamiento de la velocidad y aceleración de la ola. Estas son cantidades son denotadas a través de las ecuaciones:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi}{15,3 \text{ s}} = 0,41 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \quad (17)$$

y

$$\omega^2 = gk \tanh(kd) \gg k = 0,026 \quad (18)$$

Donde:

- ω= Frecuencia de oscilación de la ola (rad/s).
- k= Número de ola.

Una vez determinados estas cantidades, es posible determinar la velocidad de la partícula, la cual es dependiente de su posición y del tiempo (ver Ecuación 17).

$$u(x, y, t) = \frac{gkH \cosh k(y + d)}{2\omega \cosh kd} \cos[k(x - ct)] \quad (19)$$

Donde:

- x= Posición en el eje horizontal.
- y= Altura o posición en el eje vertical sobre el nivel medio del agua.
- t= Tiempo
- c= Celeridad de grupo de olas.

Para nuestro caso de análisis, es conveniente definir $x=0$ y $t=0$ para el punto de contacto con la plataforma, de esta forma, el término trigonométrico toma el valor de la unidad, además si realizamos la misma equivalencia para el valor de altura $y=0$, la velocidad horizontal de partícula en medio de la boya se representa como:

$$u = \frac{gkH}{2\omega} \cos[k(x - ct)] = \frac{9,8 \text{ m/s}^2 \cdot 0,026 \cdot 6,97\text{m}}{2 \cdot 0,41 \text{ rad/s}} \cdot 1 = 2,17 \text{ m/s} \quad (20)$$

Ahora, para el cálculo de la aceleración de la partícula, según la teoría lineal de oleaje, se tiene:

$$u = \frac{gkH \cdot \cosh k(y + d)}{2\omega \cdot \cosh kd} \sin[k(x - ct)] \quad (21)$$

Sin embargo, una vez calculada, la velocidad Chakrabarti sugiere una simplificación para el cálculo de la aceleración haciendo uso de la velocidad de la partícula ya determinada, la cual viene dada por la siguiente fórmula

$$a = \frac{2\pi u}{T} = \frac{2\pi \cdot 2,17 \text{ m/s}}{15,3 \text{ s}} = 1,36 \text{ m/s}^2 \quad (22)$$

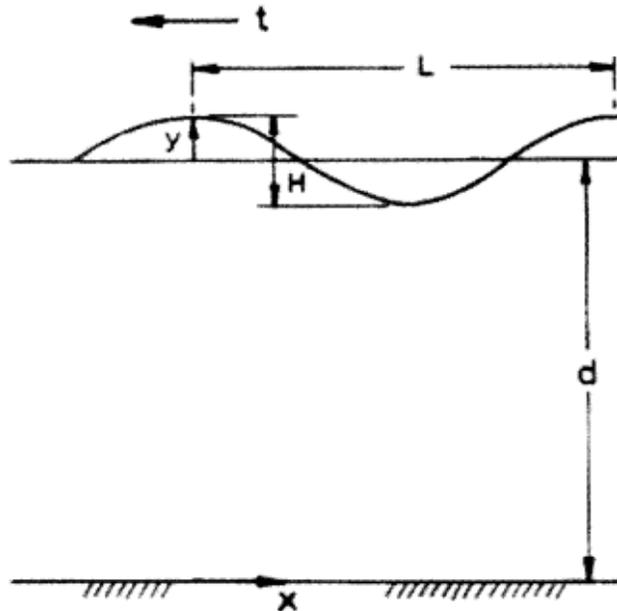


Figura 4.17 Movimiento bidimensional de la ola según la teoría lineal de oleaje (Chakrabarti, 2005).

4.4.4 Coeficientes hidrodinámicos.

En el ambiente oceánico, las fuerzas predichas por la ecuación de Morison son aproximaciones utilizadas en la ingeniería. Esta aproximación se puede comparar con las fuerzas de arrastre e inercia reales al contemplar en el cálculo los coeficientes de arrastre e inercia. No obstante, los valores que mejor se ajustan de C_D y C_m varían conforme se da el ciclo de la ola, ya que depende de magnitudes como la velocidad de la partícula.

La guía de diseño de American Petroleum Institute (2002) da una recomendación global siempre que se cumpla la relación establecida en la Ecuación 21. Para el caso de las condiciones hidrodinámicas, a la cual se encuentra sometida la BOMM, la Ecuación 22 define que siempre que el diámetro de la estructura no supera los 1,167 m, se pueden utilizar las aproximaciones establecidas por API, para el caso de una superficie rugosa.

$$\frac{uT_{app}}{D} > 30 \quad (23)$$

$$\frac{2,17m/s \ 15,3 s}{30} > D \gg 1,167m > D \quad (24)$$

Tabla 4.9 Recomendaciones de C_m y C_d en condiciones típicas de diseño
(American Petroleum Institute, 2002).

Coefficiente	Superficie rugosa	Superficie lisa
Cd	1,05	0,65
Cm	1,2	1,6

4.4.5 Fuerza por efecto simultáneo de oleaje y corrientes.

Con todos los parámetros del entorno definidos, se debe determinar que componentes de la boya se verán impactados por el actuar en conjunto del oleaje y corrientes. Para definir estos elementos, se utiliza la altura significativa que considere el 90 % de los escenarios probables de oleaje, la cual tiene un valor de 2,16 m. Además, se asume que, independientemente del momento del ciclo del oleaje, el nivel del agua siempre

se encontrará justo sobre los flotadores, por lo tanto, las fuerzas por oleaje tendrán efecto 2,16 m por debajo de la línea de los flotadores. Esta altura contempla la totalidad del candelabro y 1,12 m de la sección superior del pie de la plataforma.

Tabla 4.10 Resumen de parámetros en la ecuación de Morison
(Elaboración propia).

Símbolo	Parámetro	Magnitud
u	Velocidad de oleaje	2,17 m/s
a	Aceleración de oleaje	1,36 m/s ²
U	Velocidad de corriente	0,18 m/s
Cd	Coefficiente de arrastre	1,05
Cm	Coefficiente de inercia	1,2

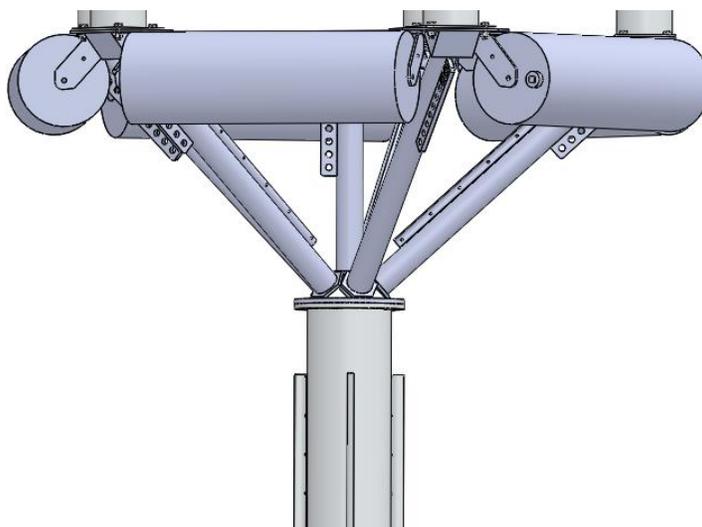


Figura 4.18 Sección de la BOMM expuesta a la acción del oleaje superficial
(Elaboración propia).

En la Figura 4.18, se puede observar el modelado de la superficie de la BOMM que se ve expuesta al efecto del oleaje superficial. A partir de esta suposición, es posible calcular el área proyectada de la plataforma, último parámetro requerido para la determinación de las fuerzas de arrastre e inercia. Los resultados de la ecuación de Morison se encuentran resumidos en la Tabla 4.11.

Tabla 4.11 Fuerza de arrastre e inercia debido al oleaje y corrientes sobre la plataforma (Elaboración propia).

Elemento	Diámetro(m)	Altura(m)	Área proyectada (m ²)	F. Arrastre (N)		F. Inercia (N)	
				Unitario	Total	Unitario	Total
Pie inferior	0,33	1,11	0,366	926,013	926,013	158,44	158,44
Candelabro	0,102	0,914	0,093	235,682	707,046	12,46	37,39
Flotadores	0,34	1,149	0,391	987,596	1597,860	174,10	280,295
Total					3230,919		476,126

Al considerar a los elementos del candelabro y parte del pie de la boya en el cálculo en conjunto de oleaje y corrientes, los valores de fuerza en la plataforma generados exclusivamente por corrientes se ven modificados. La carga en la BOMM generada exclusivamente a raíz de las corrientes cuando se contempla el actuar en conjunto con el oleaje se pueden observar en la Tabla 4.12.

Tabla 4.12 Fuerza de arrastre debido al efecto aislado de la corriente (Elaboración propia).

Elemento	Por elemento		Total	
	Fuerza a 0,17 m/s (N)	Fuerza a 0,3 m/s (N)	Fuerza a 0,17 m/s (N)	Fuerza a 0,3 m/s (N)
Cilindros electrónica	2,35	6,52	5,87	16,30
Pie inferior	18,36	50,99	18,36	50,99
Suma			24,23	67,29

4.4.6 Validación.

Al realizar un estudio mediante la herramienta FlowSimulation de SolidWorks, se obtienen los siguientes resultados.

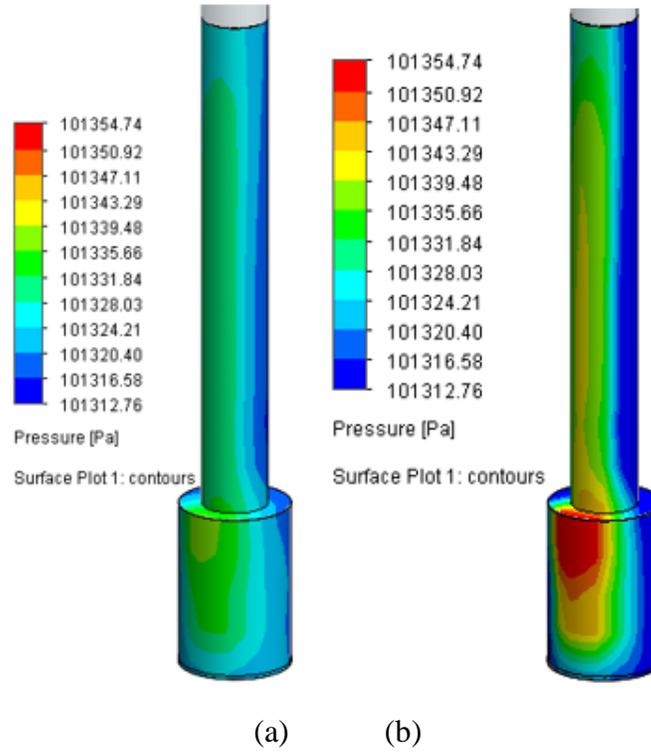


Figura 4.19 Presión debida a corrientes sobre la superficie de la BOMM para a) 0,18 m/s b) 0,3m/s (Elaboración propia).

Tabla 4.13 Comparación de Resultados de fuerza global obtenidos por corrientes.

Método	Fuerza a 0,18 m/s (N)	Fuerza a 0,3 m/s (N)
Analítico	24,23	67,29
Simulación	26,18	72,72
% Error	7,44	7,46

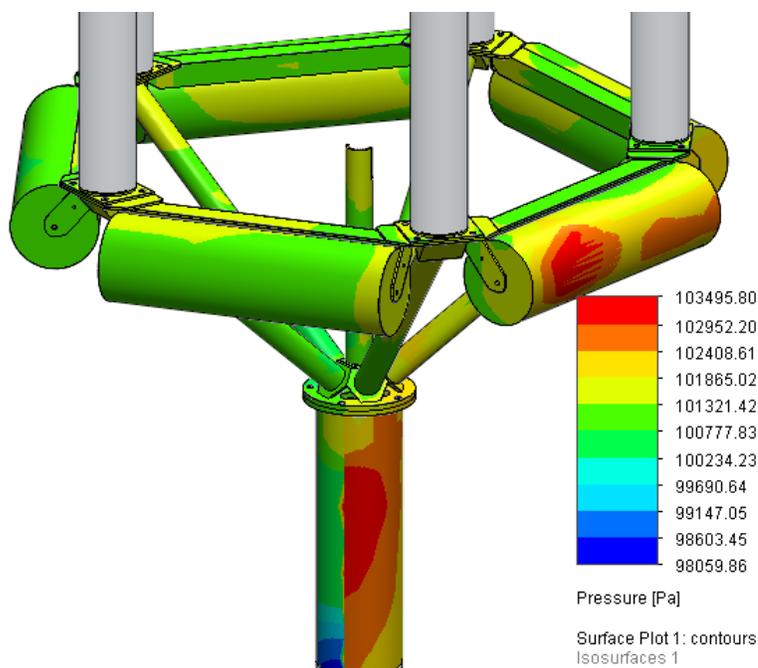


Figura 4.20 Presión debido al efecto del arrastre por oleaje y corrientes (Elaboración propia).

