



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL – ESTRUCTURAL

**ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD DE UMBILICALES EN AGUAS
PROFUNDAS DEL GOLFO DE MÉXICO**

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA CIVIL

PRESENTA:
GONZALO PABLO HERNÁNDEZ

TUTOR
DR. FRANCISCO LEONEL SILVA GONZÁLEZ

CIUDAD DE MÉXICO, NOVIEMBRE 2019

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Luis Esteva Maraboto

Secretario: Dra. Sonia Elda Ruiz Gómez

1er. Vocal: Dr. Francisco Leonel Silva González

2do. Vocal: Dr. José Alberto Escobar Sánchez

3er. Vocal: Dr. Roberto Gómez Martínez

CIUDAD DE MÉXICO, NOVIEMBRE 2019

TUTOR DE TESIS:
Dr. Francisco Leonel Silva González

GONZALO - PABLO

**Structural Reliability Analysis of an Umbilical
in the Gulf of Mexico**

Mexico City, 2019

**NATIONAL AUTONOMOUS UNIVERSITY OF MEXICO
FACULTY OF ENGINEERING**

SUMMARY

Mexico has the great fortune of having enough energy resources in its national territory, among the most important are oil. Currently, the country seeks to detonate the enormous potential of the energy sector and thus contribute to the development of the nation taking advantage of these natural resources efficiently and sustainably. It has been shown that the reserves of this hydrocarbon are currently located in shallow and deep waters of the Gulf of Mexico. From the oil expropriation by the Mexican government in the year 1938 to the 21st century (specifically the last 20 years), oil extraction, mainly, has been concentrated in shallow waters of the Mexican gulf and is controlled exclusively by the state oil company PEMEX.

On the other hand, the enormous energy demand of the planet, global market prices, as well as the drop in oil production and extraction in Mexico, have made exploration, drilling and extraction in deep waters of the Gulf of Mexico economically feasible and technically viable, as well as in different remote parts of the oceans around the world subject to harsh ocean weather conditions. Currently there are oil facilities operating in deep water, the main areas where this type of investment has been made are located in the North Sea in Europe (Norway), the Mediterranean Sea (Libya and Egypt), Gulf of Mexico (USA and Mexico), West Africa (Nigeria, Mauritania, Angola), South America (Brazil) and the South Sea from China.

Faced with this enormous panorama of adversity and at the same time of opportunity, the Mexican Government, carried out the Energy Reform, one of the most important for the country, with the vision of positioning Mexico at the forefront of the oil sector worldwide. Thanks to this, important development opportunities have been generated in engineering, research and application of offshore infrastructure in the Gulf of Mexico. This thesis project is one of them and is specifically focused on determining the structural reliability of an umbilical cable of a hypothetically located oil production system in deep waters of the Mexican part of the Gulf of Mexico, the Trion field, with an average depth of 1,500 m. Currently, the Trion field has proven, probable and possible reserves of 485 million barrels of crude oil and is considered one of the main development fields with great energy potential for the country.

RESUMEN

México tiene la enorme fortuna de contar con bastantes recursos energéticos en su territorio nacional, de entre los más importantes se encuentran el petróleo.

Actualmente el país busca detonar el enorme potencial del sector energético y así contribuir al desarrollo de la nación aprovechando de forma eficiente y sustentable estos recursos naturales. Se ha demostrado que actualmente las reservas de este hidrocarburo están ubicadas en aguas someras y aguas profundas del Golfo de México. Desde la expropiación petrolera por el gobierno mexicano en el año de 1938 hasta el siglo XXI, (específicamente los últimos 20 años), la extracción petrolera, principalmente, se ha concentrado en aguas someras del golfo mexicano y es controlado exclusivamente por la compañía petrolera estatal PEMEX.

Por otra parte, la enorme demanda energética del planeta, los precios del mercado global, así como la caída de producción y extracción del petróleo en México, han hecho económicamente factible y técnicamente viable la exploración, perforación y extracción en aguas profundas del Golfo de México, así como en diferentes partes remotas de los océanos alrededor de todo el mundo sujetas a duras condiciones océano/ meteorológicas. Actualmente ya existen instalaciones petroleras operando en aguas profundas, las principales zonas en donde se ha hecho este tipo de inversiones se encuentran ubicadas en el mar del norte en Europa (Noruega), el mar Mediterráneo (Libia y Egipto), **Golfo de México (USA y México)**, oeste de África (Nigeria, Mauritania, Angola), sur de América (Brasil) y el mar del sur de China.

Ante este enorme panorama de adversidad y a la vez de oportunidad, el Gobierno Mexicano, realizó la Reforma Energética, una de las más importantes para el país, con la visión de posicionar a México en la vanguardia del sector petrolero a nivel mundial. Gracias a ello, se han generado importantes oportunidades de desarrollo en ingeniería, investigación y aplicación de infraestructura *offshore* en el Golfo de México. **Este proyecto de tesis es uno de ellos y está enfocado específicamente en determinar la confiabilidad estructural de un cable umbilical de un sistema de producción petrolero ubicado, hipotéticamente, en aguas profundas de la parte mexicana del Golfo de México**, el campo Trion, con una profundidad promedio de 1,500 m. Actualmente, el campo Trion, tiene reservas probadas, probables y posibles de 485 millones de barriles de petróleo crudo y es considerado uno de los principales campos de desarrollo con gran potencial energético para el país.

NOTACIÓN/ACRÓNIMOS

GoM	Golfo de México
MBR	Radio de curvatura mínimo (por sus siglas en inglés Minimum Bending Radius)
API	American Petroleum Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials
DNV	Det Norske Veritas
PEMEX	Petróleos Mexicanos
RAO	Operador de amplitud de respuesta (por sus siglas en inglés Response Amplitude Operator)
TDP	Punto de contacto (por sus siglas en inglés Touch Down Point)
TDZ	Zona de contacto (por sus siglas en inglés Touch Down Zone)
ROUV	Vehículo submarino operado por control remoto (por sus siglas en inglés Remotely Operated Underwater Vehicle)
EMC	Compatibilidad electromagnética (por sus siglas en inglés Electromagnetic Compatibility)
MDPE	Polietileno de mediana densidad (por sus siglas en inglés Medium Density Polyethylene)
ALS	Estado límite accidental (por sus siglas en inglés Accidental Limit State)
FLS	Estado límite de fatiga (por sus siglas en inglés Fatigue Limit State)
SLS	Estado límite de servicio (por sus siglas en inglés Serviceability Limit State)
ULS	Estado límite último (por sus siglas en inglés Ultimate Limit State)
LRFD	Factores de diseño de carga y resistencia (por sus siglas en inglés Load and Resistance Factor Design)
WSD	Diseño por esfuerzos permisibles (por sus siglas en inglés Working Stress Design)
MPM	Valor máximo más probable (por sus siglas en inglés Most Probable Maximum)
PDF	Función de densidad de probabilidad (por sus siglas en inglés Probability Density Function)
CDF	Función acumulada de probabilidad (por sus siglas en inglés Cumulative Distribution Function)
SORM	Método de confiabilidad de segundo orden (por sus siglas en inglés Second Order Reliability Methods)
FORM	Método de confiabilidad de primer orden (por sus siglas en inglés First Order Reliability Method)

SRA	Análisis de confiabilidad estructural (por sus siglas en inglés Structural Reliability Analysis)
NBM	Nivel de Bajamar Medio
heave	Arzada, traslación a lo largo del eje vertical de una embarcación
surge	Vaiven, traslación a lo largo del eje longitudinal de una embarcación
sway	Deriva, traslación a lo largo del eje transversal de una embarcación
yaw	Guiñada, rotación alrededor del eje vertical de una embarcación
pitch	Cabeceo, rotación alrededor del eje transversal de una embarcación
roll	Balanceo, rotación alrededor del eje longitudinal de una embarcación
H_s	Altura de ola significativa
T_p	Periodo pico
F_y	Valor mínimo garantizado del esfuerzo correspondiente al límite inferior de fluencia del acero
F_u	Esfuerzo mínimo especificado de ruptura en tensión del acero
near	Distancia horizontal cercana al punto de anclaje
far	Distancia horizontal lejana al punto de anclaje

ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD DE UMBILICALES EN AGUAS PROFUNDAS DEL

GoM

por

Gonzalo Pablo Hernández

Este trabajo está organizado en 7 capítulos. El Capítulo 1 describe de forma general los sistemas submarinos de producción, establece el objetivo principal de la tesis, así como la metodología para lograrlo. El Capítulo 2 presenta la situación actual de los sistemas de cables umbilicales, el proceso de diseño, la fabricación, los diferentes tipos de materiales que se usan, las principales configuraciones de instalación y operación, así como los trabajos académicos que se han desarrollado acerca de este tema, también se presenta la situación actual, internacional y nacional, de los buques FPSO. En el Capítulo 3 están las principales normas, recomendaciones y reglamentos que se deben seguir para el proceso de diseño de cables umbilicales y análisis de confiabilidad estructural. El Capítulo 4 presenta el cable umbilical propuesto para su análisis en el Campo Trion y los resultados considerando la revisión del diseño con el método convencional determinista mientras que en el Capítulo 5 se considera la revisión del diseño por el método probabilístico. El Capítulo 6 analiza los resultados obtenidos y hace una comparativa entre el análisis determinista y el análisis probabilístico. Finalmente, en el Capítulo 7 se emiten las conclusiones y recomendaciones generales.

ÍNDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN	5
1.1. OBJETIVO.....	7
1.2. METODOLOGÍA	8
2. ESTADO DEL ARTE	10
2.1. FPSO, UNIDAD FLOTANTE DE PRODUCCIÓN, ALMACENAMIENTO Y TRASIEGO DE PETRÓLEO	11
2.2. INFRAESTRUCTURA DE CABLES UMBILICALES	16
2.2.1. TIPO DE SECCIONES Y MATERIALES	19
2.2.2. DISEÑO DE UMBILICALES	22
2.2.3. FABRICACIÓN	24
2.2.4. CONFIGURACIONES DE INSTALACIÓN.....	25
2.2.5. CONFIGURACIONES DE OPERACIÓN.....	28
2.2.6. FALLAS ESTRUCTURALES.....	30
3. CÓDIGOS, REGULACIONES, REGLAMENTOS	33
4. CABLE UMBILICAL PLANTEADO/PROPUESTO	37
4.1. UBICACIÓN DEL CAMPO TRION EN EL GoM.....	37
4.2. ANÁLISIS HIDRODINÁMICO	37
4.2.1. DENSIDAD ESPECTRAL DE OLEAJE	40
4.2.2. OPERADOR DE AMPLITUD DE RESPUESTA.....	41
4.2.3. PERFIL DE LA VELOCIDAD DE LA CORRIENTE.....	45
4.3. CABLE UMBILICAL ANALIZADO	46
4.4. CONFIGURACIÓN LAZY-WAVE ANALIZADA.....	52
4.4.1. CONFIGURACIÓN DEL MODELO.....	52
4.5. ANÁLISIS MODAL	55
4.6. RESULTADOS ANÁLISIS HIDRODINÁMICO.....	59
4.7. REVISIÓN POR CRITERIO DE DISEÑO DE CARGA COMBINADA WSD, ULS	73
4.7.1. FUERZAS ACTUANTES	73
4.7.2. FUERZAS RESISTENTES	77
4.8. ANÁLISIS DE TRASLACIONES.....	84
5. CONFIABILIDAD ESTRUCTURAL	99
5.1. INTRODUCCIÓN A LA CONFIABILIDAD	102
5.2. CARACTERIZACIÓN DE LAS VARIABLES ALEATORIAS.....	105
5.3. MARGEN DE SEGURIDAD	116
5.4. CÁLCULO DE LA CONFIABILIDAD ESTRUCTURAL	118
6. RESULTADOS	120
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	121

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Sistema submarino de producción <i>offshore</i> , cortesía de TechnipFMC 2017.....	6
Figura 2 Tipos de instalaciones para aguas profundas, cortesía <i>Wood Group</i>	10
Figura 3 FPSO con torreta interna (izquierda) y externa (derecha). Fuente: elaboración propia.....	12
Figura 4 Ubicación de instalaciones tipo FPSO. Fuente: elaboración propia.....	13
Figura 5 FPSO; YUUM K'AK' NAAB, CRYSTAL OCEAN, ECO III, TOISA PISCES y TA'KUNTAH.	15
Figura 6 Sección típica, geometría y dimensiones de dos cables umbilicales diferentes	17
Figura 7 Secciones de cables umbilicales, cortesía de <i>TEconnectivity Industries & Solutions Oil, Gas and Marine</i>	19
Figura 8 Umbilical producido por <i>NEXANS</i> , obtenida de Hovde, M. (2017) y modificada por el autor.....	20
Figura 9 Fabricación y almacenaje de un cable umbilical. Fuente: elaboración propia	24
Figura 10 Configuración <i>S-lay</i> , obtenida de Lu, X. (2013) y modificada por el autor.....	25
Figura 11 Configuración <i>J-lay</i> , obtenida de Lu, X. (2013) y modificada por el autor.....	26
Figura 12 Configuración <i>Reel-lay</i> , obtenida de Lu, X. (2013) y modificada por el autor	27
Figura 13 Configuración <i>Tow-In</i> , obtenida de Lu, X. (2013) y modificada por el autor	27
Figura 14 Configuraciones para infraestructura submarina de cables umbilicales hacia la superficie. Fuente: elaboración propia	29
Figura 15 Fallas debido a pandeo lateral: a), b), e), i), colapso: c), fatiga por torsión: d), g), h) y degradación: f). Fuente: elaboración propia	30
Figura 16 Campo Trion, mapa de concesiones de gas y petróleo en el GoM, 2018.....	37
Figura 17 Oleaje regular (izquierda) Vs Oleaje irregular (derecha), Puerto de Ensenada Baja California. Fuente: elaboración propia	38
Figura 18 Análisis dinámicos de estructuras <i>offshore</i>	39
Figura 19 Contorno ambiental Tr 100 años, GoM	41
Figura 20 Surge RAO, frecuencia H_z Vs respuesta m/m	42
Figura 21 Heave RAO, frecuencia H_z Vs respuesta m/m	42
Figura 22 Pitch RAO, frecuencia H_z Vs respuesta m/m	43
Figura 23 Surge ángulo de fase RAO, frecuencia H_z Vs respuesta deg	43
Figura 24 Heave ángulo de fase RAO, frecuencia H_z Vs respuesta deg	44
Figura 25 Pitch ángulo de fase RAO, frecuencia H_z Vs respuesta deg	44
Figura 26 Perfil vertical de velocidades, obtenida de Zárate, L. (2015).....	45
Figura 27 Fotografía y modelo FEM del cable umbilical dinámico analizado Agbami, obtenida del trabajo realizado por Mohammad, S. (2014)	46
Figura 28 Propiedades y sección en corte del cable umbilical dinámico analizado Agbami, obtenida del trabajo realizado por Mohammad, S. (2014)	48

Figura 29 Configuración de los 26 tubos de acero	50
Figura 30 Propuesta de configuración en <i>Lazy-Wave</i> longitud 2,200 m. Fuente: elaboración propia	54
Figura 31, 1 ^{er} modo de vibrar	56
Figura 32, 2 ^{do} modo de vibrar	57
Figura 33, 3 ^{er} modo de vibrar	58
Figura 34 Contorno ambiental Tr 100 años, Tensión Efectiva	59
Figura 35 Contorno ambiental Tr 100 años, momento flexionante	60
Figura 36 Contorno ambiental Tr 100 años, MBR	60
Figura 37 Tensión efectiva, configuración <i>lazy wave</i>	62
Figura 38 Momento flexionante, configuración <i>lazy wave</i>	62
Figura 39 Curvatura, configuración <i>lazy wave</i>	63
Figura 40 Discretización del modelo	64
Figura 41 Serie temporal de la tensión efectiva, caso 6, nodo 125	65
Figura 42 Serie temporal de la curvatura, caso 6, nodo 241	66
Figura 43 Serie temporal del momento flexionante, caso 6, nodo 241	67
Figura 44 Serie temporal de la elevación de la superficie del agua, caso 6	68
Figura 45 Serie temporal de la respuesta FPSO <i>heave</i> , caso 6	69
Figura 46 Serie temporal de la respuesta FPSO <i>pitch</i> , caso 6	70
Figura 47 Apoyo en la superficie del umbilical " <i>hang-off device</i> ". Fuente: elaboración propia	76
Figura 48 Traslaciones <i>near y far</i>	84
Figura 49 Serie Temporal de la Tensión Efectiva, Caso 6 <i>NEAR 10%</i> , Nodo 241	87
Figura 50 Serie Temporal de la Curvatura, Caso 6 <i>NEAR 10%</i> , Nodo 241	88
Figura 51 Serie Temporal del Momento Flexionante <i>NEAR 10%</i> , Caso 6, Nodo 241	89
Figura 52 Serie Temporal de la Elevación de la superficie del agua, Caso 6 <i>NEAR 10%</i>	90
Figura 53 Serie Temporal de la Respuesta FPSO <i>heave</i> , Caso 6 <i>NEAR 10%</i>	91
Figura 54 Serie Temporal de la Respuesta FPSO <i>pitch</i> , Caso 6 <i>NEAR 10%</i>	92
Figura 55 Serie Temporal de la Tensión Efectiva, Caso 6 <i>FAR 10%</i> , Nodo 241	93
Figura 56 Serie Temporal de la Curvatura, Caso 6 <i>FAR 10%</i> , Nodo 241	94
Figura 57 Serie Temporal del Momento Flexionante <i>FAR 10%</i> , Caso 6, Nodo 241	95
Figura 58 Serie Temporal de la Elevación de la superficie del agua, Caso 6 <i>FAR 10%</i>	96
Figura 59 Serie Temporal de la Respuesta FPSO <i>heave</i> , Caso 6 <i>FAR 10%</i>	97
Figura 60 Serie Temporal de la Respuesta FPSO <i>pitch</i> , Caso 6 <i>FAR 10%</i>	98
Figura 61 Función de estado límite	101
Figura 62 Propuesta de 9 densidades espectrales de oleaje adicionales	110
Figura 63 Superficies de respuesta de tensión efectiva (izquierda) y momento flexionante (derecha)	110
Figura 64 Coeficiente de sensibilidad asociados al valor medio	118
Figura 65 Coeficiente de sensibilidad asociados a la desviación estándar	119

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Información técnica, <i>TEconnectivity Industries & Solutions Oil, Gas and Marine</i>	20
Tabla 2 Cálculo de la rigidez global al momento flexionante	51
Tabla 3 Propiedades dinámicas del umbilical	55
Tabla 4 Cálculo de los momentos máximos para las 26 tuberías del cable umbilical, caso 6 nodo 241	74
Tabla 5 Revisión por criterio de cargas combinadas, Caso 6 nodo 125, Método WSD	82
Tabla 6 Revisión por criterio de cargas combinadas, Caso 6 nodo 241, Método WSD	83
Tabla 7 Valores MPM tensión efectiva caso 6, near 10% y far 10%, nodo 241	85
Tabla 8 Valores MPM curvatura caso 6, near 10% y far 10%, nodo 241	85
Tabla 9 Valores MPM momento flexionante caso 6, near 10% y far 10%, nodo 241	85
Tabla 10 Tensión Efectiva, offset 10% de la profundidad, Nodo 241	111
Tabla 11 Momento Flexionante, offset 10% de la profundidad, Nodo 241	111
Tabla 12 Curvatura, offset 10% de la profundidad, Nodo 241	112
Tabla 13 Valores aceptables de probabilidad de falla anual y confiabilidad objetivo	120

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente la demanda de hidrocarburos es tan alta en todo el mundo que las reservas de petróleo y gas natural en lugares accesibles del planeta se están agotando. Antes de que se llegue a un punto de inflexión en el que la demanda sea mayor que la oferta y por tanto exista un desabasto además de costos elevados en los hidrocarburos, empresas transnacionales y gobiernos trabajan en conjunto para extraer estos energéticos en lugares tan inhóspitos y poco accesibles que en otras épocas y situaciones hubiera resultado prácticamente imposible de alcanzar. Las grandes reservas de estos hidrocarburos se encuentran debajo de los océanos que cubren aproximadamente el 70% de la superficie terrestre, en donde las condiciones oceanográficas y meteorológicas son tan hostiles que incluso, actualmente, el hombre no ha podido dominar por completo, un ejemplo de ello es Cabo de Hornos en Chile. Debido a que la demanda va en aumento es más viable económicamente la extracción en lugares más y más profundos del mar y alejados de las zonas costeras, este es uno de los factores principales que determina la complejidad de la infraestructura *offshore* necesaria para la obtención de hidrocarburos; la profundidad del lecho marino desde la superficie del agua. Para efectuar las actividades tan complejas de la extracción de hidrocarburos en aguas profundas la industria petrolera internacional ha utilizado exitosamente los sistemas submarinos y los sistemas flotantes de producción.

La **Figura 1** muestra un sistema de producción típico en aguas profundas que consiste en extraer las reservas energéticas subterráneas del lecho marino hacia las válvulas, bobinas, medidores de presión, estranguladores y demás equipo mecánico instalado sobre el lecho marino normalmente llamado *cross tree*, *X-tree* o *Christmas tree*, estos equipos mecánicos se interconectan con el sistema de ductos que se agrupan en ductos de perforación, inyección, producción y terminación. Finalmente, estos ductos ascienden hasta la TLP (por sus siglas en inglés *Tension Leg Platform*) o hacia un FPSO (por sus siglas en inglés *Floating Production, Storage and Offloading Vessel*) en la superficie del océano. En resumen, los sistemas submarinos de producción reciben los hidrocarburos desde los pozos y los envían a través de ductos y/o *risers* hacia los sistemas flotantes para su procesamiento, almacenamiento o venta. Los cables umbilicales son los componentes que interconectan los sistemas submarinos con los sistemas flotantes y que además tienen la función de controlar los sistemas de extracción y transporte de los hidrocarburos desde el yacimiento hasta las instalaciones en la superficie. De forma general los cables umbilicales son necesarios para transportar fluidos de control, corriente eléctrica y así poder operar los dispositivos electrónicos submarinos, así como los equipos de seguridad y transmisión de datos, es decir, un cable umbilical está compuesto de varios cables o tubos en su interior, la cantidad de tubos internos está determinado por el sistema de producción a controlar, si el sistema es muy complejo el umbilical también lo será. Estructuralmente debe resistir las cargas ambientales dinámicas impuestas por el océano y las traslaciones que le imponen las instalaciones de la superficie.

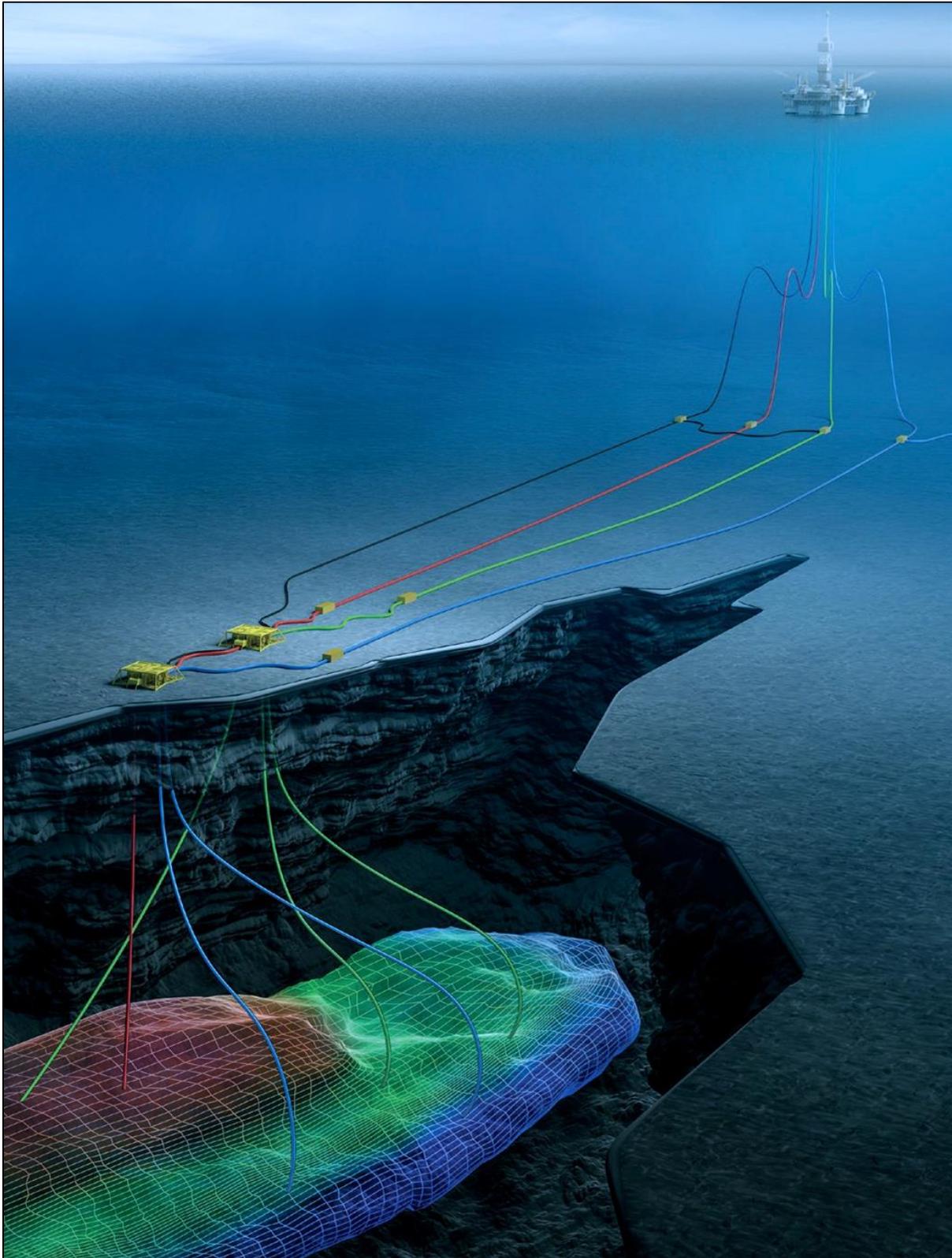


Figura 1 Sistema submarino de producción *offshore*, cortesía de TechnipFMC 2017

1.1. OBJETIVO

El objetivo de este trabajo es realizar un análisis de confiabilidad estructural para obtener la probabilidad de falla de un cable umbilical instalado y operando (hipotéticamente) en el campo Trion del Golfo de México ante eventos oceanográficos extremos (huracanes y tormentas de invierno).

1.2. METODOLOGÍA

La metodología propuesta de este trabajo se describe a continuación:

Como paso inicial se estableció un cable umbilical ya existente que opera en condiciones similares de profundidad a las esperadas en el Campo Trion. El análisis fue enfocado en el Estado Límite Último ULS (por sus siglas en inglés *Ultimate Limit State*) acorde con las reglas y recomendaciones del ente internacional marítimo DNV (por sus siglas *Det Norske Veritas*) mientras que para la revisión por diseño (para saber si el cable propuesto resiste las situaciones de operación más extremas en mar adentro en la temporada de huracanes y tormentas de invierno) se empleó la metodología WSD (por sus siglas en inglés *Working Stress Design*).

La respuesta que se analizó fue: la tensión efectiva, momento flexionante, presión externa y curvatura. Para obtener la respuesta dinámica se realizó un análisis en el dominio del tiempo, simulando 3 horas de tormenta para los estados de mar caracterizados por su densidad espectral mediante un modelo global del umbilical y una configuración de operación. La representación del modelo global consideró los efectos de rigidez, amortiguamiento, masa, movimientos del buque inducidos por el oleaje y viento utilizando un RAO (por sus siglas en inglés *Response Amplitude Operator*) además de las condiciones hidrostáticas, hidrodinámicas y corrientes oceánicas. Adicionalmente se realizó el análisis modal para la configuración de operación propuesta y se determinaron los primeros 10 modos de vibrar, posteriormente se verifico que estos periodos no coincidan con los periodos predominantes del oleaje en el mar.

Con los resultados obtenidos y el criterio de diseño de carga combinada WSD basado en una relación de interacción que considera los efectos dinámicos combinados de la tensión efectiva, el momento flexionante y la presión externa a evaluar para el ULS DNV (2018), se determinó que el cable umbilical propuesto, así como la configuración **satisface las condiciones de operación** esperadas en el Campo Trion. También se identificó en que zonas del umbilical se presentan los valores críticos de las fuerzas máximas más probables MPM (por sus siglas en inglés *Most Probable Maximum*). Adicionalmente se revisó que el cable umbilical soportara desplazamientos horizontales en dirección *near* y *far* de un 10% del valor del tirante de agua, estos desplazamientos representan físicamente los movimientos de traslación que el FPSO realiza por consecuencia del viento y oleaje. En la zona crítica del contorno ambiental (específicamente entre las densidades espectrales 5 y 6 ver la **Figura 19**) se plantearon 9 puntos adicionales, es decir 9 densidades espectrales H_s Vs T_p y se simulo para cada uno de ellos 3 horas de tormenta. El objetivo de estas densidades espectrales adicionales es obtener los valores críticos MPM de la tensión efectiva, el momento flexionante y la curvatura para cada una de ellas. Con los resultados obtenidos se realizó un ajuste por mínimos cuadrados para obtener un modelo cuadrático (un polinomio de segundo grado que geométricamente representa una superficie en un sistema coordenado 3D), estas superficies representan la tensión efectiva, el momento flexionante y la curvatura en función de H_s y T_p .

El objetivo de plantear estas superficies de respuesta en función de H_s y T_p , es principalmente por las siguientes 3 razones;

La primera razón es que, al obtener las superficies de respuesta de tensión efectiva, momento flexionante y curvatura en función de H_s y T_p podemos evaluar dicha función para cualquier densidad espectral (siempre y cuando se encuentre dentro de las fronteras válidas de cada función) y así obtener de forma aproximada el valor de la respuesta sin la necesidad de realizar tantas horas de simulación. La segunda razón es que actualmente ya se ha planteado la función conjunta de probabilidad para las variables H_s y T_p , así como la correlación que existe entre ambas utilizando datos de oleaje de una boya cercana a la zona de estudio (haciendo uso de la metodología de máxima verosimilitud). La tercera razón es que con la distribución de probabilidad conjunta podemos determinar de forma mucho más aproximada la confiabilidad estructural del cable umbilical. Las superficies de respuesta son una herramienta muy útil en los análisis de confiabilidad de sistemas estructurales complejos ya que simplifican los cálculos de la respuesta.

El software que se usó para resolver el modelo global fue FLEXCOM® que emplea la solución por el Método de Elemento Finito FEM (por sus siglas en inglés *Finite Element Method*). FLEXCOM® es la herramienta más avanzada y versátil a nivel global con más de 30 años de experiencia se ha desarrollado específicamente para el sector *offshore* en la industria del gas y el petróleo. Actualmente es usado por los mayores operadores, contratistas, constructoras, fabricantes, investigación en universidades, así como por ingenieros consultores de primer nivel en todo el mundo. FEM es la herramienta más utilizada para el diseño y análisis de estructuras *offshore* que existe.

Una vez definidas las superficies de respuesta se hizo la propuesta de la variación aleatoria en la resistencia, esto se logró haciendo uso de la distribución de probabilidad lognormal, la media y desviación estándar se determinaron con los valores MPM de tensión efectiva, momento flexionante y curvatura respectivamente. Esta consideración ha sido ya planteada para el análisis de confiabilidad estructural en *risers* y calibración de códigos, por lo tanto, puede ser empleada para el caso de un cable umbilical pues estructural y dinámicamente se comportan de manera similar. Finalmente, definidas las distribuciones de probabilidad lognormal de las resistencias y las superficies de respuesta; cargas, se planteó el margen de seguridad para obtener la probabilidad de falla haciendo uso de la transformación de Nataf y los métodos FORM (por sus siglas en inglés *First Order Reliability Method*) y SORM (por sus siglas en inglés *Second Order Reliability Method*). Con los resultados obtenidos, se hizo un análisis comparativo para saber si la probabilidad de falla está dentro de los rangos permisibles recomendados por la norma DNV (1992) para diseño basado en confiabilidad.

2. ESTADO DEL ARTE

Actualmente la industria especializada en exploración y extracción de hidrocarburos *offshore* ha evolucionado en diferente tipo de instalaciones acordes a las condiciones específicas en donde operan, es decir, a las características marítimas de oleaje, batimetría, viento, profundidad y velocidad de corriente. Los tipos de instalaciones en aguas profundas se muestran a continuación, ver la **Figura 2**, así como sus acrónimos ingleses universales.¹

CT	<i>Compliant Tower</i>
DDCV	<i>Deep Draft Caisson Vessel</i>
DDS	<i>Deep Draft Semi</i>
FDPSO	<i>Floating Drilling, Production, Storage and Offloading System</i>
FLNG	<i>Floating Liquefied Natural Gas Vessel</i>
FPS	<i>Floating Production System</i>
FPSO	<i>Floating Production, Storage and Offloading Vessel</i>
FPU	<i>Floating Production Unit</i>
MinDOC	<i>Cross between a semisubmersible and a truss spar</i>
MODU	<i>Mobil Offshore Drilling Unit</i>
Semi-FPU	<i>Semi-Submersible Floating Production Unit</i>
SSTB	<i>Subsea Tieback</i>
TLP	<i>Tension Leg Platform</i>

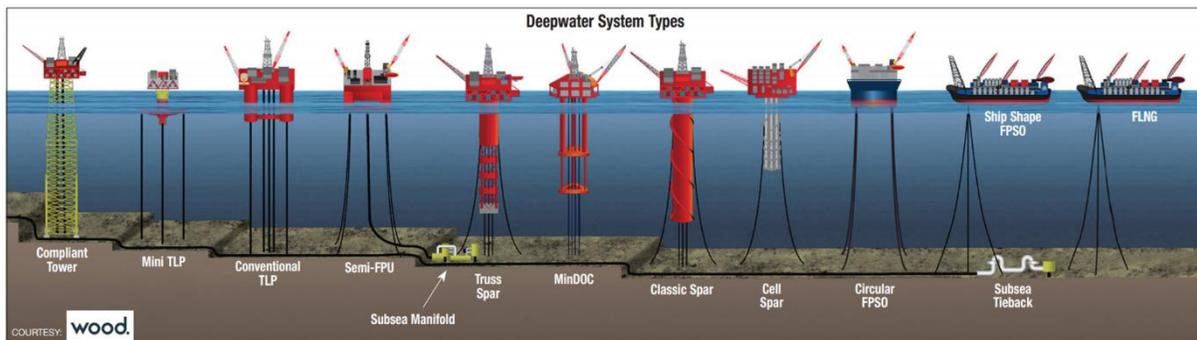


Figura 2 Tipos de instalaciones para aguas profundas, cortesía Wood Group

Como consecuencia, los cables umbilicales han tenido que adaptarse a estas circunstancias aumentando su longitud, profundidad y configuraciones de operación, por ejemplo, la máxima profundidad a la que se ha instalado un umbilical es a 2,926 m en el área "El Perdido" (abril de 2010), otro umbilical importante ha sido instalado a 2,316 m de profundidad en el área conocida como "Shell's Na Kika" ambos en el GoM.

¹ <https://www.offshore-mag.com/content/dam/offshore/print-articles/Volume-78/05/2018-deepwaterposter-d7out.pdf>

2.1. FPSO, UNIDAD FLOTANTE DE PRODUCCIÓN, ALMACENAMIENTO Y TRASIEGO DE PETRÓLEO

Un buque FPSO es una Unidad Flotante de Producción, Almacenamiento y Trasiego de Petróleo, este barco está diseñado específicamente para la industria *offshore* con la finalidad de procesar, almacenar, transferir y descargar el petróleo a otro barco o en una terminal *onshore*. Un FPSO es la mejor solución para zonas de extracción en aguas profundas y ultra-profundas alejadas de las zonas costeras ya que cubre varios aspectos logísticos de la industria petrolera. El FPSO debe permanecer anclado en la zona durante todo el ciclo de vida del yacimiento que explota, cuando sus tanques de almacenamiento están llenos debe trasegar el petróleo hacia un buque petrolero. Para cada entorno ambiental marítimo de explotación y operación, es decir, condiciones normales o condiciones extremas del océano existe un diseño específico de FPSO, por lo tanto, un buque FPSO que opera en las aguas tranquilas de África occidental no podría operar en las condiciones tan exigentes del Mar del Norte en Europa. La conexión entre las líneas de operación y producción con el FPSO se hace mediante una torreta que normalmente se coloca (externamente) en la proa del buque o al interior, esta estructura permite al FPSO virar 360° en cualquier dirección con la finalidad de reducir las fuerzas incidentes del medio ambiente (minimizar el efecto del viento y oleaje). El sistema de conexión con la torreta puede estar diseñado para ser desconectado o permanecer conectado permanentemente. Otras partes comunes en los FPSO son el brazo de descarga, planta de procesos y equipos auxiliares. Las principales ventajas de usar un FPSO son:

Altamente eficaces en lugares remotos y en aguas profundas comparadas con las plataformas.

Elimina el uso de tuberías y gasoductos de larga distancia que suelen ser muy costosos ya que deben transportar el petróleo desde el pozo hasta una terminal terrestre *onshore*.

Para campos petroleros con pequeñas reservas de hidrocarburos que se pueden extraer en pocos años es mucho más rentable usar un FPSO si se compara con la inversión de instalar una plataforma fija y tuberías.

Una vez que un yacimiento ha sido totalmente explotado el FPSO puede ser trasladado hacia un nuevo yacimiento.

En lugares de extracción bajo condiciones extremas de operación, huracanes o *icebergs*, el FPSO puede desconectarse de todos los amarres y conexiones para evitar accidentes y derrames, una vez que las condiciones oceanográficas mejoran vuelve a conectarse.

La **Figura 3** presenta dos buques FPSO con la ubicación de la torreta de conexión al interior y al exterior del barco.