Tabla 4.14 Comparación de resultados de fuerzas debido al oleaje (Elaboración propia).

Método	Fuerza de arrastre (N)
Analítico	3230
Simulación	2719
% Error	15,8

El modelo de CFD de SolidWorks no contempla la componente inercial de la fuerza generada por el oleaje, por lo que se validaran solamente los resultados de fuerza de arrastre obtenidos y en el caso de la fuerza de inercia.

4.5 Resumen

Tabla 4.15 Resumen de parámetros de fenómenos ambientales (Elaboración propia).

Fenómeno	Velocidad nominal (m/s)	Velocidad extrema (m/s)
Viento	8,40	17,08
Corrientes	0,18	0,30

Oleaje	2,17	N/A
--------	------	-----

Tabla 4.16 Resumen de fuerzas sobre la estructura según condiciones ambientales
(Elaboración propia).

Elemento	Nominal (N)	Extrema (N)
Mástil	31,01	130
Caja	163,	675
Flotadores	1877,86	1877,86
Candelabro	744,44	744,44
Pie	944,01	944,01
Cilindros	5,7	16,5

Capítulo 5. Análisis estructural de la BOMM

El objetivo de este capítulo es definir las condiciones de frontera de la BOMM, como lo son su geometría, material y apoyos para determinar y evaluar los esfuerzos en la estructura generados por las cargas ambientales obtenidas en la sección anterior. Se hace uso de la herramienta de análisis de elemento finito existente en el software SolidWorks, con la cual se realiza un estudio individual para cada una de las cargas y así se define la magnitud de sus efectos en la estructura.

Posteriormente, se realiza un estudio considerando el actuar simultaneo de los tres fenómenos ambientales tanto en condiciones nominales como en casos extremos. Además, se incluyen estudios de fatiga, soldadura y análisis de la fractura con la intención de identificar los fenómenos probables que causaron la fractura en la plataforma. Al conocer las causas probables que causaron la fractura en la plataforma, es posible realizar modificaciones precisas al diseño original para evitar que este evento se repita.

5.1 Modelado geométrico

La BOMM es uno de los instrumentos clave con los que cuenta el CIGoM para la observación y estudio del Golfo de México. Construida en el taller metalmecánico del CICESE, la estructura es una réplica de una plataforma adquirida anteriormente por el centro de investigación en la década de los 90. Dado que no se hizo uso de un diseño original, la institución no cuenta con planos de diseño o modelados computacionales para realizar simulaciones o estudios sobre la plataforma.



Figura 5.1 BOMM4 durante labores de transporte en noviembre de 2020
(CICESE, 2019).

Con el objetivo de poder estimar los esfuerzos resultantes en la estructura debido a las cargas ambientales, se realiza el modelado detallado de la plataforma en SolidWorks a partir de las dimensiones y características de la plataforma física ya construida. Con la colaboración del Máster Carlos Rodríguez, asesor de este trabajo, se diseña digitalmente una aproximación de la BOMM, la cual será la base estructural para ejecución del análisis de elemento finito.

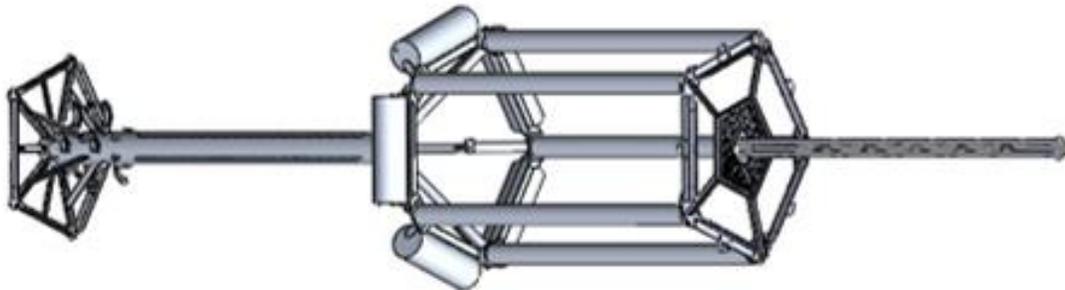


Figura 5.2 Modelo en SolidWorks de la BOMM-VER-2 (CICESE, 2019).

De forma general, la boya está construida casi en su totalidad en aluminio 6061, con una longitud de aproximadamente trece metros y una envergadura de dos metros y medio. Estructuralmente, se compone de tres secciones las cuales son conocidas como: a) el pie, b) el candelabro y c) el ensamble constituido por la caja y el mástil.

5.1.1 Simplificación del modelo geométrico.

Como se detalla en la descripción del método de análisis de elemento finito, para facilitar el proceso de simulación, es recomendable simplificar la estructura de manera que se mantengan sólo los componentes estructuralmente esenciales, disponiendo de tornillería, bases de equipos, mallados de instalación y secciones que no se encuentran sometidas a cargas mecánicas. De esta forma, se facilita la creación de la malla compuesta por las celdas del análisis FEA y se reducen los tiempos de computación.

Además, también es apropiado adaptar la geometría de aquellas piezas que tienen zonas de contacto en común, idealizando el contacto existente entre ellas. De esta forma, se asegura que exista una superficie adecuada para que la distribución de esfuerzos ocurra en la estructura. A continuación, se detalla cada sección de la BOMM modelada y su respectiva simplificación.

El pie, con una base pentagonal, es la sección inferior de la plataforma. Cerca de su base, se instalan 6 cilindros encapsulados, 5 de ellos contienen arreglos de baterías para alimentar la instrumentación, cada uno con una masa aproximada de 60 kg. El sexto cilindro, de unos 45 kg, almacena gran parte de la electrónica, a su vez, estos se encuentran asegurados a una estructura central cilíndrica que une este ensamblaje con las siguientes secciones. En la simplificación, se prescinde de la base pentagonal y para representar a los cilindros de electrónica, se aumenta el diámetro del cilindro central, de forma que iguale la suma de los diámetros representativos de estos elementos y aproxime su peso.

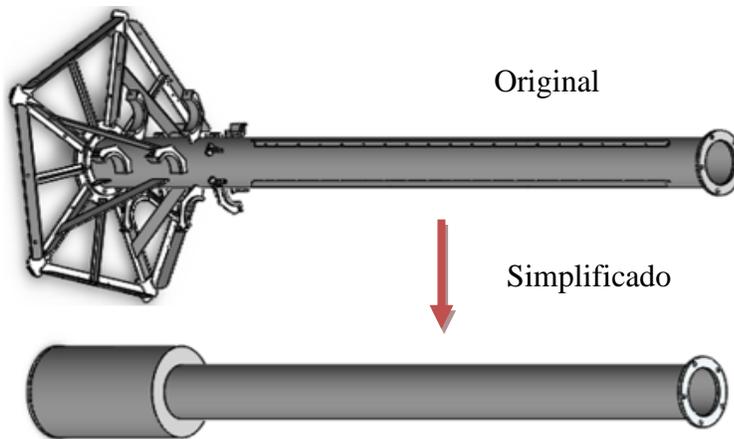


Figura 5.3 Simplificación del pie de la BOMM (Elaboración propia).

El candelabro (la sección central de la BOMM) asemeja una geometría pentagonal, en su base se encuentra el acople de unión con el pie, seguido con un punto central del cual se despliegan sus 5 radios. Cada uno de estos radios tiene como base una pieza hexagonal, en la cual se suelda un tubo en su cara superior. Por último, cilindros flotadores, uno en cada lado del pentágono proyectado, mantienen la estructura estable y a flote.

Esta sección es de crucial importancia, debido a dos razones, en la unión entre la base del candelabro y el pie, se instala una placa encadenada al ancla. Por lo tanto, esta zona se considera desde el punto de vista del análisis estático, como el único apoyo de la plataforma. Además, en la soldadura entre las piezas hexagonales y los elementos cilíndricos, es la zona en específico donde se han presentado fallas estructurales. Para su simplificación, se elimina la tornillería, las secciones semicirculares en las aristas y se modifica su base, de forma tal que todos los elementos hexagonales hagan contacto entre ellos.

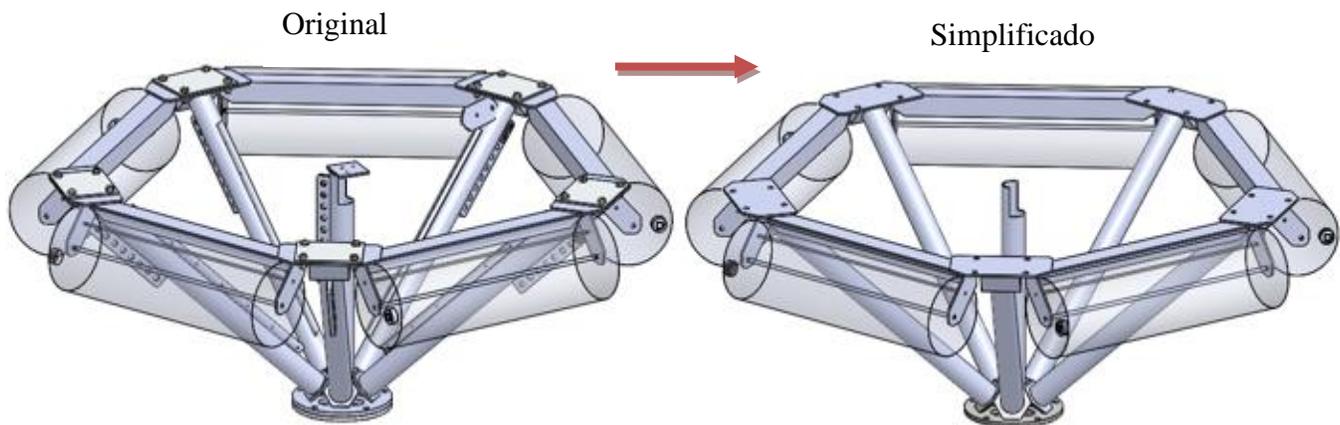


Figura 5.4 Simplificación del candelabro de la BOMM (Elaboración propia).

Por último, la sección de la caja y el mástil. El marco o chasis se compone de cinco secciones tubulares que cumplen la función de darle rigidez y estabilidad al mástil y a los equipos de monitoreo y autonomía que aquí se encuentran como anemómetros y paneles solares. En su simplificación, se elimina la malla metálica de la parte superior, las argollas para asegurar equipos y diversos orificios pequeños a lo largo de las piezas.

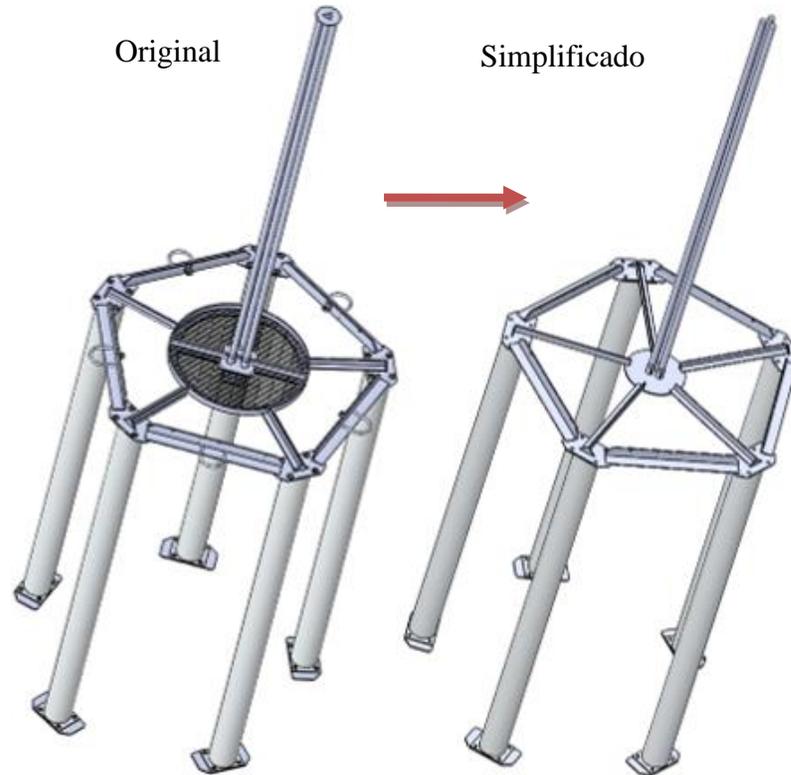


Figura 5.5 Simplificación de la caja y mástil de la BOMM (Elaboración propia).

5.2 Características del material y soldaduras

Al estar en un medio marino, la plataforma de observación se encuentra sometida a condiciones desafiantes. Cargas ambientales constantes, largos ciclos de operación y corrosión son solo algunos factores que se deben tomar en cuenta en la selección de materiales en estructuras marinas.

La BOMM se encuentra construida en su gran mayoría con la aleación de aluminio 6061. Esta aleación endurecida se encuentra compuesta principalmente por aluminio, magnesio y silicio, es usada ampliamente en el contexto industrial ya que presenta características favorables para su soldadura y manipulación. Es especialmente usada en ambientes demandantes como el ambiente marino o aeronáutico, debido a que presenta un buen rendimiento en medios corrosivos. En el caso de la aleación estándar, el esfuerzo de cedencia se presenta a los 55,15 MPa.

Property	Value	Value	Value	Value	Units
Elastic Modulus	69000	69000.00067	6.900000067e+10	69000.00067	N/mm ²
Poisson's Ratio	0.33	0.33	0.33	0.33	N/A
Shear Modulus	26000	26000.00013	2.600000013e+10	26000.00013	N/mm ²
Mass Density	2700	2700	2700	2700	kg/m ³
Tensile Strength	124.084	124.9999985	239999999.6	310.0000021	N/mm ²
Compressive Strength					N/mm ²
Yield Strength	55.1485	62.05281564	227526990.7	275.0000009	N/mm ²
Thermal Expansion Coefficient	2.4e-05	2.4e-05	2.4e-05	2.4e-05	/K
Thermal Conductivity	170	180	154	166.9	W/(m·K)
Specific Heat	1300	896	896	896	J/(kg·K)
Material Damping Ratio					N/A

Figura 5.6 Propiedades de Aluminio 6061 regular, O, T-4, T-6 (Dassault Systèmes, 2021).

Para el proceso de soldadura de la BOMM, se utilizó el electrodo 5356, el cual es aplicado por el método de soldadura de arco con gas inerte (MIG). Este electrodo cuenta con una resistencia a la cedencia que oscila entre 110 y 130 MPa. Esta información es de suma importancia, ya que las fracturas en la estructura se presentan en zonas adyacentes a los cordones de soldadura, específicamente en la unión de los radios del candelabro con su base.

5.3 Sistema de anclaje

Al encontrarse flotando en la superficie marina, la BOMM no cuenta con ningún tipo de apoyo sobre una superficie rígida y, por lo tanto, no tiene reacciones de fuerza o momentos al analizar el sistema por medio de la estática de sólidos. Sin embargo, la boya se encuentra sujeta a una boya auxiliar o *theter*, y esta, a su vez, está anclada al fondo marino mediante un peso muerto de 1,8 toneladas. Al realizar un análisis cuasi estático, se asume que la boya se mantiene inmóvil, debido al efecto de su ancla o peso muerto, esto cuando la cadena que une el *theter* y la BOMM se encuentra en tensión. Se puede observar el método de anclaje en la Figura 5.7

En la misma figura, también se definen los ángulos que determinan la orientación de la boya: el ángulo ϕ indica la rotación alrededor del eje x (roll), es decir, el ángulo en el plano ZY; el ángulo θ se define como la rotación alrededor del eje y (*pitch*), por lo tanto, se entiende como el ángulo en el plano ZX y, finalmente, el ángulo ψ (yaw) se define como la

rotación alrededor del eje vertical Z, por lo que se entiende como la orientación de la boya.(CICESE, 2019).

Estos ángulos son medidos por la instrumentación de la boya y, en promedio, se encuentran por debajo los 2,5 grados, por lo que, para simplificaciones del estudio, se despreciaran estos valores. De esta forma, es posible determinar el sistema de la boya como una estructura vertical con un soporte rígido fijo que no permite traslaciones o rotaciones.

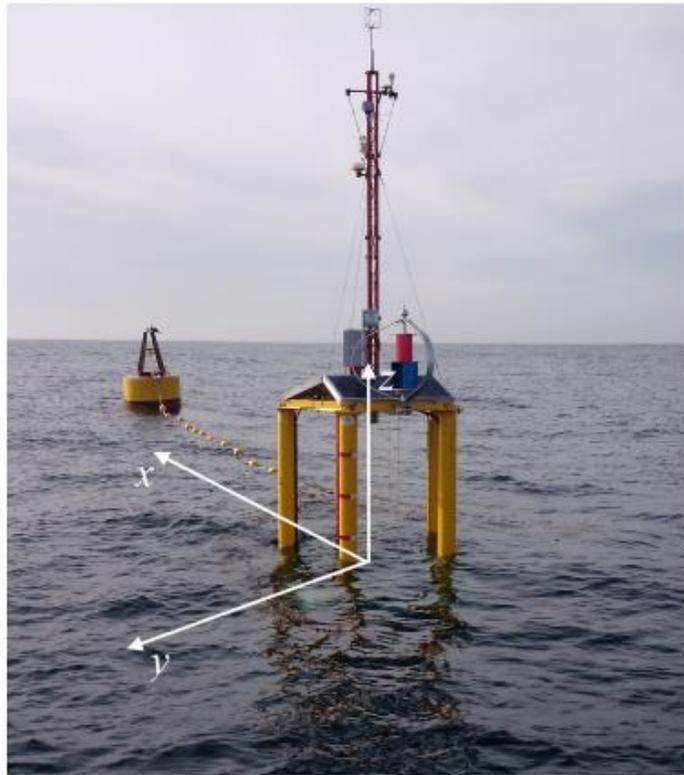


Figura 5.7 Sistema coordinado de orientación e inclinación en la BOMM
(CICESE, 2019).

5.4 Determinación de esfuerzos ambientales por medio de FEA

El objetivo de esta sección es determinar los esfuerzos provocados por los fenómenos ambientales de vientos, corriente y oleaje, y así conocer el efecto que cada uno de estos genera en la plataforma. Este proceso se realiza al tomar los resultados de los análisis de CFD ejecutados en el capítulo anterior y utilizarlos como valores de fuerza aplicada para el análisis de elemento finito correspondiente. Finalmente, se simulará el caso

de cargas combinadas, en el cual las tres fuerzas ambientales predominantes se encuentren actuando sobre la plataforma simultáneamente.

Cabe destacar que los puntos interés son aquellos en donde ya se conoce que existe una fractura, es decir, las bases de los radios del candelabro, numeradas en la figura 5.8. Por lo tanto, serán estas las secciones a evaluar su esfuerzo resultante en cada una de las pruebas realizadas. SolidWorks toma cada una de estas uniones y las representa como una entidad, en cada entidad existe una cantidad finita de nodos, cada uno con valores de esfuerzo distinto. Los resultados a presentar serán la suma de todos estos nodos y su promedio, así como el valor mínimo y máximo entre todos los nodos pertenecientes a la entidad.

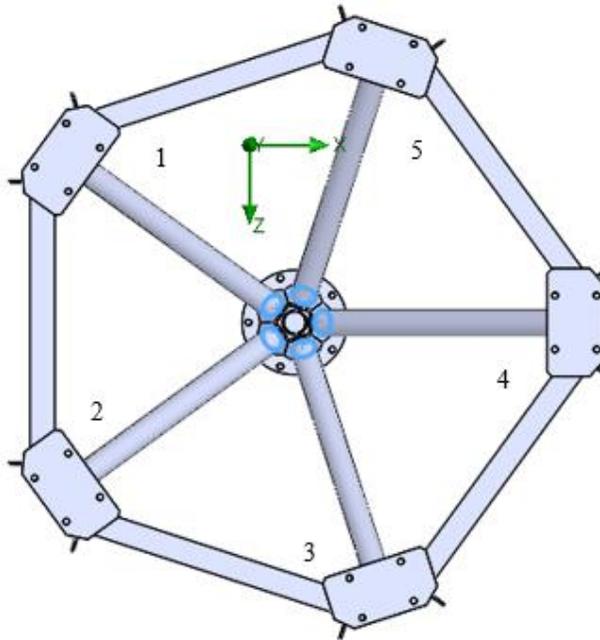


Figura 5.8 Vista superior del candelabro (Elaboración propia).

5.4.1 Condiciones de frontera.

Para que el análisis de elemento finito sea exitoso, es necesario definir cuidadosamente los parámetros o condiciones de frontera que dominan el estudio. En el caso del software SolidWorks, se tienen seis parámetros fundamentales a determinar previo a realizar la simulación, esta etapa es conocida como preprocesamiento. Las condiciones de frontera en los estudios llevados a cabo son:

- Geometría: se hará uso del modelo simplificado desarrollado en la Sección 5.1. Se harán pruebas con y sin refuerzos en los radios del candelabro y, de esta forma, se evalúa la contribución de estos elementos en la resistencia de la BOMM.
- Material: se utiliza la aleación de Aluminio 6061 con una resistencia a la cedencia de 55,15 MPa y electrodo de soldadura 5356 con un valor resistencia a la cedencia de 117 MPa.
- Tipo de soporte o apoyo: apoyo rígido en la base del candelabro que no permite traslación o rotación.
- Cargas externas: aquellas determinadas en el análisis de CFD.
- Tipo de conexión: inicialmente, se utilizará una conexión de contacto, la cual asume que los elementos se encuentran idealmente unidos en las superficies que hacen contacto. Posteriormente, se utiliza la conexión de cordón de soldadura para modelar las soldaduras en la base del candelabro, esta modificación se detalla en la sección 5.7
- Malla: es el proceso de discretización de la estructura, se utiliza elementos triangulares tridimensionales, ya que estos describen mejores geometrías irregulares. Se utiliza un control de mallado en los elementos de interés, reduciendo el tamaño de los elementos triangulares en la malla a 15 mm con una relación altura base de 1.4. De esta forma, es posible refinar el resultado obtenido.

5.4.2 Viento.

Iniciando con los esfuerzos provocados por la carga de viento, la mayor concentración de esfuerzos se encuentra en la soldadura en la base del candelabro, siendo los elementos 1, 3 y 5 los más comprometidos cuando la dirección del viento se establece en el eje z negativo. Estas uniones son las más afectadas debido a que soportan las columnas de la caja que están expuestas al viento.

Además, existe un notable aumento en la magnitud del esfuerzo de Von Mises entre las condiciones de operación nominal y operación en condiciones extremas, la cual llega a ser de 13 MPa en los valores máximos. A continuación, se presentan los resultados obtenidos en las uniones numeradas según la Figura 5.8.

Tabla 5.1 Esfuerzo de Von Mises producto del viento a 8,4 m/s (Elaboración propia).

	Esfuerzo por elemento (MPa)				
	1	2	3	4	5
Suma	51,92	50,06	51,72	38,68	51,21
Promedio	1,44	1,39	1,44	1,08	1,42
Max	2,66	2,36	2,45	1,73	2,37
Min	0,42	0,60	0,34	0,36	0,40

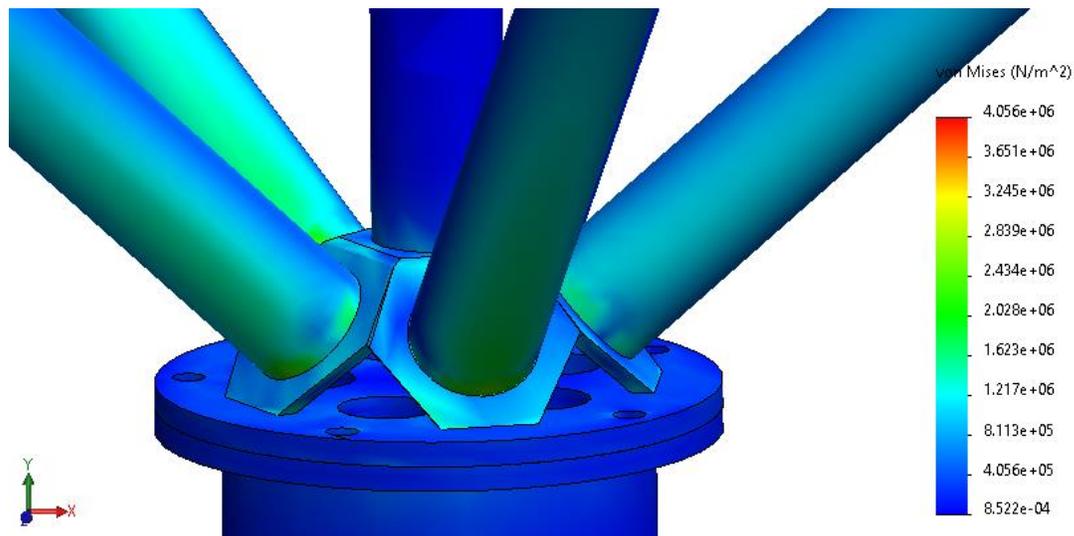


Figura 5.9 Mapa de esfuerzos debido al viento en condiciones nominales (Elaboración propia).

Tabla 5.2 Esfuerzo de Von Mises producto del viento a 17,08 m/s (Elaboración propia).