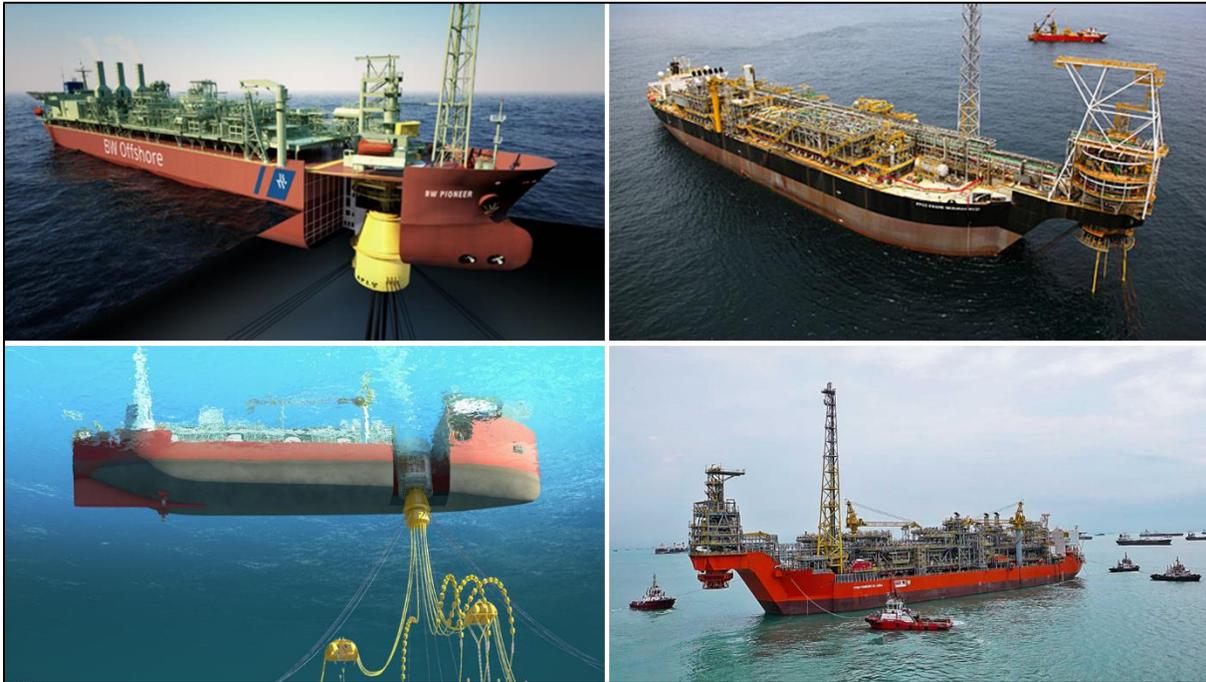


Figura 3 FPSO con torreta interna (izquierda) y externa (derecha). Fuente: elaboración propia

INTERNACIONALMENTE

Hasta marzo del año 2018², el estatus y la tendencia del uso de FPSO en aguas profundas de todo el mundo respecto a otras instalaciones es del 66%.

Brasil	58 instalaciones
Oeste de África	47 instalaciones
Mar del Norte	34 instalaciones
Sureste de Asia	30 instalaciones
China	16 instalaciones
Australasia	15 instalaciones
México, GoM	4 instalaciones
India, este medio	4 instalaciones
Norte medio de África	3 instalaciones
Canadá	2 instalaciones
USA, GoM	2 instalaciones
Guayana	1 instalación

En orden decreciente, la ubicación *offshore* es la siguiente, ver la **Figura 4**:

² Datos obtenidos por: *Energy Maritime Associates and World Energy Reports Abandoned*, (www.worldenergyreports.com) cortesía de *Wood Group Ireland*.

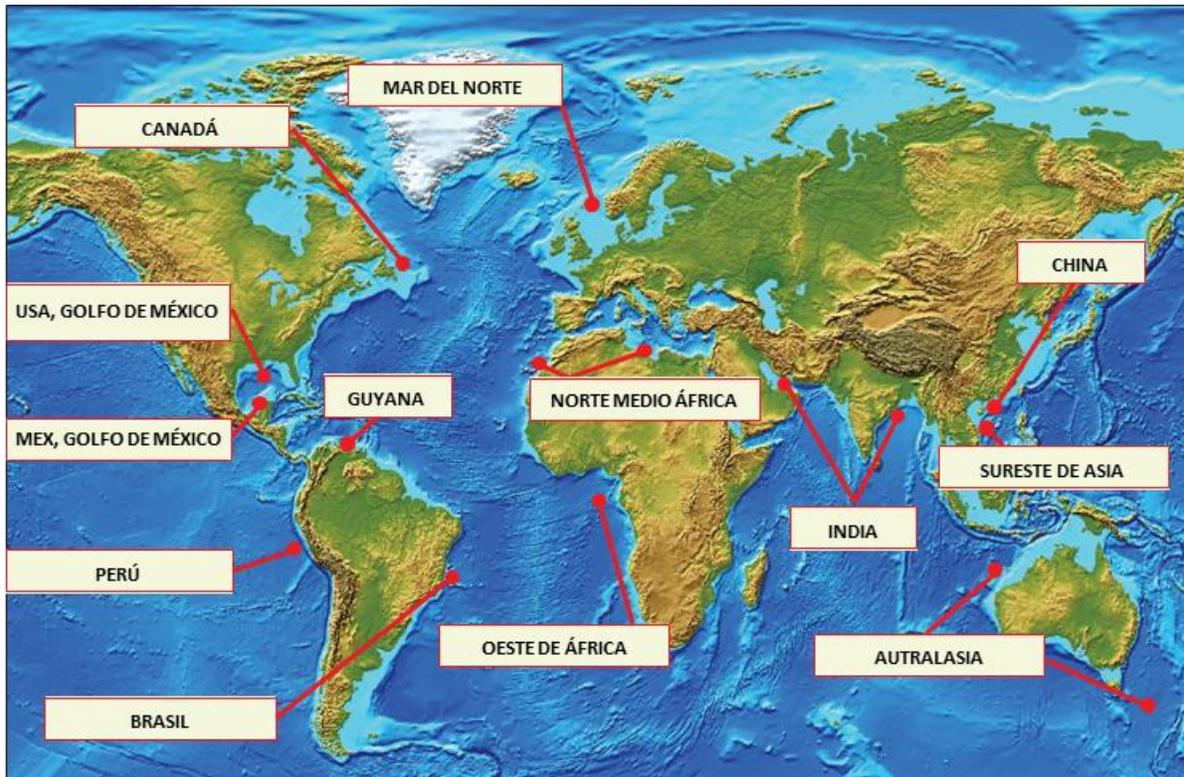


Figura 4 Ubicación de instalaciones tipo FPSO. Fuente: elaboración propia.

NACIONALMENTE

En el GoM, mar territorial, han operado los siguientes buques FPSO (información registrada hasta marzo de 2018)³, a través de un arrendamiento con diferentes empresas extranjeras mediante la paraestatal PEMEX Exploración y Producción.

Buque YUUM K'AK' NAAB (actualmente no está en operación), fue operado por **Bergesen Worldwide Mexico, S.A. de C.V.**, tipo de contrato: arrendamiento por 15 años. También conocido como buque tanque “*Señor del Mar*” por su traducción en maya, (buque previamente petrolero y modificado a FPSO), profundidad de operación 100 m, nombre del campo de operación Ku-Maloob-Zaap ubicado en la sonda de Campeche. Especificaciones técnicas: eslora de 347 m, manga 65 m, capacidad de almacenamiento 2.5 millones de barriles y cuenta con una capacidad de proceso de 200,000 bpd (barriles por día)⁴.

³ Datos obtenidos por: *Energy Maritime Associates and World Energy Reports Abandoned*, (www.worldenergyreports.com) cortesía de *Wood Group Ireland*.

⁴ http://bluemarine.com.mx/wp/wp-content/uploads/2018/06/yuum_k%E2%80%99gak_naab_2018.pdf

Buque CRYSTAL OCEAN, operado por **SEA PROD LTD. BLUE MARINE OIL & GAS**, tipo de contrato: arrendamiento por 2 años (finalizó operaciones en el año 2017). Buque de nueva construcción, específico para actividades de FPSO, profundidad de operación 170 m, ubicado en las costas de Tabasco. Especificaciones técnicas: eslora de 101 m, manga 21 m, cuenta con una capacidad de proceso de 37,700 bpd (barriles por día)⁵.

Buque ECO III, operado por **Marítima de Ecología S.A. de C. V.**, tipo de contrato: arrendamiento. Buque previamente petrolero y modificado a FPSO, profundidad de operación 300 m, ubicado en las costas de Campeche. Especificaciones técnicas: eslora de 117 m, manga 21 m, cuenta con una capacidad de proceso de 15,000 bpd (barriles por día)⁶.

Buque TOISA PISCES, operado por **Sea Lion Shipping**, tipo de contrato; arrendamiento. Buque previamente petrolero y modificado a FPSO. Especificaciones técnicas: eslora de 103 m, manga 23 m, cuenta con una capacidad de proceso de 20,000 bpd (barriles por día).

Buque TA'KUNTAH operado por Pemex Exploración y Producción. Buque previamente petrolero y modificado a FSO. Especificaciones técnicas: eslora de 391.60 m, manga de 60 m y calado de 22.36 m, cuenta con una capacidad de almacenamiento de 2,342,000 barriles de petróleo.⁷

La **Figura 5** muestra los 5 buques descritos.

⁵ <http://bluemarine.com.mx/wp/wp-content/uploads/2016/08/crystal-ocean-2.pdf>

⁶ <http://www.marecsa.com/downloads/2013%20ECO%20III%20-%20Espa%C3%B1ol.pdf>

⁷ www.pemex.com/bienes-no-utiles/Documents/Cat%25C3%25A1logo%2520Buque%2520Takuntah.pdf



Figura 5 FPSO; YUUM K'AK' NAAB, CRYSTAL OCEAN, ECO III, TOISA PISCES y TA'KUNTAH.

En el siguiente orden: superior a inferior, izquierda a derecha. Fuente: elaboración propia

2.2. INFRAESTRUCTURA DE CABLES UMBILICALES

Un cable umbilical está integrado por cables, fibra óptica, tubos de acero y mangueras de termoplástico, cada uno de estos componentes ejecutan funciones específicas y pueden existir dos o tres de estos componentes al interior de un cable. Esto hace posible controlar muchos sistemas con un solo umbilical, de forma coloquial podemos decir que un cable umbilical consiste en insertar muchos cables y/o tuberías dentro de otro cable más grande. Son elementos fundamentales en las actividades de los sistemas de producción *offshore* y de forma general pueden ser divididos en dos tipos, **Dinámicos y Estáticos**, la diferencia radica en el uso, por una parte, los cables dinámicos están diseñados para soportar cargas de oleaje, corrientes y movimientos inducidos desde la superficie (en este caso el FPSO) mientras que los cables estáticos están diseñados para operar en el fondo del mar.

Las aplicaciones son;

Cables dinámicos. Interconectar instalaciones sumergidas, conectar instalaciones desde el fondo del lecho marino hasta las estructuras de la superficie (FPSO y/o plataformas flotantes) y conectar instalaciones sumergidas desde el fondo del mar hasta instalaciones en la costa *onshore*; terminales marítimas, petroleras o gasificadoras. También son usados para inspección submarina a través de imágenes de video, control de **ROUV** (por sus siglas en inglés *Remotely Operated Underwater Vehicle*) más comúnmente denominados **ROV** para operaciones a grandes profundidades.

Cables estáticos. Interconectar las telecomunicaciones, la energía, los fluidos, así como las sustancias químicas necesarias para controlar todos los sistemas ubicados en el fondo marino.

Estructuralmente su comportamiento global es similar al de los *risers*, sin embargo, la sección geométrica, así como los materiales del que está compuesto lo hacen particularmente complejo y diferente para modelarlo y analizarlo localmente, ver la **Figura 6**.

Las características en la sección de un umbilical son muy variables pues normalmente cada cable es diseñado específicamente acorde para el lugar de operación, considerando los esfuerzos principales a los que estará sometido y también al tipo de esfuerzo que ocurre en zonas específicas de la configuración. Por ejemplo, en la superficie actúan más las fuerzas dinámicas, en el fondo descansa sobre el lecho marino por tanto las condiciones pueden considerarse de forma estática y en la configuración intermedia adopta la forma de una curva en catenaria libre que varía de acuerdo a la longitud propuesta.

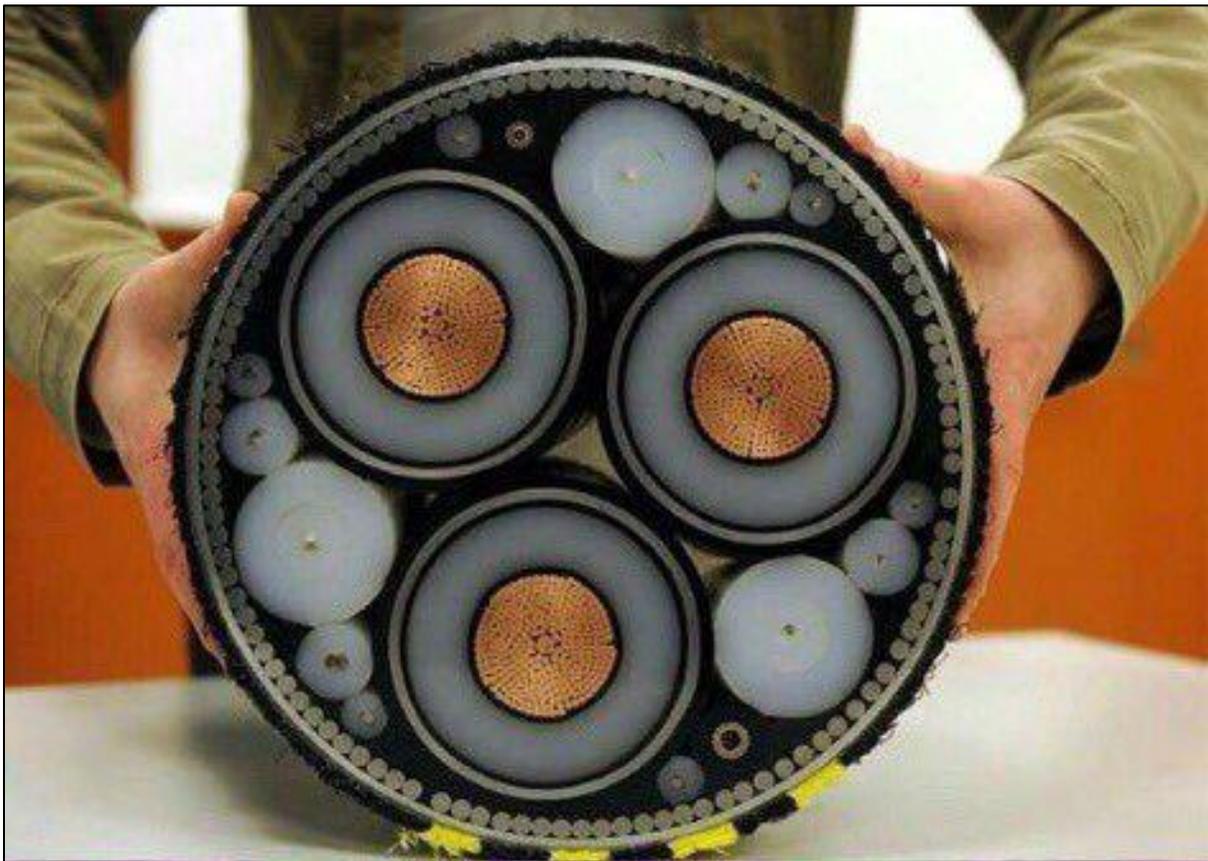


Figura 6 Sección típica, geometría y dimensiones de dos cables umbilicales diferentes

Las variables que son consideradas y que determinan el tipo de sección a escoger son las siguientes:

Rendimiento/Especificaciones mecánicas:

- Peso
- Longitud
- Presión hidrostática
- Diámetro
- Resistencia a la tensión

Rendimiento/Especificaciones ambientales:

- Condiciones de temperatura de operación
- Resistencia a la salinidad
- Presión hidrostática
- Fluidos internos, químicos y aceites

Requisitos eléctricos:

- Tasa de transferencia de datos e integridad de la señal
- Requerimientos/Especificaciones EMC (por sus siglas en inglés *Electromagnetic compatibility*)

Tipo de los elementos de la sección del cable:

- Suministro de energía, señales, fibra óptica y secciones compuestas

Blindaje, armadura, coraza:

- Una línea de blindaje
- Doble línea de blindaje
- Triple línea de blindaje

Conductores y fibras:

- Fibra óptica dentro de un tubo de acero
- Fibra ligera de acero
- Fibra electro-ligera

2.2.1. TIPO DE SECCIONES Y MATERIALES

Las secciones de los cables umbilicales son circulares, compuestas de diferentes materiales, que están integrados por polímeros (exteriores e interiores), metales que aportan resistencia y rigidez (coraza interior de acero para aumentar la rigidez a flexión y a tensión), fibras ópticas y cerámicas (transmisión de datos), cables (suministro de energía). Actualmente todas estas características las definen los fabricantes quienes han desarrollado y patentado un amplio rango de disposiciones en las secciones, así como las dimensiones de los diámetros. Por ejemplo;

TE connectivity Industries & Solutions Oil, Gas and Marine (empresa dedicada a fabricación de diámetros relativamente pequeños), ofrece los siguientes tipos de cables umbilicales, la **Figura 7** presenta los diferentes arreglos en las secciones mientras que la **Tabla 1** describe las especificaciones técnicas asociada a cada tipo de ellas.



Figura 7 Secciones de cables umbilicales, cortesía de *TEconnectivity Industries & Solutions Oil, Gas and Marine*

Tabla 1 Información técnica, *TEconnectivity Industries & Solutions Oil, Gas and Marine*

Código	Diámetro		Fuerza de Ruptura		Peso en agua		Electricidad	Señal	Coaxes	Fibras
	mm	in	kN	lbf	kg/km	lb/kft	Conductores	Conductores		
A302467	38.10	1.500	498	112,000	746	501	6	3	–	6 SMF
A303955	30.48	1.200	271	61,000	598	402	3	–	–	3 SMF
A304267	43.64	1.718	596	134,000	3,768	2,532	32	16	4	7 MMF
A304472	36.32	1.430	449	101,000	2,838	1,907	13	4	–	6 SMF
A304493	45.62	1.796	645	145,000	4,392	2,951	15	3	–	9 SMF
A304562	45.52	1.792	845	190,000	5,193	3,490	20	4	1	7 SMF
A304613	65.38	2.574	1,014	228,000	8,367	5,623	34	–	–	8 MMF, 4 SMF
A304822	42.67	1.680	569	128,000	3,612	2,427	18	16	3	6 MMF
A304835	42.42	1.670	641	144,000	4,123	2,771	14	1	–	6 MMF, 6 SMF
A304982	42.10	1.658	623	140,000	4,271	2,870	12	4	–	4 SMF

Por otro lado, *Nexans Brings Energy To Life* presenta una sección con diámetros mucho mayores ver la Figura 8.

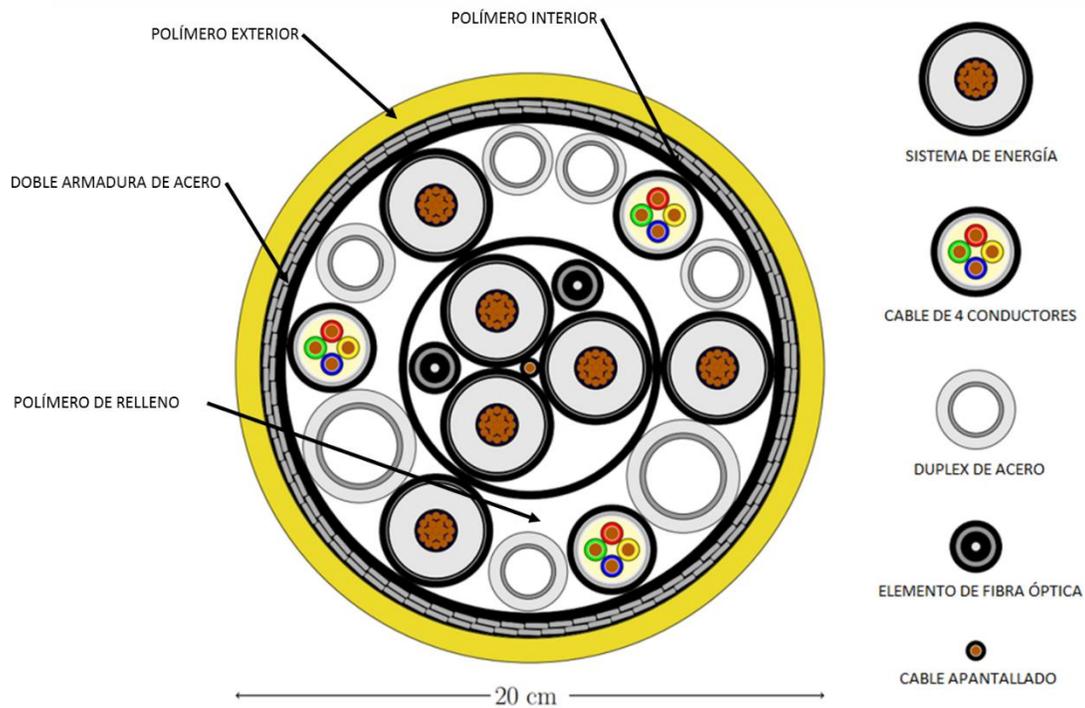


Figura 8 Umbilical producido por *NEXANS*, obtenida de Hovde, M. (2017) y modificada por el autor

La infraestructura interna, así como los componentes y la función que desempeñan son:

Capa externa de polímero/plástico (Polietileno de Alta Densidad).

Proteger del proceso de fabricación, almacenaje, instalación, corrosión del agua salada, aislamiento eléctrico y térmico.

Coraza estructural. Armadura de acero para los esfuerzos axiales, rigidez a torsión, fabricación, armadura interna, helicoides en contraria posición para una buena estabilidad estructural.

Capa interna de polímero/plástico (Polietileno de Baja Densidad).

Estabilidad y soporte interno.

Cables internos, conductores de cobre.

Núcleo Funcional, suministro de energía eléctrica.

Mangueras.

Núcleo Funcional, compatibilidad de fluidos.

Cables internos, fibra óptica.

Núcleo Funcional, para señales de comunicación.

Caucho interno de relleno (Polietileno de Baja Densidad).

Distribuir la compresión radial.

Moldes de relleno.

Eliminar los huecos.

Los umbilicales son elementos importantes y de muy alta tecnología en la industria *offshore*, por lo tanto, el diseño necesita ser altamente confiable, resistente y seguro, cualquier daño en el cable durante el proceso de operación puede traer consecuencias catastróficas en la producción submarina de gas y petróleo, que en algunos casos se traducen en grandes pérdidas económicas por cada día que el sistema este inoperativo. Debido a esto las siguientes consideraciones deben ser tomadas en cuenta para el diseño de cables umbilicales estáticos y dinámicos.

2.2.2. DISEÑO DE UMBILICALES

PARA CABLES UMBILICALES ESTÁTICOS

El diseño de un cable umbilical debe tomar en consideración los esfuerzos de aplastamiento y tensión que se presentan durante su fabricación, manejo, instalación y servicio, también se debe considerar que tenga el peso suficiente para lograr una buena estabilidad en el lecho marino y finalmente el correcto espesor de los tubos de acero que aportan la resistencia estructural ante las tensiones esperadas. Este es uno de los principales retos ya que al agregar más peso se presentan problemas al momento de la instalación. Adicionalmente se deben considerar los siguientes aspectos:

Máxima tensión permitida y fuerza mínima de rotura.

Tensiones permisibles durante el proceso de tendido e instalación.

Fuerzas específicas que se generan sólo en donde el cable umbilical es conectado a otra infraestructura.

Efecto de las cargas radiales que son las responsables de la presión de colapso.

Las fuerzas accidentales que se podrían presentar debido a objetos que son arrojados al mar, ejemplo, anclas que se podrían enganchar en el cable o mercancías de los barcos que pudieran transitar; contenedores.

Los efectos de las tensiones que generan los dispositivos de instalación.

Cargas máximas permisibles de impactos.

Curvatura y momento flexionante permisible.

Balance torsional.

Estabilidad hidrodinámica en el lecho marino.

Cuando el cable umbilical esta interconectado con una estructura *onshore* se deben tomar en cuenta las cargas hidrodinámicas para tener una buena estabilidad conforme el cable se aproxima hacia la playa.

Material y recubrimiento adecuado para aplicaciones *onshore*.

PARA CABLES UMBILICALES DINÁMICOS

El caso más ideal y que casi nunca se presenta, es que el cable una vez puesto en operación sólo se comporte de forma estática, sin embargo, debe resistir las cargas ambientales que se traducen en un comportamiento dinámico. Debido a esto adicionalmente a las consideraciones hechas para el diseño de los cables umbilicales estáticos, en el caso de los dinámicos se deben realizar análisis hidrodinámicos y de fatiga para determinar si el diseño es el apropiado.

Normalmente en el proceso de diseño se analiza que al menos el cable para efectos de fatiga pueda soportar 10 veces su vida esperada de diseño. Como todo proceso de diseño, inicialmente se propone un diseño conceptual para después realizar el diseño a detalle, las principales consideraciones que integran cada uno de estos pasos son las siguientes:

DISEÑO CONCEPTUAL

Propuesta preliminar del tamaño de la sección.
Diámetro del umbilical.
Reuniones iniciales con los fabricantes.

Propuesta preliminar de la configuración de diseño.
Esfuerzos, interferencias e incompatibilidad.
Componentes preliminares.
Verificar si es factible el diseño preliminarmente.

Identificar posibles problemas previo al proceso de fabricación.

Debido a que los cables umbilicales operan sumergidos en el océano, se deben tener las siguientes consideraciones; almacenaje previo a la instalación, exposición ante los fluidos de servicio (fluidos internos que transporte el cable umbilical), parámetros específicos como radiación, ozono, temperatura del agua salada y salinidad. Protección ante objetos que puedan caer al cable desde la superficie.

DISEÑO DETALLADO

Definir los rangos de operación de temperatura en los que puede operar el cable.
Definir las máximas y mínimas cargas de operación.
Definir el MBR, así como la vida esperada de servicio ante condiciones dinámicas.

Se debe realizar un estudio de estabilidad en el lecho marino donde el cable umbilical “descansa” hasta conectarse con las instalaciones en el fondo, debe considerarse el material del lecho marino, así como las velocidades de las corrientes. Una forma de caracterizar el comportamiento del cable umbilical en el lecho marino es haciendo uso de coeficientes de fricción en dirección axial y lateral.

Diseño final de la sección del cable umbilical. Debe integrar todos los componentes, así como su posición, geometría y orientación. Como se ha mencionado anteriormente un umbilical está compuesto por varios ítems; tubos de acero que transportan fluidos, cables eléctricos, fibra óptica, tubos o varillas de acero que aportan la resistencia, polímeros para protección y asilamiento del agua salada y polímeros de relleno que son usados para confinar y mantener en su lugar a todos los demás componentes.

Debido a que cada instalación *offshore* es única el diseño específico y detallado de los umbilicales es información (muchas veces) exclusiva de los fabricantes, información no siempre disponible al público en general.

2.2.3. FABRICACIÓN

De forma general la fabricación de un cable umbilical se lleva a cabo en un solo proceso ininterrumpido en donde todos los componentes que lo integran son unidos en un paquete "perfecto" por una máquina llamada *closing* que genera la sección circular que ha sido proyectada en el diseño. El proceso siguiente es el de "extrusión" que consiste en agregar (fundir) la capa externa de polietileno alrededor del cable. Finalmente, el cable fabricado es enrollado en un carrete verificando que el radio (del carrete) no sea menor al MBR especificado por el fabricante y el proyectista. Finalmente se almacena en los patios del fabricante o enviado directamente al barco de instalación.

La **Figura 9** presenta de izquierda a derecha y de arriba hacia abajo; el proceso de integración de los componentes en la maquina *closing* enrollados horizontalmente, el cableado es rotado en la misma dirección del eje del cable lo que genera la hélice, el proceso de extrusión, almacenamiento y traslado del cable umbilical a la zona de instalación.

La norma ISO (2009) establece los procesos que deben seguirse para la fabricación de cables umbilicales.



Figura 9 Fabricación y almacenaje de un cable umbilical. Fuente: elaboración propia

2.2.4. CONFIGURACIONES DE INSTALACIÓN

Actualmente existen las siguientes configuraciones de instalación aplicable para cables estáticos;

S-lay
J-lay
Reel-lay
Tow-In

S-lay. Esta configuración de instalación se usa para aguas someras, profundidades que varían desde cero a 300 m. Para ciertos tipos de barcos, es posible utilizarse en profundidades de hasta 3,000 m, usualmente los diámetros de instalación varían de 8 plg a 60 plg. Los mayores esfuerzos ocurren en las zonas definidas como *curvatura inferior* y *curvatura superior*, para mantener la curvatura y por consecuencia los valores de momento aceptables en esas zonas, son usados apoyos y/o soportes para deslizar el cable (*stinger*) y/o tubería además de tensores. Durante el proceso de instalación, para el caso de tuberías, estas necesitan estar vacías de fluidos al interior, ver la **Figura 10**.

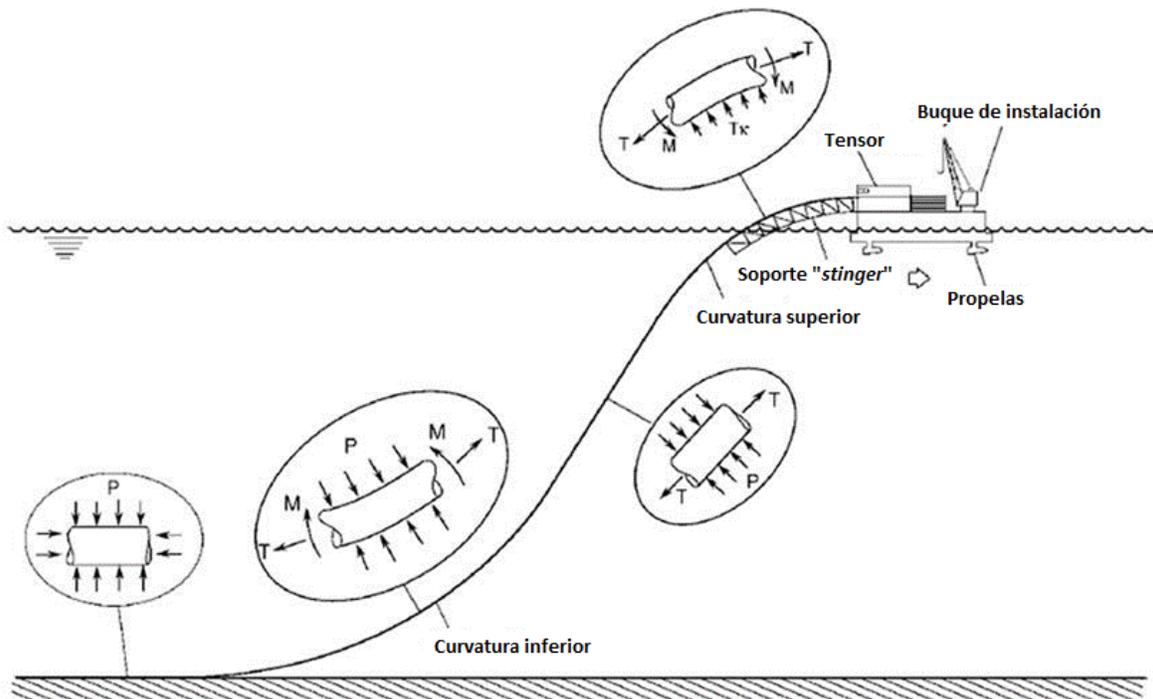


Figura 10 Configuración *S-lay*, obtenida de Lu, X. (2013) y modificada por el autor

J-lay. Para aguas intermedias, profundas y ultra-profundas. El cable y/o tubería se mantiene sujeto verticalmente al buque de instalación. Es recomendable que los diámetros máximos de instalaciones no sean mayores a 32 plg. La diferencia entre *S-lay* Vs *J-lay* es bajas tensiones en el fondo y cortos periodos del proceso de instalación, ver la **Figura 11**.

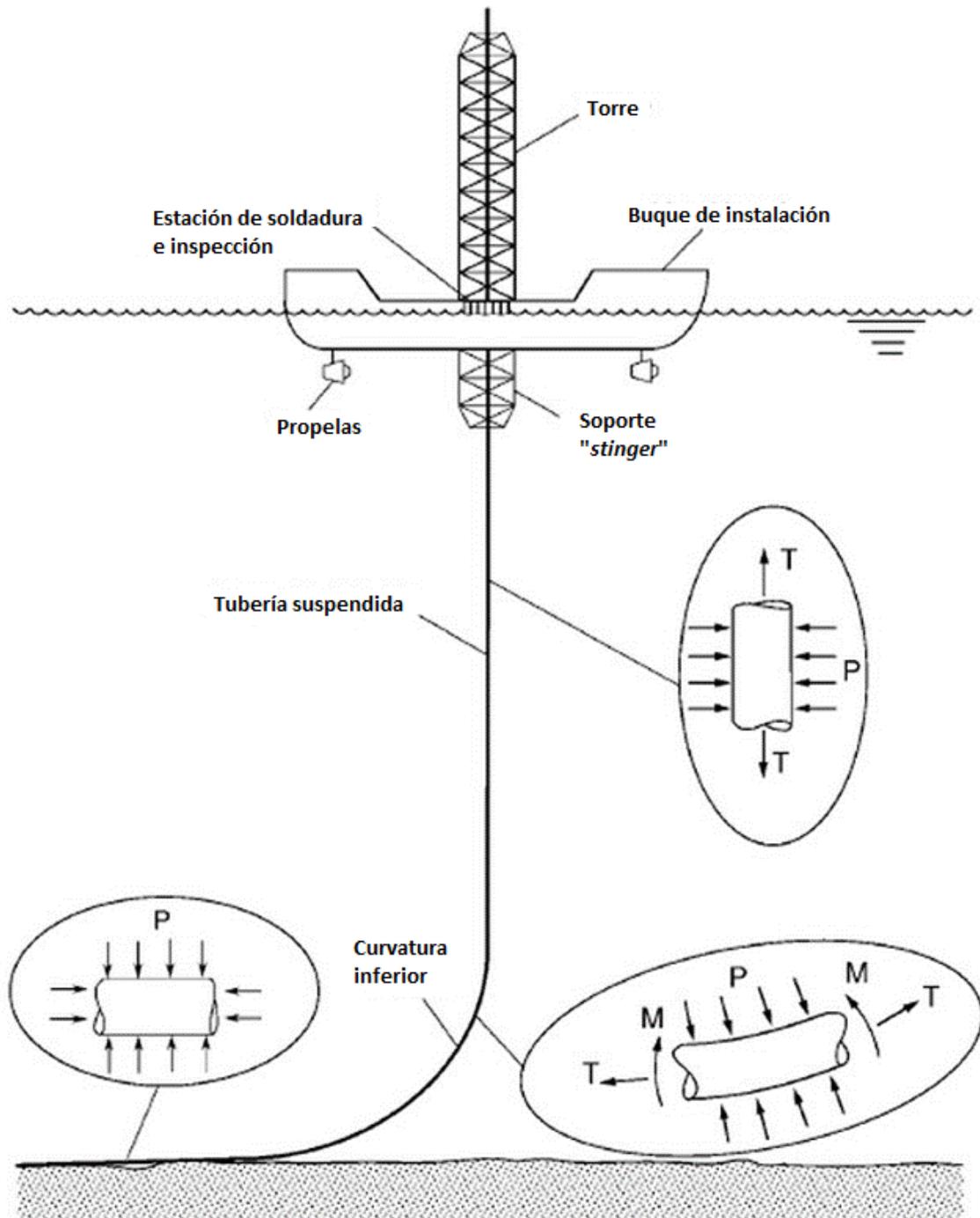


Figura 11 Configuración *J-lay*, obtenida de Lu, X. (2013) y modificada por el autor

Reel-lay. La forma más fácil de describir esta configuración es que es necesario que el tubo y/o cable este enrollado en un carrete sobre el barco, utilizando este proceso es posible colocar el tubo y/o cable de manera continua desenrollándolo del carrete. Una de las ventajas de este método es que se reducen costos debido al menor número de personal necesario durante la instalación y por lo tanto disminuye el riesgo de accidentes. Este método es recomendable para diámetros de 2 plg a 12 plg y para un rango de profundidades de 10 m a 100 m, ver la **Figura 12**.

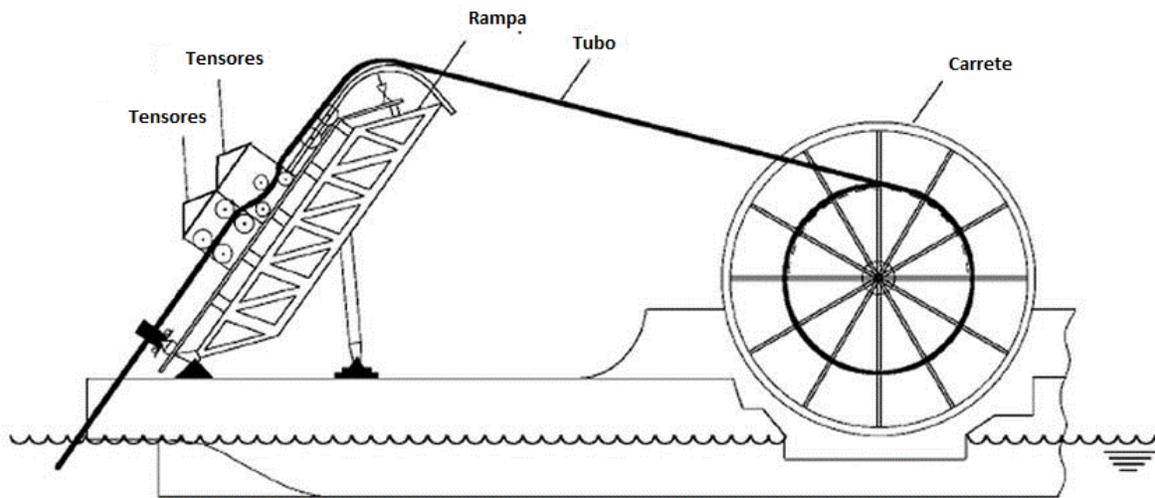


Figura 12 Configuración *Reel-lay*, obtenida de Lu, X. (2013) y modificada por el autor

Tow-In. Este método de configuración consiste en suspender el cable y/o tubería sobre la superficie del agua mediante boyas con la asistencia de remolcadores, una vez que se encuentra en el lugar de instalación las boyas de flotación son retiradas y poco a poco se sumerge hasta el fondo del mar, ver la **Figura 13**.