Esfuerzo por elemento (MPa)					
	1	2	3	4	5
Suma	264,40	235,20	292,00	242,80	281,60
Promedio	7,34	6,53	8,11	6,75	7,82
Max	13,28	10,70	13,66	11,38	13,86
Min	1,77	2,69	2,38	1,74	1,62
RMS	7,98	6,95	8,66	7,27	8,36

5.4.3 Corriente.

Al analizar los resultados de esfuerzo obtenidos, debido a la carga de corrientes, es fácilmente apreciable que la magnitud en las secciones de interés es bastante baja, ya que en ningún caso supera los 0,05 MPa. Esto se debe a que, al incidir en el pie de la boya, el esfuerzo máximo no se obtiene en las soldaduras de interés, las cuales soportan la parte superior de la plataforma, sino que la mayor concentración de esfuerzo se da entre los elementos hexagonales y la base del candelabro, donde se obtiene un valor máximo de 0,4 MPa en condiciones extremas.

Tabla 5.3 Esfuerzo de Von Mises producto de corrientes a 0,17 m/s (Elaboración propia).

Esfuerzo por elemento (MPa)					
	1	2	3	4	5
Suma	0,46	0,39	0,60	0,30	0,59
Promedio	0,00	0,01	0,02	0,01	0,02
Max	0,02	0,02	0,03	0,02	0,03
Min	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01

Tabla 5.4 Esfuerzo de Von Mises producto de Corriente a 0,3 m/s (Elaboración propia).

Esfuerzo por elemento (MPa)					
-----------------------------	--	--	--	--	--

	1	2	3	4	5
Suma	1,18	1,14	1,65	0,83	1,65
Promedio	0,03	0,03	0,05	0,02	0,05
Max	0,06	0,06	0,09	0,05	0,08
Min	0,01	0,01	0,02	0,01	0,02

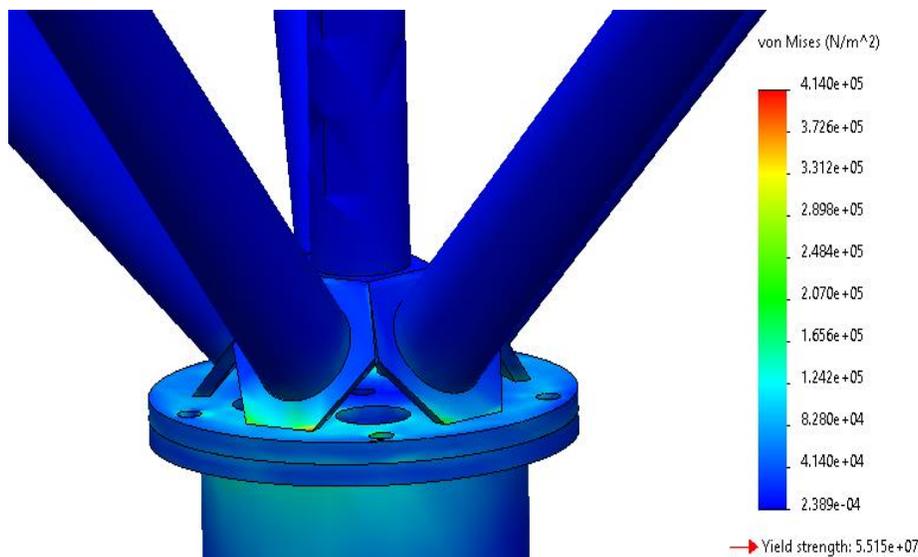


Figura 5.10 Mapa de esfuerzos debido a corrientes extremas (Elaboración propia).

5.4.4 Oleaje y corriente.

Al realizar este estudio, se obtiene que el valor máximo de esfuerzo presente en la estructura no se encuentra en la base del candelabro como sucedió en todas las pruebas anteriores. En este caso, el punto de mayor esfuerzo se ubica en los sujetadores del flotador, en el cual la ola tiene mayor incidencia Figura 5.11. Este resultado se verifica por medio de la herramienta de perspectiva de diseño en el software, la cual recalca en color azul las áreas de la plataforma que presentan mayor esfuerzo (Ver Figura 5.12).

Tabla 5.5 Esfuerzo de Von Mises producto del actuar en conjunto del oleaje y corrientes (Elaboración propia).

Esfuerzo por elemento (MPa)					
	1	2	3	4	5

Suma	88,54	110,60	116,10	77,49	114,30
Promedio	2,46	3,07	3,23	2,15	3,17
Max	4,59	5,06	5,61	3,62	5,04
Min	0,68	0,86	0,96	0,53	1,45
RMS	2,70	3,29	3,46	2,30	3,34

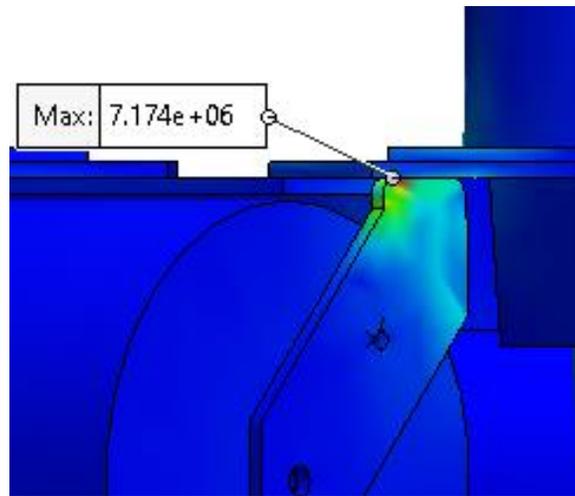


Figura 5.11 Punto de mayor esfuerzo en estudio de esfuerzo por oleaje y corrientes (Elaboración propia).

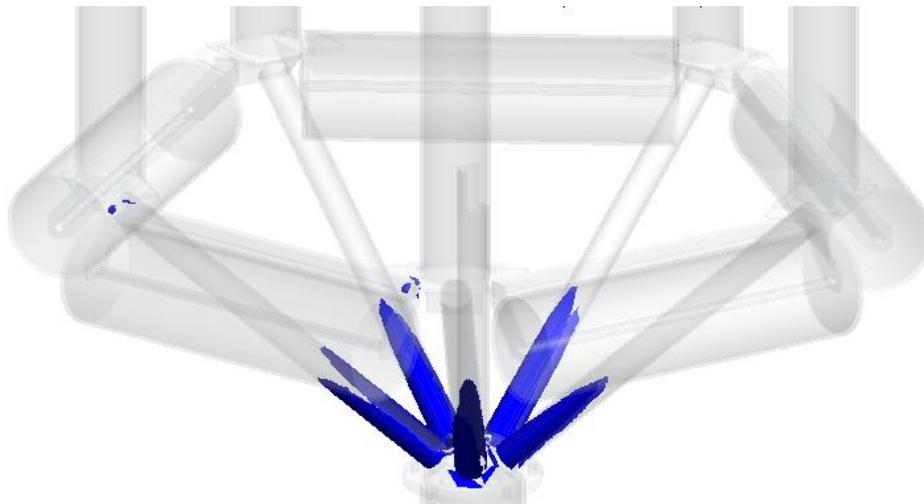


Figura 5.12 Perspectiva de diseño en estudio de esfuerzos por oleaje y corrientes (Elaboración propia).

5.5 Cargas combinadas

5.5.1 Análisis direccional con cargas nominales.

Para iniciar el cálculo del actuar en conjunto de los tres fenómenos ambientales considerados, se toma la recomendación de diseño de la norma API, la cual sugiere realizar un estudio para cada una de las direcciones probables, en la cual se pueden presentar las cargas en la estructura. Para abarcar este análisis en la BOMM, se hace uso de los valores de fuerza en condiciones de operación regulares, se mantiene constante la dirección del oleaje y corriente y se realizan variaciones de noventa grados en la dirección del viento para determinar la dirección crítica del conjunto de fuerzas.

Al igual que en los escenarios anteriores, corriente y viento se dirigen en dirección positiva al eje X en la Figura 5.13 es posible observar el sistema de coordenadas de la BOMM. En la Tabla 5.6, se presentan los resultados de los elementos con mayor esfuerzo en cada una de las direcciones de viento. Como dirección crítica, se obtiene que el mayor de los esfuerzos se presenta cuando viento, corrientes y oleaje actúan simultáneamente en el eje X. De esta forma, se obtiene que el elemento con mayor concentración de esfuerzos corresponde al que se encuentra en el extremo opuesto de la estructura, en el caso de las pruebas en el eje X, este elemento es el número 4.

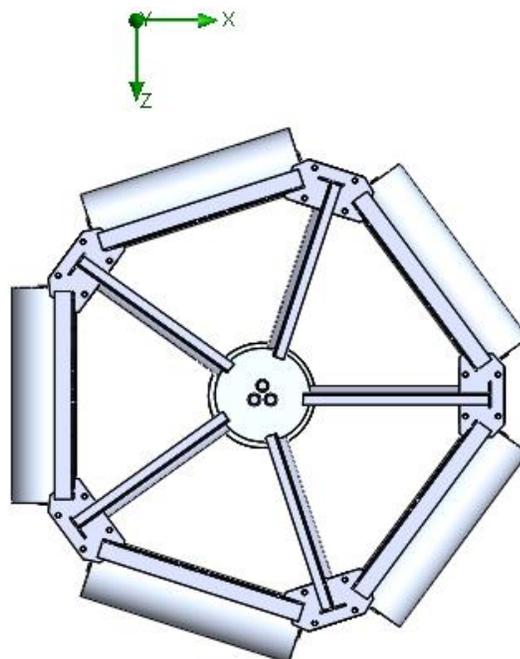


Figura 5.13 Sistema de coordenadas de la BOMM (Elaboración propia).

Tabla 5.6 Esfuerzos resultantes a distintas direcciones de velocidad de viento (Elaboración propia).

	-X (MPa)	X(MPa)	-Z(MPa)	Z(MPa)
Elemento	4	4	3	5
Suma	377,90	182,50	303,40	303,20
Avg	10,50	5,07	8,43	8,42
Max	16,78	7,70	13,29	13,32
Mín	3,77	2,06	3,73	3,49
RMS	11,11	5,36	8,89	8,88

5.5.2 Condiciones extremas de operación.

Al determinar que el caso de carga más severo se da cuando todas las fuerzas actúan en la misma dirección, los escenarios de cargas combinadas se realizan con la premisa de que todos los fenómenos ambientales se desarrollan en el eje X positivo.

Tabla 5.7 Esfuerzo de Von Mises producto de cargas extremas combinadas (Elaboración propia).

Esfuerzo por elemento (MPa)					
	1	2	3	4	5
Sum	604,41	585,3	459,48	645,41	458,6
Avg	16,79	16,26	12,76	17,93	12,74
Max	28,15	27,92	20,86	27,58	22,32
Min	4,35	4,48	3,63	8,09	4,12

Luego de realizar las pruebas estáticas con los escenarios de cargas ambientales más severos, el mayor esfuerzo obtenido es de 32,00 MPa, el cual se presenta en la base del radio 4. En la Figura 5.15, se observa que, al igual que en los estudios anteriores, las zonas que presentan una mayor magnitud de esfuerzo son las bases de los radios, específicamente los perfiles superiores e inferiores de cada elemento tubular.

El valor máximo obtenido se encuentra lejos de superar los 55 MPa necesarios para llegar al punto de cedencia del material, por lo que se logra determinar que el actuar del viento, corriente y oleajes de forma aislada en una prueba estática, no causan el fallo en la estructura idealizada.

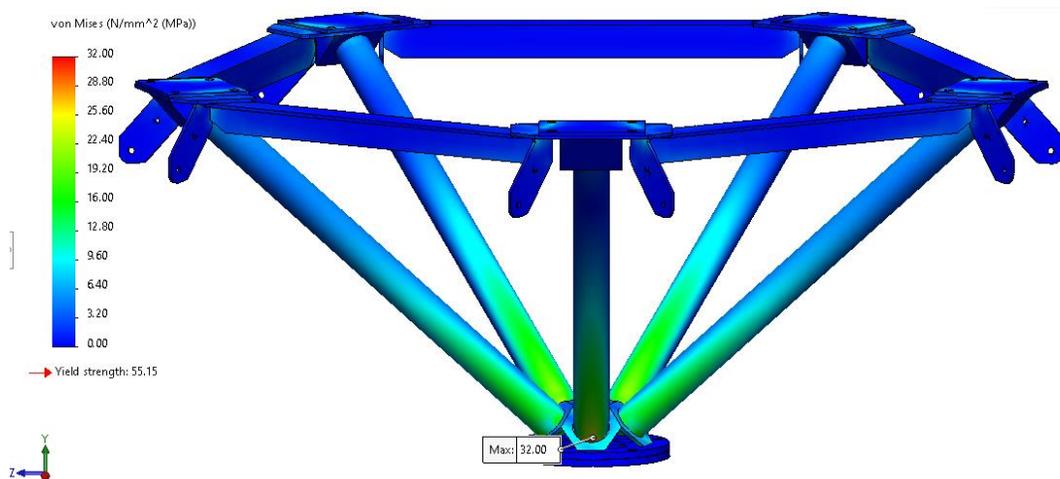


Figura 5.14 Mapa de esfuerzos debido condiciones extremas (Elaboración propia).

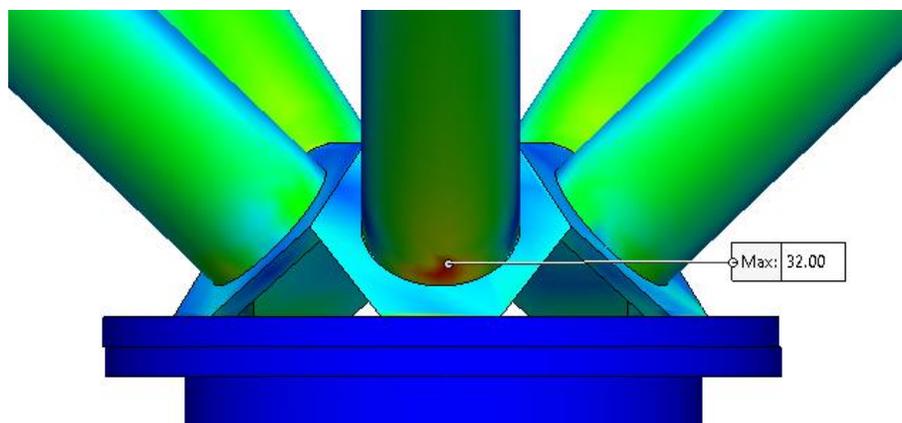


Figura 5.15 Zona de mayor esfuerzo en condiciones ambientales extremas (Elaboración propia).

5.5.3 Estructura reforzada.

Finalmente, se añade el soporte o pie de amigo a la base de cada radio del candelabro, con el objetivo de identificar su contribución estructural a la plataforma. Los resultados obtenidos señalan que el esfuerzo máximo en el candelabro se traslada de la base del elemento tubular al punto de unión entre el pie de amigo y el radio. Se reduce la magnitud máxima de 32 a 27,80 MPa. Además, se disminuye significativamente el esfuerzo en la unión entre los radios y sus bases.

Tabla 5.8 Esfuerzos de Von Mises producto de condiciones ambientales extremas en estructura reforzada (Elaboración propia).

	Esfuerzo por elemento (MPa)				
	1	2	3	4	5
Sum	339,189	234,713	331,971	305,821	385,432
Avg	9,976	7,335	11,066	8,995	11,336
Max	24,165	12,113	22,084	17,637	20,735
Min	3,332	3,348	3,642	0,879	3,704
RMS	11,407	7,687	11,911	10,252	12,063

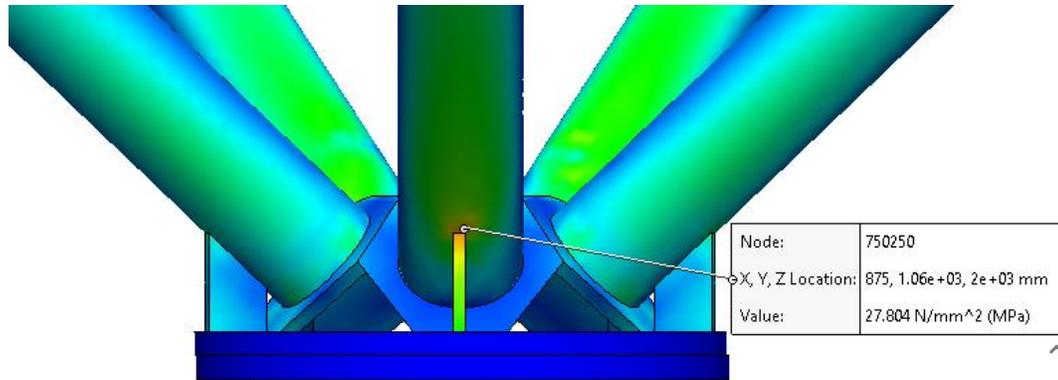


Figura 5.16 Zona de mayor esfuerzo debido a cargas ambientales extremas
(Elaboración propia).

Al conocer los sitios donde se concentran los esfuerzos en la BOMM, es posible determinar que, si las fracturas fuesen producto de las cargas estáticas en la estructura, ya sea por fatiga o no, las fracturas probablemente se presentarían en estos puntos. Sin embargo, esto no sucede en todos los casos. Esto es indicador de que otros factores contribuyen en la formación de las fracturas en la BOMM .

5.6 Fatiga

Al verificar que la fractura no sucede, debido a un evento único de carga estática, se procede a realizar un estudio de fatiga en la estructura. La fatiga sucede en los materiales cuando se someten a ciclos repetitivos de esfuerzo o deformación hasta que llegan a fracturarse. La naturaleza de esta falla deriva de imperfecciones microscópicas, donde se concentra el esfuerzo, estas crecen hasta llegar a la fractura del material. La fatiga suele ser responsable de gran cantidad de fallas en elementos como ejes y engranes debido a que se encuentran constantemente bajo cargas cíclicas (Hibbeler, 2011)

En la gran mayoría de casos, la fractura se produce con un esfuerzo menor al de cedencia. Cuando sucede, el material se comporta como si fuera frágil, aunque naturalmente sea dúctil, lo que resulta en fracturas definidas con poca deformación plástica similar a como se observa en la BOMM. Debido a que los fenómenos ambientales como el oleaje también tienen una naturaleza cíclica, se genera un estudio que represente este fenómeno.

Para especificar la resistencia a la fatiga de un material metálico, es necesario definir un límite debajo del cual no se pueda detectar daño luego de aplicar una carga determinada durante un número de ciclos definido. Para esto, se hace unos de diagramas S-N, que representan en el esfuerzo que puede soportar un material determinado, dependiendo del número de ciclos al cual se ve sometido. Generalmente, estas curvas llegan a ser casi horizontales luego de un gran número de ciclos, lo que significa que, si el esfuerzo no aumenta, el material no fallara sin importar el número de ciclos a los que se ve sometido, lo que se le conoce como límite de resistencia a la fatiga.

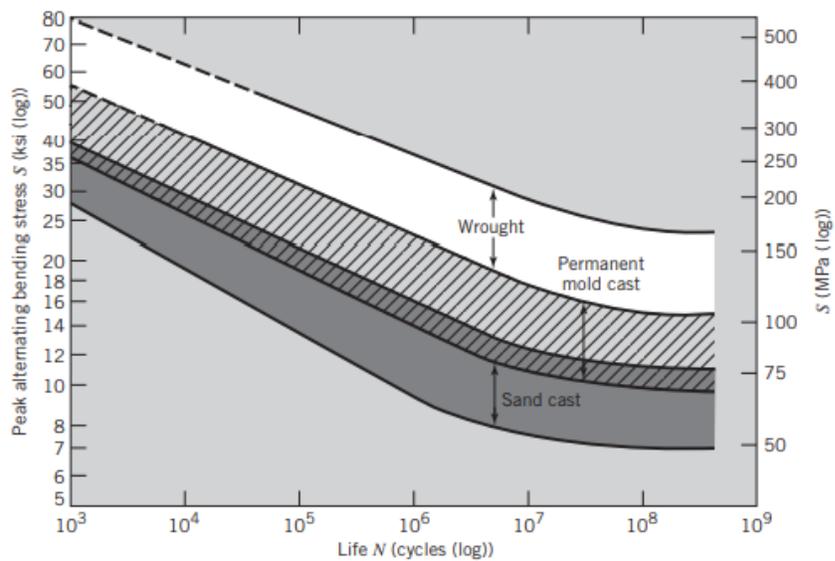


Figura 5.17 Diagrama esfuerzo-ciclos para aleaciones de aluminio (Juvinall & Marshek, 2017).

No obstante, en las aleaciones del aluminio, este límite no se encuentra definido, por lo que es común brindar su resistencia a la fatiga en un valor de 5×10^7 ciclos de trabajo. En el caso del aluminio 6061, la resistencia a la fatiga se presenta alrededor de los 120 MPa. Como el máximo esfuerzo en la boya obtenido en las pruebas estáticas de la Sección 5.5, es menor a límite de resistencia a la fatiga del material, se puede decir que, en un escenario ideal, no se presentarán fracturas debido a la fatiga.

Este resultado es respaldado por estudios de fatiga en SolidWorks, en los cuales no se obtiene ningún resultado debido a que nunca se alcanza el límite de resistencia a la fatiga

sin importar el número de ciclos de trabajo a los que se someta la estructura. Adicionalmente, en la Figura 2.3, en la cual se muestran las grietas, no hay evidencia de marcas de playa, las cuales son un indicador de que se presenta falla por fatiga.

Sin embargo, no es posible descartar concentradores de esfuerzo, debido a imperfecciones en el material, los cuales pueden aumentar en gran medida el esfuerzo resultante en la BOMM, lo que la llevaría a ser más propensa a fallar por fatiga. A pesar de esto, se determina que otros factores pueden contribuir a la creación de las grietas, es por ello por lo que en la siguiente sección se detallan los análisis realizados en la soldadura y posibles defectos asociados a este proceso.

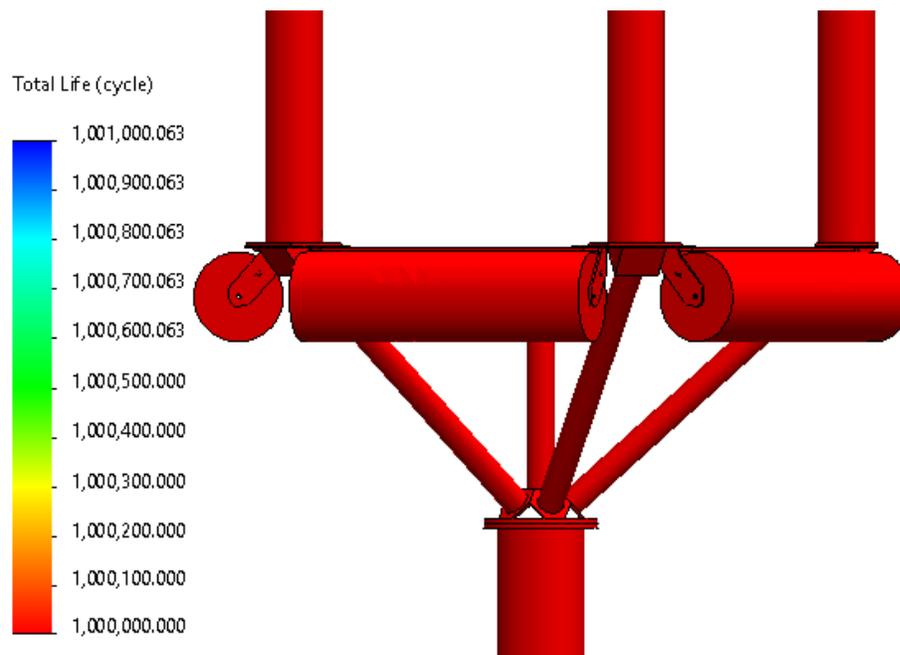


Figura 5.18 Mapa de vida en estudio de fatiga bajo condiciones ambientales extremas (Elaboración propia).

5.7 Soldadura

En las secciones anteriores, se ha idealizado el contacto entre los elementos de la boya, este apartado se enfoca en considerar la soldadura en la base de los radios del candelabro, de esta forma, se incluyen en el análisis aspectos como las dimensiones del cordón de soldadura, material del electrodo y técnica de soldadura. Las condiciones de

frontera para evaluar la soldadura en SolidWorks serán las mismas utilizadas en los escenarios de cargas ambientales nominales y extremas, con excepciones en la definición de la malla.

Esta variación en el mallado se debe a que la opción de contacto por soldadura se encuentra disponible solo para elementos definidos como carcasas o cuerpos superficiales. El modelo de la BOMM solo cuenta con cuerpos sólidos, no obstante, al cambiar la definición de la malla de los radios del candelabro a malla de cascarón, con un espesor idéntico al del tubo (6,35 mm), se simula las características del elemento original y, a su vez, es posible aplicarles cordones de soldadura.

Existen diversos tipos de técnicas de soldadura que definen sus características, SolidWorks utiliza las soldaduras a tope y de filete. En el candelabro de la BOMM, se utiliza la soldadura a filete, la cual se aplica sobre todo en elementos que son perpendiculares entre ellos, el cordón presenta una forma triangular y sus dimensiones se definen por su altura de sus catetos y su garganta.