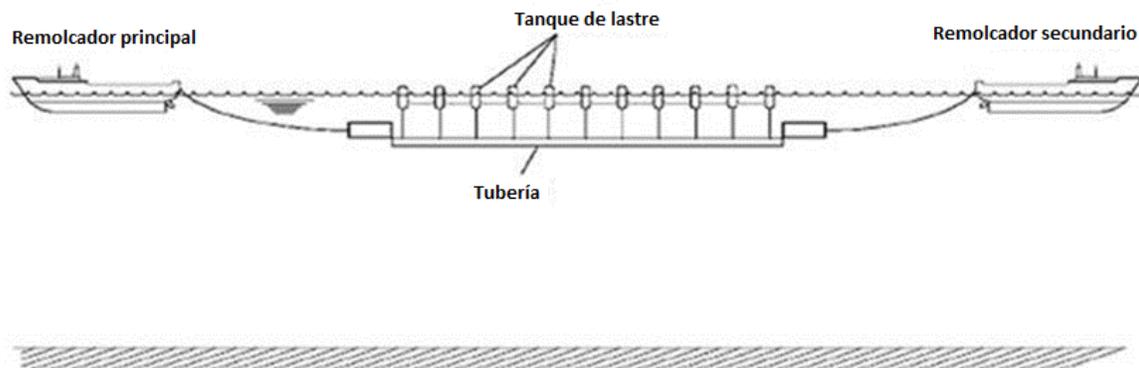


Figura 13 Configuración *Tow-In*, obtenida de Lu, X. (2013) y modificada por el autor

2.2.5. CONFIGURACIONES DE OPERACIÓN

Existen diferentes configuraciones para interconectar las instalaciones desde el fondo marino hasta la superficie del mar y están divididas de acuerdo a la profundidad de operación; aguas someras, aguas intermedias y aguas profundas. La variación se debe a que cada una de ellas tiene la función específica de generar los menores esfuerzos de respuesta sobre el cable umbilical.

Aguas someras, profundidad menor a 500 metros.

Para este caso, el cable umbilical es suspendido al océano desde la superficie hasta el fondo, debido a esto adopta la forma de una curva en catenaria libre ya que es un elemento pesado y flexible. El fenómeno ocurre debido a que la fuerza que principalmente actúa es su propio peso, ver la **Figura 14**.

Aguas intermedias, profundidad entre 500 metros a 1,500 metros.

Normalmente se usa la configuración *Lazy – S (subsea buoy)*⁸ que consiste en una boya esférica anclada al fondo del lecho marino sin llegar a la superficie, de ahí la letra **S (subsea buoy)**. Su función es la de un intermediario ya que al apoyarse el cable umbilical atenúa (divide) el peso de la longitud total y genera al mismo tiempo una doble catenaria también tiene por objetivo desacoplar/disminuir los movimientos inducidos por los FPSO u otras instalaciones desde la superficie, que es de donde está suspendido el cable umbilical y también apoyado, ver la **Figura 14**.

Aguas profundas, profundidades mayores a 1,500 metros.

Principalmente se usan las configuraciones *Lazy Wave* y *Steep Wave*, la función es la misma que para la configuración *Lazy – S*, sin embargo, no es viable anclar una boya hasta el fondo marino debido a las grandes profundidades, a cambio de eso se agregan flotadores en una longitud que está ubicada aproximadamente a la mitad de la longitud total de todo el cable umbilical para que el efecto de estos flotadores generen el mismo fenómeno geométrico de la configuración *Lazy – S*, (es decir, como si estuviera apoyada sobre alguna boya ficticia), la diferencia entre *Lazy Wave* y *Steep Wave*, es la longitud sobre la cual se agregan estos flotadores (que normalmente es mayor en la configuración *Steep Wave*), ver la **Figura 14**.

⁸ <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.821.7030&rep=rep1&type=pdf>

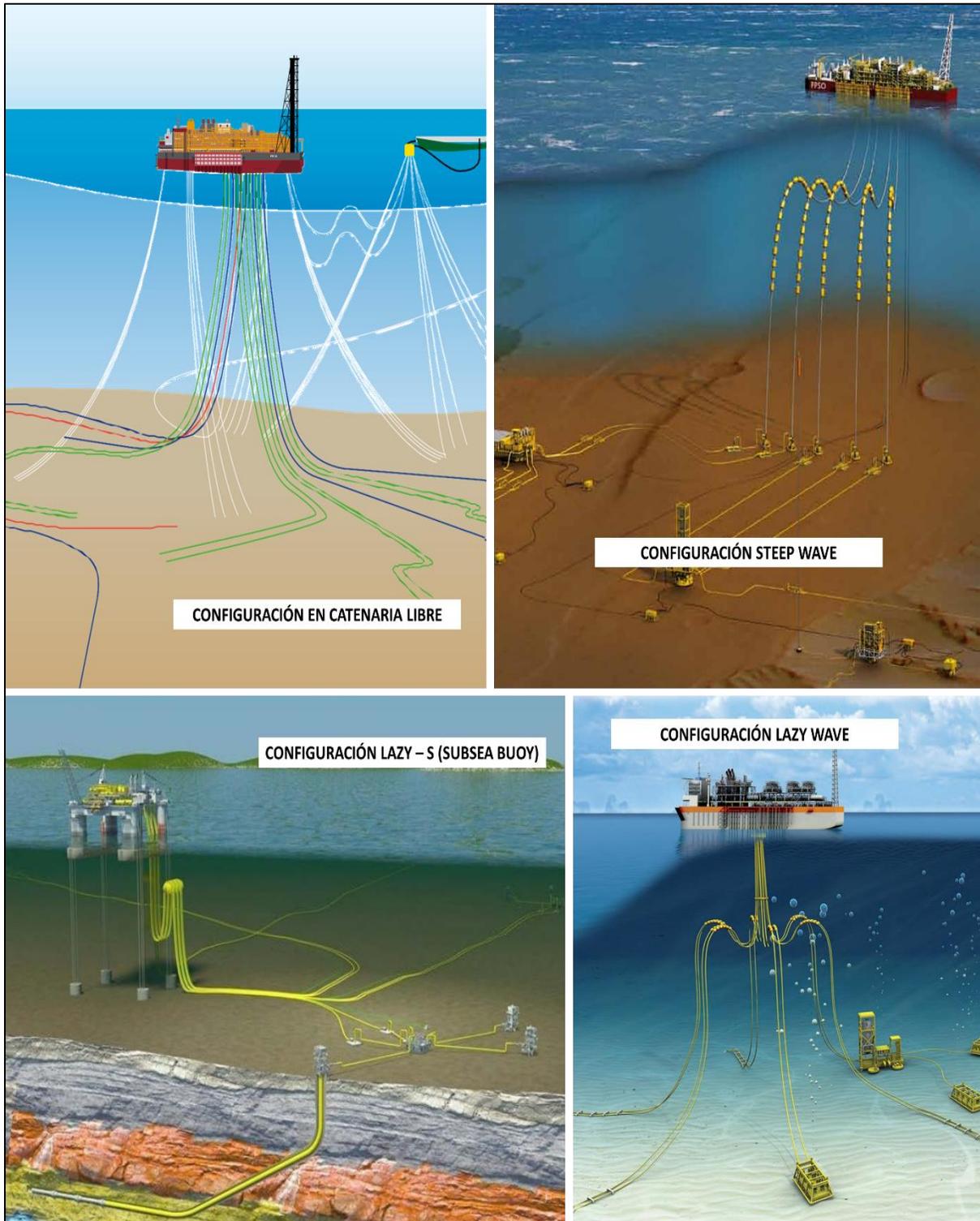


Figura 14 Configuraciones para infraestructura submarina de cables umbilicales hacia la superficie. Fuente: elaboración propia

2.2.6. FALLAS ESTRUCTURALES

La falla de un cable umbilical puede ocurrir durante el proceso de fabricación, instalación y operación. Bryant (1990) describe los modos de fallas más comunes: tensión o compresión, torsión, fatiga y desgaste. Adicionalmente también se debe tomar en cuenta lo siguiente:

Colapso y/o estallamiento debido a la diferencia de presiones que se presentan internamente y externamente del cable umbilical cuando transporta fluidos de control.

Degradación del material por la salinidad del agua marina y corrosión.

Deformaciones plásticas debido a que se excede la fluencia de los materiales, por ejemplo, las altas temperaturas pueden ser críticas para el cobre ya que es un material maleable y dúctil, por el contrario, cuando los metales son expuestos a temperaturas bajas el riesgo por una fractura frágil se incrementa.

Pandeo local y pandeo global debido a las cargas y a las traslaciones dinámicas, así como a las flexiones excesivas durante el proceso de fabricación e instalación.

Fatiga debido a las cargas cíclicas dinámicas.

La falla debida a tensión y/o compresión esto sucede cuando el valor del MBR es sobrepasado.

La **Figura 15** presenta las fallas más comunes que se pueden presentar.

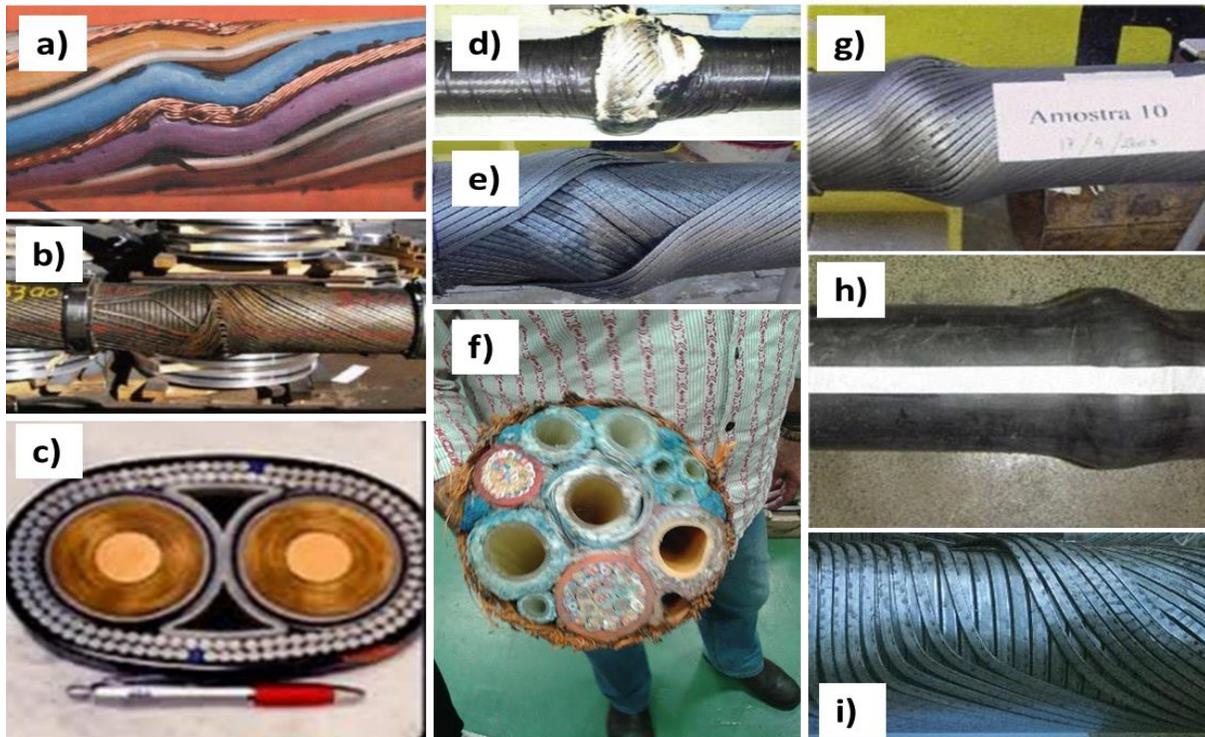


Figura 15 Fallas debido a pandeo lateral: a), b), e), i), colapso: c), fatiga por torsión: d), g), h) y degradación: f). Fuente: elaboración propia

Académicamente se han hecho grandes investigaciones y aportaciones sobre el tema, principalmente en Europa y USA. Adicionalmente existen organismos internacionales encargados de establecer principios, procesos, reglamentos, recomendaciones y normas en ingeniería marítima *offshore* como la API (por sus siglas en inglés *American Petroleum Institute*), *DNV Det Norske Veritas* y *This British Standard ISO*.

El NTNU – *Trondheim. Norwegian University of Science and Technology* ha realizado los siguientes trabajos de investigación;

- Mohammad, S. (2014), analizó el comportamiento de “culebreo/viboreo”, “*Snaking Behavior of Umbilicals*”, de 3 diferentes cables umbilicales (1 cable umbilical dinámico y 2 cables umbilicales estáticos) durante el proceso de fabricación, almacenamiento e instalación mediante un análisis local para las secciones de los cables, este es uno de los trabajos que más aporte de información presenta sobre cables umbilicales que fabrica la empresa *AKER Solutions*[®].
- Finstad, M. (2017) por otra parte analiza la inestabilidad torsional de umbilicales durante el proceso de instalación, “*Torsion instability of Dynamic Cables during Installation*”, donde establece un conjunto de ecuaciones que permiten determinar las propiedades mecánicas de todo un cable umbilical partiendo de la geometría y materiales de los componentes estructurales de acero.

Ambos trabajos presentan análisis locales en una longitud relativamente corta para diferentes tipos de cables umbilicales. Por otra parte:

- Holum, K. (2010) analiza los efectos que ocurren durante la instalación de un umbilical dinámico en una longitud relativamente larga, aproximadamente 850 m, “*Simulation of dynamic umbilical installation effects*”, simula una configuración de instalación utilizando varios modelos numéricos y comparando los resultados.
- Risa, A. (2011) analiza un cable umbilical que contiene 19 conductores de cobre y considera el aporte que este material agrega al comportamiento mecánico, “*Finite element analysis of marine umbilical*”, modelado en el software *ABAQUS*[®] y compara los resultados con pruebas de ensayos en laboratorio.

- Por otra parte, Wali, S. (2013) de *School of Civil and Building Engineering, Loughborough University, United Kingdom* presenta su tesis doctoral acerca de las características estructurales de cables helicoidales enrollados sujetos a curvaturas, "*Structural Characteristics of Various Types of Helically Wound Cables in Bending*", su trabajo básicamente es un compendio de todo lo referente al tema helicoidal que es muy usado para análisis y modelos numéricos locales mediante FEM.
- Mustaffa, Z. (2011), analiza la confiabilidad de tuberías en el fondo del mar, que tienen por función transportar petróleo y gas en largas longitudes a precios relativamente bajos, "*System Reliability Assessment of Offshore Pipelines*", el principal problema que aqueja a las tuberías es la corrosión ocasionando fugas en el océano.
- Finalmente, Suñé, D. (2008), determina la confiabilidad de cables umbilicales para el caso de fatiga y estallamiento ubicado en las aguas someras a 1,000 m de profundidad, del mar de Brasil, con la tesis de nombre "*Análise de Confiabilidade Estrutural de Cabos Umbilicais*".

En resumen, este trabajo trata de abarcar las anteriores líneas de investigación a través del planteamiento de un modelo numérico global de un cable umbilical partiendo de un cable real y actualmente operando, en el que se tomó en consideración la geometría helicoidal de los tubos de acero que aportan resistencia para calcular la resistencia general del elemento en el modelo global y verificando que cumpla el ULS haciendo uso de la metodología WSD mediante una relación de interacción que relaciona las variables de la tensión efectiva, momento flexionante y presión externa.

3. CÓDIGOS, REGULACIONES, REGLAMENTOS

Este trabajo toma en consideración las siguientes normas ya que son las más útiles, disponibles y compatibles además de que pueden aplicarse al diseño, análisis y revisión estructural de cables umbilicales, así como al análisis de confiabilidad de estructuras marítimas.

- BRITISH STANDARD en ISO 13628-5-(2009). *Petroleum and natural gas industries – Design and operation of subsea production systems. Part 5: Subsea umbilicals.*
- DNVGL-ST-F201 (2018) *Dynamic Risers.*
- DNVGL-RP-C211 (1992) *Structural reliability analysis.*

La norma ISO (2009) recomienda que se puede hacer uso del apéndice A “Análisis global”, el apéndice D “Verificación del modelo de análisis global” y el apéndice F “Marco de referencia para bases de diseño” de la norma DNV (2018) para estimar las cargas del modelo global de un cable umbilical. A su vez DNV (2018) menciona que es posible usar esta normativa para el diseño estructural de tubos de acero (en un análisis global) que complementan secciones más complejas, por ejemplo, cables umbilicales, la condición que debe ser cumplida es que las cargas sean calculadas adecuadamente.

Además por la similitud que existe entre el comportamiento mecánico global dinámico entre los *risers* y los cables umbilicales y de que los componentes que aportan resistencia estructural son tubos de acero de diferentes diámetros en diferentes posiciones al interior del cable umbilical y finalmente, porque la norma DNV (2018) propone una metodología específica de análisis para el ULS, es por mucho la mejor opción para determinar si el caso de estudio cumple el criterio de diseño por carga combinada WSD mediante una relación de interacción que relaciona las variables de la tensión efectiva, momento flexionante y presión externa. La relación de interacción se presenta desde la ecuación (3-1) hasta la ecuación (3-8).

Adicionalmente la norma DNV (1992) es un marco de referencia obligatoria para cualquier trabajo relacionado con el análisis y diseño basado en confiabilidad estructural *offshore* en el mundo ya que incluye un apartado de confiabilidad objetivo **Tabla 13** que se puede usar para el diseño basado en confiabilidad de una estructura o un elemento estructural marítimo.

Det Norske Veritas DNV GL es la principal sociedad de clasificación del mundo y un reconocido asesor en la industria marítima *offshore*.

CRITERIO DE DISEÑO POR CARGAS COMBINADAS. Momento flexionante, tensión efectiva y presión externa, debe cumplir las siguientes condiciones:

Método WSD

$$\left[\left[\frac{|M|}{M_k} \right] + \left[\frac{T_e}{T_k} \right]^2 \right]^2 + \left[\frac{p_e - p_{min}}{p_c(t)} \right]^2 \leq \eta^4 \quad (3-1)$$

M M_{MPM} Momento flexionante máximo debido a las cargas medioambientales

M_k Resistencia al momento plástico, definido por la ecuación:

$$M_k = f_y(0.96) \alpha_c (D - t)^2 t \quad (3-2)$$

f_y valor mínimo garantizado del esfuerzo correspondiente al límite inferior de fluencia del acero

D diámetro nominal externo

t espesor de las tuberías de acero

α_c parámetro *Flow Stress*, para el endurecimiento por deformación, no debe ser mayor que 1.20:

$$\alpha_c = (1 - \beta) + \beta \frac{f_u}{f_y} \quad (3-3)$$

$$\beta = 0.4 \quad \text{para} \quad \frac{D}{t} < 15 \quad (3-4)$$

T_e T_{eMPM} Tensión efectiva máxima debido a las cargas medioambientales

T_k Resistencia a la fuerza axial plástica, definido por la ecuación:

$$T_k = f_y(0.96) \alpha_c \pi (D - t) t \quad (3-5)$$

p_e presión local externa

p_{min} **presión interna del fluido, no aplica en este caso pues no se transportan fluidos**

$p_c(t)$ presión de colapso:

$$(p_c(t) - p_{el}(t)) (p_c^2(t) - p_p^2(t)) = p_c(t) p_{el}(t) p_p(t) f_0 \frac{D}{t} \quad (3-6)$$

$p_{el}(t)$ presión de colapso elástico:

$$p_{el}(t) = \frac{2 E \left[\frac{t}{D} \right]^3}{1 - \nu^2} \quad (3-7)$$

E módulo de Young
 ν relación de Poisson

$p_p(t)$ presión de colapso plástico:

$$p_p(t) = 2 \frac{t}{D} f_y \alpha_{fab} \quad (3-8)$$

α_{fab} factor de reducción del proceso de fabricación. Se considera de 1.00 ya que no se cuenta con información

f_o relación de ovalidad, no se considera en este trabajo debido a falta de información

$\eta = 1$ factor de carga combinada. Se considera de 1 ya que no se cuenta con información específica para el caso de cables umbilicales

Método LRFD

$$[\gamma_{SC} * \gamma_m]^2 \left[\left[\frac{|M_d|}{M_k} \right] + \left[\frac{T_{ed}}{T_k} \right]^2 \right]^2 + \left[\frac{p_e - p_{min}}{p_c(t)} \right]^2 \leq 1.0 \quad (3-9)$$

γ_{SC} Factor de Resistencia asociada al tipo de seguridad

γ_m Factor de Resistencia asociada a la incertidumbre en los materiales

M_d Momento de diseño:

$$M_d = M_{MPM} 1.30 \quad (3-10)$$

T_{ed} Tensión efectiva de diseño:

$$T_{ed} = T_{eMPM} 1.30 \quad (3-11)$$

4. CABLE UMBILICAL PLANTEADO/PROPUESTO

4.1. UBICACIÓN DEL CAMPO TRION EN EL GoM

El campo Trion (ver la **Figura 16**) espera inversiones por 11 mil millones de dólares en un periodo cercano a los próximos 15 años y está previsto que la primera extracción de hidrocarburos se alcance en los próximos años. Geográficamente se encuentra a 40 kilómetros de la frontera con Estados Unidos (zona marítima) y a 179 kilómetros al este de Matamoros, Tamaulipas. Actualmente tiene reservas probadas, probables y posibles de 485 millones de barriles de petróleo crudo y es considerado como uno de los principales campos petroleros con gran potencial energético para el país⁹.

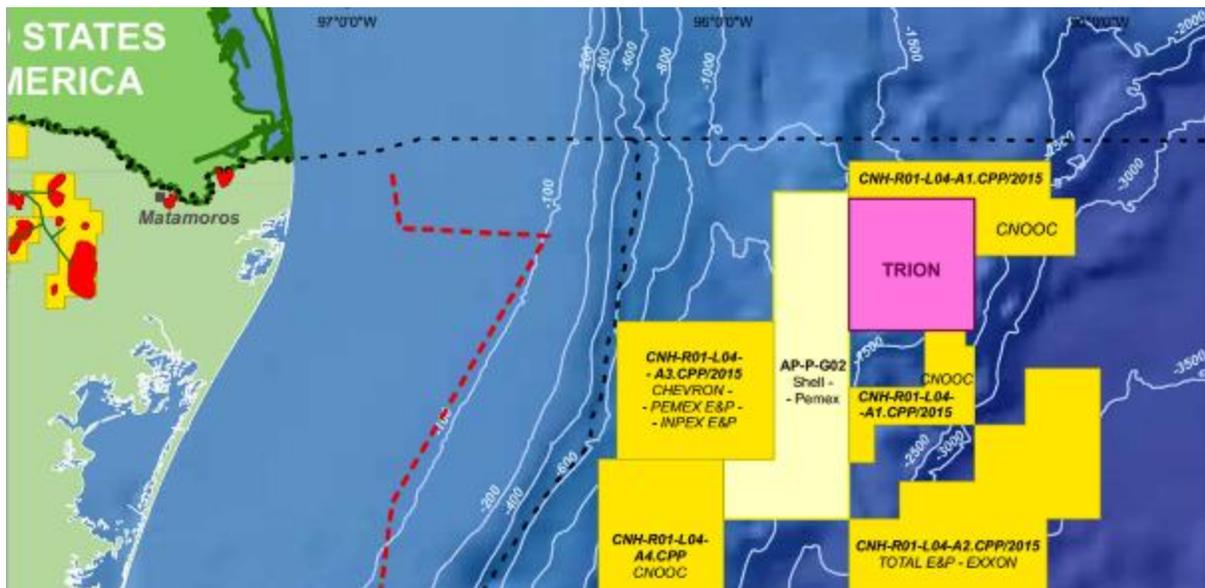


Figura 16 Campo Trion, mapa de concesiones de gas y petróleo en el GoM, 2018¹⁰

4.2. ANÁLISIS HIDRODINÁMICO

Las condiciones de la superficie del mar pueden ser representadas bajo un oleaje regular o un oleaje irregular, es decir, a través de una sola ola (esta condición es la ideal para modelar y representar un *tsunami*) o un tren sucesivo de varias y diferentes olas (que es la forma real de cómo se propaga el fenómeno del oleaje) ver la **Figura 17**. El oleaje regular está definido por las teorías lineales y no-lineales de onda, por ejemplo, la teoría de Airy y la teoría de Stokes, respectivamente.

⁹ <http://www.forbes.com.mx/bhp-invertira-256-mdd-para-perforar-otro-pozo-en-trion/>

¹⁰ Secretaría de Energía (SENER), Comisión Nacional de Hidrocarburos (CNH), Centro Nacional de Control del Gas Natural (CENAGAS), Comisión Federal de Electricidad (CFE).

El oleaje irregular por otra parte, se caracteriza por una densidad espectral obtenida de mediciones reales (observaciones) de la superficie del mar, es decir, diferentes alturas y periodos de oleaje que son analizados estadísticamente para generar sintéticamente una densidad espectral de oleaje.

Los métodos de análisis dinámicos más usuales para estimar la respuesta de una estructura ante condiciones de oleaje son el análisis en el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia. La **Figura 18** desglosa estas alternativas.

DNV (2018) establece que para un análisis ULS se debe usar el método de análisis en el dominio de tiempo, en donde se deben simular al menos 3 horas de tormenta debido a que es un análisis de respuesta de corto plazo y a que en este periodo de tiempo el estado de mar puede considerarse como un proceso estacionario. Silva, R. (2005) define a un estado de mar como aquella situación o periodo de tiempo en que, y debido a la inercia del fenómeno, se considera que existe un cierto equilibrio entre las fuerzas generadoras y las fuerzas restauradoras que intervienen, lo cual produce que su manifestación permanezca aproximadamente en estado estacionario.

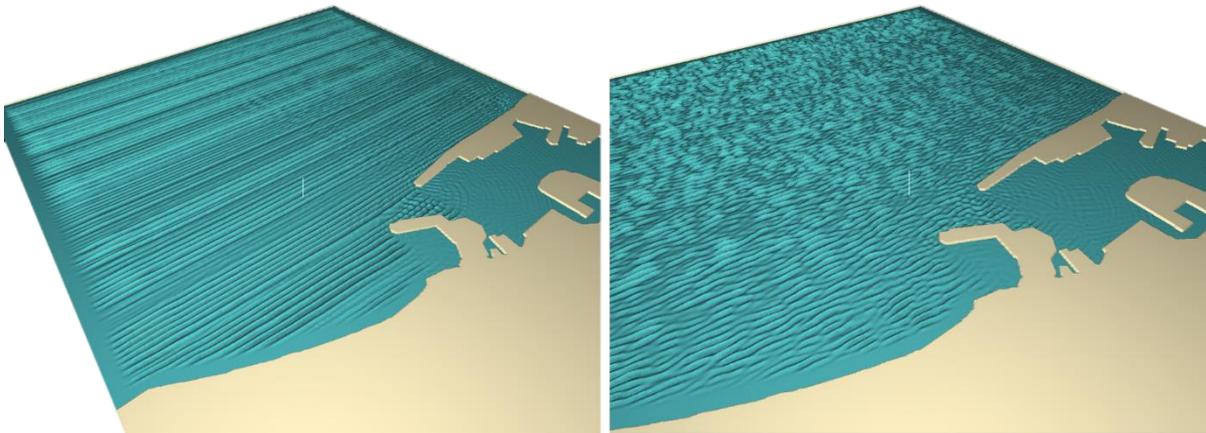


Figura 17 Oleaje regular (izquierda) Vs Oleaje irregular (derecha), Puerto de Ensenada Baja California. Fuente: elaboración propia

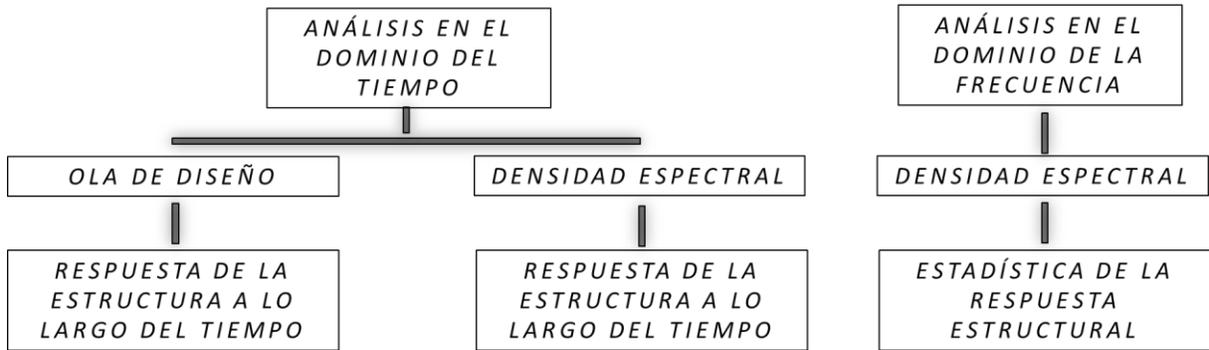


Figura 18 Análisis dinámicos de estructuras *offshore*

4.2.1. DENSIDAD ESPECTRAL DE OLEAJE

Para todas las densidades espectrales de oleaje que integran el contorno ambiental específico del campo Trion resulta muy conveniente utilizar un oleaje irregular que se representa mediante una densidad espectral de oleaje ya que no contamos con datos *in situ* de una boya de medición. El viento y los cambios de la presión del aire son las principales variables que determinan el fenómeno aleatorio del oleaje, el área donde hace contacto o interactúa la fuerza del viento sobre la superficie del mar se llama *fetch*, la dirección dominante hacia donde se propaga el oleaje es la del viento y la zona en el océano donde ocurre esto determina su clasificación en; oleaje local (*sea*) y oleaje distante (*swell*). Una densidad espectral de oleaje puede ser generada sintéticamente por medio de los parámetros que caracterizan su desarrollo¹¹.

Espectro Pierson - Moskowitz

Existe ya un modelo espectral basado en mediciones de oleaje realizadas en el Atlántico Norte, fue desarrollado en el año de 1964 por Pierson - Moskowitz y se ha ido actualizando al largo del tiempo, la expresión para generar la densidad espectral es:

$$S(f) = \frac{1}{4\pi} \frac{H_s^2}{T_z^4} \frac{1}{f^5} \exp\left[-\frac{1}{\pi T_z^4 f^4}\right] \quad (4-1)$$

donde

f	frecuencia del oleaje	Hz
H_s	altura de ola significativa	m
T_z	periodo de cruces por cero	s

$$T_z = \frac{T_p}{1.4} \quad (4-2)$$

donde

T_p	periodo pico de oleaje	s
-------	------------------------	---

Como se ha mencionado anteriormente este caso de estudio es en el campo Trion, ubicado en aguas profundas del GoM (razón por la cual se escogió esta densidad espectral) y el contorno ambiental elaborado por Perez, R. (2018) para un Tr de 100 años, ver la **Figura 19**.

¹¹ Silva Casarín Rodolfo (2005), Análisis y descripción estadística del oleaje, Serie Docencia II UNAM.

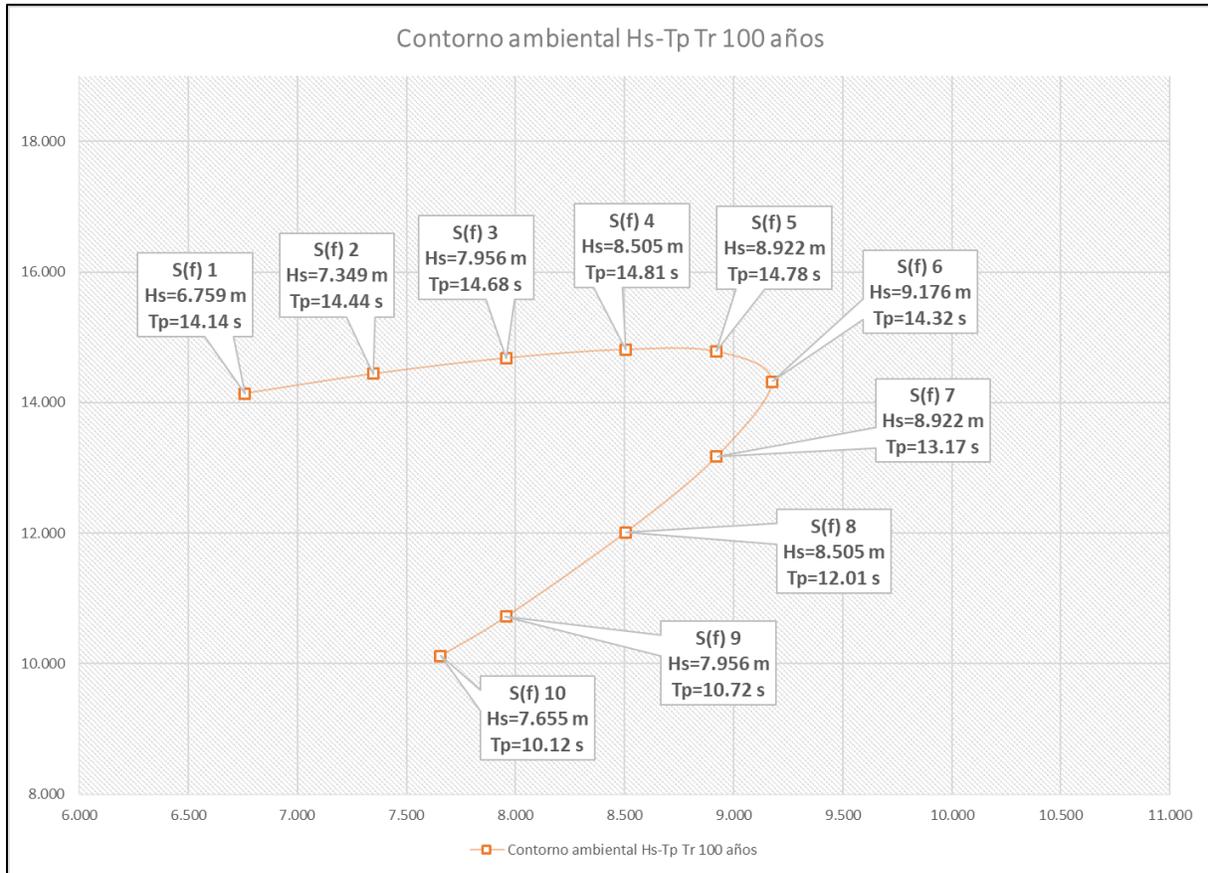


Figura 19 Contorno ambiental Tr 100 años, GoM

4.2.2. OPERADOR DE AMPLITUD DE RESPUESTA

Uno de los principales factores que determinan el comportamiento dinámico del cable umbilical son los movimientos que el FPSO le induce como consecuencia de las condiciones marítimas extremas de viento y oleaje. El comportamiento del FPSO está gobernado por su respectivo RAO que describe los movimientos en los 6 grados de libertad, traslación: *surge*, *sway*, *heave* y rotación: *roll*, *pitch*, *yaw*, ante un oleaje regular unitario.

Los RAO's en el punto de conexión entre el cable umbilical y el FPSO son los siguientes:

Surge, ver la **Figura 20** y la **Figura 23**.

Heave, ver la **Figura 21** y la **Figura 24**.

Pitch, ver la **Figura 22** y la **Figura 25**.

Sólo se consideraron 3 grados de libertad debido a que son los más representativos. Esta información fue proporcionada por la empresa **FLEXCOM® Software, Wood Group Ireland**.

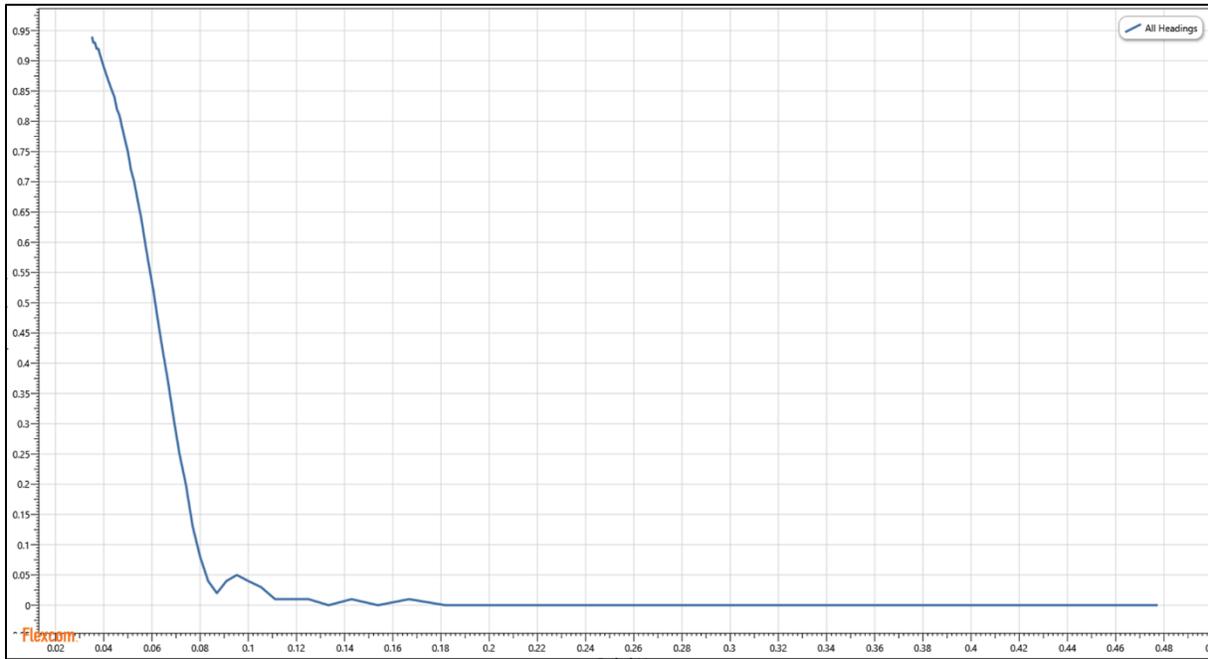


Figura 20 Surge RAO, frecuencia H_z Vs respuesta m/m

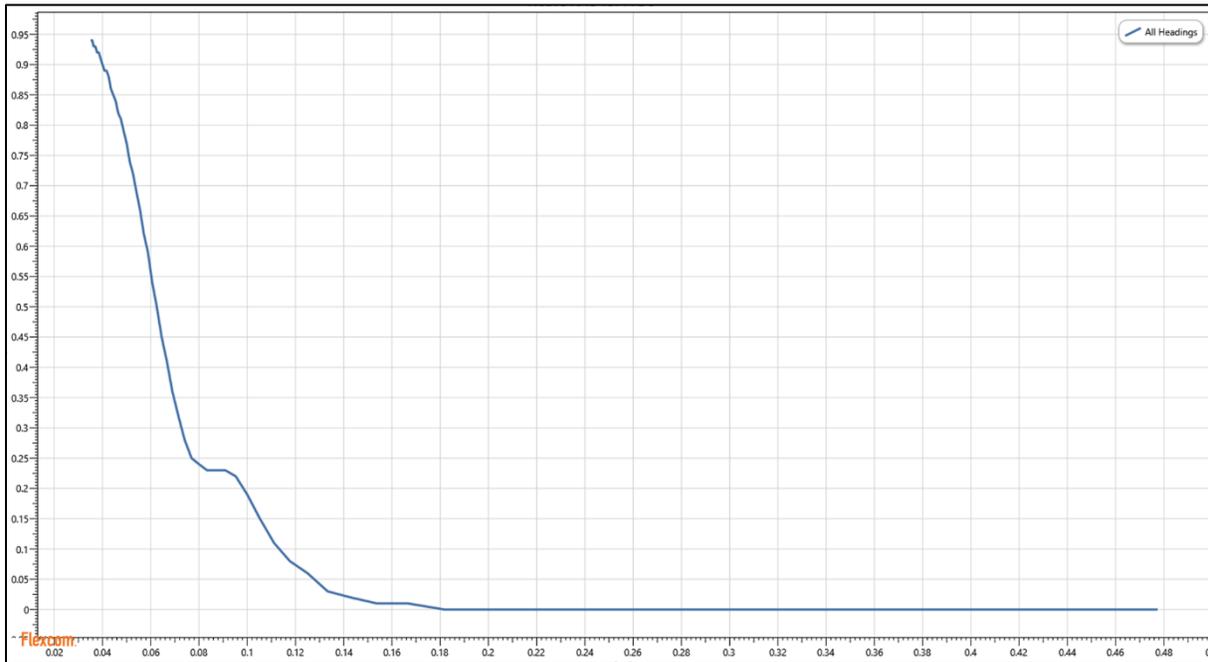


Figura 21 Heave RAO, frecuencia H_z Vs respuesta m/m

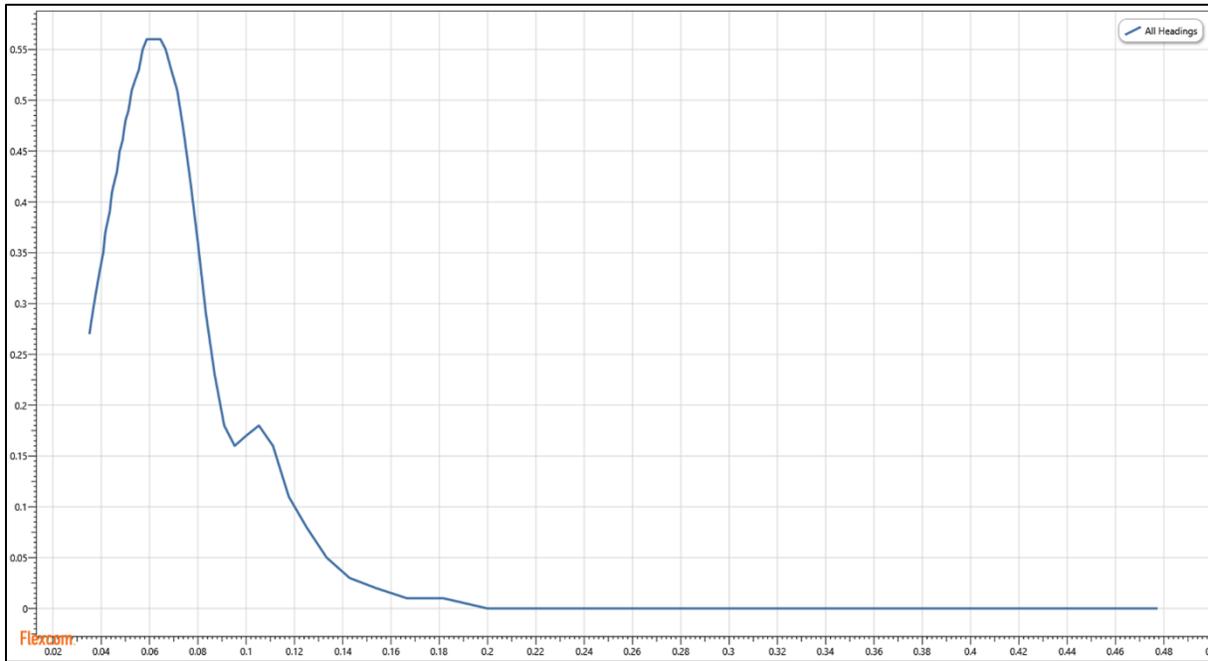


Figura 22 Pitch RAO, frecuencia H_z Vs respuesta m/m

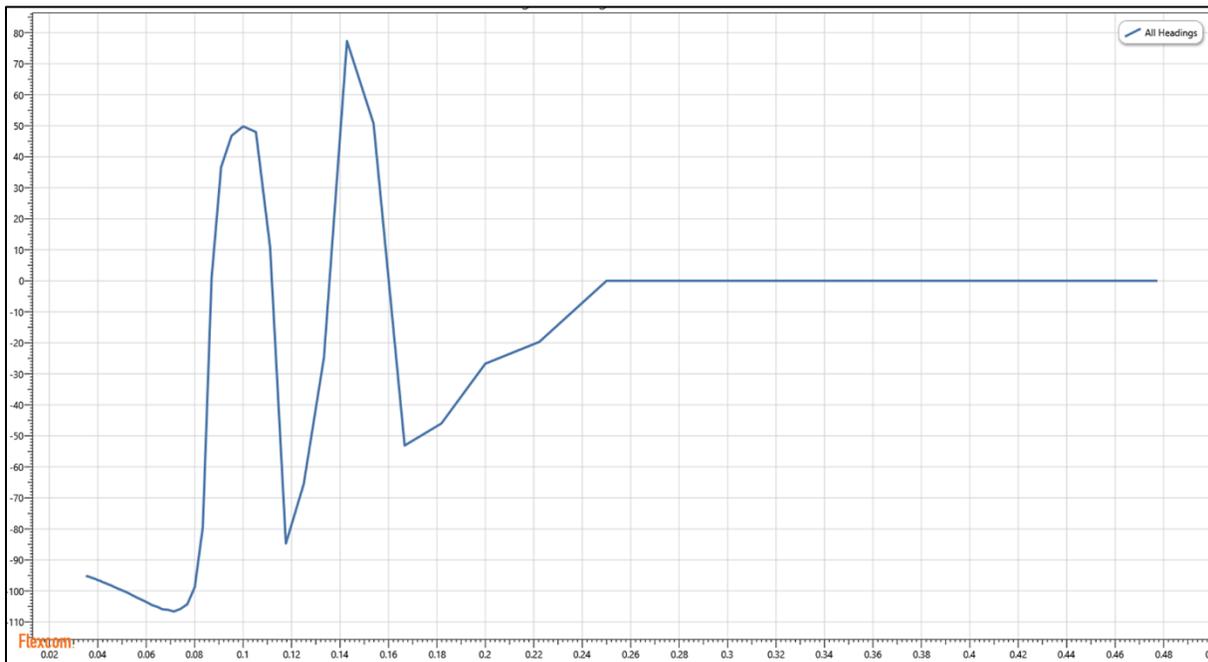


Figura 23 Surge ángulo de fase RAO, frecuencia H_z Vs respuesta deg

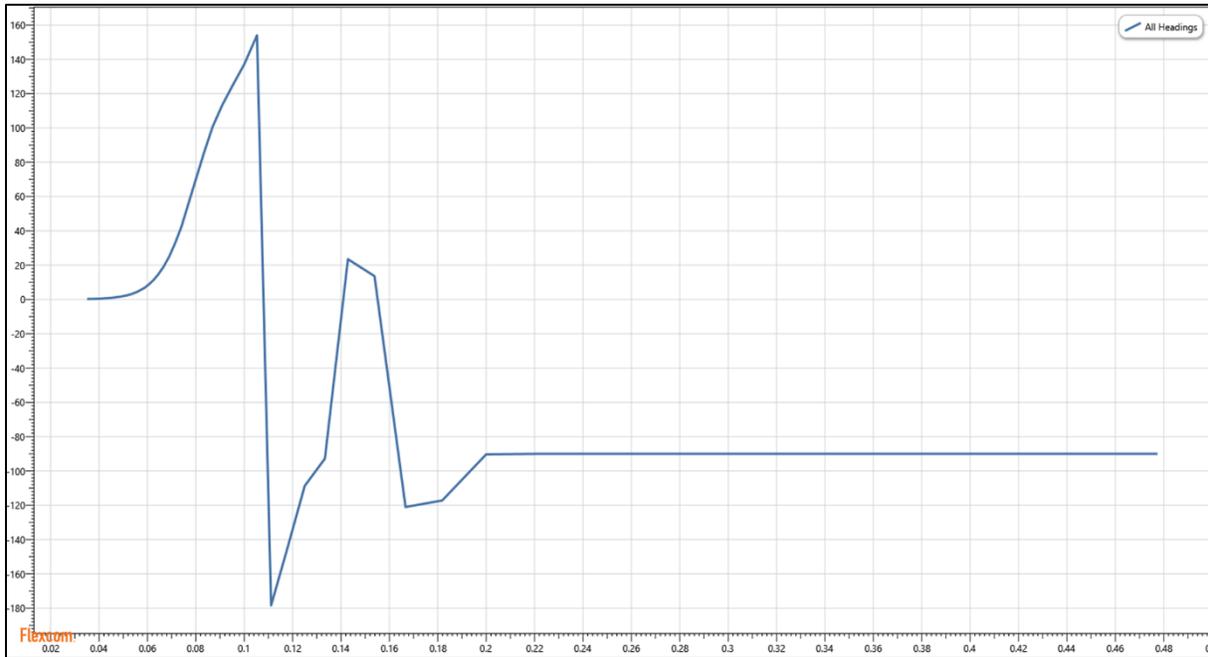


Figura 24 Heave ángulo de fase RAO, frecuencia H_z Vs respuesta deg

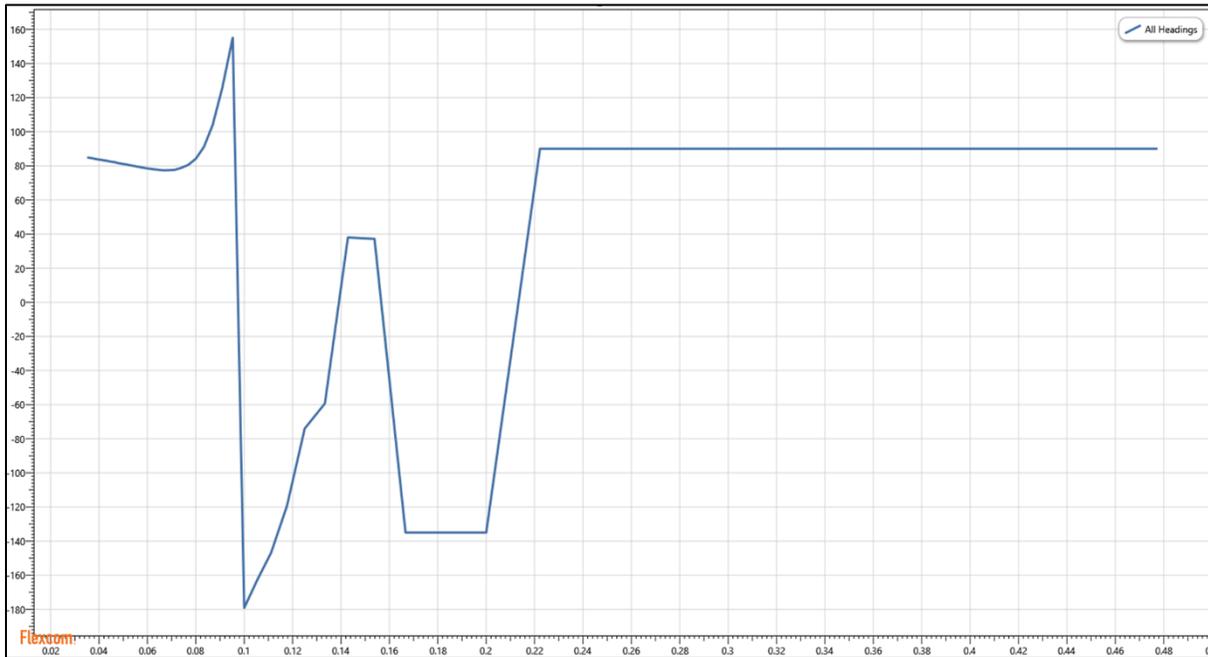


Figura 25 Pitch ángulo de fase RAO, frecuencia H_z Vs respuesta deg

4.2.3. PERFIL DE LA VELOCIDAD DE LA CORRIENTE

Por la profundidad y ubicación del caso de estudio se eligió el siguiente perfil vertical de velocidades de corrientes (ver la **Figura 26**) obtenido de la investigación realizada por Zárate, L. (2015). La dirección de la velocidad de corriente es 270° -Oeste, **convención oceanográfica**.

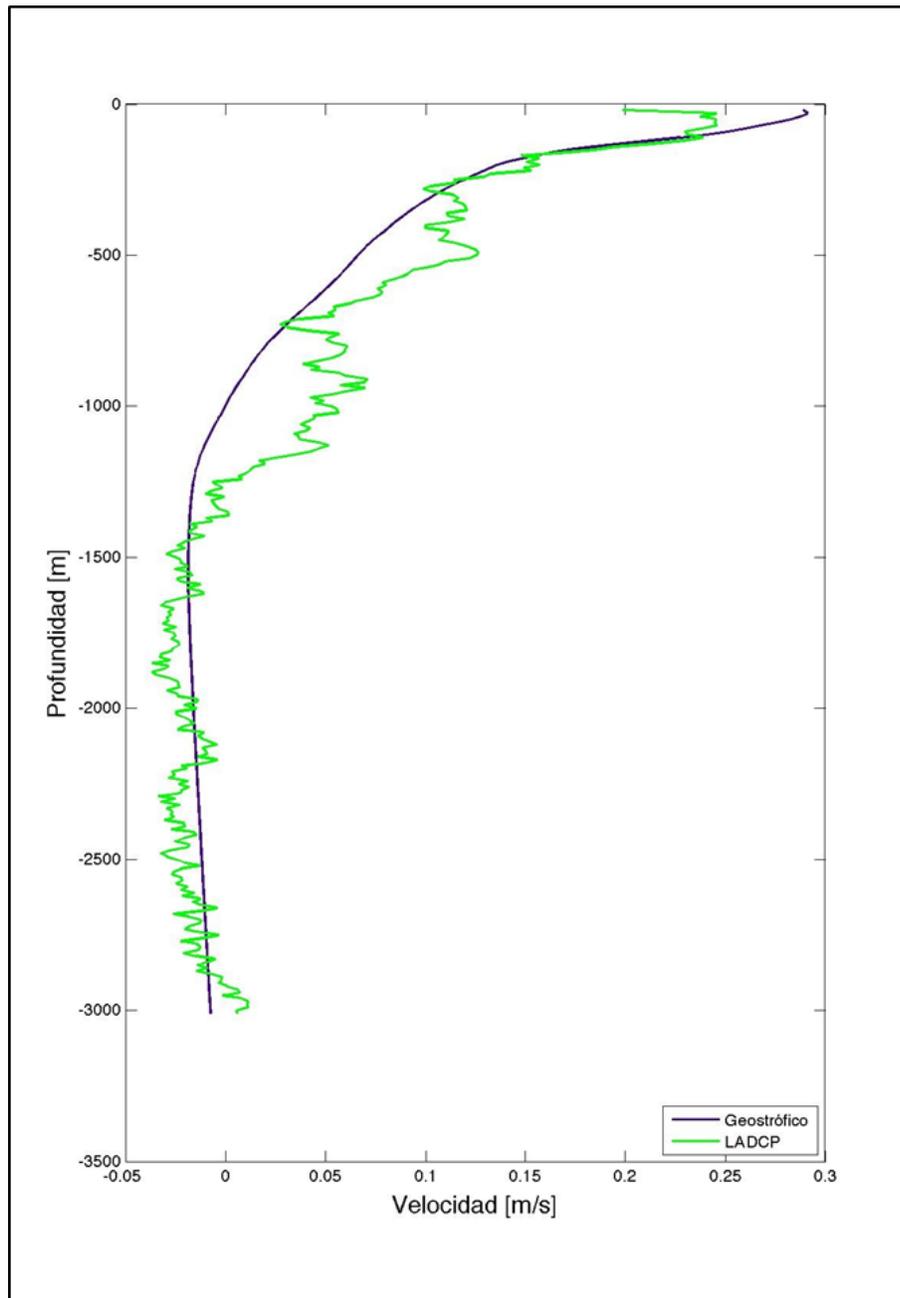


Figura 26 Perfil vertical de velocidades, obtenida de Zárate, L. (2015)

4.3. CABLE UMBILICAL ANALIZADO

Debido a que los cables umbilicales son fabricados exclusivamente para grandes proyectos específicos no es posible hacer una propuesta de diseño tan fácilmente y a la ligera ya que se estaría analizando un cable umbilical "ficticio" que muy probablemente no sea fabricado además de que actualmente aún no se ha desarrollado la ingeniería a detalle de las instalaciones *offshore* en el Campo Trion, por lo tanto, la mejor opción es usar un cable umbilical existente, es decir, ya fabricado y que opere en condiciones similares de profundidad a las esperadas en el GoM. La alternativa seleccionada corresponde al cable dinámico umbilical de nombre **Agbami** manufacturado por la Empresa **Aker Solutions**[®]. Algunas de sus características son el diámetro externo de 178 mm y peso lineal fuera del agua de 370 N/m. Por tratarse de un umbilical dinámico las rigideces; axial, al momento flexionante y a la torsión, son relativamente altas, esta ventaja le permite tener muy bajos valores de MBR, parámetro sensible que no debe sobrepasarse durante el almacenamiento, instalación y operación, la profundidad de operación es de 1,460 m. La **Figura 27** presenta una fotografía real del cable durante el proceso de instalación, así como una sección del modelo FEM que fue idealizado para en análisis local, mientras que la **Figura 28** indica las especificaciones principales del cable **Agbami**. Ambas figuras fueron obtenidas del trabajo elaborado por Mohammad, S. (2014).

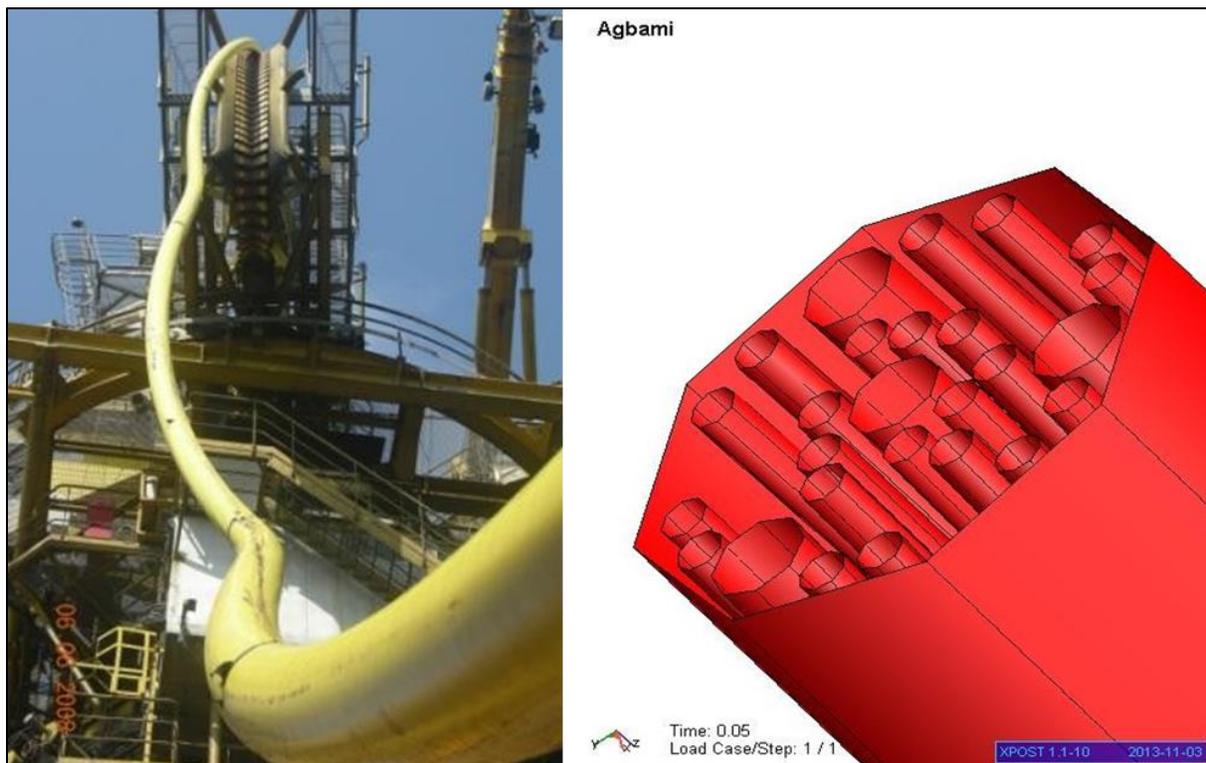


Figura 27 Fotografía y modelo FEM del cable umbilical dinámico analizado Agbami, obtenida del trabajo realizado por Mohammad, S. (2014)

Externamente el cable umbilical esta extruido con Polietileno de Mediana Densidad MDPE (por sus siglas en inglés *Medium Density Polyethylene*) y tiene un espesor de 5 mm.

Estructuralmente al interior contiene 26 tubos de acero distribuidos de la siguiente forma:

4 tubos de acero de mayor diámetro:	
Diámetro externo, mayores dimensiones	31.00 mm
Diámetro interno, mayores dimensiones	25.40 mm
22 tubos de acero de menor diámetro.	
Diámetro externo, menores dimensiones	15.38 mm
Diámetro interno, menores dimensiones	12.70 mm

Operativamente contiene 9 cables eléctricos de cobre que no son considerados para el aporte de resistencia mecánica. La sección y el arreglo del cable es simétrica respecto del eje vertical, ver la **Figura 28**. En este trabajo se considera que el cable umbilical Agbami no transporta ninguna clase de fluido.

La interacción de todos los elementos que componen un cable umbilical ha sido tema de investigación en varias tesis de maestría, doctorados y artículos de investigación, en donde el principal objetivo es determinar la resistencia general de todo el cable si se considera la resistencia de todos los componentes (estructurales y operativos), así como la fricción existente entre ellos por estar unidos en un solo paquete. Para conocer esa resistencia, el problema se aborda mediante un modelo local y muchas veces los resultados se comparan con pruebas y ensayos de laboratorio utilizando muestras del cable real que fue usado para la idealización del modelo local FEM, ahora bien, debido a que en este trabajo se analiza un modelo global, para conocer la resistencia general de todo el cable umbilical, la rigidez axial y la rigidez al momento flexionante, fueron determinadas de forma aproximada mediante la ecuación (4-3) y la ecuación (4-13), respectivamente ya que no se realizó ningún modelo local. Este método ya ha sido usado por Mohammad, S. (2014) y por Finstad, M. (2017) las ecuaciones toman en cuenta la sección, la geometría, las propiedades mecánicas (únicamente de las armaduras que aportan resistencia) de los materiales, así como la configuración helicoidal.

Los resultados obtenidos empleando el método usado por Mohammad, S. (2014) y por Finstad, M. (2017) fueron comparados con las especificaciones del fabricante para verificar que las rigideces obtenidas fueran las correctas. Finalmente, una vez que los valores fueron verificados las variables se usaron en el modelo global en el software FLEXCOM®.

Nombre del Umbilical	Agbami
Tipo	Dinámico
Diámetro externo (mm)	89
Espesor (mm)	5
"Pitch length" (m)	11.5
Ángulo helicoidal (grados)	2.8
Peso en aire, agujeros vacíos (N/m)	370
Peso en agua, agujeros vacíos (N/m)	170
Peso en agua, agujeros rellenos (N/m)	200
Peso específico relativo comparado con el agua de mar	1.79
Rigidez Axial (N)	4.62E8
Rigidez al momento (Nm ²)	2.68E4
Rigidez Torsional (Nm ²)	2.06E4
Capacidad a tensión, instalación(KN)	1010
MBR en almacenamiento (m)	2.5
MBR en operación (m)	12
MBR en instalación (m)	7.1

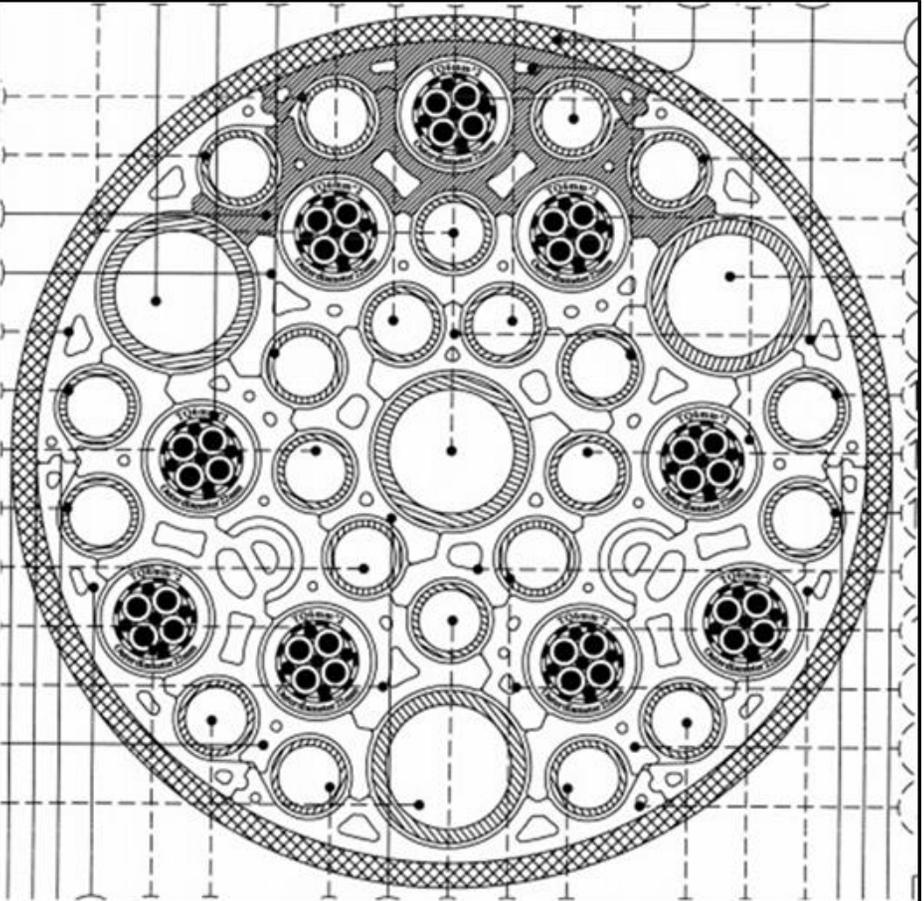


Figura 28 Propiedades y sección en corte del cable umbilical dinámico analizado Agbami, obtenida del trabajo realizado por Mohammad, S. (2014)

La rigidez axial global se determinó con la ecuación (4-3) :

$$E A = n E A_t \cos \alpha (\cos^2 \alpha - \nu_a \sin^2 \alpha) \quad (4-3)$$

donde

n	número de elementos de acero
E	módulo de Young del acero 2×10^{11} N/m ²
A_t	área total de acero de cada tubo
α	<i>lay angle</i> especificación del fabricante de 2.8°. Este parámetro geométrico tiene como ventaja minimizar la fricción interna en el umbilical que se presenta cuando está sujeto a tensión, esto asegura buena estabilidad estructural
ν_a	relación de Poisson, 0.3

Para los 4 (cuatro) tubos de mayores dimensiones obtenemos:

$$A = \pi \left[\frac{31mm}{2} \right]^2 - \pi \left[\frac{25.40mm}{2} \right]^2 = 2.481 \times 10^{-4} [m^2] \quad (4-4)$$

$$E A = 4 \times 2 \times 10^{11} \left[\frac{N}{m^2} \right] \times 2.481 \times 10^{-4} [m^2] \times \cos 2.8^\circ (\cos^2 2.8^\circ - 0.3 \times \sin^2 2.8^\circ) \quad (4-5)$$

$$E A_{4tubos} = 1.976 \times 10^8 [N] \quad (4-6)$$

Para los 22 (veintidós) tubos de menores dimensiones obtenemos:

$$A = \pi \left[\frac{15.38mm}{2} \right]^2 - \pi \left[\frac{12.70mm}{2} \right]^2 = 5.91 \times 10^{-5} [m^2] \quad (4-7)$$

$$E A = 22 \times 2 \times 10^{11} \left[\frac{N}{m^2} \right] \times 5.91 \times 10^{-5} [m^2] \times \cos 2.8^\circ (\cos^2 2.8^\circ - 0.3 \times \sin^2 2.8^\circ) \quad (4-8)$$

$$E A_{22tubos} = 2.589 \times 10^8 [N] \quad (4-9)$$

La rigidez axial global del umbilical Agbami resulta en:

$$E A_{4tubos} + E A_{22tubos} = 4.565 \times 10^8 [N] \quad (4-10)$$

Analizando por separado los valores que corresponden a la relación de Poisson y al ángulo de la espiral de los tubos de acero considerados, podemos ver que pueden ser interpretados como un factor de reducción a la resistencia total del umbilical, siempre que el ángulo sea pequeño. En este caso sólo reduce la resistencia total en un 0.5%.

$$E A = n E A_t \cos \alpha (\cos^2 \alpha - \nu_a \sin^2 \alpha) \quad (4-11)$$

$$\cos 2.8^\circ (\cos^2 2.8^\circ - 0.3 \times \sin^2 2.8^\circ) = 0.995 \quad (4-12)$$

La rigidez global al momento se determina con la siguiente ecuación (4-13). Los resultados se presenta en la **Tabla 2** y en la **Figura 29** se presentan la numeración de los tubos de acero:

$$E I = \sum_{i=1}^n E A_{t_i} R_i^2 \cos^2 \theta_i \quad (4-13)$$

donde

R es el radio promedio y es una información específica del fabricante con un valor de 0.01413 m

θ Azimut de la posición de la tubería analizada respecto del centro del umbilical

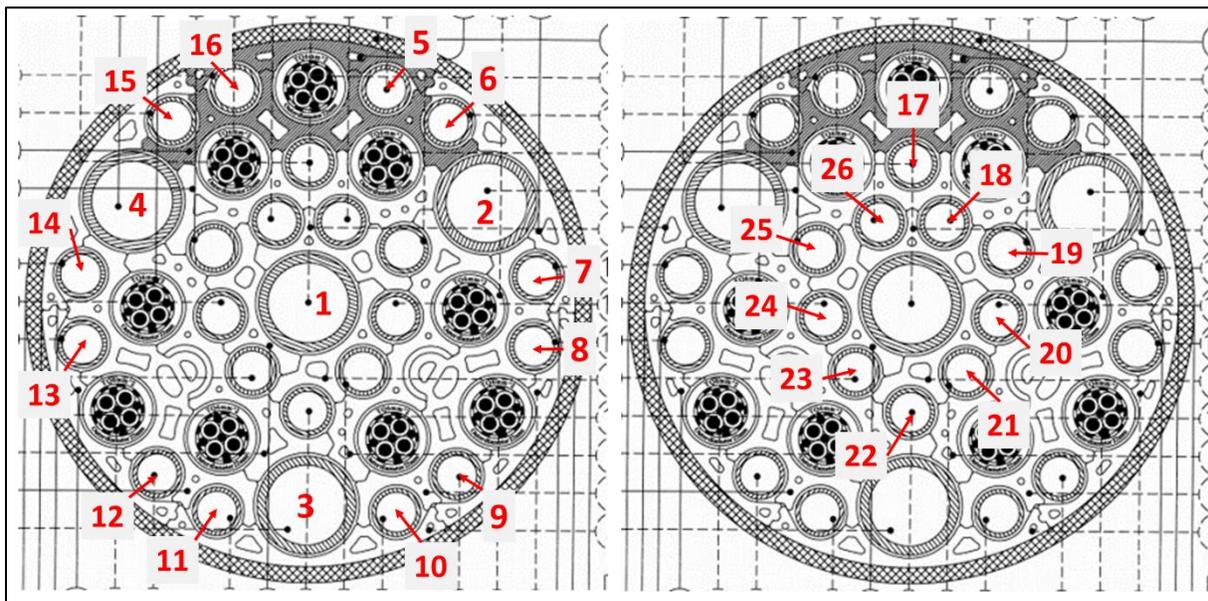


Figura 29 Configuración de los 26 tubos de acero

Tabla 2 Cálculo de la rigidez global al momento flexionante

Módulo de Elasticidad	Tubo de acero	Área	Radio	Cos(θ) ²	E Ip
N/m ²	No	m ²	m		N-m ²
2.00E+11	1	2.48E-04	0.01413	0.23503	2,326.81
2.00E+11	2	2.48E-04	0.01413	1.00000	9,899.97
2.00E+11	3	2.48E-04	0.01413	0.25000	2,475.03
2.00E+11	4	2.48E-04	0.01413	1.00000	9,899.97
2.00E+11	5	5.91E-05	0.01413	0.88302	2,082.40
2.00E+11	6	5.91E-05	0.01413	0.62095	1,464.38
2.00E+11	7	5.91E-05	0.01413	0.01485	35.02
2.00E+11	8	5.91E-05	0.01413	0.03641	85.87
2.00E+11	9	5.91E-05	0.01413	0.56960	1,343.27
2.00E+11	10	5.91E-05	0.01413	0.84734	1,998.26
2.00E+11	11	5.91E-05	0.01413	0.83456	1,968.13
2.00E+11	12	5.91E-05	0.01413	0.55226	1,302.39
2.00E+11	13	5.91E-05	0.01413	0.03015	71.11
2.00E+11	14	5.91E-05	0.01413	0.01485	35.03
2.00E+11	15	5.91E-05	0.01413	0.63782	1,504.16
2.00E+11	16	5.91E-05	0.01413	0.89401	2,108.32
2.00E+11	17	5.91E-05	0.01413	1.00000	2,358.27
2.00E+11	18	5.91E-05	0.01413	0.85966	2,027.32
2.00E+11	19	5.91E-05	0.01413	0.23503	554.27
2.00E+11	20	5.91E-05	0.01413	0.02448	57.72
2.00E+11	21	5.91E-05	0.01413	0.60397	1,424.32
2.00E+11	22	5.91E-05	0.01413	1.00000	2,358.27
2.00E+11	23	5.91E-05	0.01413	0.58682	1,383.89
2.00E+11	24	5.91E-05	0.01413	0.01937	45.68
2.00E+11	25	5.91E-05	0.01413	0.25000	589.58
2.00E+11	26	5.91E-05	0.01413	0.87158	2,055.42

La rigidez global al momento flexionante del umbilical Agbami resulta en:

$$\sum EI = 2.68 \times 10^4 [N - m^2] \quad (4-14)$$

Por recomendación del fabricante sólo se consideró el aporte de los 22 tubos de acero de menor diámetro en la rigidez global al momento flexionante (es decir desde el tubo 5 hasta el tubo 26).

4.4. CONFIGURACIÓN LAZY-WAVE ANALIZADA

La principal variable que determina la mejor configuración para la operación del cable umbilical a usar en una instalación *offshore* es la profundidad a la que se encuentran las instalaciones submarinas. La profundidad del Campo Trion es de 1,500 m, esta distancia está en el umbral que corresponde a la frontera entre las aguas intermedias y las aguas profundas, por esta razón se eligió la configuración *Lazy Wave* para ser modelada en el análisis global. La configuración *Lazy Wave* consiste en agregar boyas de flotación en una longitud del cable umbilical sumergido en el océano, es decir, las boyas de flotación cambian la configuración en catenaria libre que el cable adoptaría por consecuencia de su peso propio. La longitud total del cable umbilical es de 2,200 m y los flotadores se agregaron en una longitud de 600 m, ver la **Figura 30**.

4.4.1. CONFIGURACIÓN DEL MODELO

El modelo global analizado con el software FLEXCOM® considera la configuración *Lazy-Wave* de 2,200 m de longitud a 1,500 m de profundidad (referidos al N.B.M., Nivel de Bajamar Medio) que se conecta a la superficie con el FPSO. Una vez definida y modelada la configuración en el software se analizó el contorno ambiental para un Tr de 100 años elaborados por Pérez, R. (2018) ver la **Figura 19**.