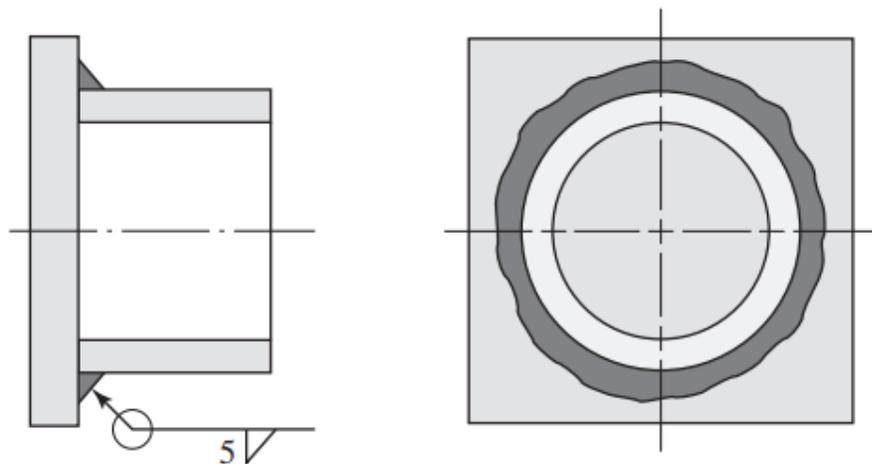


Figura 5.19 Soldadura de filete en elementos tubulares (Budynas & Keith Nisbett, 2012).

En la BOMM-VER-2, la altura de los cordones de soldadura en la base del candelabro se encuentra en un rango de $0,5 \pm 0,0625$ in y se usó un electrodo 5356 con una

resistencia a la cedencia de aproximadamente 117 MPa. Una vez definidos estos valores, es posible realizar las uniones soldadas de interés en la plataforma y simularlas bajo las condiciones de carga extrema para verificar su comportamiento.

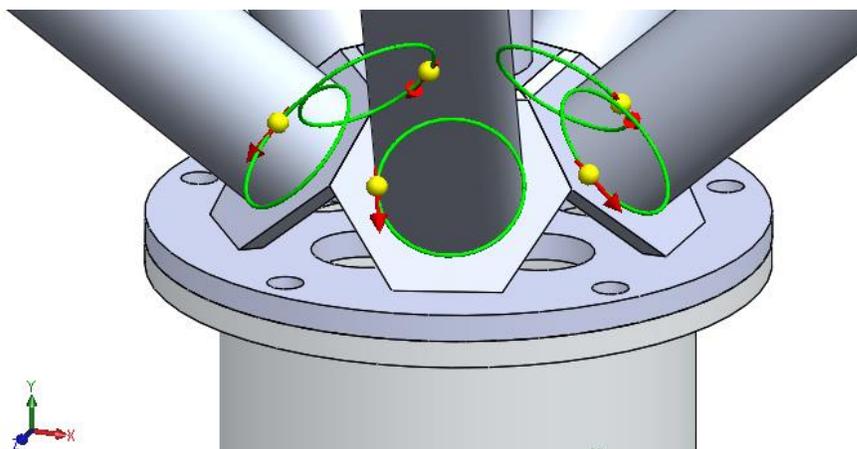


Figura 5.20 Estudio de soldaduras en la plataforma (Elaboración propia).

Similar a la perspectiva de diseño, el gráfico de revisión de soldaduras en la Figura 5.20 nos permite analizar a detalle las características de cada unión, el color verde indica que las dimensiones son adecuadas para soportar las cargas a las cuales se somete a la estructura. SolidWorks presenta dos tipos de resultados en la soldadura, el primer resultado obtenido es el conjunto de fuerza por unidad de longitud en el cordón según las coordenadas de la soldadura. Con estos valores, es posible realizar los cálculos según el método direccional.

Tabla 5.9 Fuerzas por unidad de longitud en la soldadura del elemento 4.

Tipo	Min	Max	Promedio
Tamaño de soldadura (mm.)	0,83086	4,50	2,96
Tamaño de garganta (mm.)	0,58751	3,18	2,09
Tj (N/mm)	-62,979	72,362	6,703,5
Tw (N/mm)	-37,115	36,126	-1,076,9
Ts (N/mm)	-16,721	6,541,6	-4,527,8

Donde:

T_j = Tensión normal a la unión.

T_w = Fuerza cortante en el eje de la soldadura.

T_s = Fuerza cortante normal a la superficie.

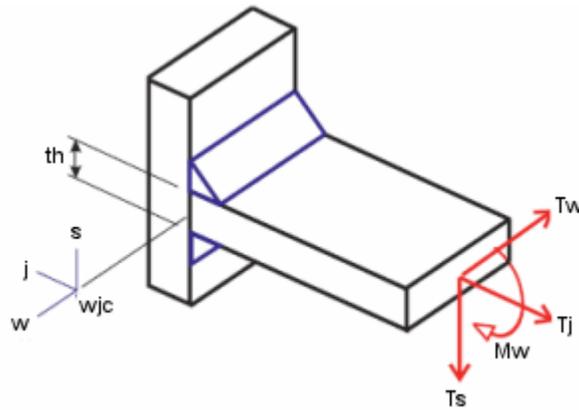


Figura 5.21 Componentes direccionales de fuerza en la soldadura.

Además, basado en esta misma metodología, el software calcula las dimensiones requeridas por el cordón de soldadura en sus piernas y garganta. Lo que demuestra que el elemento que requiere mayores dimensiones, debido a los esfuerzos que soporta, es la soldadura del radio número 4, el cual requiere una altura de cordón mínima de 5,46 mm.

Adicionalmente, es posible graficar las dimensiones requeridas para soportar los esfuerzos por cargas ambientales a lo largo del cordón de soldadura. En la figura 5.20, las esferas amarillas representan el punto de inicio de la soldadura, mientras que la flecha roja indica la dirección en la que se realiza el cordón.

Como se puede observar en la Figura 5.22, cuando no se cuenta con soporte en el radio, las secciones donde se requiere un tamaño de soldadura mayor en la parte inferior y superior de la circunferencia, lo que coincide con los estudios estáticos realizados a la estructura. Cuando se añade el pie de amigo, las dimensiones de soldadura requeridas disminuyen significativamente tanto en la sección inferior (posición 62) como en la sección superior (posición 248) del elemento tubular.

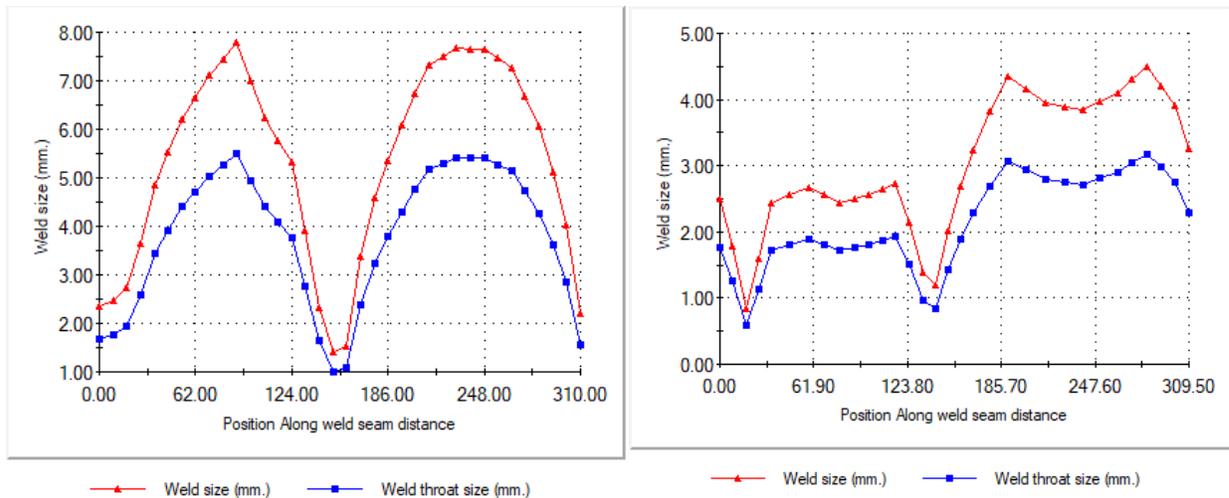


Figura 5.22 Dimensiones requeridas a lo largo del cordón de soldadura.

Izquierda: sin refuerzo. Derecha: con refuerzo.

De acuerdo con las dimensiones obtenidas con el análisis de fuerzas en la soldadura, se determina que las dimensiones de cordón son adecuadas para soportar las fuerzas ejercidas por efectos ambientales en la BOOM.

5.8 Análisis de fractura

De acuerdo con los resultados obtenidos en el estudio de esfuerzo estático de las soldaduras en la BOMM, se determina que fallas en el material no se presentarán a raíz del efecto único de las fuerzas externas. Por ello, aunque la mecánica de fracturas se encuentra fuera del alcance de este trabajo, en esta sección, se detallan las características de las distintas grietas presentes en la estructura, con la intención de determinar factores adicionales que pueden contribuir a la formación de estas fracturas.

Porosidades, contaminantes e incrustaciones son algunas discontinuidades que pueden ocurrir en las soldaduras o en las zonas afectadas por el calor del proceso, sin embargo, las grietas son las discontinuidades más severas, ya que comprometen la estructura y la efectividad de la soldadura como tal. Al observar las fallas en la BOMM, es posible clasificarlas en dos tipos: a) grietas sobre el cordón de soldadura y b) grietas adyacentes al cordón de soldadura, en la zona afectada por el calor (HAZ).

5.8.1 *Grietas en HAZ.*

El agrietamiento en las zonas afectadas por el calor (HAZ por sus siglas en inglés [*heat-affected zone*]), durante el proceso de soldadura son caracterizadas por la separación que ocurre de forma inmediatamente adyacente al cordón de soldadura. A esta clase de fallas, se les conoce como agrietamiento en frío y están relacionadas con la contaminación de la microestructura de la soldadura por hidrógeno.

El agrietamiento inducido por hidrógeno es un fenómeno que puede ocurrir semanas o meses luego de la operación de soldadura. Como otros defectos, las fracturas inducidas por hidrógeno requirieron de la presencia de defectos en la microestructura del material y el cierto nivel de esfuerzo alcanzado en el material (ASM International, 1993). Por lo tanto, para que se presente el agrietamiento en frío, tres condiciones deben presentarse simultáneamente: a) un nivel de hidrógeno suficientemente alto b) sensibilidad del material y c) niveles suficientemente altos de esfuerzos aplicados o residuales.

Según Cieslak (1993), en el caso de que exista un proceso ideal de soldadura, el agrietamiento inducido por hidrógeno sería solo una preocupación menor. Sin embargo, en la práctica, excluir el hidrógeno de la estructura durante el proceso de soldado es sumamente difícil. Se considera que la principal fuente de hidrógeno en los metales es la disociación del vapor de agua en el arco de soldadura, aunque existen otras fuentes probables como lubricantes, aceites y residuos orgánicos en la zona de soldadura.



Figura 5.23 Grietas adyacentes al cordón de soldadura en el candelabro.

Al revisar con detalle las características de las fracturas en la BOMM, no se puede apreciar evidencia de mecanismos de elongamiento o deformación del material, comportamientos que se relacionan con la falla estática del material. Tampoco es posible observar “marcas de playa” en el aluminio, evidencia característica de los daños por fatiga. Sin embargo, las fracturas por hidrógeno inducido suceden de forma súbita en zonas cercanas a la soldadura, como se puede observar en la Figura 5.23. Por lo tanto, se determina que la causa raíz de las grietas generadas en la BOMM es la acción combinada de los esfuerzos en la estructura y la contaminación por hidrógeno, durante el proceso de soldadura.

5.8.2 *Grietas sobre el cordón de soldadura.*

El agrietamiento sobre el cordón de soldadura también se encuentra relacionado con la contaminación por hidrógeno, sin embargo, se asocia con otras causas, además de este fenómeno. Este escenario es el resultado a alguno de los siguientes fenómenos: agrietamiento inducido por segregación, agrietamiento inducido por geometría del cordón o agrietamiento inducido por el perfil de la superficie (The James F. Lincoln Arc Welding Foundation, n.d.)

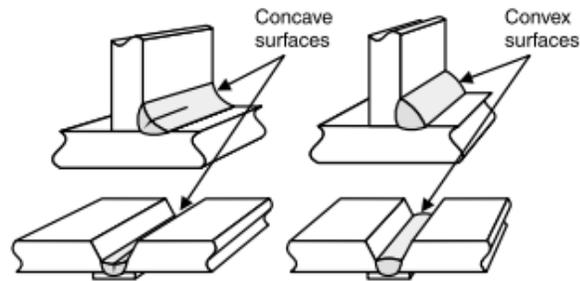


Figura 5.24 Agrietamiento inducido por perfil superficial de la soldadura (The James F. Lincoln Arc Welding Foundation, s.f.).

Este último mecanismo que genera grietas longitudinales sobre el eje de la soldadura se evidencia en la Figura 5.24 y en la plataforma en la Figura 5.25. Esencialmente, se trata de un perfil de superficie cóncavo. En el perfil de soldadura, esta condición conlleva dos efectos que pueden propiciar la aparición de grietas. El primero de ellos es que, al enfriarse la soldadura, se generan esfuerzos residuales internos por la contracción térmica en el material, lo que pone el cordón de soldadura en tensión permanente. El segundo efecto es la reducción significativa del diámetro de la garganta de soldadura, entidad que se considera el punto de evaluación de esfuerzos, por lo tanto, la capacidad de soportar cargas del cordón se ve reducida.



Figura 5.25 Grieta longitudinal sobre soldadura en el candelabro (CICESE, 2019).

Al observar esta condición en las soldaduras del candelabro, se considera que también es un factor contribuyente en la falla mecánica de la estructura. En resumen, se

define que la combinación de los esfuerzos por cargas ambientales y defectos en la soldadura como la contaminación por hidrógeno y un pobre perfil superficial de cordón son las razones asociadas al agrietamiento de la BOMM.

Capítulo 6. Alternativas de rediseño en la BOMM

En el capítulo anterior, se determina que las fracturas en la boya probablemente no se deban a los efectos aislados de las cargas ambientales, sino que se involucran otros factores que contribuyen a que estas grietas se generarán en la estructura. Además, se determina que el agrietamiento inducido por hidrógeno es uno de los factores contribuyentes en la falla de la soldadura.

El fin de este capítulo es definir pautas para mitigar el efecto de las causas de las fracturas inducidas por hidrógeno. Primero, se plantean modificaciones en el diseño original de la BOMM para reducir los valores de esfuerzos máximos de la plataforma. Además, se presentan recomendaciones para reducir el nivel de hidrógeno en el material durante el proceso de soldadura y su sensibilidad a este contaminante.

6.1 Rediseño geométrico

Una de las principales características geométricas de la BOMM es su arreglo pentagonal, esta configuración es simétrica solo en uno de sus ejes. Al carecer de simetría en Z, se presentan casos de carga distintos dependiendo la dirección en la que actúen los fenómenos ambientales, además, puede llevar una concentración en distribución de esfuerzos. Por lo tanto, se propone modificación que cambiaría la geometría pentagonal del candelabro por una configuración la cual, si posea simetría en ambos de sus ejes. De esta forma, se pretende distribuir los esfuerzos uniformemente, sin importar la dirección de ataque de los fenómenos ambientales.

Se propone el análisis de dos modificaciones, la primera de ellas es cambiar la configuración pentagonal por una hexagonal. Esta alternativa presenta la ventaja de que, al existir una mayor cantidad de elementos, los esfuerzos ejercidos en la estructura poseen una mayor superficie en la cual ser distribuidos, lo que reduce su magnitud. Como desventajas, al poseer más elementos, también incrementa la cantidad de fuerzas ambientales sobre la estructura, lo que aumenta los esfuerzos.

Adicionalmente, al aumentar la cantidad de fuerzas, también lo hacen las incógnitas en las ecuaciones de equilibrio estático, lo que, a su vez, aumenta el grado de indeterminación estática de la estructura. Además, al presentar una mayor cantidad de uniones, es posible que se presente una mayor cantidad de concentradores de esfuerzos que pueden afectar el cálculo.

La segunda alternativa propone una configuración cuadrada en lugar de pentagonal, con esta modificación, se intercambian las ventajas y desventajas con relación a la estructura hexagonal. La Figura 6.1 muestra las alternativas planteadas para el rediseño de la plataforma.

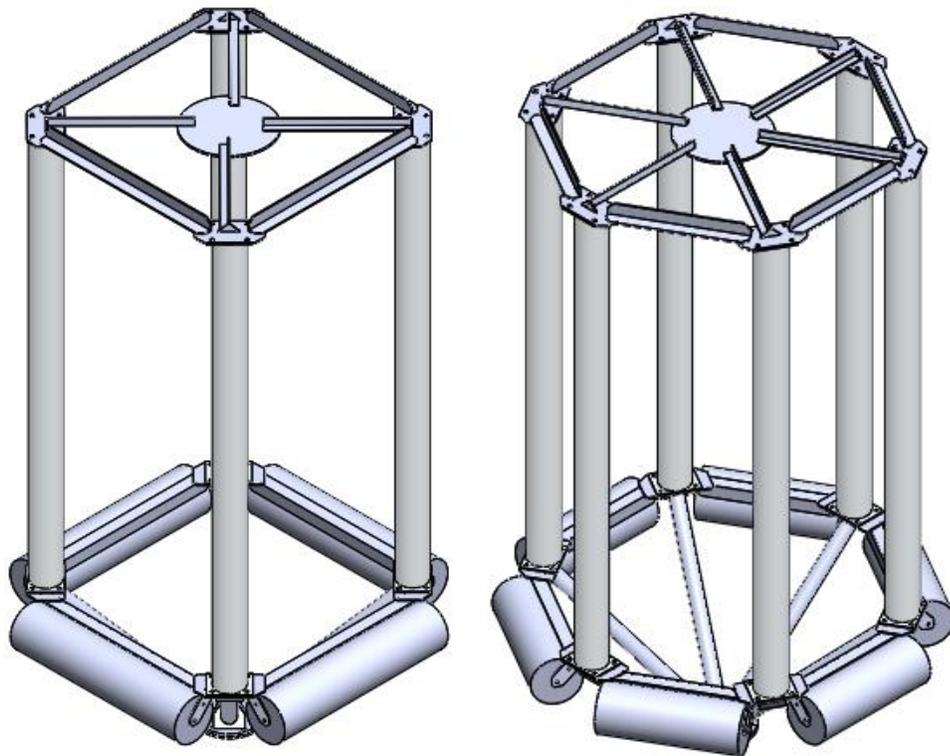


Figura 6.1 Alternativas geométricas de rediseño en la BOMM. Izquierda: geometría cuadrada.
Derecha: geometría hexagonal.

Para determinar el rendimiento de estas nuevas geometrías, se someten a un estudio con condiciones de frontera idénticas a las utilizadas en el diseño original. Se plantea utilizar el caso de condiciones ambientales extremas, ya que es donde se presentan los esfuerzos de mayor magnitud. En este escenario, los fenómenos ambientales de viento,

corriente y mareas actúan simultáneamente sobre una de las caras de la plataforma. Se decide que la dirección de la velocidad horizontal de estos fenómenos será en el eje X positivo, puesto que todos los diseños presentan de simetría en este eje.

Para conocer los esfuerzos resultantes en cada rediseño, es necesario calcular nuevamente las fuerzas sobre la estructura. Esto debido a que el área proyectada varía en cada configuración, por lo que el resultado de la fuerza total se ve afectado.



Figura 6.2 Vista lateral de configuraciones de la BOMM (Elaboración propia).

6.1.1 Fuerza ejercida sobre cada configuración.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de las pruebas de CFD para cada una de las configuraciones diseñadas. Es posible observar cómo varían las fuerzas sobre la estructura debido a las modificaciones geométricas. En la Tabla 6.1 y Table 6.2, se

presentan respectivamente las fuerzas de arrastre e inercia generadas por el oleaje para cada variante. Se obtienen valores con magnitudes similares, esto se debe a que la envergadura de la BOMM se mantiene prácticamente constante en todas las configuraciones y, por lo tanto, el área proyectada de esta sección varía poco.

Por el contrario, en la Tabla 6.3, se observa la fuerza de arrastre debida el viento, donde se aprecian diferencias significativas en las magnitudes obtenidas. Esto sucede debido a que, gracias a la reducción de elementos y su efecto de barrera, reducen el área proyectada de las columnas de la caja. Se desprecian las fuerzas provocadas por efectos de la corriente, ya que en el Capítulo 5 se determina que no generan esfuerzos considerables en el material.

Tabla 6.1 Fuerzas de arrastre debido al oleaje (Elaboración propia).

Elemento	Cuadrado (N)	Pentagonal (N)	Hexagonal (N)
Pie inferior	926,013	926,013	926,01
Candelabro	319,744	707,046	639,49
Flotadores	1705,129	1597,860	1598,72
Total	2950,886	3230,919	3164,22
Simulación	3211	2719	3090,81
% Error	8,1	15,8	2,32

Tabla 6.2 Fuerzas de inercia debido al oleaje (Elaboración propia).

Elemento	Cuadrado (N)	Pentagonal (N)	Hexagonal (N)
Pie inferior	158,439	158,44	158,44
Candelabro	16,910	37,39	33,82
Flotadores	219,704	280,295	281,83
Total	395,052	476,126	474,09

Tabla 6.3 Fuerzas de arrastre debido al viento (Elaboración propia).

Elemento	Coefficiente	Cuadrada (N)	Pentagonal (N)	Hexagonal (N)
Caja	1	270,01	675,02	540,01

mástil	1,2	130,80	130,80	130,80
Base	0,7	39,41	31,97	31,97
Total		440,22	837,78	702,78
Simulación		483,02	773,55	668,32
% Error		8,29	7,66	4,90

6.1.2 Evaluación de esfuerzo en las propuestas de diseño

Al realizar el análisis de elemento finito bajo las condiciones de fuerzas correspondientes para cada modelo, se logra obtener el punto de esfuerzo máximo presente en el candelabro. De acuerdo con la Figura 5.23, la ubicación del agrietamiento existente en el diseño original señala que existen dos puntos de interés a considerar: a) las uniones entre los refuerzos y elementos tubulares y b) las uniones entre la base del candelabro y el elemento tubular.

Tabla 6.4 Comparación de esfuerzos máximos entre configuraciones de la BOMM (Elaboración propia).

Sección	Cuadrada (MPa)	Pentagonal (MPa)	Hexagonal (MPa)
Base	21,52	24,16	24,93
Refuerzo	19,18	27,80	40,33

En la configuración cuadrada, se obtienen resultados favorables con lo que se logra reducir el esfuerzo resultante máximo en la base del radio del candelabro en 10,93 %. Mientras que la reducción en el esfuerzo en la unión de los refuerzos con el radio es de 31 %. Esta disminución en la magnitud del esfuerzo se debe, en parte, a la reducción de elementos expuestos al viento, fenómeno que ejerce una carga considerable en la estructura.

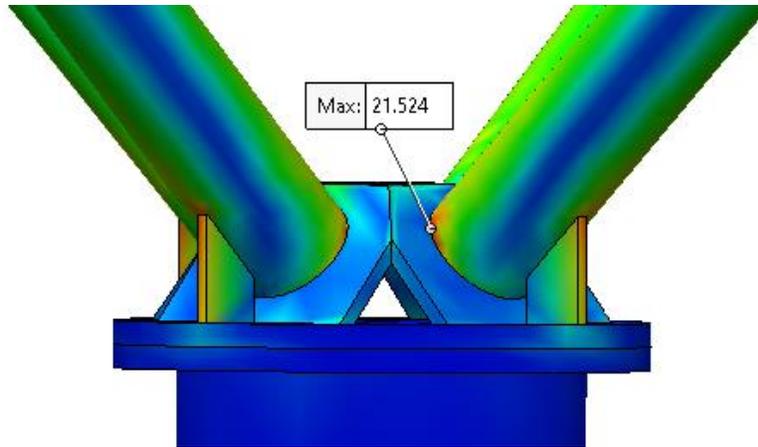


Figura 6.3 Esfuerzo resultante máximo en la configuración cuadrada (Elaboración propia).

Por el contrario, la configuración hexagonal presenta resultados desfavorables. Mientras que los esfuerzos en la base de los radios son prácticamente idénticos que los obtenidos en el diseño original, los esfuerzos se concentran significativamente en la unión entre los refuerzos y los radios. El esfuerzo resultante máximo en este punto aumenta un 31,07 %, a pesar de que la fuerza producto del viento es menor en el rediseño hexagonal. Los altos valores de esfuerzo se relacionan con una sobrerigidización en la estructura, debido a la gran cantidad de uniones, lo que provoca que los esfuerzos se localicen en zonas específicas en lugar de distribuirse a lo largo de la superficie del material.

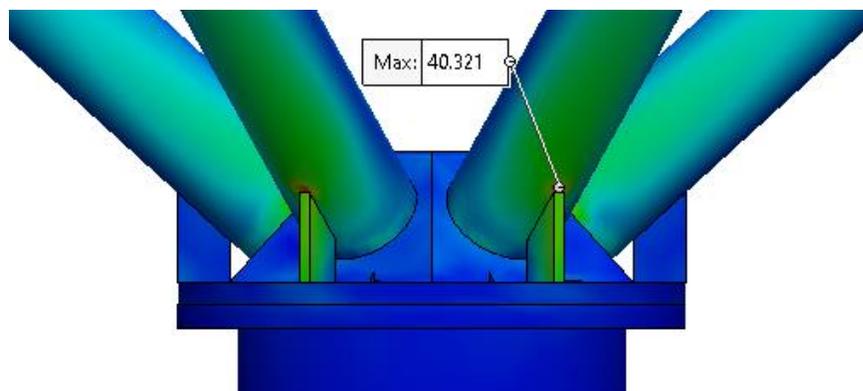


Figura 6.4 Esfuerzo resultante máximo en la configuración hexagonal (Elaboración propia).