Las siguientes consideraciones se hicieron en el modelo global:

- Inicialmente se simuló la condición estática en la que solo se considera la fuerza de gravedad y flotación, después se realizaron simulaciones en el dominio de la frecuencia para saber en cuales densidades espectrales que integran el contorno ambiental se presentan los valores más críticos de tensión efectiva, momento flexionante y curvatura. Los resultados mostraron que los valores más críticos se presentan entre las densidades espectrales 5 y 6 (ver la **Figura 19**) así que nuevamente se realizaron simulaciones, pero ahora en el dominio del tiempo sólo para estos dos casos simulando 3 horas de tormenta con la finalidad de determinar la respuesta estructural del cable ante los movimientos del FPSO y las condiciones oceanográficas.
- La discretización del modelo se realizó a cada 5 m y las propiedades estructurales que fueron utilizadas; rigidez axial y rigidez al momento flexionante, fueron las determinadas previamente con la ecuación (4.3) y la ecuación (4.13) respectivamente.

- La densidad del agua corresponde al agua salada $1,025 \text{ kg/m}^3$, la viscosidad cinemática de $0.0000013 \text{ m}^2/\text{s}$ y las propiedades hidrodinámicas se mantuvieron constantes a lo largo de todo el análisis.
- La distancia horizontal del FPSO medida desde el inicio del cable umbilical es de 700 m y la orientación del FPSO *yaw* es hacia la dirección este.
- La condición de apoyo en el lecho marino se consideró sin traslaciones en los 3 ejes [X], [Y] y [Z] mientras que, en el otro extremo, en el FPSO se permiten las traslaciones en los 3 ejes.
- La información de los RAO's fue aplicada en el punto de conexión entre el cable umbilical y el FPSO.
- Para el análisis dinámico el tiempo durante el cual las cargas y los desplazamientos aplicados se incrementaron gradualmente hasta su valor total fue de 10 segundos.

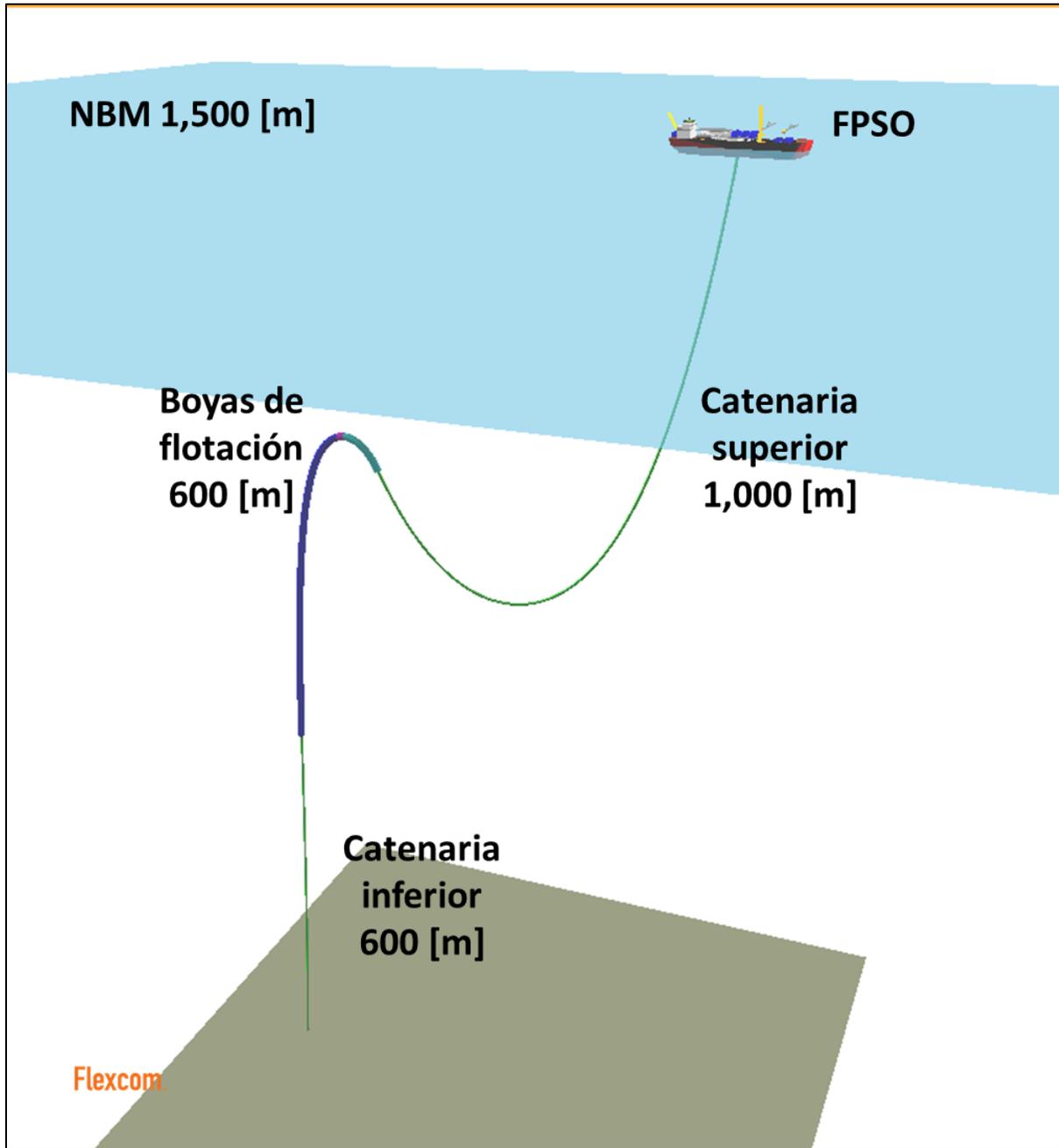


Figura 30 Propuesta de configuración en *Lazy-Wave* longitud 2,200 m. Fuente: elaboración propia

4.5. ANÁLISIS MODAL

Para la configuración *Lazy-Wave* y el cable umbilical Agbami, los periodos naturales de vibrar obtenidos están en el rango de 175 segundos a 35 segundos ver la **Tabla 3**. Esta variación esta lejana a los periodos de oleaje predominantes en el GoM que oscilan entre los 5 a los 8 segundos. La **Figura 31**, **Figura 32** y **Figura 33** presentan los 3 primeros modos de vibrar en el espacio tridimensional. Las 4 vistas por figura izquierda a derecha y arriba hacia abajo son; perspectiva en isométrico, perspectiva en planta, perfil lateral y perfil frontal. La ecuación (4-15) se usó para obtener los valores del modelo global y la frecuencia fue obtenida con la ecuación (4-16).

$$K v = \omega^2 M v \quad (4-15)$$

donde

K	Matriz de rigidez total de la estructura
M	Matriz de masa total de la estructura
ω^2	Frecuencias modales
v	Vector característico

$$f = \frac{\omega}{2 \pi} \quad (4-16)$$

Tabla 3 Propiedades dinámicas del umbilical

Modo No.	Frecuencia (Hz)	Periodo (s)
1	0.00570	175.373
2	0.00640	156.584
3	0.01110	89.788
4	0.01370	73.179
5	0.01570	63.669
6	0.01860	53.695
7	0.02100	47.648
8	0.02230	44.774
9	0.02730	36.687
10	0.02810	35.53

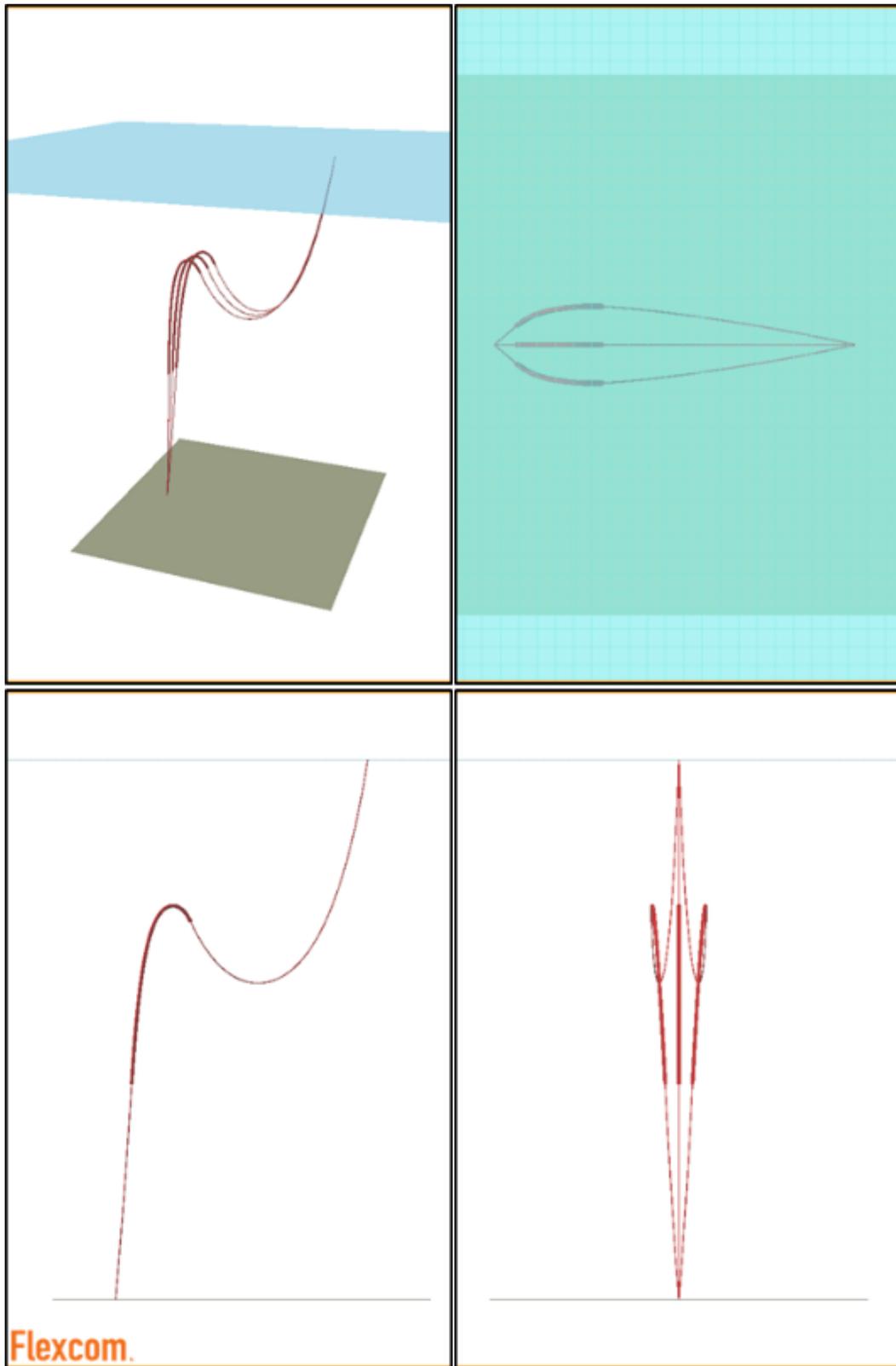


Figura 31, 1^{er} modo de vibrar

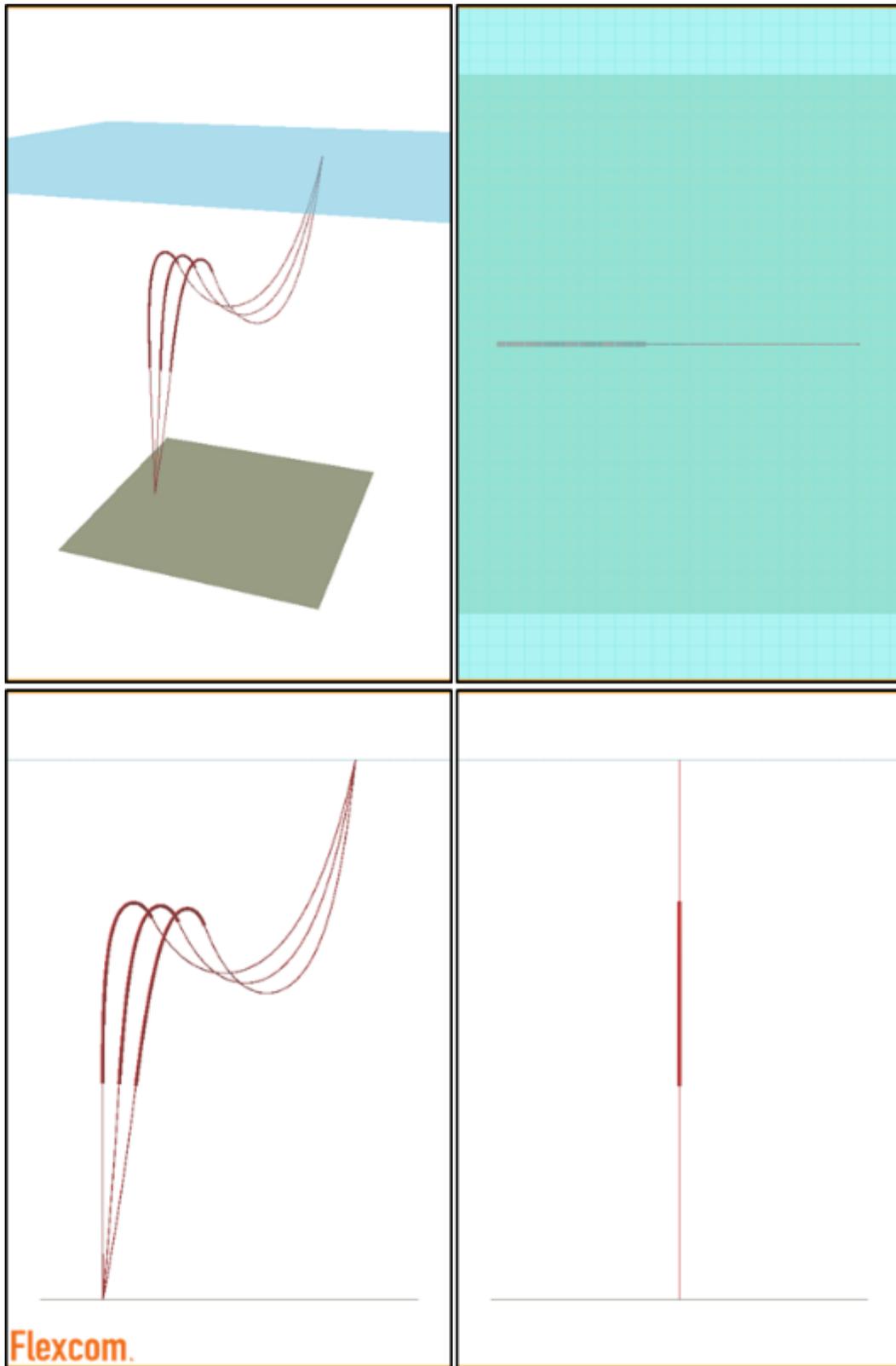


Figura 32, 2do modo de vibrar

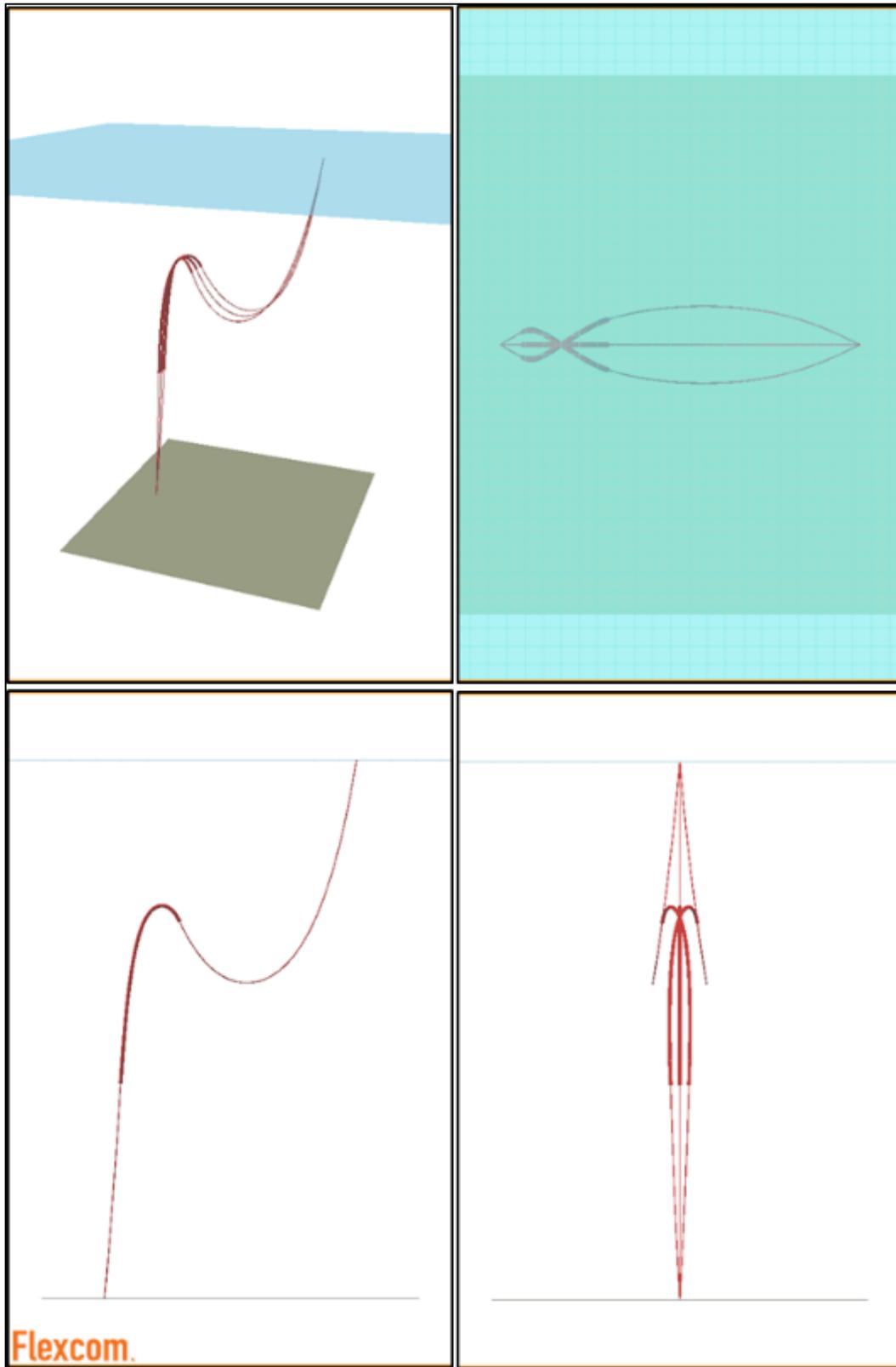


Figura 33, 3er modo de vibrar

4.6. RESULTADOS ANÁLISIS HIDRODINÁMICO

Los resultados de analizar las densidades espectrales que integran el contorno ambiental muestran que los esfuerzos máximos más probables MPM (momento flexionante, tensión efectiva y curvatura) ocurren para las siguientes densidades espectrales y ubicadas en los siguientes nodos;

$$\text{Caso 5 } "H_s = 8.922 \text{ m} - T_p = 14.78 \text{ s}"$$

$$\text{Caso 6 } "H_s = 9.176 \text{ m} - T_p = 14.32 \text{ s}"$$

(De ahora en adelante cada vez que se mencione Caso 5 o Caso 6 se refiere a los resultados obtenidos de la respuesta estructural que corresponden a la densidad espectral 5 y densidad espectral 6 respectivamente). El valor máximo más probable de tensión efectiva se presenta en el Caso 6 con un valor de 301.47 kN en el nodo 125 ver la **Figura 34**.

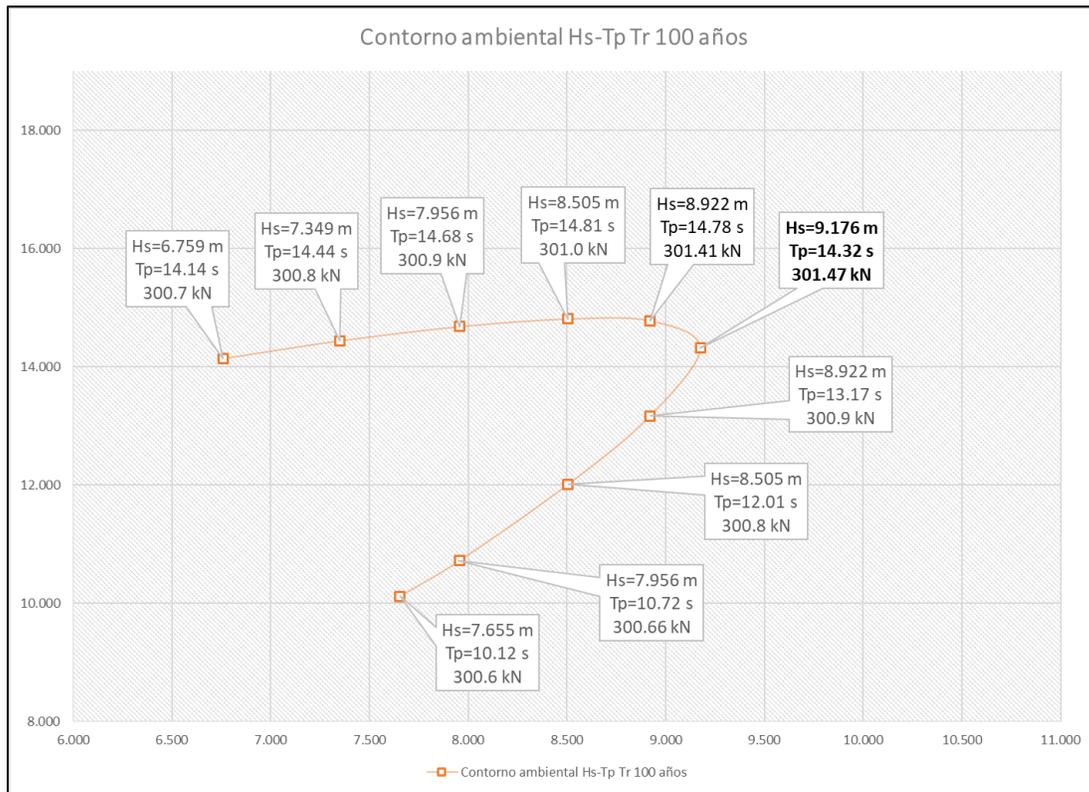


Figura 34 Contorno ambiental Tr 100 años, Tensión Efectiva

Mientras que el momento flexionante nuevamente se presenta para el Caso 6 con 918.78 N-m en el nodo 241 ver la **Figura 35** y finalmente, la curvatura de 0.031 m^{-1} se presenta para el Caso 5 y Caso 6 en el nodo 241 ver la **Figura 36**. El valor inverso de la curvatura es el MBR con un valor de 32.25 m, muy por encima del MBR especificado por el fabricante para condiciones de operación. La ubicación de los nodos se presenta en la **Figura 40**.

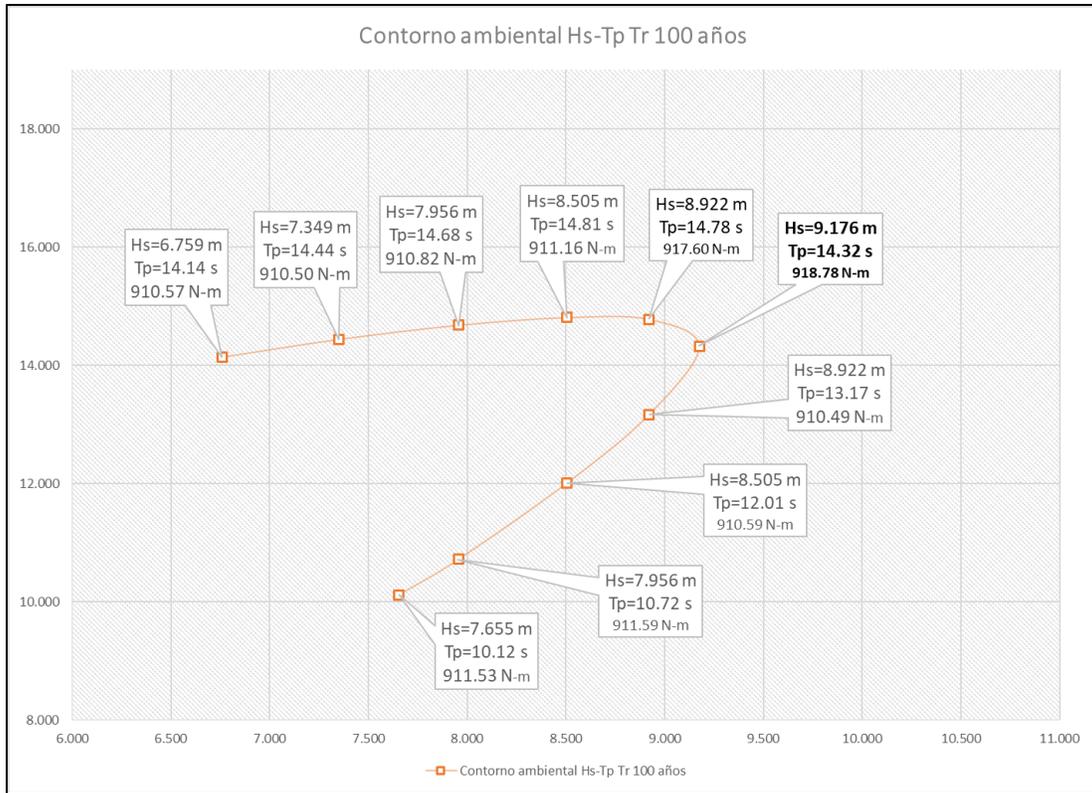


Figura 35 Contorno ambiental Tr 100 años, momento flexionante

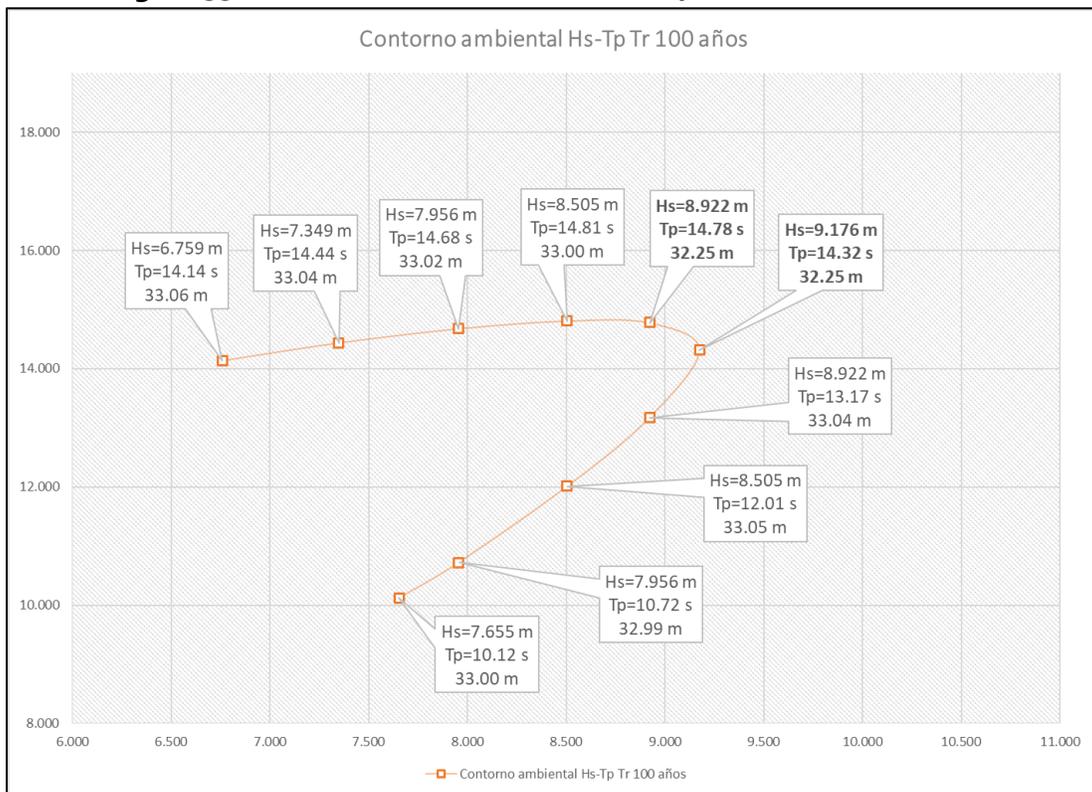


Figura 36 Contorno ambiental Tr 100 años, MBR

La configuración *Lazy-Wave* presenta las siguientes ventajas; distribuye la fuerza de la tensión efectiva en dos zonas del cable, donde se conecta al FPSO en la superficie **Figura 37** imagen derecha, y en la parte definida como *Lower Catenary Last* (catenaria inferior) **Figura 37** imagen izquierda. También elimina el TDZ (por sus siglas en inglés *Touch Down Zone*), pues los flotadores crean una doble sección en catenaria, las consecuencias o desventajas de esto es que ahora existen dos zonas en donde la curvatura y el momento flexionante presenta valores importantes, ver la **Figura 38** y la **Figura 39**.

Gracias a la discretización realizada en el modelo global sabemos exactamente la ubicación de los nodos en donde las fuerzas son mayores. La **Figura 40** muestra la ubicación de estos nodos, entonces, podemos extraer las series temporales de la variación de la tensión efectiva, momento flexionante y curvatura en estos nodos a lo largo del tiempo o dicho en otra forma, el registro al segundo de estos valores durante las 3 horas que dura la tormenta simulada. Con estos registros se determinó el valor MPM de las fuerzas haciendo uso de la distribución probabilística de Rayleigh.

Para el Caso 6 los nodos donde se presentan los mayores valores son:

NODO 125, Tensión Efectiva, ver la **Figura 41**.

NODO 241, Curvatura, ver la **Figura 42**.

NODO 241 Momento Flexionante, ver la **Figura 43**.

Adicionalmente también se extrajo (para el Caso 6) la serie temporal de la elevación de la superficie del agua y las series temporales de la respuesta del FPSO en *heave* y *pitch* en donde el cable umbilical se conecta al FPSO:

Elevación de la superficie del agua, ver la **Figura 44**.

Respuesta FPSO *heave*, ver la **Figura 45**.

Respuesta FPSO *pitch*, ver la **Figura 46**.

Con estos valores MPM se revisó el cable umbilical Agbami haciendo uso de la relación de interacción ecuación (3-1). De forma individual se revisaron cada una de las 26 tuberías; 4 de mayor diámetro y 22 de menor diámetro donde el área total de acero por las 26 tuberías es de 22.93 cm². La especificación del acero es A572 acorde a la nomenclatura internacional ASTM cuyas propiedades son: $F_y=449$ mPa, $F_u= 551$ mPa, $E=2e11$ N/m² y un coeficiente de Poisson igual a 0.3, además se tomaron en consideración las propiedades geométricas individuales, así como toda la información disponible del fabricante AKER *Solutions*[®].

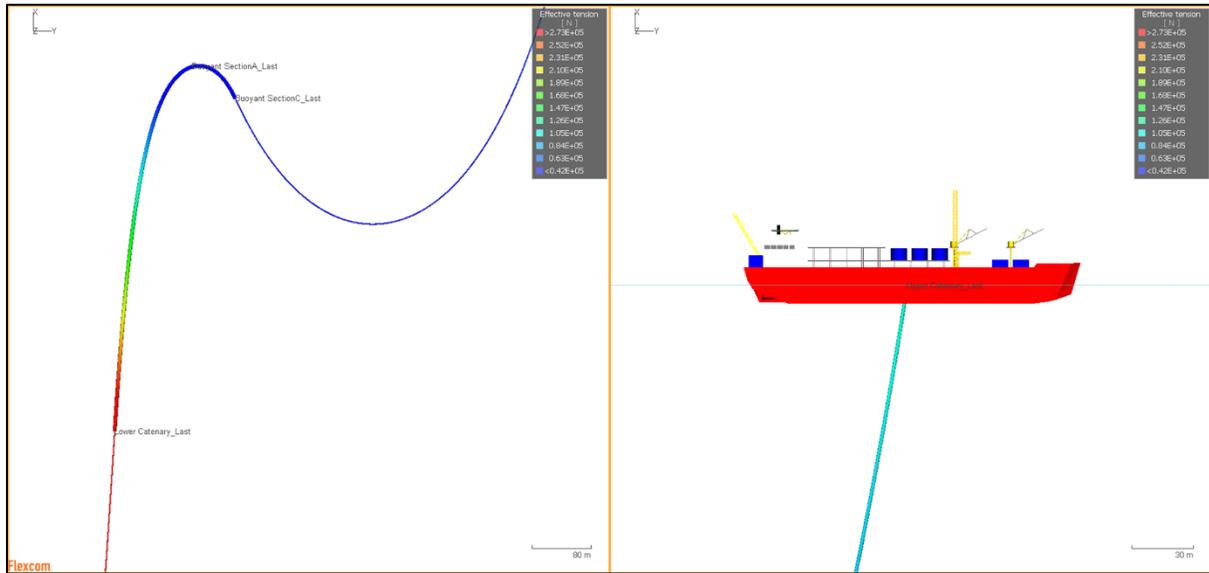


Figura 37 Tensión efectiva, configuración *lazy wave*

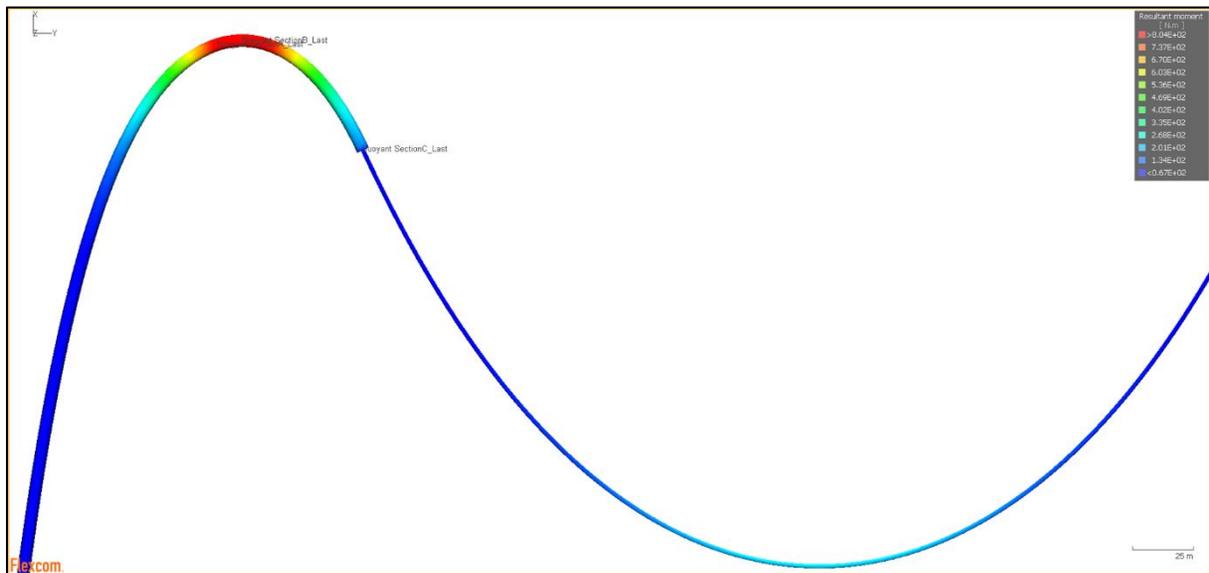


Figura 38 Momento flexionante, configuración *lazy wave*

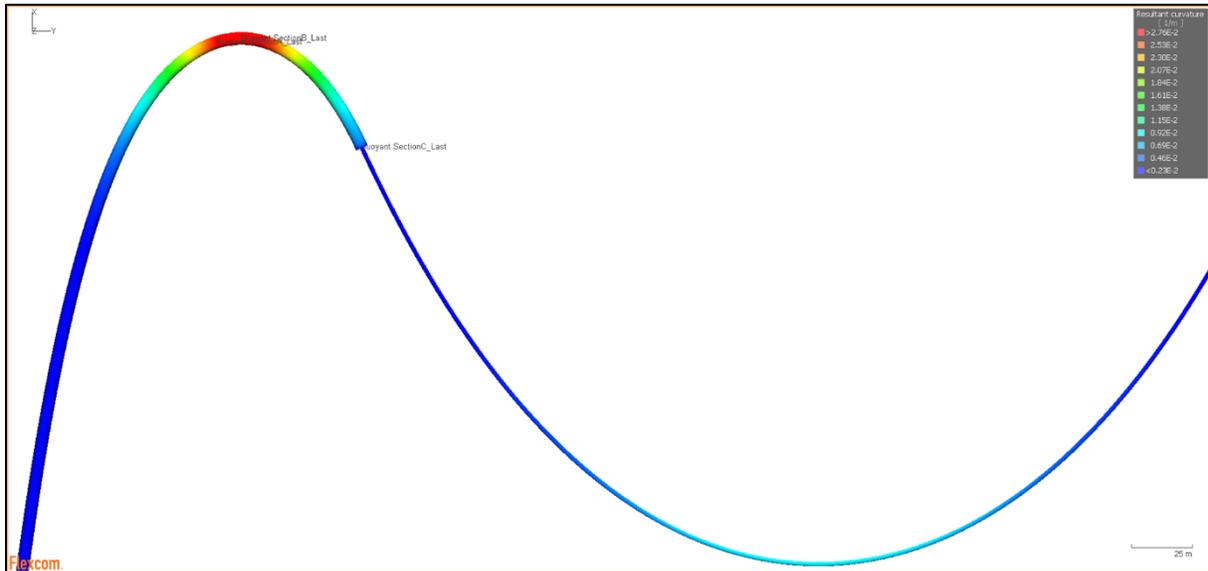


Figura 39 Curvatura, configuración *lazy wave*

Las características principales de las series temporales extraídas son:

Para la **Figura 41 Serie temporal de la tensión efectiva, caso 6, nodo 125** el valor MPM ocurre en el segundo 10,762, el valor medio es de 300,049 N y la desviación estándar es de 238.28 N.

En la **Figura 42 Serie temporal de la curvatura, caso 6, nodo 241** el valor MPM ocurre en el segundo 10,765, el valor medio es de 0.030 m^{-1} y la desviación estándar es de cero.

La **Figura 43 Serie temporal del momento flexionante, caso 6, nodo 241** el valor MPM ocurre en el segundo 10,765, el valor medio es de 904 N-m y la desviación estándar es de 3.33 N-m.

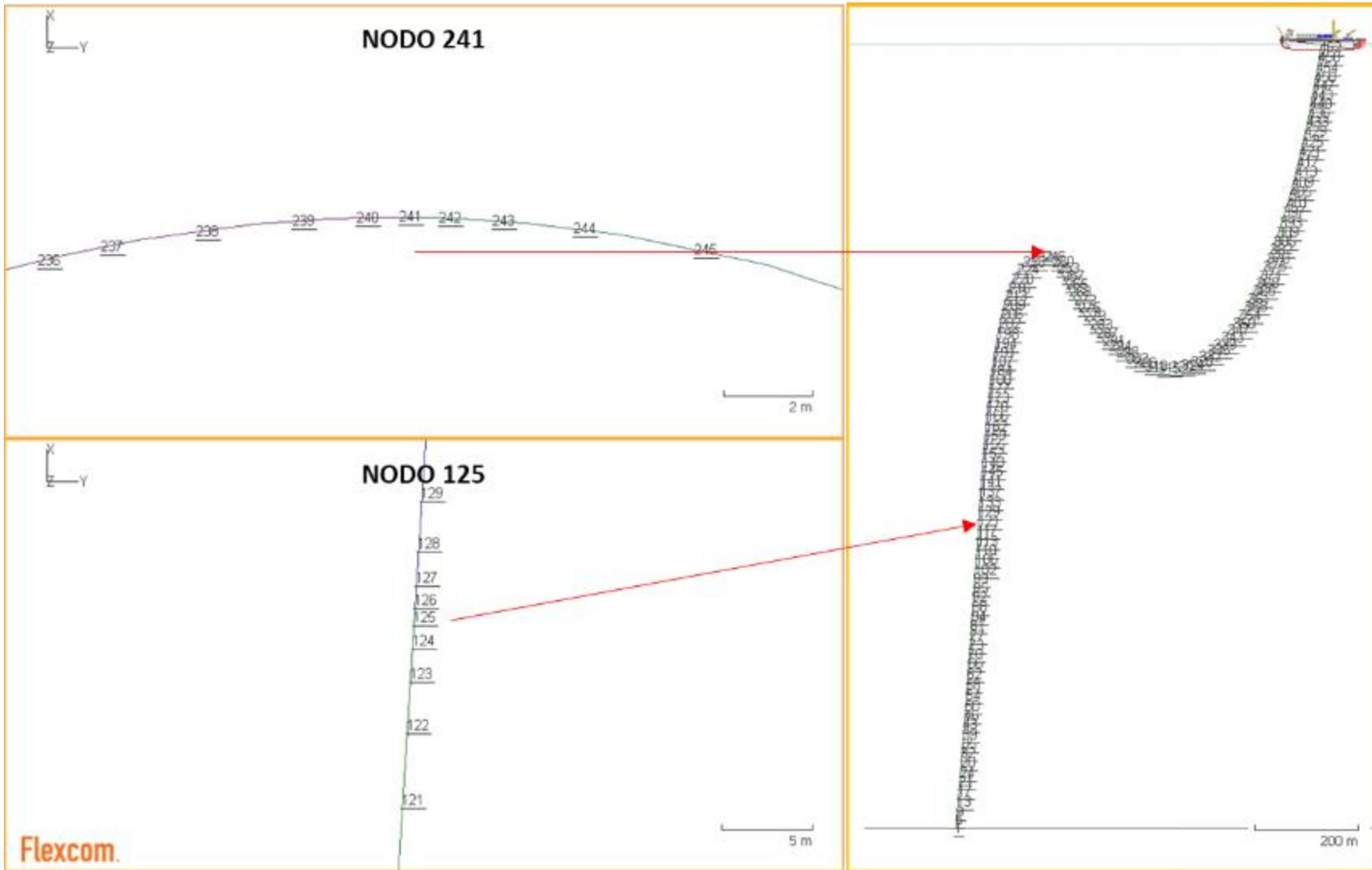


Figura 40 Discretización del modelo

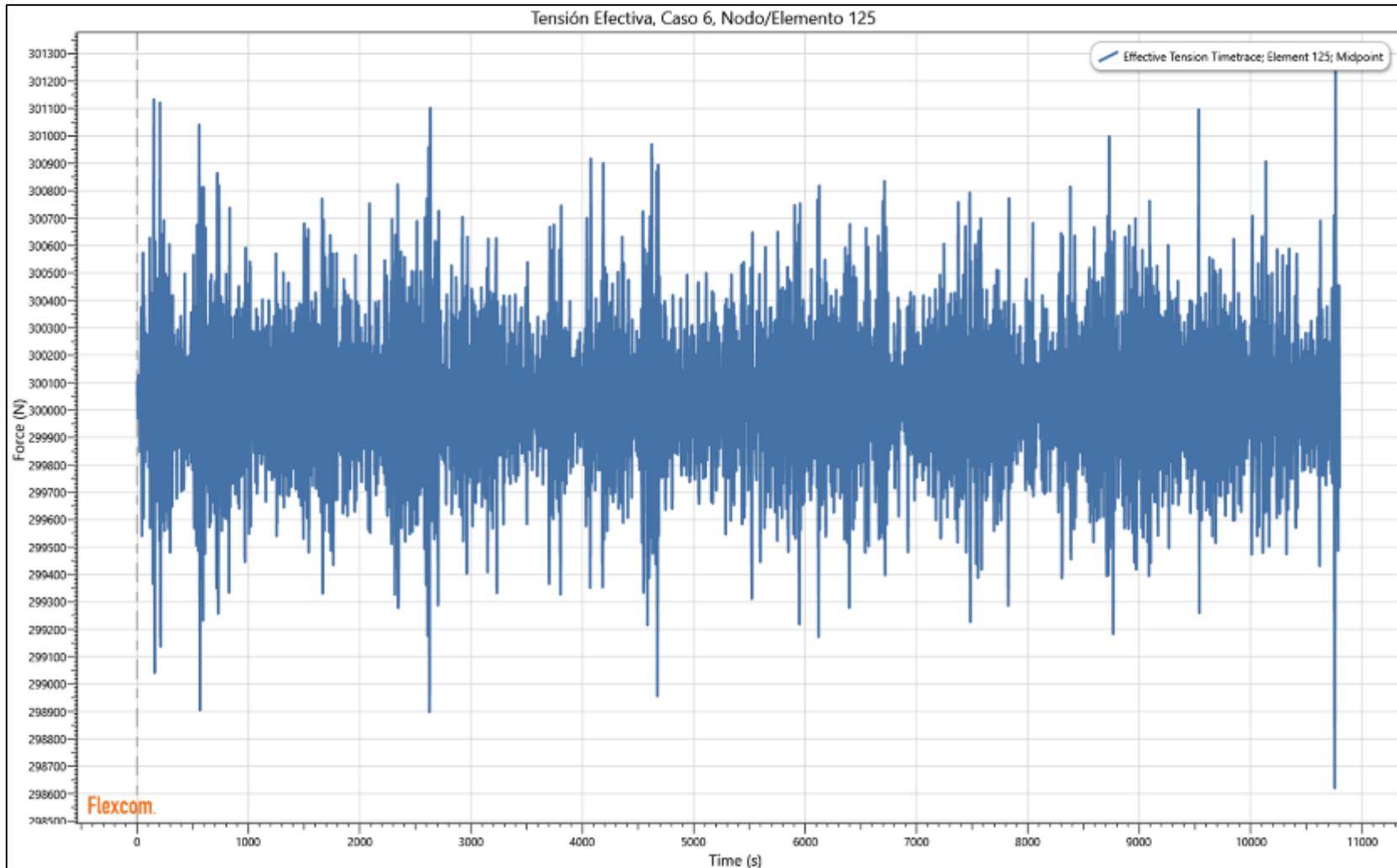


Figura 41 Serie temporal de la tensión efectiva, caso 6, nodo 125
Tiempo s Vs Tensión efectiva N

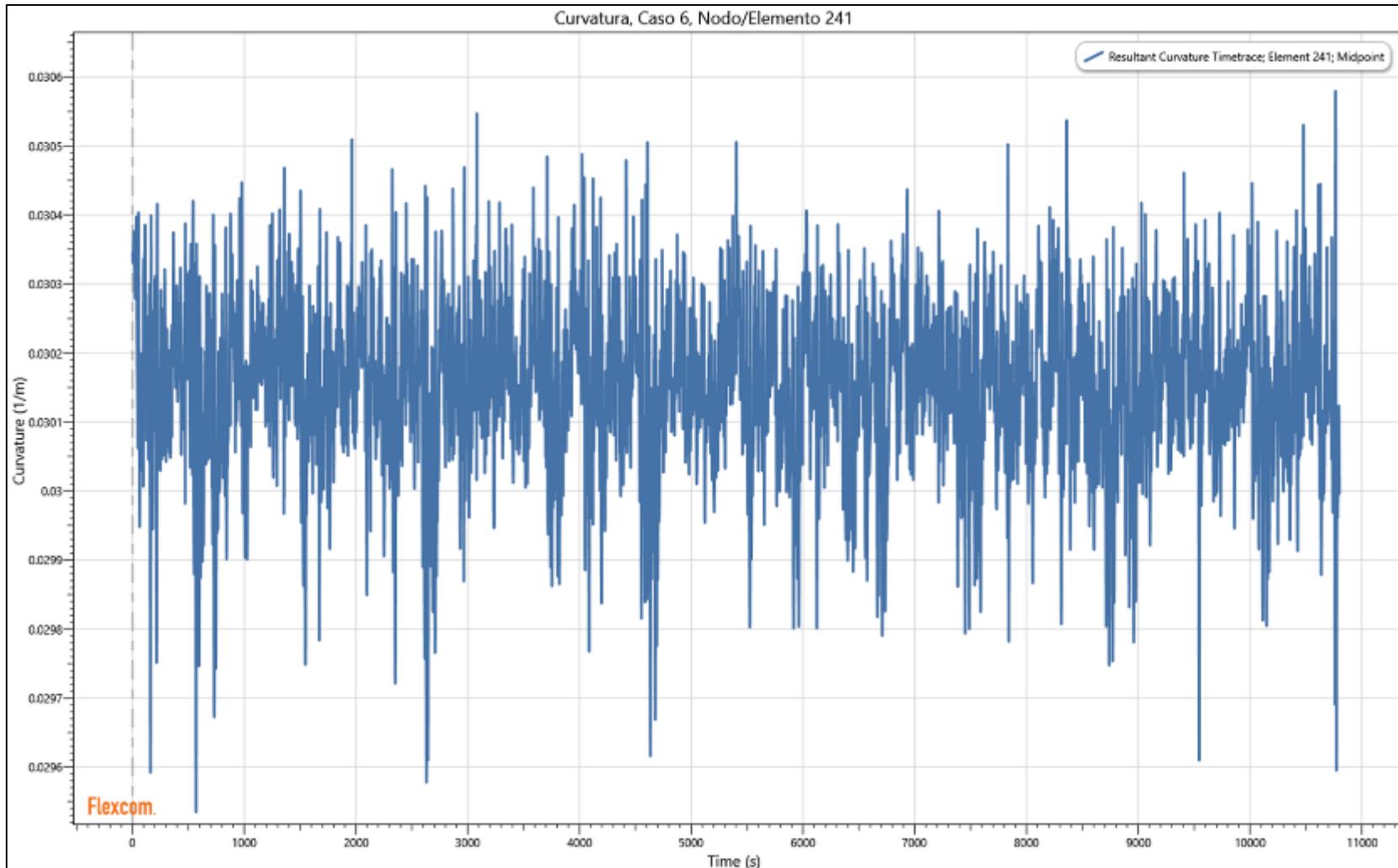


Figura 42 Serie temporal de la curvatura, caso 6, nodo 241
Tiempo s Vs Curvatura 1/m

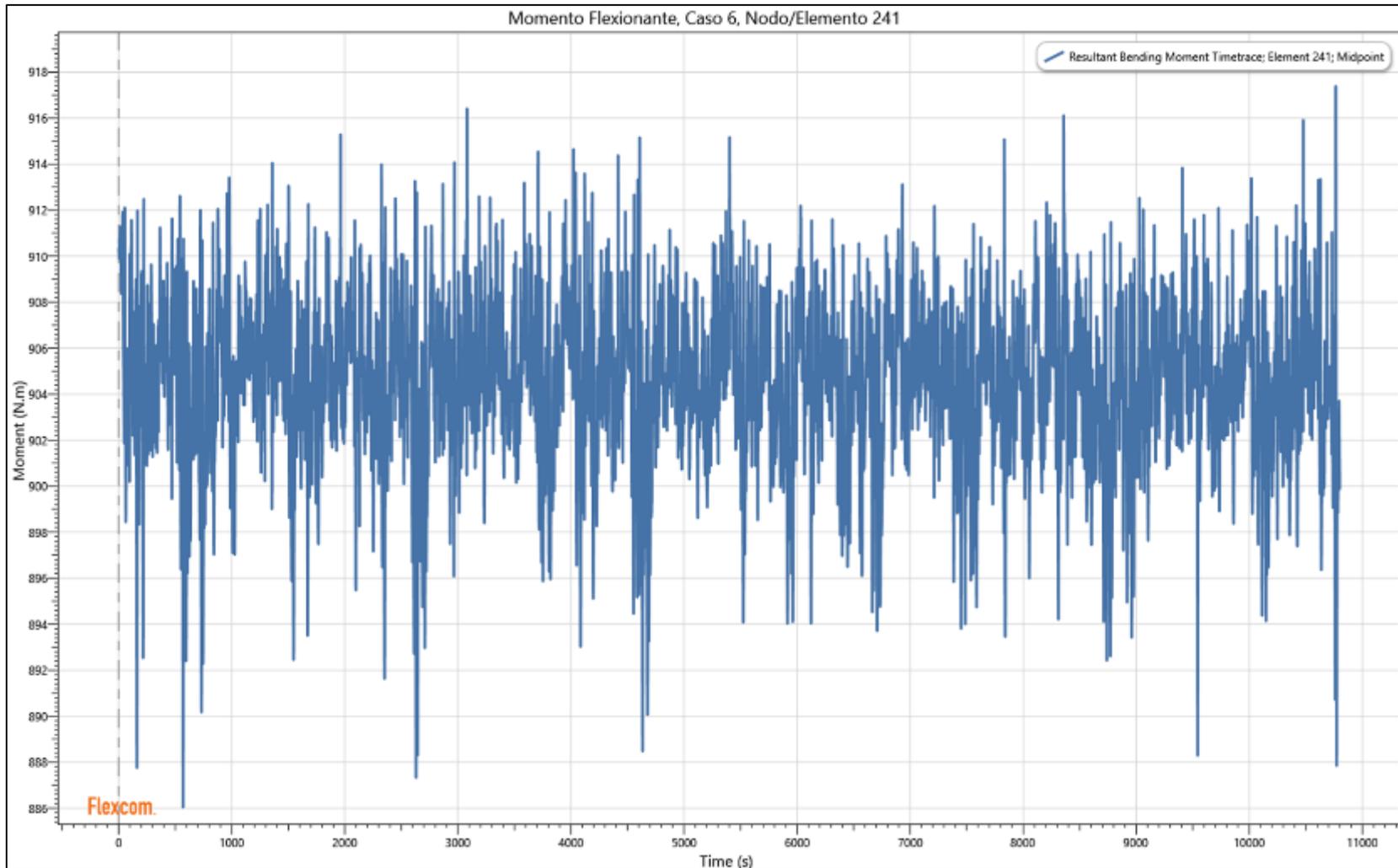


Figura 43 Serie temporal del momento flexionante, caso 6, nodo 241
Tiempo s Vs Momento flexionante N-m

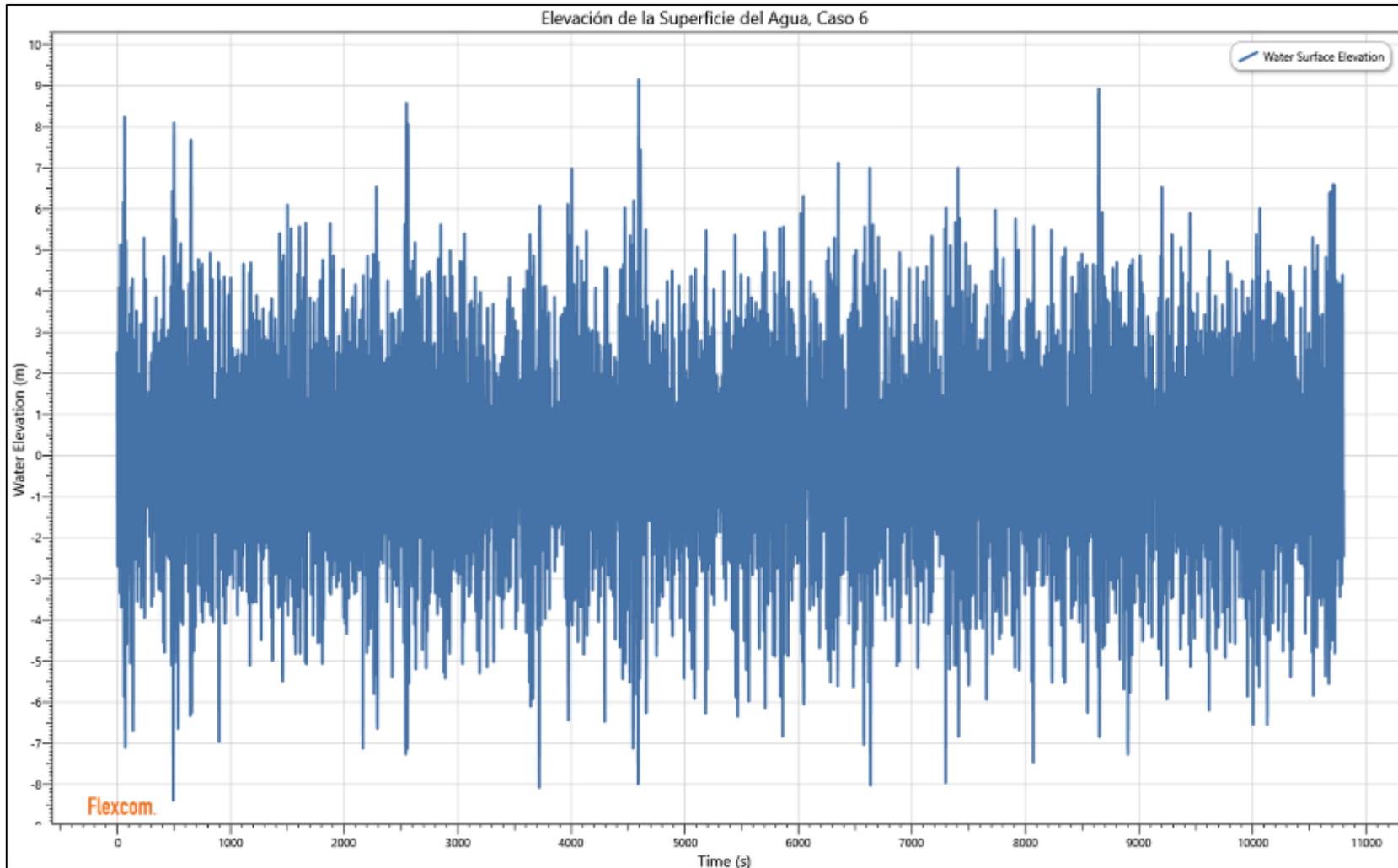


Figura 44 Serie temporal de la elevación de la superficie del agua, caso 6
Tiempo s Vs Elevación de la superficie del agua m

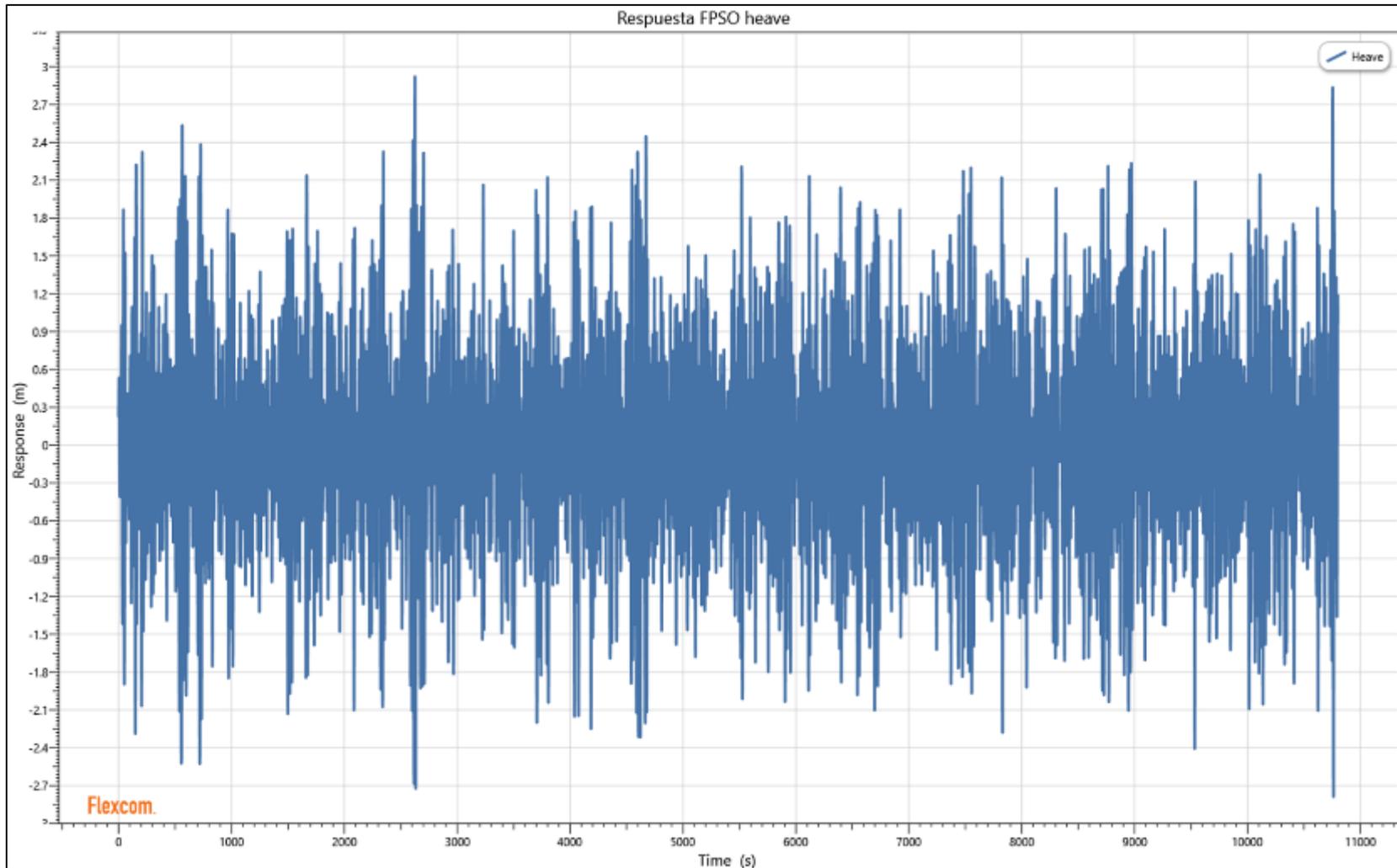


Figura 45 Serie temporal de la respuesta FPSO *heave*, caso 6
Tiempo s Vs Respuesta m

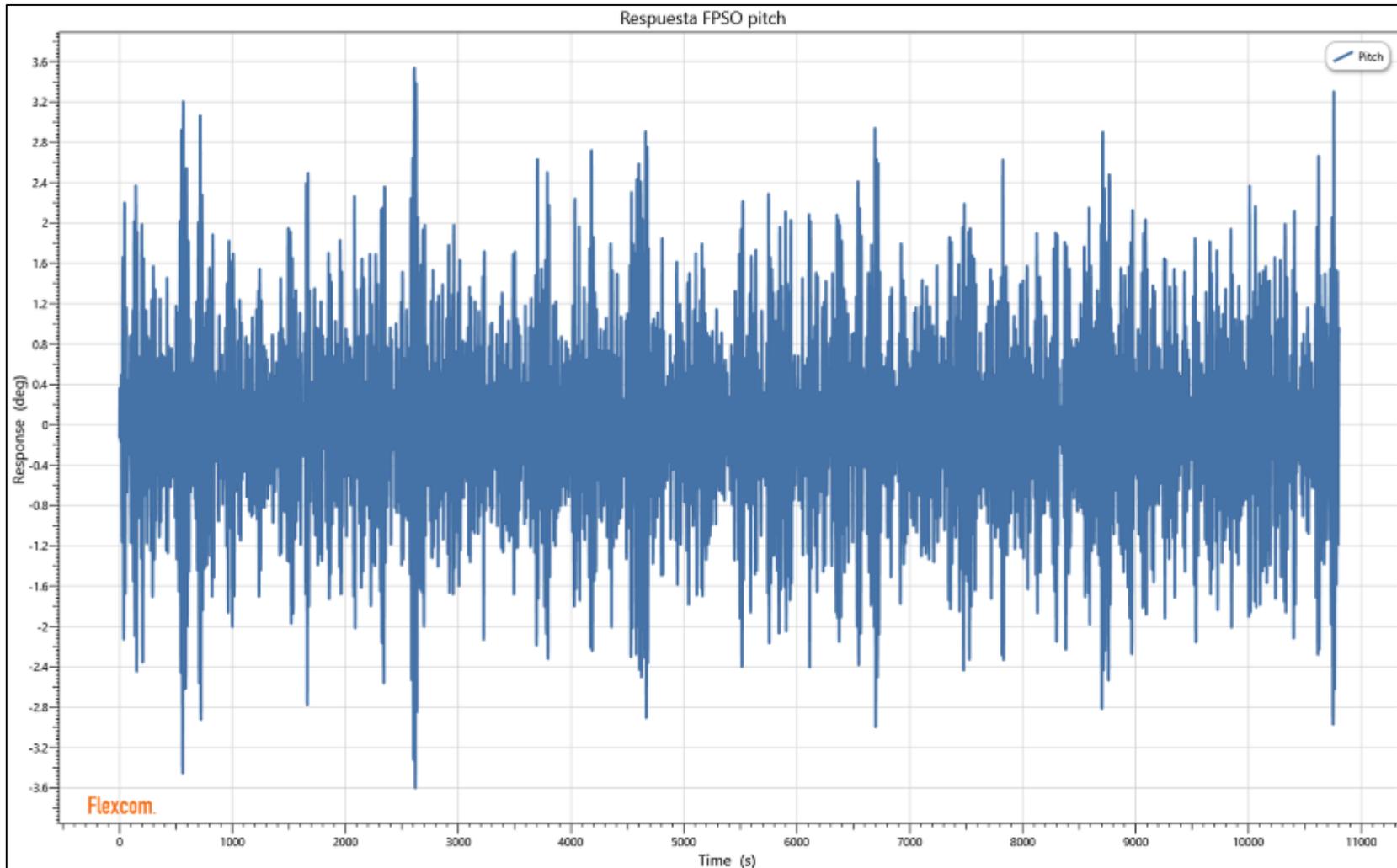


Figura 46 Serie temporal de la respuesta FPSO *pitch*, caso 6
Tiempo s Vs Respuesta deg

VALORES MÁXIMOS MÁS PROBABLES MPM DISTRIBUCIÓN DE RAYLEIGH

Para obtener los valores máximos más probables MPM¹² partimos de las series temporales extraídas en las simulaciones para 3 horas de tormenta en las zonas donde los esfuerzos son más críticos;

NODO 125, Tensión Efectiva
NODO 241, Curvatura
NODO 241, Momento Flexionante

Ahora bien, sabemos que todos los puntos o valores siguen una distribución normal gaussiana donde los máximos individuales en las series temporales siguen una distribución de probabilidad de Rayleigh. La estimación de los valores máximos más probables MPM, se determinó a partir de la distribución de probabilidad de los valores individuales N con mayores valores que se presentaron en las series temporales extraídas, ver la ecuación (4-17).

$$x_{MPM} = \pm \sigma \left(2 \ln \frac{N}{p} \right)^{1/2} \quad (4-17)$$

donde

p probabilidad de excedencia
 σ desviación estándar de la serie temporal, para este caso la respuesta estructural tiene media diferente de cero μ , es decir, el valor extremo se convierte en:

$$v_{MPM} = \mu \pm x_{MPM} \quad (4-18)$$

El número máximo de valores individuales N se calcula a partir de:

$$N = n_{count} \frac{\text{duración de la tormenta}}{\text{duración de la serie temporal}} \quad (4-19)$$

donde

n_{count} número de máximos contados en la serie temporal

¹² Ver la siguiente referencia para más detalles y/o dudas:

<https://www.orcina.com/webhelp/OrcaFlex/Content/html/Extremevaluestatisticstheory.htm###targetText=Extreme%20value%20statistics%20theory,moments%20of%20all%20the%20data>.

Finalmente, la distribución de excedencia de los valores máximos más probables MPM, está determinada por la siguiente expresión, ecuación (4-20):

$$P(X > x_{MPM}) = 1 - (F(x_{MPM}))^{N_{um}} \quad (4-20)$$

donde

- x_{MPM} valores máximos más probables MPM
- F distribución cumulativa de los valores máximos individuales en la serie temporal obtenida de la simulación en FLEXCOM®
- N_{um} Número total de valores máximos individuales

Para la revisión del cable umbilical propuesto haciendo uso de la relación de interacción del criterio de diseño por carga combinada DNV (2018) así como para el análisis de confiabilidad se usaron siempre los valores máximos más probables MPM.

4.7. REVISIÓN POR CRITERIO DE DISEÑO DE CARGA COMBINADA WSD, ULS

Para determinar si el cable propuesto resiste las condiciones esperadas para el ULS se usó la relación de interacción ecuación (3-1) que determinan la resistencia individual de cada componente estructural del cable umbilical, ahora bien, debido a que los valores de esfuerzos MPM son para el modelo global (es decir para toda la sección), debemos distribuir las cargas máximas más probables de momento flexionante y tensión efectiva en los diferentes componentes estructurales del umbilical que le aportan la resistencia. La distribución de estos esfuerzos globales máximos MPM hacia los elementos individuales se hizo de una manera sencilla y lógica siguiendo los principios fundamentales de la mecánica de materiales y la física.

4.7.1. FUERZAS ACTUANTES

MOMENTO FLEXIONANTE MÁXIMO MÁS PROBABLE MPM

Para distribuir el momento máximo más probable de forma individual en los 26 elementos se utiliza la expresión que relaciona la curvatura con el momento flexionante ecuación (4-21) y considerando que la curvatura global máxima es la misma para todos los elementos es posible obtener el valor de momento máximo asociado a cada elemento.

$$k = \frac{1}{\rho} = \frac{M}{E I} ; M_{max} = E I k_{max} \quad (4-21)$$

Haciendo uso de la ecuación (4-13) y sustituyendo en la ecuación (4-21) obtenemos la **Tabla 4** que considera la distribución del momento global máximo en cada uno de los tubos de acero que componen el cable umbilical:

$$M_{max} = (E A_t R^2 \cos^2 \theta) k_{max} \quad (4-22)$$

Recordemos que los valores presentados en la **Tabla 4** son para el nodo 241.

Tabla 4 Cálculo de los momentos máximos para las 26 tuberías del cable umbilical, caso 6 nodo 241

Módulo de Elasticidad	Tubo de acero	Área	Radio	Cos(θ) ²	E Ip	Curvatura máxima	Momento Máximo
N/m ²	No	m ²	m		N-m ²	1/m	N-m
2.00E+11	1	2.48E-04	0.01413	0.23503	2,326.81	0.03100	72.13
2.00E+11	2	2.48E-04	0.01413	1.00000	9,899.97	0.03100	306.90
2.00E+11	3	2.48E-04	0.01413	0.25000	2,475.03	0.03100	76.73
2.00E+11	4	2.48E-04	0.01413	1.00000	9,899.97	0.03100	306.90
2.00E+11	5	5.91E-05	0.01413	0.88302	2,082.40	0.03100	64.55
2.00E+11	6	5.91E-05	0.01413	0.62095	1,464.38	0.03100	45.40
2.00E+11	7	5.91E-05	0.01413	0.01485	35.02	0.03100	1.09
2.00E+11	8	5.91E-05	0.01413	0.03641	85.87	0.03100	2.66
2.00E+11	9	5.91E-05	0.01413	0.56960	1,343.27	0.03100	41.64
2.00E+11	10	5.91E-05	0.01413	0.84734	1,998.26	0.03100	61.95
2.00E+11	11	5.91E-05	0.01413	0.83456	1,968.13	0.03100	61.01
2.00E+11	12	5.91E-05	0.01413	0.55226	1,302.39	0.03100	40.37
2.00E+11	13	5.91E-05	0.01413	0.03015	71.11	0.03100	2.20
2.00E+11	14	5.91E-05	0.01413	0.01485	35.03	0.03100	1.09
2.00E+11	15	5.91E-05	0.01413	0.63782	1,504.16	0.03100	46.63
2.00E+11	16	5.91E-05	0.01413	0.89401	2,108.32	0.03100	65.36
2.00E+11	17	5.91E-05	0.01413	1.00000	2,358.27	0.03100	73.11
2.00E+11	18	5.91E-05	0.01413	0.85966	2,027.32	0.03100	62.85
2.00E+11	19	5.91E-05	0.01413	0.23503	554.27	0.03100	17.18
2.00E+11	20	5.91E-05	0.01413	0.02448	57.72	0.03100	1.79
2.00E+11	21	5.91E-05	0.01413	0.60397	1,424.32	0.03100	44.15
2.00E+11	22	5.91E-05	0.01413	1.00000	2,358.27	0.03100	73.11
2.00E+11	23	5.91E-05	0.01413	0.58682	1,383.89	0.03100	42.90
2.00E+11	24	5.91E-05	0.01413	0.01937	45.68	0.03100	1.42
2.00E+11	25	5.91E-05	0.01413	0.25000	589.58	0.03100	18.28
2.00E+11	26	5.91E-05	0.01413	0.87158	2,055.42	0.03100	63.72

TENSIÓN EFECTIVA MÁXIMA MÁS PROBABLE MPM

Para entender cómo se distribuye la tensión efectiva máxima más probable analizamos la zona donde se interconecta el cable umbilical con el FPSO en la superficie del mar, esto se logra a través de un dispositivo llamado *hang-off* ver la **Figura 47**. Las ecuaciones de equilibrio muestran que la suma de las tensiones debe ser iguales;

$$T_1 + T_2 = T_{max} \quad (4-23)$$

La geometría del problema muestra que las deformaciones δ_1 y δ_2 de los diferentes tubos deben también ser iguales, por lo tanto;

$$\delta_1 = \frac{T_1 L}{A_1 E_1}; \delta_2 = \frac{T_2 L}{A_2 E_2} \quad (4-24)$$

$$\frac{T_1}{A_1 E_1} = \frac{T_2}{A_2 E_2} \quad (4-25)$$

Resolviendo simultáneamente y recordando que para el caso del umbilical las tuberías son de acero y por tanto el módulo de Young es el mismo obtenemos;

$$T_1 = \frac{A_1 E_1 T_{max}}{A_1 E_1 + A_2 E_2} ; T_2 = \frac{A_2 E_2 T_{max}}{A_1 E_1 + A_2 E_2} \quad (4-26)$$

$$T_1 = \frac{A_1 T_{max}}{A_1 + A_2} ; T_2 = \frac{A_2 T_{max}}{A_1 + A_2} \quad (4-27)$$

La ecuación (4-23) puede ser aplicada a cualquier número de elementos y de igual forma se puede demostrar que se llega a la ecuación (4-27). La ecuación (4-27) nos dice que la tensión efectiva se distribuye como el porcentaje de área parcial de cada elemento sobre el área total de acero multiplicada por la tensión efectiva total máxima que se le aplica al elemento en toda la sección del cable umbilical. Sustituyendo los valores de área individual para las dos diferentes secciones de los tubos de acero y el área total del acero en la ecuación (4-27), obtenemos la tensión máxima de cada elemento para el caso 6 en el nodo 125:

PARA UN TUBO DE ACERO DE MAYOR DIÁMETRO

$$T_1 = \frac{A_1 T_{max}}{A_1 + A_2} = \frac{2.48 \text{ cm}^2 \times 301.47 \text{ kN}}{22.93 \text{ cm}^2} = 32.6 [\text{kN}] \quad (4-28)$$

PARA UN TUBO DE ACERO DE MENOR DIÁMETRO

$$T_1 = \frac{A_2 T_{max}}{A_1 + A_2} = \frac{0.591 \text{ cm}^2 \times 301.47 \text{ kN}}{22.93 \text{ cm}^2} = 7.7 [\text{kN}] \quad (4-29)$$

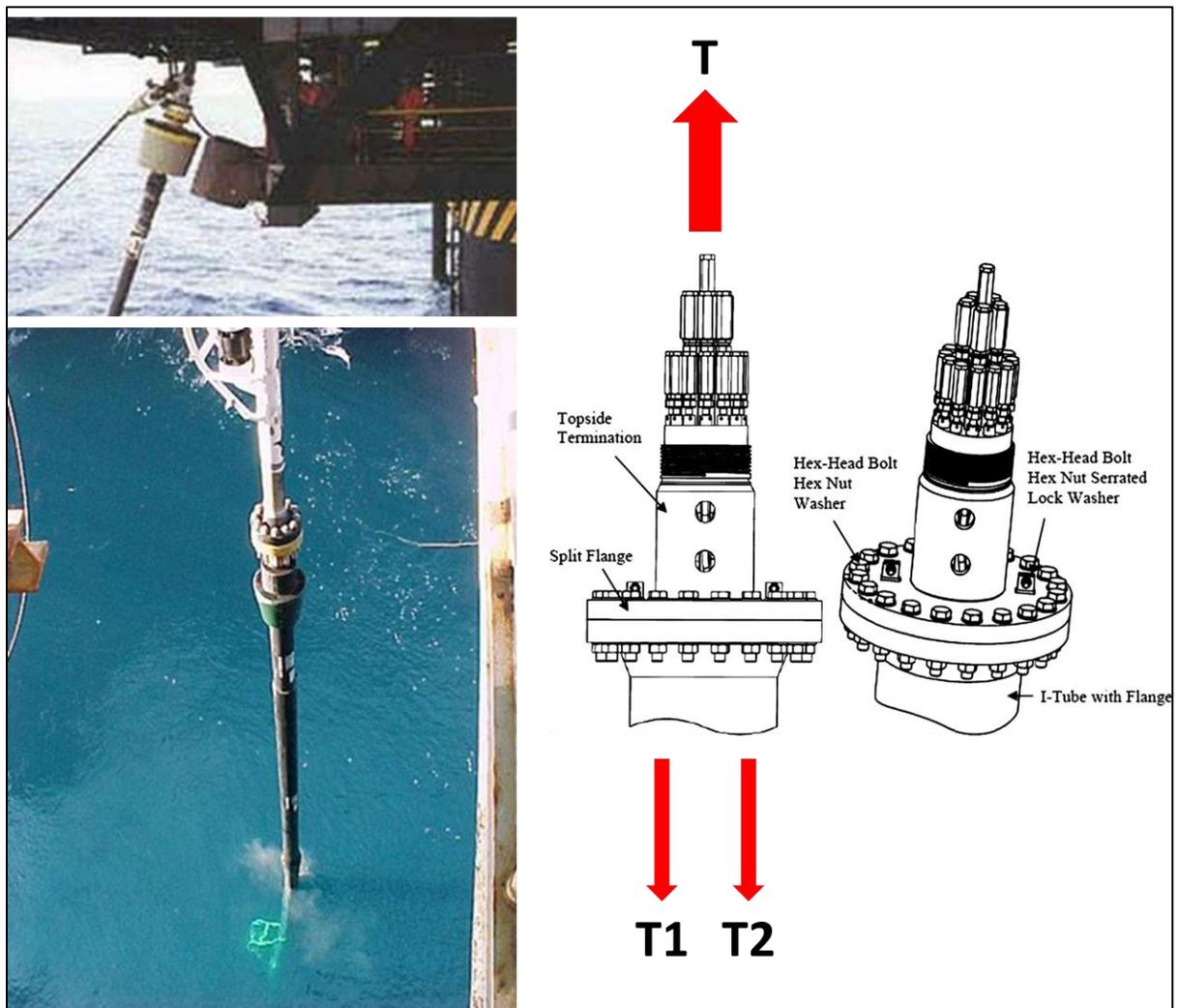


Figura 47 Apoyo en la superficie del umbilical "hang-off device". Fuente: elaboración propia

PRESIÓN EXTERNA

La presión externa del mar en el nodo 241 es de 5.5 mPa y en el nodo 125 es de 8.8 mPa. La presión externa del mar sólo es función de la profundidad y es la misma en todas direcciones, por lo tanto, la fuerza total ejercida sobre cada uno de los tubos de acero es también igual.