6.2 Soldadura

Esta sección se enfoca en dar a conocer técnicas para remediar la condición de agrietamiento inducido por hidrógeno y debido al perfil superficial de la soldadura. Para evitar que se genere contaminación por hidrógeno durante el proceso de soldadura, es importante utilizar dos técnicas: a) minimizar las fuentes de contaminación y b) reducir el desarrollo de microestructuras sensibles al agrietamiento. Para reducir las fuentes de hidrógeno, es necesario limpiar apropiadamente las superficies a soldar, evitando que contengan aceites, impurezas o humedad indeseada. Además, es posible utilizar electrodos con bajo contenido de hidrógeno y, sobre todo, almacenarlos de forma que no se humedezcan y produzcan vapor de agua al fundirse.

El desarrollo microestructuras susceptibles a fracturarse se relaciona con las tasas de enfriamiento del material luego de ser soldado. Para evitar altas tasas de enfriamiento, se puede precalentar las piezas a soldarse, aumentar ligeramente el calor de del arco de soldadura al aumentar la corriente o reducir la velocidad en la que se ejecuta la soldadura. Finalmente, el perfil cóncavo en la soldadura es comúnmente resultado de un voltaje excesiva en el arco eléctrico. Para lograr un perfil de soldadura deseado (convexo), puede reducirse ligeramente este parámetro y reducir la velocidad de soldadura

Capítulo 7.

Para determinar el alcance económico de este estudio, es necesario conocer los costos asociados a la implementación de la BOMM en su etapa constructiva. Debido a las características propias de las instituciones y equipos involucrados, el objeto de estudio de este documento (BOMM) obedece intereses relacionados directamente a la investigación y desarrollo, por lo que no se pretende obtener un retorno de capital con este esfuerzo. Por lo tanto, no se ejecuta un análisis financiero tradicional donde el objetivo es verificar la viabilidad de implementación.

Dentro de los costos considerados, no se incluyen procesos relacionados con el mantenimiento o despliegue de la estructura. Por otro lado, se hace énfasis en el costo de la instrumentación instalada en la BOMM, ya que estos equipos pueden verse comprometidos si la estructura fallara y son las principales herramientas en la toma de mediciones oceanográficas, objetivo primordial de la línea de investigación.

7.1 Costos de implementación

Las plataformas de observación usadas por el CIGoM son en su mayoría manufacturadas por el taller de metalmecánica del CICESE. Esta internalización del proceso permite que el costo de construcción se vea reducido considerablemente. Sin embargo, equipos especializados como los diversos sensores instalados en la boya deben ser adquiridos con proveedores externos, lo que encarece el proyecto.

El objetivo principal de este estudio desde el punto de vista económica es garantizar el funcionamiento estructural de la BOMM. En el caso en el que se pierda la capacidad operativa de la estructura debido a una fractura crítica, esta debe ser recuperada para su reparación, por lo tanto, los sensores tampoco pueden operar.

Además, en caso de rupturas en el material de la plataforma, se pueden comprometer la seguridad de la instrumentación si se llegase a perder estabilidad o flotabilidad. En la tabla 6.1 se desglosan los costos de todos los sensores instalados en la boya. Los precios de las listas son facilitados por el CICESE.

Tabla 7.1 Costos de la instrumentación instalada en la BOMM (CICESE, 2019)

Descripción	Precio (USD)
Anemómetro Sónico GILL R3-100	35.000,00
Estación meteorológica GILL GMX-600	5.000,00
Modem Satelital Taoglas Spartan MA-600	9.000,00
GPS Garmin 19x-HSV	3.000,00
Luz de señalización Carmanah M660	1.000,00
SBG Ekinox2-M	28.000,00
RBR Concerto CTD+02 pH	35.000,00
Nortek Vector	32.000,00
Nortek Signature 1000	20.000,00
Pro Oceanus C02 Agua-Aire	30.000,00
Materiales y construcción de la BOMM	20.000,00
Total	218.000,00

Por lo tanto, la importancia económica de este trabajo reside en resguardar la seguridad de los equipos descritos en la Tabla 7.1 que en total representan una inversión de 198.000,00 \$. Así como garantizar la capacidad operativa de la BOMM, de tal forma que los sensores pueden funcionar adecuadamente y realizar mediciones las investigaciones realizadas por los distintos grupos del CIGoM, lo que justifica su inversión.

Capítulo 8. Conclusiones y recomendaciones

8.1 Conclusiones

- Se define que los principales fenómenos ambientales que afecta a las estructuras marinas son el viento, las corrientes y el oleaje. La fuerza que ejercen estos fenómenos en la estructura se determina, según la magnitud de su velocidad. Para el sitio de despliegue de la BOMM-2VER, las condiciones nominales y extremas se presentan en la Tabla 4.15
- Se determinan, por medio de CFD, los estados de carga máxima que ejercida por los fenómenos ambientales de viento, corriente y oleaje sobre la boya en la Tabla 4.16. Las fuerzas se consideran en su mayoría de arrastre, sin embargo, el oleaje genera una componente de inercia, lo que genera que los componentes con mayor carga en la estructura sean los flotadores con 1877 N en total.
- Se genera un mapa de esfuerzos en la estructura haciendo uso de FEA, donde se identifican los puntos de máximo esfuerzo bajo cargas combinadas son las bases de los radios del candelabro. Ahí se alcanzan valores de aproximadamente 27,80 MPa durante su operación, valor de esfuerzo resultante se encuentra alejado del límite de cedencia de la aleación aluminio 6061
- Se considera que las grietas en la plataforma fueron inducidas por la presencia de hidrógeno en la soldadura, lo que indica que la contaminación en la superficies y electrodos y la susceptibilidad del material a soldar juegan un papel importante en la formación de grietas en la BOMM.
- Se modela un rediseño con geometría cuadrada, donde el esfuerzo resultante máximo se reduce en un 31 % en puntos críticos bajo condiciones de carga extremas, en comparación con el diseño original.

8.2 Recomendaciones

1. Estudiar las condiciones ambientales de la zona previo al despliegue de la BOMM.
2. Reducir la cantidad de superficie de la estructura expuesta a las corrientes de viento.
3. Evitar defectos en la soldadura como el agrietamiento inducido por hidrógeno. Un debido almacenamiento de los electrodos y el precalentamiento de las piezas previo a soldarlas son métodos efectivos para evitar este defecto.
4. Procurar una geometría cóncava en los cordones de soldadura de filete, de esta forma se obtiene un mayor tamaño de garganta de soldadura.
5. Implementar el uso de recubrimientos como pintura o polímeros que protejan la zona de fractura. Así se pueden evitar que se presenten picaduras u oxidación que deterioren la plataforma.
6. Evaluar los esfuerzos existentes durante las operaciones de transporte y despliegue de la BOMM
7. Continuar con los esfuerzos de investigación, especialmente en los análisis de soldadura bajo condiciones extremas de funcionamiento.

Capítulo 9. Bibliografía

- Álvarez, P. (2005). *Barreras artificiales para la protección de centros de cultivos acuícolas*.
- American Bureau of Shipping. (2013). *Rules for Building and Classing Floating Production Installations R*.
- American Petroleum Institute. (2002). Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms-Working Stress Design. In *API RECOMMENDED PRACTICE 2A-WSD (RP 2A-WSD) (TWENTY-FIRST EDITION)*. API Publishing Services.
- ASM International. (1993). Welding, Brazing and Soldering. In *ASM Handbook* (Vol. 6).
- Budynas, R. G., & Keith Nisbett, J. (2012). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley, 9na Edición* (9th ed.).
- Cengel, A., & Ghajar, A. (2011). *Transferencia De Calor y Masa: Fundamentos y Aplicaciones* (A. Delgado, Ed.; 4th ed.). McGraw-Hill.
- Chakrabarti, S. K. (2005). *Handbook of Offshore Engineering: Vol. I* (First edition). ELSEVIER. www.bookaid.org
- CICESE. (2019). *Ficha Técnica Boya Oceanográfica y de Meteorología Marina Parque Nacional Arrecifes Veracruzanos BOMM2-VER*.
- CICESE. (2021, April). *Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California*. <https://www.cicese.edu.mx/welcome/acerca/2>
- CIGoM. (2021). *Consortio de Investigación del Golfo de México*. <https://cigom.org/#seccion-l2>
- Cockburn, A. (2008). Using Both Incremental and Iterative Development. *CrossTalk The Journal of Defense Software Engineer*, 21.
- Cruz, R., & Durazo, R. (2017, December). *Se instala e inicia pruebas la primer boya oceanográfica BOMM construida en CICESE*. TodosCICESE. <http://todos.cicese.mx/sitio/noticia.php?n=1082#.YHmtGegzbIX>
- Dassault Systèmes. (2021). *Resistencia del diseño de una soldadura de redondeo (Estándar europeo)*.

- Det Norske Veritas. (2010). *Recommended Practice DNV-RP-C205 Environmental Conditions And Environmental Loads*. <http://www.dnv.com>
- Farías, L., Fernández, C., Garreaud, R., Guzmán, L., Hormazábal, S., Morales, C., Narváez, D., Pantoja, S., Pérez, I., Soto, D., Winckler, P., Camaño Moreno, A., Fierro Contreras, J., & Giglio Muñoz Enrique Vargas Guerra, S. (2019). *Propuesta de un Sistema Integrado de Observación del Océano Chileno*. www.negro.cl
- Frias, B., & Maciá, J. (2015). *Análisis Estructural de una Plataforma Jacket con aplicación al Caribe Colombiano*.
- González, O., González, C., & López, A. (2019). Introducción a análisis de elemento finito: Solidworks y Matlab. *Ideas En Ciencias de La Ingeniería*, 28–38.
- Hibbeler, R. C. (2011). *Mecánica de materiales* (L. Cruz, Ed.; 8th ed.). Prentice Hall.
- Hibbeler, R. C. (2016). *Ingeniería mecánica. Estática* (14th ed.). Prentice Hall.
- ICTS SOCIB. (n.d.). *MEDCLIC*. Infraestructuras Fijas . Retrieved March 7, 2021, from <http://medclic.es/es/creditos-web/>
- IMEDEA. (n.d.). *Follow the Glider*. Retrieved March 8, 2021, from <http://followtheglider.socib.es/creditos/>
- Instituto Español de Oceanografía. (2014). *Pliego de prescripciones técnicas para la contratación del servicio de gestión náutica de la flota de buques oceanográficos gestionada por el instituto español de oceanografía durante 2014*. <http://www.ieo.es/buques.htm>
- Jamshed, S. (2015). Introduction to CFD. In *Using HPC for Computational Fluid Dynamics* (pp. 1–20). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-801567-4.00001-5>
- Juvinall, R., & Marshek, K. (2017). *Fundament of machine component design* (6th ed.). John Wiley & Sons, Inc.
- Llorca, J., Muñoz, J., Rdez-Sedano, E., & Rodríguez, I. (1995). *ROM 0_4-95 Acciones climáticas II: Viento: Vol. I*. Ministerio de Obras Públicas, Transporte y Medio Ambiente .
- Norske Veritas, D. (2010). *RECOMMENDED PRACTICE ENVIRONMENTAL CONDITIONS AND ENVIRONMENTAL LOADS*. <http://www.dnv.com>
- Oberg, E., Jones, F., Horton, H., & Ryffel, H. (2008). *Machinery's handbook*. Industrial Press.

- Ocampo, F., Bruns, T., & Chawla, A. (2018). *Guide to Wave Analysis and Forecasting*.
- Rodríguez, A. (2015). Estudio de las solicitaciones metaocenánicas extremas y las respuestas asociadas a una plataforma eólica flotante tipo spar. In *Coastal Engineering* (Vol. 54, Issue 1). <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2006.08.004>
- Rueda, J. (2015). *Caracterización hidromecánica de plataformas marinas en aguas intermedias sometidas a cargas de oleaje y corriente mediante modelación numérica*. SOCIB. (2010). Observing Facilities. <https://www.socib.es/?seccion=observingFacilities&facility=glider>
- The James F. Lincoln Arc Welding Foundation. (n.d.). *Weld Cracking An Excerpt from The Fabricators' and Erectors' Guide to Welded Steel Construction*.
- Toro, V. (2014). *Estudio sobre el crecimiento del oleaje limitado por el fetch en presencia de swell utilizando radares de alta frecuencia*.
- van Leer, B., & Powell, K. G. (2010). Introduction to Computational Fluid Dynamics. *Encyclopedia of Aerospace Engineering*. <https://doi.org/10.1002/9780470686652.eae048>
- Vazquez, A. M., Reid, R. O., F Dimarco, S., & Jochens, A. E. (2005). Bay of Campeche circulation: An update. In *Geophysical Monograph Series* (Vol. 161, pp. 279–293). Blackwell Publishing Ltd. <https://doi.org/10.1029/161GM20>
- Windy: *Wind map & weather forecast*. (2021, May 7). © Colaboradores de OpenStreetMap. <https://www.windy.com/es/-Corrientes-marinas-currents?cmems,currents,25.721,-95.559,5,m:ejXadD7>