4.7.2. FUERZAS RESISTENTES

La resistencia individual de los tubos de acero se determinó haciendo uso de las siguientes ecuaciones obtenida de la norma DVN (2018):

RESISTENCIA AL MOMENTO Y A LA TENSIÓN EFECTIVA PARA UN TUBO DE ACERO DE MAYOR DIÁMETRO

Diámetro externo, mayores dimensiones	31.00 mm
Diámetro interno, mayores dimensiones	25.40 mm

$$M_k = f_y(0.96)\alpha_c (D - t)^2 t = 1,151.74 [N - m] \quad (4-30)$$

$$T_k = f_y(0.96)\alpha_c \pi (D - t) t = 128.31 [kN] \quad (4-31)$$

RESISTENCIA A LA PRESIÓN EXTERNA

$p_c(t)$ presión de colapso

$$(p_c(t) - p_{el}(t))(p_c^2(t) - p_p^2(t)) = p_c(t) p_{el}(t) p_p(t) f_0 \frac{D}{t} \quad (4-32)$$

$p_{el}(t)$ presión de colapso elástico

$$p_{el}(t) = \frac{2 E \left[\frac{t}{D}\right]^3}{1 - \nu^2} = \frac{2 \times 2 \times 10^{11} \frac{N}{m^2} \left[\frac{2.8}{31}\right]^3}{1 - 0.3^2} = 323.90 [mPa] \quad (4-33)$$

$p_p(t)$ presión de colapso plástico

$$p_p(t) = 2 \frac{t}{D} f_y \alpha_{fab} = 2 \times \frac{2.8}{31} \times 449[mPa] \times 1 = 81.11 [mPa] \quad (4-34)$$

α_{fab} factor de reducción del proceso de fabricación igual a 1.0

f_o relación de ovalidad, no se considera en este trabajo debido a falta de información

Resolviendo la ecuación (4-32), obtenemos:

$$p_c(t) = 81.11 \text{ [mPa]} \quad (4-35)$$

PARA UN TUBO DE ACERO DE MENOR DIÁMETRO

Diámetro externo, menores dimensiones	15.38 mm
Diámetro interno, menores dimensiones	12.70 mm

RESISTENCIA AL MOMENTO Y A LA TENSIÓN EFECTIVA

$$M_k = f_y(0.96)\alpha_c (D - t_2)^2 t_2 = 136.63 [N - m] \quad (4-36)$$

$$T_k = f_y(0.96)\alpha_c \pi (D - t_2) t_2 = 30.57 [kN] \quad (4-37)$$

RESISTENCIA A LA PRESIÓN EXTERNA

$p_c(t)$ presión de colapso

$$(p_c(t) - p_{el}(t))(p_c^2(t) - p_p^2(t)) = p_c(t) p_{el}(t) p_p(t) f_0 \frac{D}{t} \quad (4-38)$$

donde

$p_{el}(t)$ presión de colapso elástico

$$p_{el}(t) = \frac{2 E \left[\frac{t}{D}\right]^3}{1 - \nu^2} = \frac{2 \times 2 \times 10^{11} \frac{N}{m^2} \left[\frac{1.34}{15.38}\right]^3}{1 - 0.3^2} = 290.71 [mPa] \quad (4-39)$$

donde

$p_p(t)$ presión de colapso plástico

$$p_p(t) = 2 \frac{t}{D} f_y \alpha_{fab} = 2 \times \frac{1.34}{15.38} \times 449[mPa] \times 1 = 78.24 [mPa] \quad (4-40)$$

α_{fab} factor de reducción del proceso de fabricación igual a 1.0

donde

f_o relación de ovalidad, no se considera en este trabajo debido a falta de información

Resolviendo la ecuación (4-38), obtenemos:

$$p_c(t) = 78.24 [mPa] \quad (4-41)$$

En el capítulo 4.6 se determinó que los valores MPM se presentaron en los siguientes nodos (ubicación) y para el siguiente caso:

Caso 6

Nodo 125 tensión efectiva

Nodo 125 presión externa

Nodo 241 momento flexionante

Nodo 241 curvatura

Nodo 241 presión externa

Ahora bien, para estas dos ubicaciones debemos analizar la relación de interacción ecuación (4-42) con sus respectivos valores de tensión efectiva, momento flexionante, curvatura y presión externa, en otras palabras, no podemos combinar los valores MPM del nodo 125 con los valores MPM del nodo 241 en la ecuación (4-42) pues esa combinación de fuerzas nunca se presenta. Los valores correspondientes son los siguientes (obtenidos de los análisis hidrodinámicos):

Caso 6

Nodo 125 tensión efectiva 301.47 kN

Nodo 125 momento flexionante 0.12 N-m

Nodo 125 curvatura 0.0 m⁻¹

Nodo 125 presión externa 8.8 mPa

Nodo 241 tensión efectiva 19.72 kN

Nodo 241 momento flexionante 918.78 N-m

Nodo 241 curvatura 0.031 m⁻¹

Nodo 241 presión externa 5.5 mPa

Una vez definidas las fuerzas máximas más probables MPM actuantes y las fuerzas resistentes, se sustituyeron los valores en la relación de interacción ecuación (4-42) para cada uno de los tubos y se analizó la desigualdad de forma individual con los datos correspondientes de cada nodo.

$$\left[\left[\frac{|M|}{M_k} \right] + \left[\frac{T_e}{T_k} \right]^2 \right]^2 + \left[\frac{p_e}{p_c(t)} \right]^2 \leq 1.0 \quad (4-42)$$

La distribución del momento flexionante y de la tensión efectiva se realizó haciendo uso de la ecuación (4-22) y de la ecuación (4-27) respectivamente.

Caso 6 nodo 125

Los resultados para los 26 tubos de acero se muestran en la **Tabla 5**, la columna 12 indica que todos los tubos satisfacen la relación de interacción.

Tabla 5 Revisión por criterio de cargas combinadas, Caso 6 nodo 125, Método WSD

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Tubo de acero	k	M	Mk	M/Mk	T	Tk	(T/Tk)^2	Pe	Pcolapso	(Pe/Pcolapso)^2	WSD
No	1/m	N-m	N-m		N	N		mPa	mPa		
1	0.0000	0.00	1,151.74	0.0000	32,624.40	128,308.92	0.0647	8.80	81.11	0.011771	0.01595
2	0.0000	0.00	1,151.74	0.0000	32,624.40	128,308.92	0.0647	8.80	81.11	0.011771	0.01595
3	0.0000	0.00	1,151.74	0.0000	32,624.40	128,308.92	0.0647	8.80	81.11	0.011771	0.01595
4	0.0000	0.00	1,151.74	0.0000	32,624.40	128,308.92	0.0647	8.80	81.11	0.011771	0.01595
5	0.0000	0.00	136.63	0.0000	7,771.47	30,571.84	0.0646	8.80	78.24	0.012650	0.01683
6	0.0000	0.00	136.63	0.0000	7,771.47	30,571.84	0.0646	8.80	78.24	0.012650	0.01683
7	0.0000	0.00	136.63	0.0000	7,771.47	30,571.84	0.0646	8.80	78.24	0.012650	0.01683
8	0.0000	0.00	136.63	0.0000	7,771.47	30,571.84	0.0646	8.80	78.24	0.012650	0.01683
9	0.0000	0.00	136.63	0.0000	7,771.47	30,571.84	0.0646	8.80	78.24	0.012650	0.01683
10	0.0000	0.00	136.63	0.0000	7,771.47	30,571.84	0.0646	8.80	78.24	0.012650	0.01683
11	0.0000	0.00	136.63	0.0000	7,771.47	30,571.84	0.0646	8.80	78.24	0.012650	0.01683
12	0.0000	0.00	136.63	0.0000	7,771.47	30,571.84	0.0646	8.80	78.24	0.012650	0.01683
13	0.0000	0.00	136.63	0.0000	7,771.47	30,571.84	0.0646	8.80	78.24	0.012650	0.01683
14	0.0000	0.00	136.63	0.0000	7,771.47	30,571.84	0.0646	8.80	78.24	0.012650	0.01683
15	0.0000	0.00	136.63	0.0000	7,771.47	30,571.84	0.0646	8.80	78.24	0.012650	0.01683
16	0.0000	0.00	136.63	0.0000	7,771.47	30,571.84	0.0646	8.80	78.24	0.012650	0.01683
17	0.0000	0.00	136.63	0.0000	7,771.47	30,571.84	0.0646	8.80	78.24	0.012650	0.01683
18	0.0000	0.00	136.63	0.0000	7,771.47	30,571.84	0.0646	8.80	78.24	0.012650	0.01683
19	0.0000	0.00	136.63	0.0000	7,771.47	30,571.84	0.0646	8.80	78.24	0.012650	0.01683
20	0.0000	0.00	136.63	0.0000	7,771.47	30,571.84	0.0646	8.80	78.24	0.012650	0.01683
21	0.0000	0.00	136.63	0.0000	7,771.47	30,571.84	0.0646	8.80	78.24	0.012650	0.01683
22	0.0000	0.00	136.63	0.0000	7,771.47	30,571.84	0.0646	8.80	78.24	0.012650	0.01683
23	0.0000	0.00	136.63	0.0000	7,771.47	30,571.84	0.0646	8.80	78.24	0.012650	0.01683
24	0.0000	0.00	136.63	0.0000	7,771.47	30,571.84	0.0646	8.80	78.24	0.012650	0.01683
25	0.0000	0.00	136.63	0.0000	7,771.47	30,571.84	0.0646	8.80	78.24	0.012650	0.01683
26	0.0000	0.00	136.63	0.0000	7,771.47	30,571.84	0.0646	8.80	78.24	0.012650	0.01683

Caso 6 nodo 241

Los resultados para los 26 tubos de acero se muestran en la **Tabla 6**, la columna 12 indica que todos los tubos satisfacen la relación de interacción, sin embargo, los tubos 17 y 22 ver **Figura 29**, son los que presentan los mayores valores.

Tabla 6 Revisión por criterio de cargas combinadas, Caso 6 nodo 241, Método WSD

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Tubo de acero	k	M	Mk	M/Mk	T	Tk	(T/Tk)^2	Pe	Pcolapso	(Pe/Pcolapso)^2	WSD
No	1/m	N-m	N-m		N	N		mPa	mPa		
1	0.0310	72.13	1,151.74	0.0626	2,134.05	128,308.92	0.0003	5.50	81.11	0.004598	0.00856
2	0.0310	306.90	1,151.74	0.2665	2,134.05	128,308.92	0.0003	5.50	81.11	0.004598	0.07575
3	0.0310	76.73	1,151.74	0.0666	2,134.05	128,308.92	0.0003	5.50	81.11	0.004598	0.00907
4	0.0310	306.90	1,151.74	0.2665	2,134.05	128,308.92	0.0003	5.50	81.11	0.004598	0.07575
5	0.0310	64.55	136.63	0.4725	508.35	30,571.84	0.0003	5.50	78.24	0.004942	0.22844
6	0.0310	45.40	136.63	0.3323	508.35	30,571.84	0.0003	5.50	78.24	0.004942	0.11552
7	0.0310	1.09	136.63	0.0079	508.35	30,571.84	0.0003	5.50	78.24	0.004942	0.00501
8	0.0310	2.66	136.63	0.0195	508.35	30,571.84	0.0003	5.50	78.24	0.004942	0.00533
9	0.0310	41.64	136.63	0.3048	508.35	30,571.84	0.0003	5.50	78.24	0.004942	0.09800
10	0.0310	61.95	136.63	0.4534	508.35	30,571.84	0.0003	5.50	78.24	0.004942	0.21076
11	0.0310	61.01	136.63	0.4466	508.35	30,571.84	0.0003	5.50	78.24	0.004942	0.20460
12	0.0310	40.37	136.63	0.2955	508.35	30,571.84	0.0003	5.50	78.24	0.004942	0.09243
13	0.0310	2.20	136.63	0.0161	508.35	30,571.84	0.0003	5.50	78.24	0.004942	0.00521
14	0.0310	1.09	136.63	0.0079	508.35	30,571.84	0.0003	5.50	78.24	0.004942	0.00501
15	0.0310	46.63	136.63	0.3413	508.35	30,571.84	0.0003	5.50	78.24	0.004942	0.12161
16	0.0310	65.36	136.63	0.4784	508.35	30,571.84	0.0003	5.50	78.24	0.004942	0.23404
17	0.0310	73.11	136.63	0.5351	508.35	30,571.84	0.0003	5.50	78.24	0.004942	0.29155
18	0.0310	62.85	136.63	0.4600	508.35	30,571.84	0.0003	5.50	78.24	0.004942	0.21679
19	0.0310	17.18	136.63	0.1258	508.35	30,571.84	0.0003	5.50	78.24	0.004942	0.02083
20	0.0310	1.79	136.63	0.0131	508.35	30,571.84	0.0003	5.50	78.24	0.004942	0.00512
21	0.0310	44.15	136.63	0.3232	508.35	30,571.84	0.0003	5.50	78.24	0.004942	0.10956
22	0.0310	73.11	136.63	0.5351	508.35	30,571.84	0.0003	5.50	78.24	0.004942	0.29155
23	0.0310	42.90	136.63	0.3140	508.35	30,571.84	0.0003	5.50	78.24	0.004942	0.10371
24	0.0310	1.42	136.63	0.0104	508.35	30,571.84	0.0003	5.50	78.24	0.004942	0.00505
25	0.0310	18.28	136.63	0.1338	508.35	30,571.84	0.0003	5.50	78.24	0.004942	0.02291
26	0.0310	63.72	136.63	0.4664	508.35	30,571.84	0.0003	5.50	78.24	0.004942	0.22269

Análizando los resultados de la **Tabla 5** y la **Tabla 6** podemos concluir que la **zona más crítica del cable umbilical es en el nodo 241.**

4.8. ANÁLISIS DE TRASLACIONES

En la práctica, los FPSO se desplazan horizontalmente debido al empuje del viento que actúa sobre las áreas laterales y frontales del buque, esto genera traslaciones y por tanto esfuerzos adicionales al umbilical. Para el diseño se emplea el criterio de estos desplazamientos como función de la profundidad en ambas direcciones; *near* (distancia horizontal cercana al punto de anclaje) y *far* (distancia horizontal lejana al punto de anclaje) ver la **Figura 48**. Sin embargo, como en este trabajo se planteó un cable umbilical ya diseñado (Agbami) para revisar la confiabilidad se analizó el *offset* máximo permisible para el caso más crítico (Caso 6). Los resultados del análisis nos indican que las distancias máximas que pueden ser soportadas por el cable umbilical Agbami son:

CASO 6

<i>NEAR</i>	150 m	representa el 10% de la profundidad
<i>FAR</i>	150 m	representa el 10% de la profundidad

Estas traslaciones *offset* propuestas están justificadas ya que se encuentran en el rango de criterio establecido por la norma API (1995) en la que se recomienda un desplazamiento horizontal "máximo" de entre el 10% y 15% de la profundidad del agua, que para este caso es de 1,500 m referidos al NBM. Los valores MPM simulando estas traslaciones en el modelo global; tensión efectiva, curvatura y momento flexionante en el nodo 241, se presentan en la **Tabla 7, Tabla 8 y Tabla 9**.

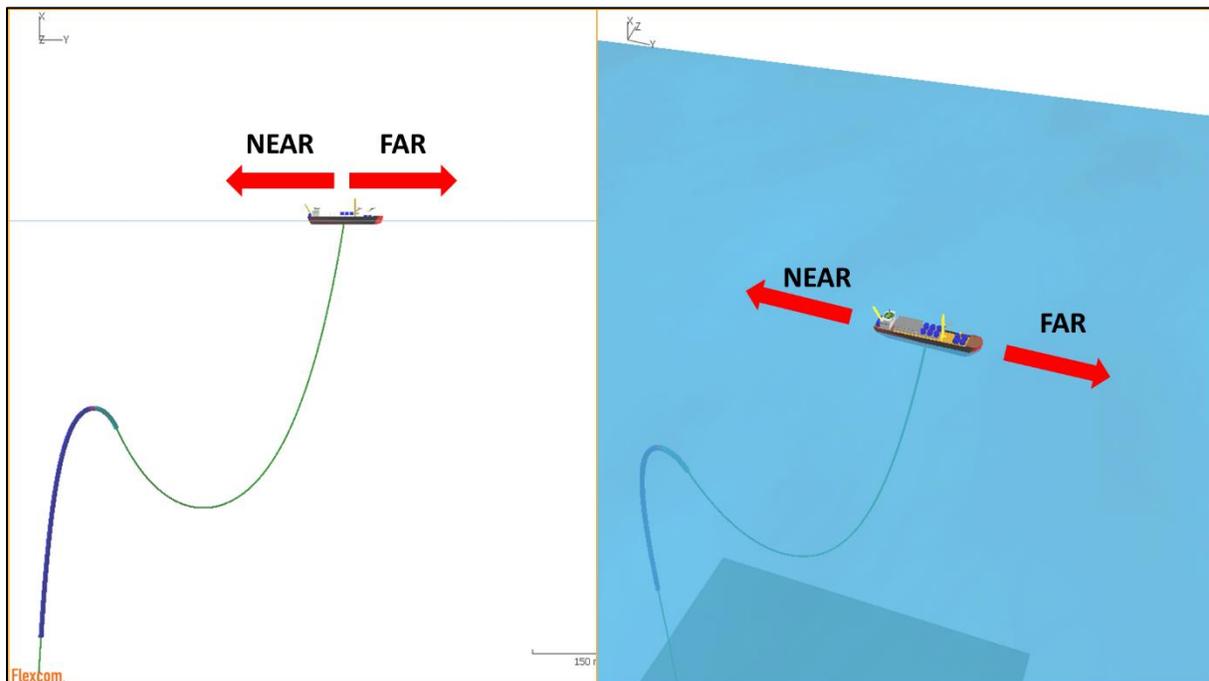


Figura 48 Traslaciones *near* y *far*

Tabla 7 Valores MPM tensión efectiva caso 6, near 10% y far 10%, nodo 241

Hs [m]	Tp [seg]	Valor MPM Posición Inicial [N]	Valor MPM traslación FAR [N]	Valor MPM traslación NEAR [N]
9.18	14.32	19,723.33	28,924.67	13,180.68

Tabla 8 Valores MPM curvatura caso 6, near 10% y far 10%, nodo 241

Hs [m]	Tp [seg]	Valor MPM Posición Inicial [1/m]	Valor MPM traslación FAR [1/m]	Valor MPM traslación NEAR [1/m]
9.18	14.32	0.0310	0.0220	0.0450

Tabla 9 Valores MPM momento flexionante caso 6, near 10% y far 10%, nodo 241

Hs [m]	Tp [seg]	Valor MPM Posición Inicial [N-m]	Valor MPM traslación FAR [N-m]	Valor MPM traslación NEAR [N-m]
9.18	14.32	918.78	651.06	1,352.28

Se analizó nuevamente la relación de interacción ecuación (4-42) con los valores MPM de las traslaciones (misma metodología y consideraciones aplicadas en la **Tabla 6**). Los resultados son:

CASO 6 nodo 241

NEAR **0.60844** valor más crítico

FAR **0.14959** valor más crítico

Podemos concluir de este análisis *offset* que para la traslación *near* la curvatura y el momento flexionante aumentan bastante contrario a la tensión efectiva que disminuye compradas con la posición inicial del barco. En la traslación *far* ocurre lo inverso la curvatura y el momento flexionante disminuyen y la tensión efectiva aumenta.

Los valores MPM obtenidos para el análisis *offset* del 10% en direcciones *near* se determinaron a partir de las series temporales mostradas en la **Figura 49**, **Figura 50** y **Figura 51**, mientras que para la dirección *far* se determinaron a partir de las series temporales mostradas en la **Figura 55**, **Figura 56** y **Figura 57**.

Las características principales de las series temporales extraídas son:

El valor MPM de la **Figura 49 Serie Temporal de la Tensión Efectiva, Caso 6 NEAR 10%, Nodo 241** ocurre en el segundo 10,743, el valor medio es de 12,572 N y la desviación estándar es de 102.52 N.

Para la **Figura 50 Serie Temporal de la Curvatura, Caso 6 NEAR 10%, Nodo 241** el valor MPM ocurre en el segundo 6,014, el valor medio es de 0.0440 m^{-1} y la desviación estándar es de cero.

En la **Figura 51 Serie Temporal del Momento Flexionante NEAR 10%, Caso 6, Nodo 241** en valor MPM ocurre en el segundo 6,014, el valor medio es de 1,332 N-m y la desviación estándar es de 4.36 N-m.

La **Figura 55 Serie Temporal de la Tensión Efectiva, Caso 6 FAR 10%, Nodo 241** el valor MPM ocurre en el segundo 10,771, el valor medio es de 26,852 N y la desviación estándar es de 336.16 N.

En la **Figura 56 Serie Temporal de la Curvatura, Caso 6 FAR 10%, Nodo 241** el valor MPM ocurre en el segundo 10,779, el valor medio es de 0.0210 m^{-1} y la desviación estándar es de cero.

Para la **Figura 57 Serie Temporal del Momento Flexionante FAR 10%, Caso 6, Nodo 241** el valor MPM ocurre en el segundo 10,779, el valor medio es de 630 N-m y la desviación estándar es de 4.13 N-m.

Finalmente, la **Figura 52 Serie Temporal de la Elevación de la superficie del agua, Caso 6 NEAR 10%**, **Figura 53 Serie Temporal de la Respuesta FPSO heave, Caso 6 NEAR 10%** y la **Figura 54 Serie Temporal de la Respuesta FPSO pitch, Caso 6 NEAR 10%** presentan los resultados de las respectivas variables a lo largo de las 3 horas de tormenta para el caso *near* de 10% y de igual forma la **Figura 58 Serie Temporal de la Elevación de la superficie del agua, Caso 6 FAR 10%**, **Figura 59 Serie Temporal de la Respuesta FPSO heave, Caso 6 FAR 10%** y la **Figura 60 Serie Temporal de la Respuesta FPSO pitch, Caso 6 FAR 10%** lo hacen para el caso *far* de 10%.

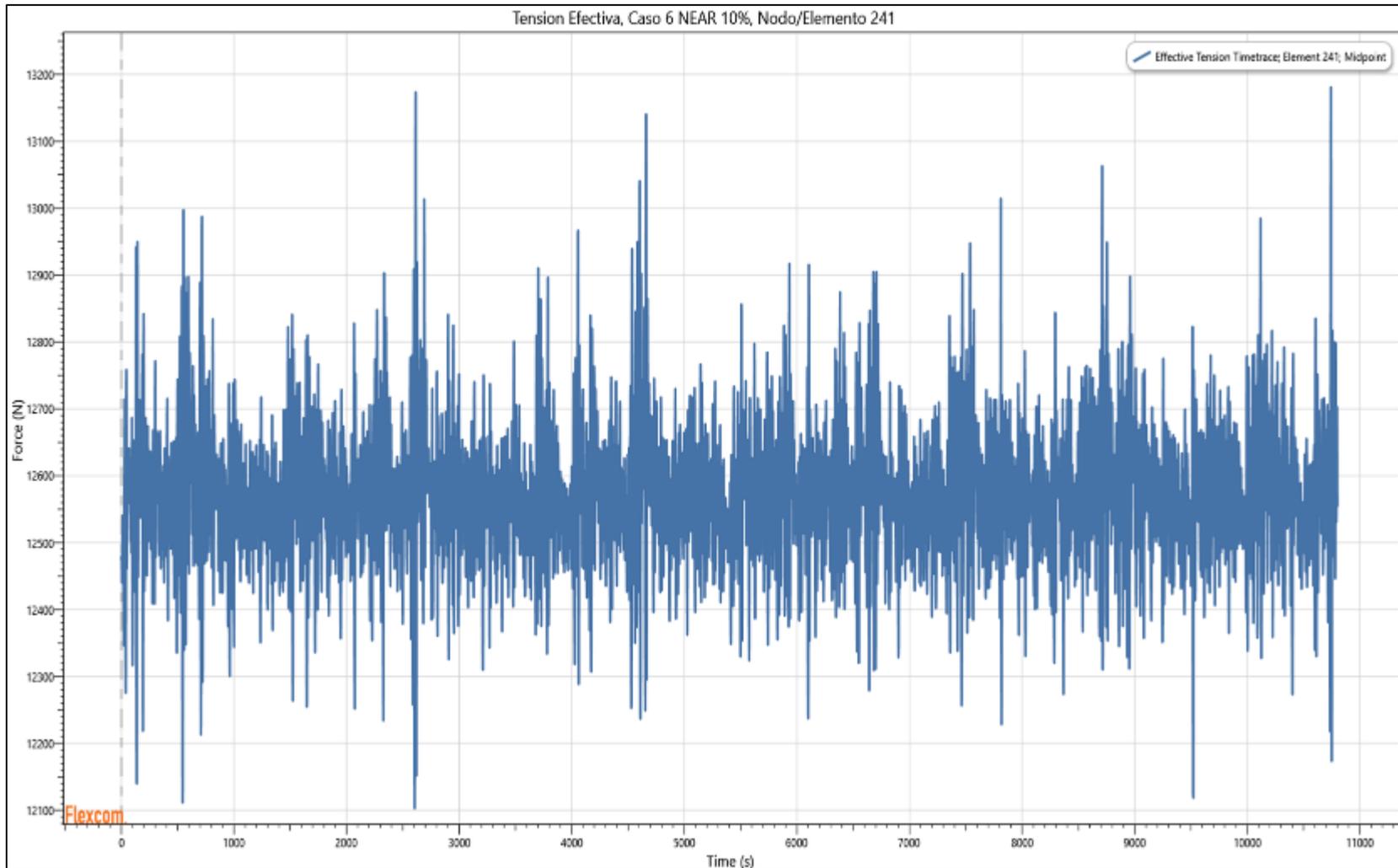


Figura 49 Serie Temporal de la Tensión Efectiva, Caso 6 NEAR 10%, Nodo 241
Tiempo s Vs Tensión efectiva N

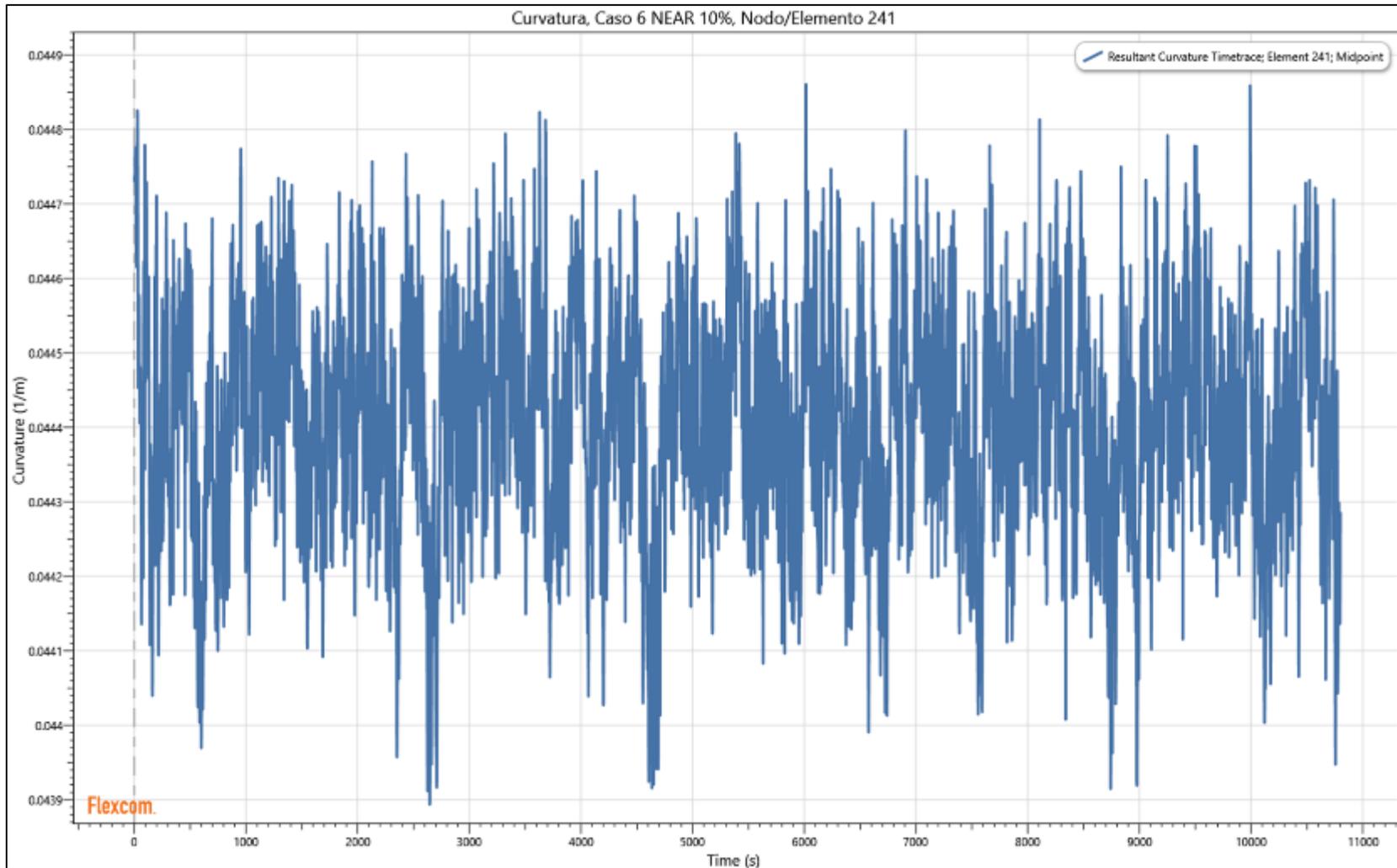


Figura 50 Serie Temporal de la Curvatura, Caso 6 NEAR 10%, Nodo 241
Tiempo s Vs Curvatura 1/m

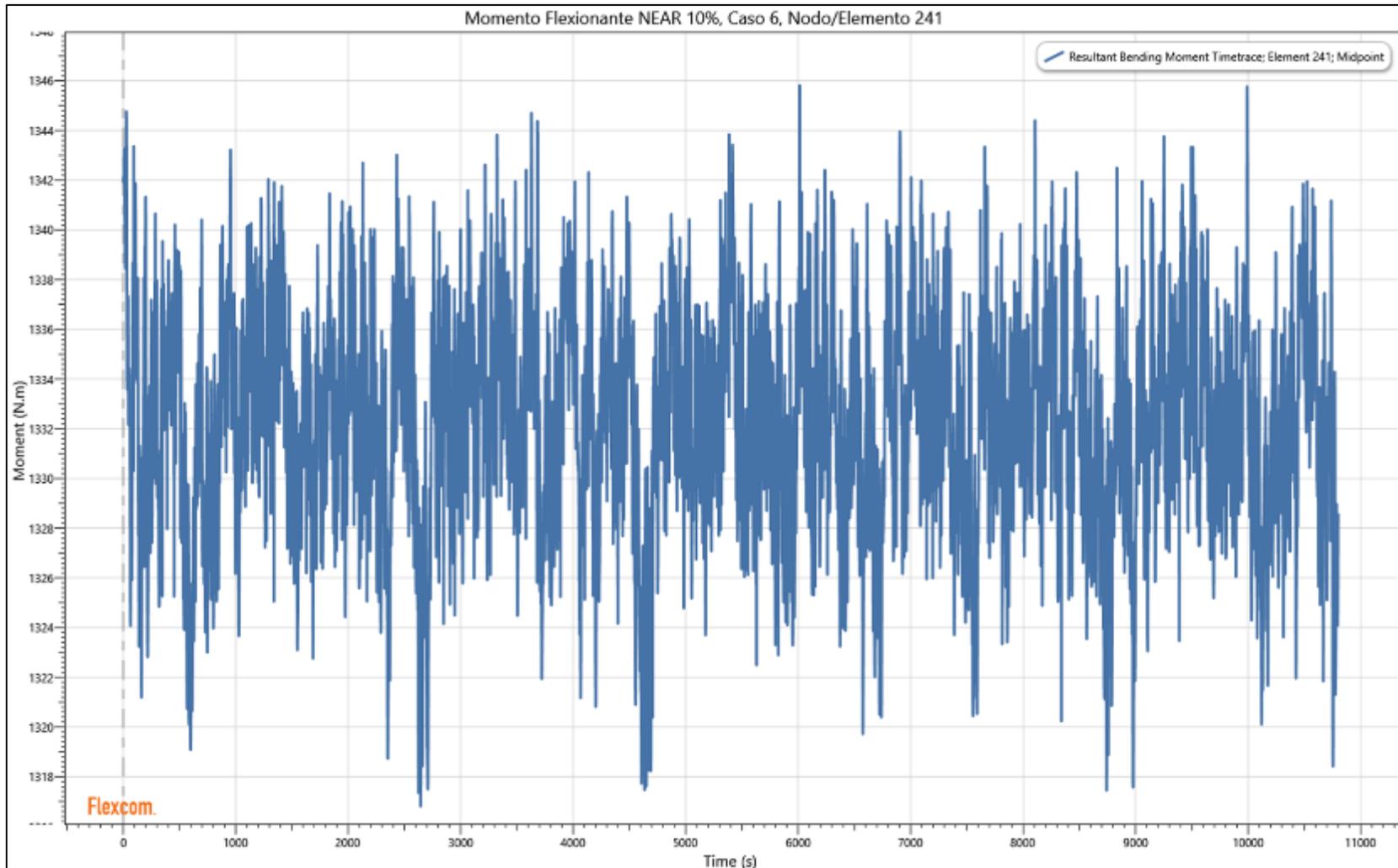


Figura 51 Serie Temporal del Momento Flexionante *NEAR 10%*, Caso 6, Nodo 241
Tiempo s Vs Momento flexionante N-m

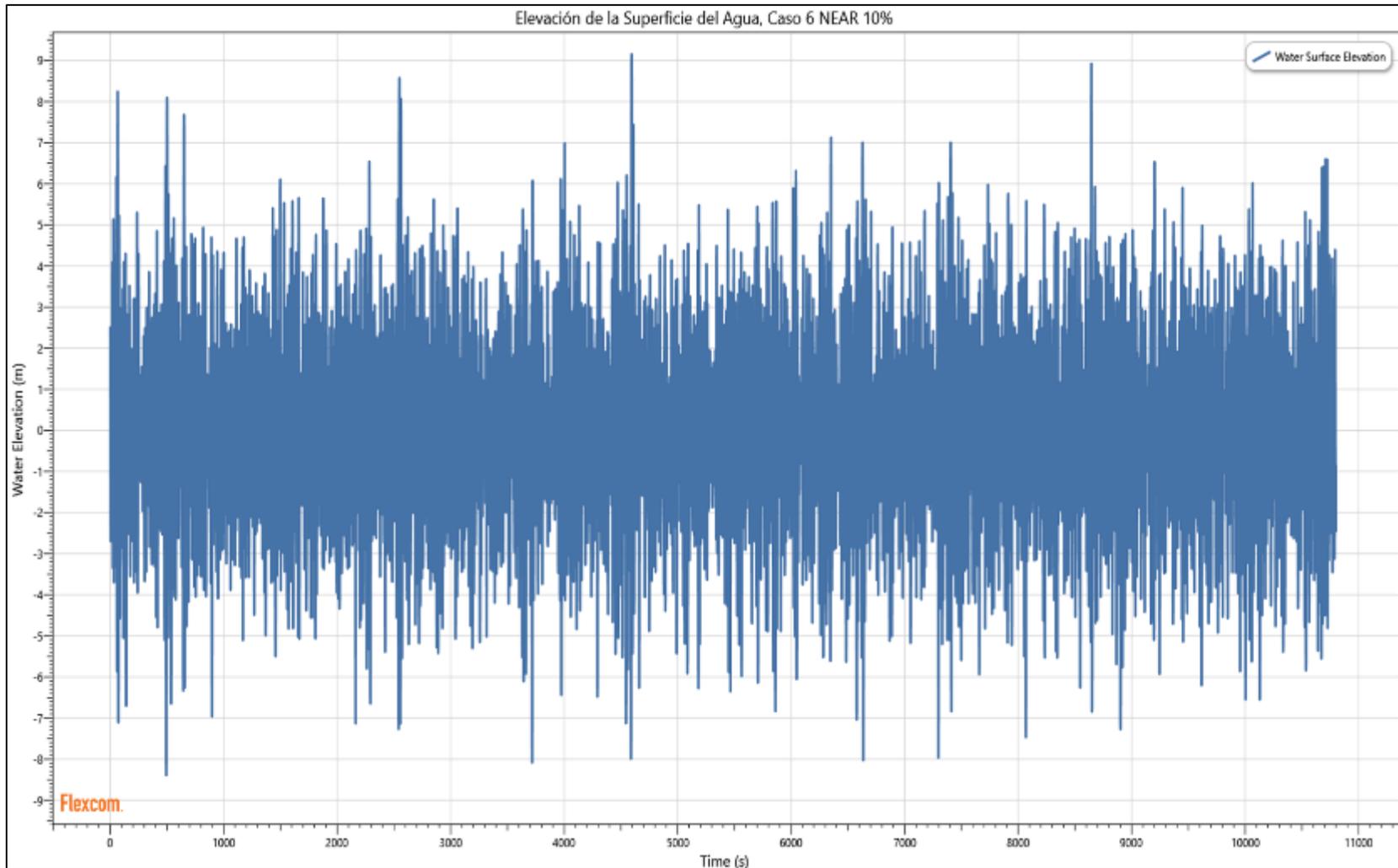


Figura 52 Serie Temporal de la Elevación de la superficie del agua, Caso 6 NEAR 10%
Tiempo s Vs Elevación de la superficie del agua m

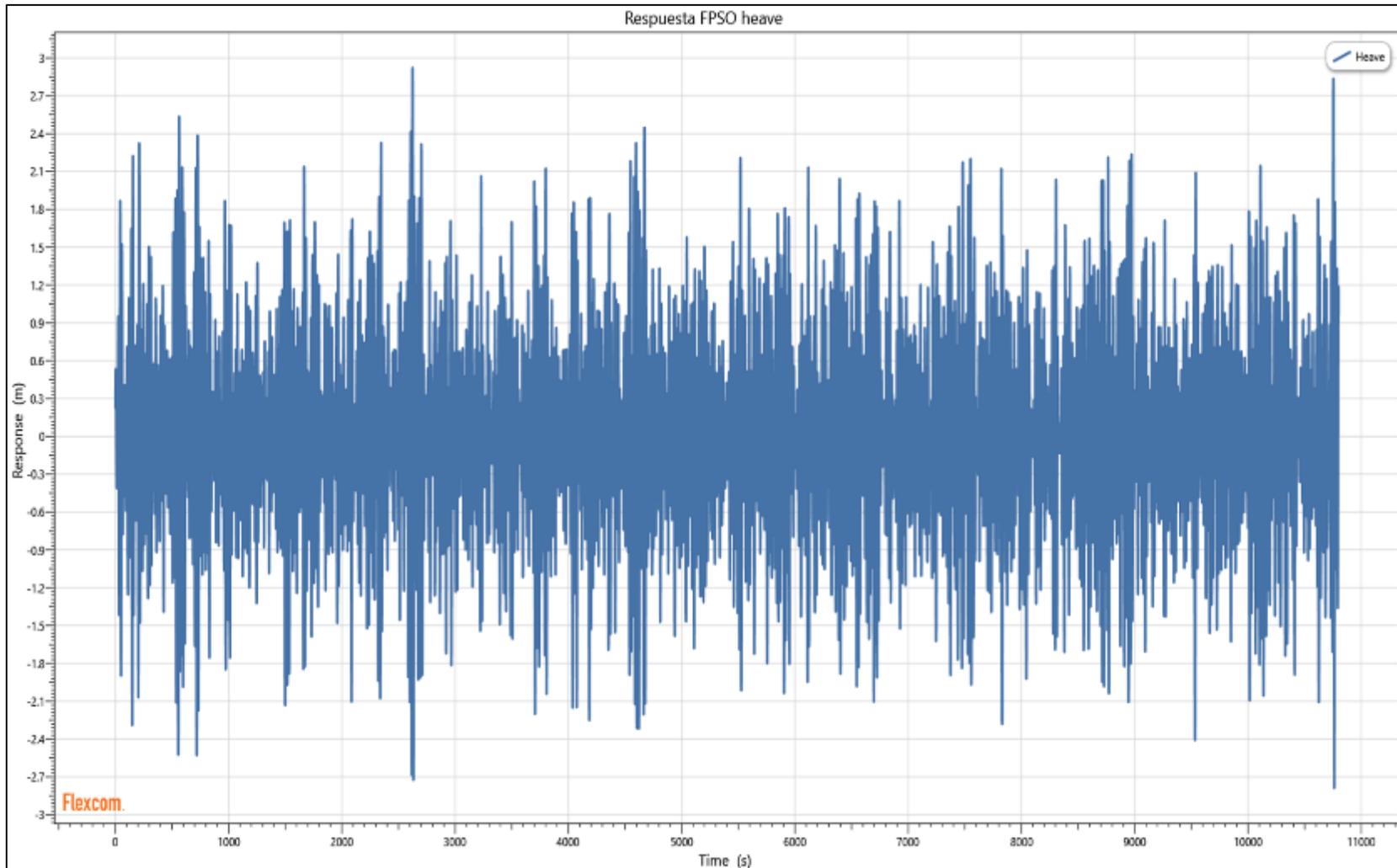


Figura 53 Serie Temporal de la Respuesta FPSO *heave*, Caso 6 NEAR 10%
Tiempo s Vs Respuesta m

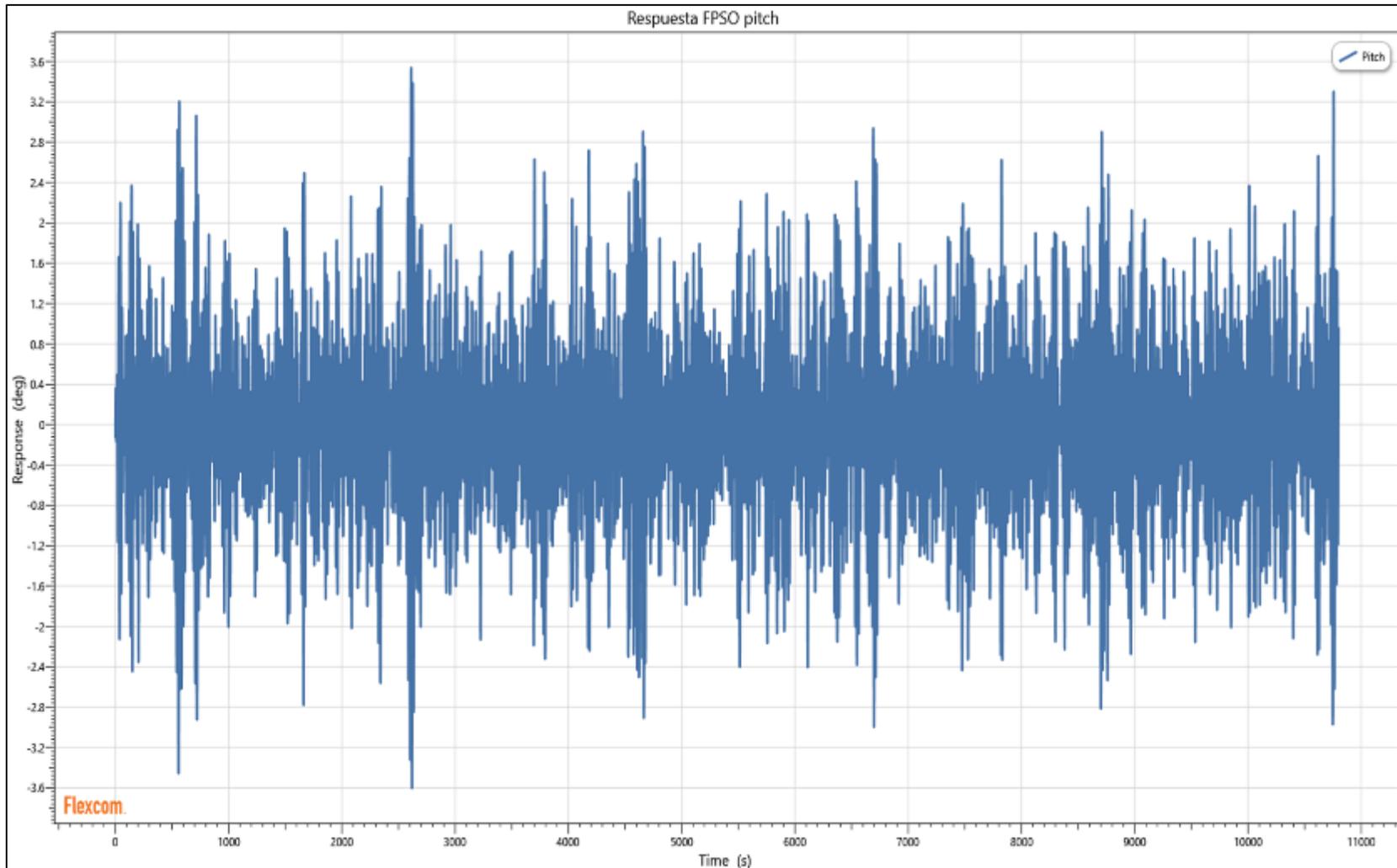


Figura 54 Serie Temporal de la Respuesta FPSO *pitch*, Caso 6 NEAR 10%
Tiempo s Vs Respuesta deg

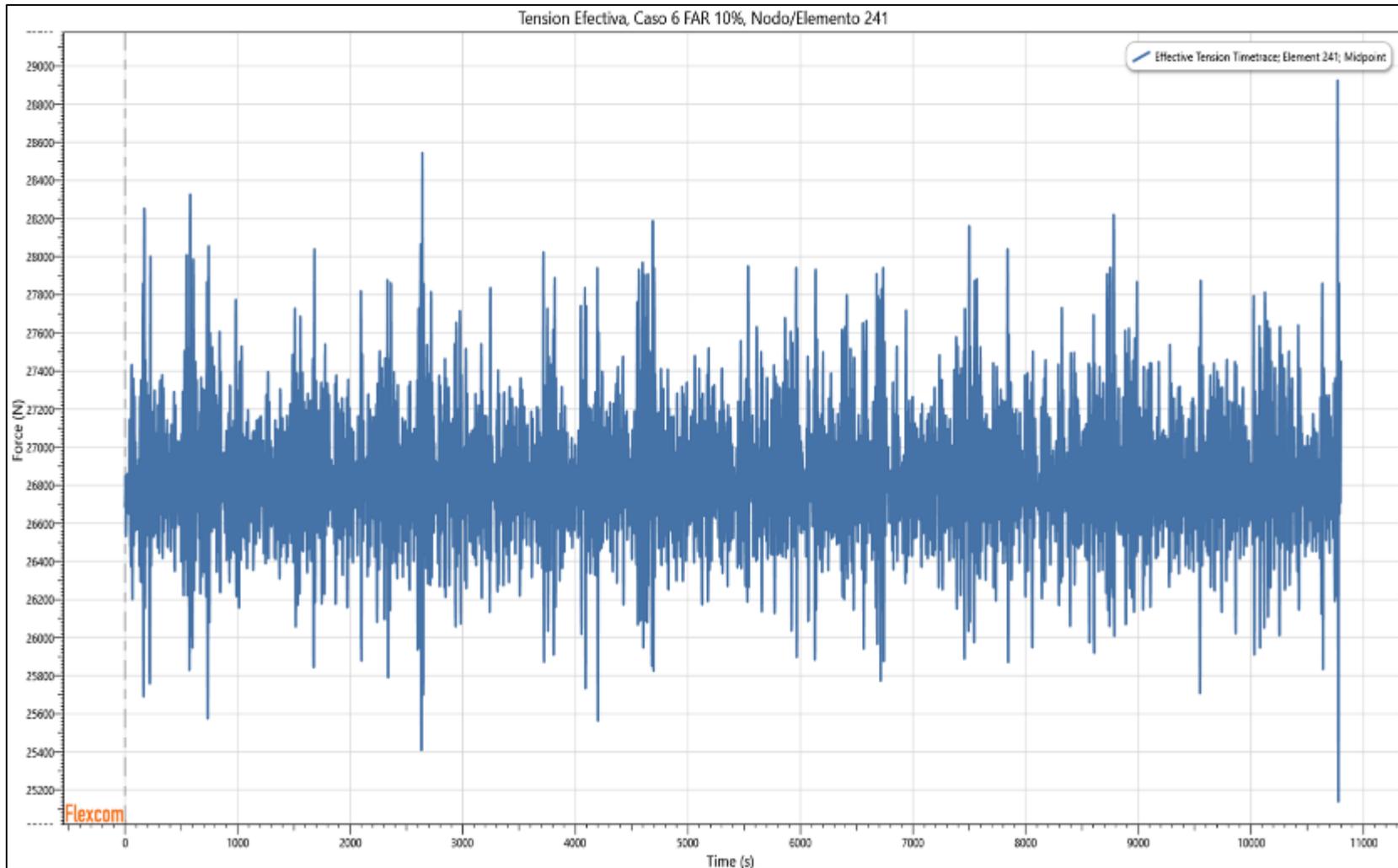


Figura 55 Serie Temporal de la Tensión Efectiva, Caso 6 FAR 10%, Nodo 241
Tiempo s Vs Tensión efectiva N

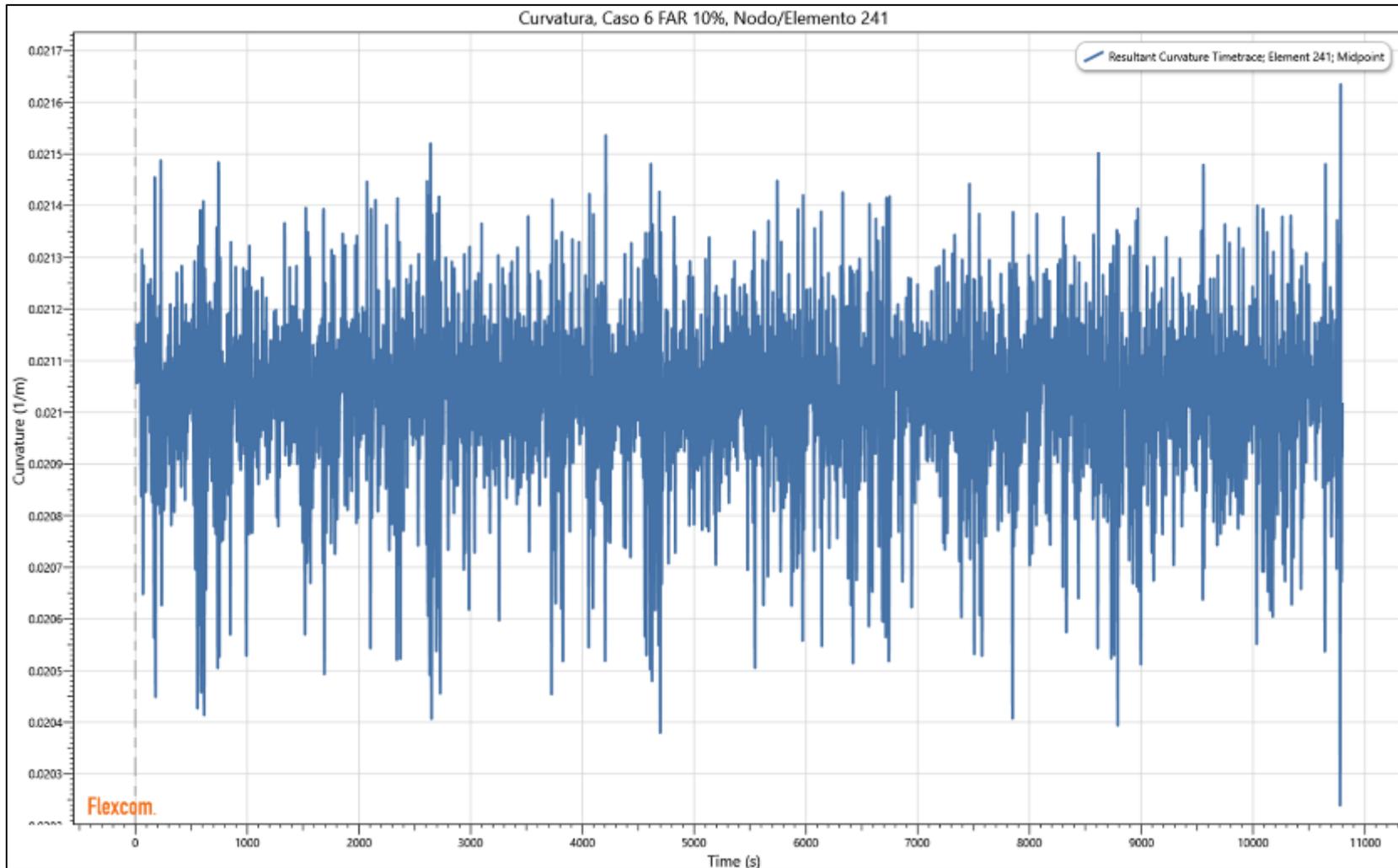


Figura 56 Serie Temporal de la Curvatura, Caso 6 FAR 10%, Nodo 241
Tiempo s Vs Curvatura 1/m

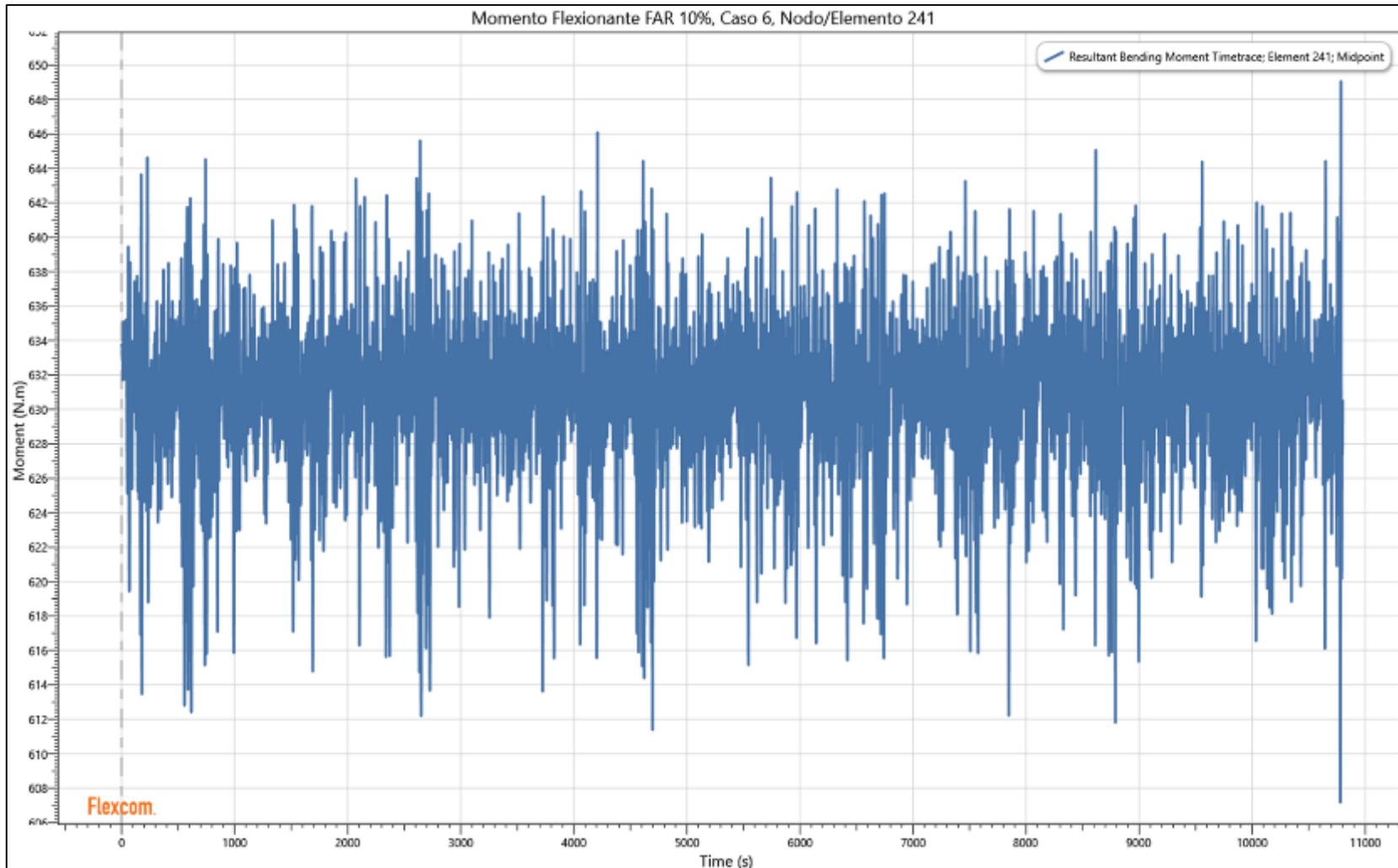


Figura 57 Serie Temporal del Momento Flexionante FAR 10%, Caso 6, Nodo 241
Tiempo s Vs Momento flexionante N-m

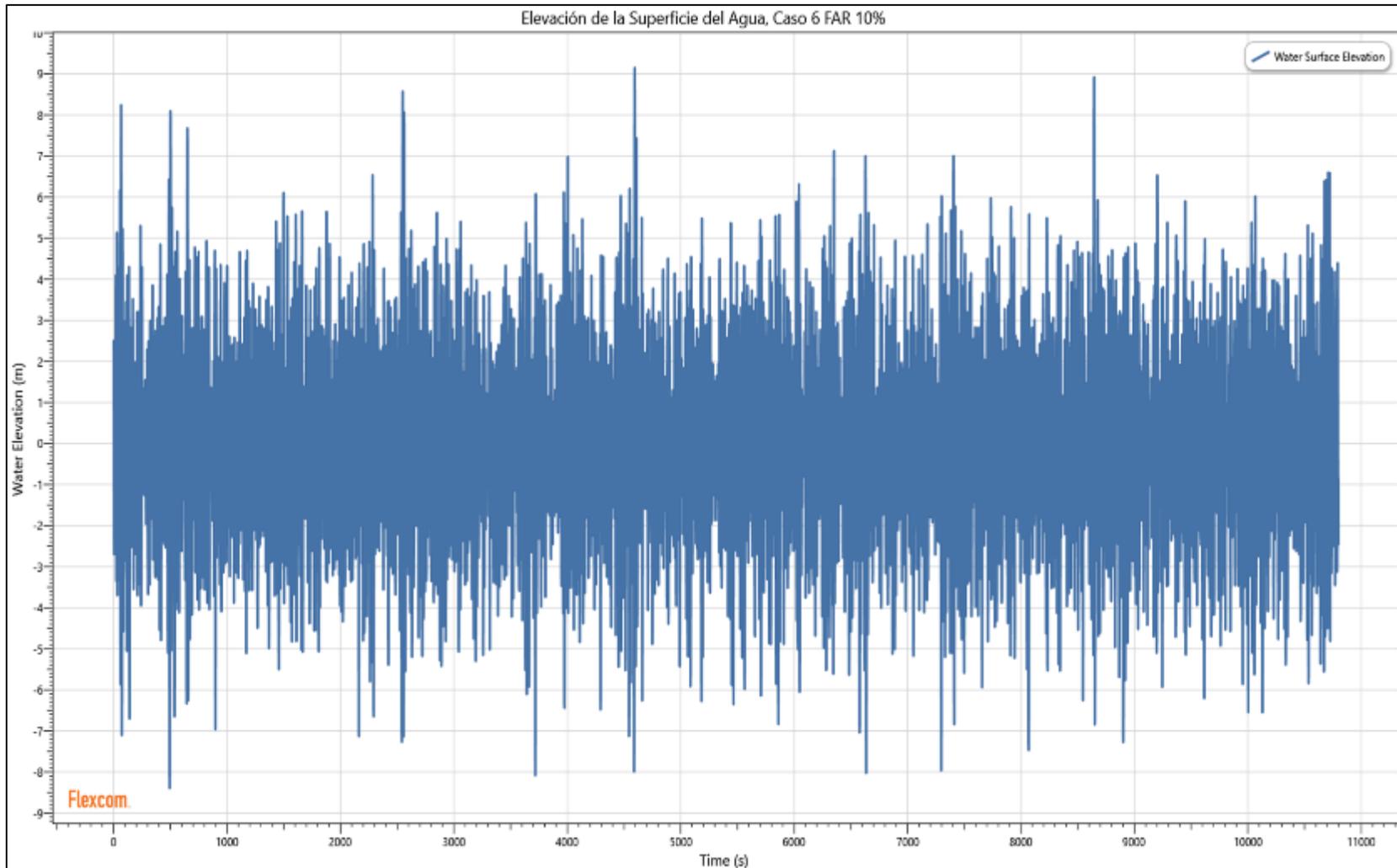


Figura 58 Serie Temporal de la Elevación de la superficie del agua, Caso 6 FAR 10%
Tiempo s Vs Elevación de la superficie del agua m

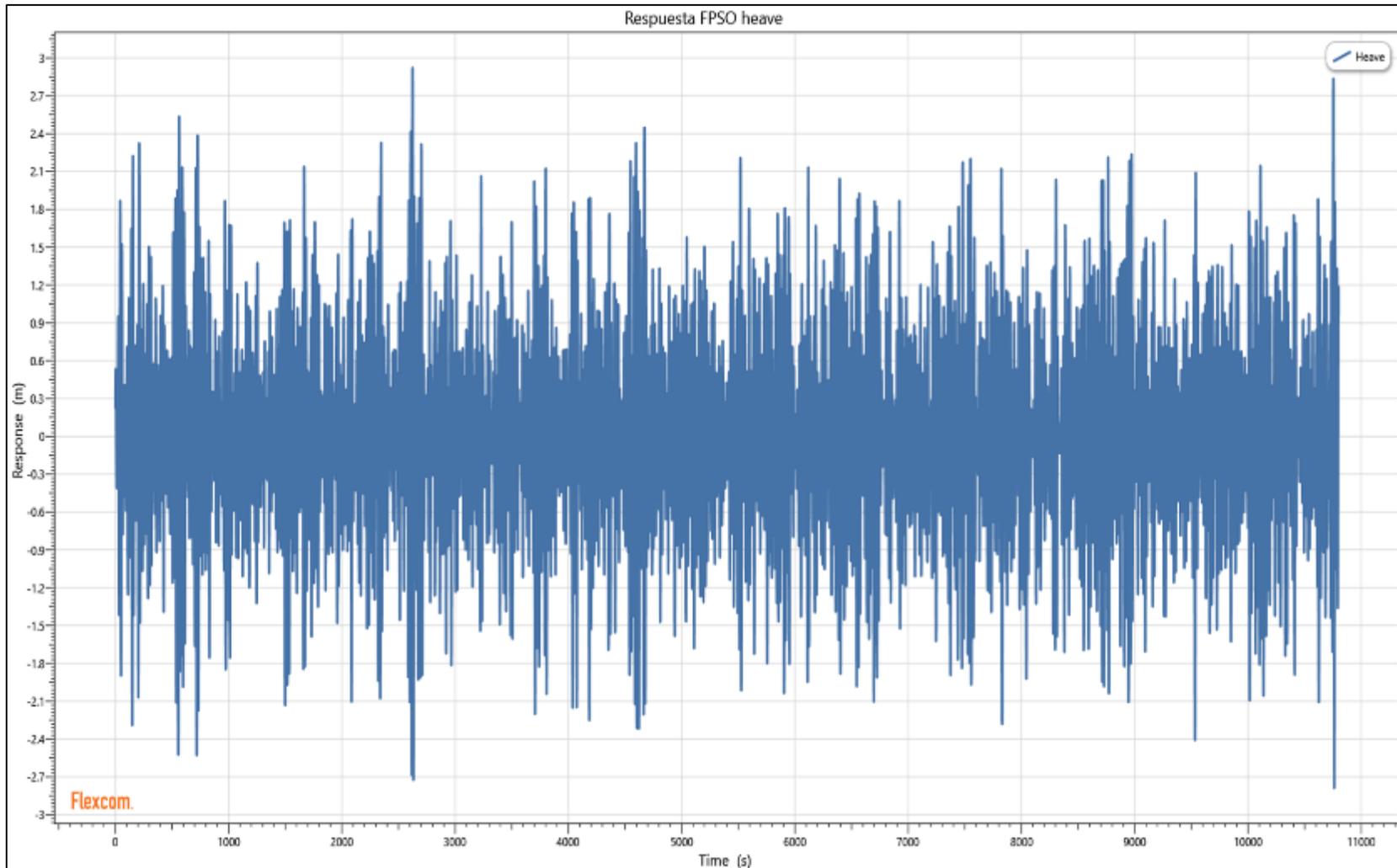


Figura 59 Serie Temporal de la Respuesta FPSO *heave*, Caso 6 FAR 10%
Tiempo s Vs Respuesta m

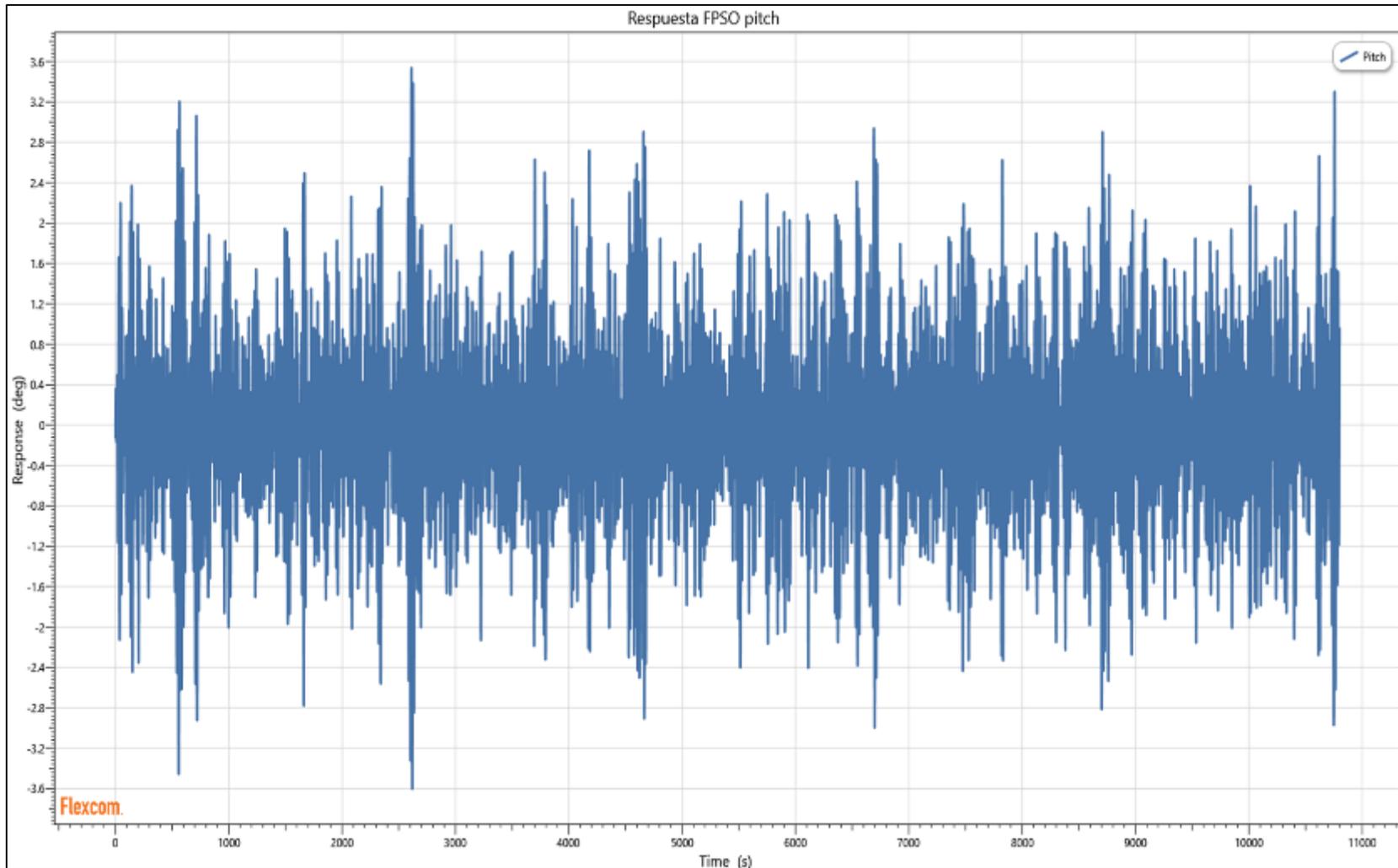


Figura 6o Serie Temporal de la Respuesta FPSO *pitch*, Caso 6 FAR 10%
Tiempo s Vs Respuesta deg

5. CONFIABILIDAD ESTRUCTURAL

En la ingeniería estructural el éxito en el diseño de cualquier estructura está basado en conocer todas las incertidumbres (o la mayor parte de ellas) con la finalidad de erradicarlas.

Actualmente existen dos vertientes en el proceso de diseño: el diseño convencional determinista y el diseño probabilístico. Ambos procesos o metodologías tratan de eliminar y/o minimizar dichas incertidumbres. Las diferencias más claras e importantes son:

El diseño convencional determinista consiste en usar la metodología LRFD, empleando factores que reducen la resistencia y que aumentan las cargas para “subsanan” las incertidumbres, por otra parte, la metodología WSD utiliza un solo factor de seguridad que no debe ser excedido. Estas consideraciones (es decir, usar la metodología LRFD o WSD) la mayoría de las veces dan como resultado sobreestimar la resistencia de la estructura (un aumento innecesario en su costo, peso y volumen) o subestimarla (es decir, que puede fallar en cualquier momento).

El diseño probabilístico (confiabilidad estructural) consiste en tomar en cuenta la naturaleza aleatoria de las variables básicas involucradas en los sistemas estructurales; resistencias, cargas, geometrías y materiales. Esta tendencia en el análisis y diseño estructural SRA (por sus siglas en inglés *Structural Reliability Analysis*) ha tenido gran aceptación a pesar de ser una técnica relativamente nueva ya que su inicio data de apenas los últimos 50 años. SRA ha sido aplicada en códigos y reglamentos internacionales e.g. DNV (1992) y API (2016), considerando las fluctuaciones de las cargas, la variación de las propiedades de los materiales y la incertidumbre de los modelos para el análisis. La consecuencia de considerar las variables aleatorias en el SRA es que los resultados de la seguridad de la estructura analizada o diseñada, a lo largo de su vida útil, está en términos del concepto de probabilidad de falla asociada a un criterio de estado límite que dicha estructura debe cumplir. Una estructura se dice que alcanza un estado límite cuando un parámetro específico de la respuesta alcanza un valor crítico o umbral. Podemos agrupar en cuatro criterios generales los estados límites:

- Estado límite accidental, ALS (por sus siglas en inglés *Accidental Limit States*).
Corresponde al daño que pueden sufrir los componentes estructurales debido a un accidente o a una falla en la operación.
- Estado límite de fatiga, FLS (por sus siglas en inglés *Fatigue Limit States*).
Corresponde a la posibilidad de falla debido al efecto cíclico de las cargas actuantes.
- Estado límite de servicio, SLS (por sus siglas en inglés *Serviceability Limit States*).
Corresponde al criterio aplicable al uso normal de la estructura y a su durabilidad.
- **Estado límite último, ULS (por sus siglas en inglés *Ultimate Limit States*).**
Corresponde a la resistencia última de la estructura ante las cargas actuantes.

La confiabilidad está definida como “**la capacidad de un componente o un sistema para realizar su función requerida sin fallas durante un intervalo de tiempo especificado**” (*Ability of a component or a system to perform its required function without failure during a specified time interval*) de acuerdo con la norma DNV (1992), es decir; **la confiabilidad es una medida nominal de la seguridad de algún sistema durante el periodo de tiempo para el que fue diseñado basándose en la calidad y la cantidad de información disponible**. En la ingeniería estructural la confiabilidad determina la probabilidad de falla de un sistema ante un estado límite, es muy importante aclarar que la confiabilidad estructural depende del tiempo debido a la variación incierta de las cargas y de las propiedades de los materiales. La probabilidad de falla no debe interpretarse como una frecuencia de ocurrencia. La ecuación (5-1) presenta la relación entre la confiabilidad y la probabilidad de falla.

$$\mathfrak{R} = 1 - p_f \quad (5-1)$$

donde

\mathfrak{R}	Confiabilidad
p_f	Probabilidad de falla

La probabilidad de falla puede interpretarse como la probabilidad de que un sistema no se comporte tal como fue proyectado. El margen de seguridad en el caso más básico es establecido con la ecuación (5-2):

$$R - S = M_S (R, S) \leq 0 \quad (5-2)$$

donde

M_S	Margen de seguridad
S	Carga
R	Resistencia

Sí para $R = r$ y $S = s$, entonces se tiene la ecuación (5-3):

$$M_S(R = r, S = s) = g(r, s) \quad (5-3)$$

donde

g	se conoce como función de estado límite
-----	---

Al evaluar la función de estado límite existen los siguientes casos: si $g(r, s) < 0$ entonces representa la región de falla, si $g(r, s) > 0$ entonces representa la región de seguridad y si $g(r, s) = 0$ es el estado límite (la frontera entre ambas), ver la **Figura 61**.

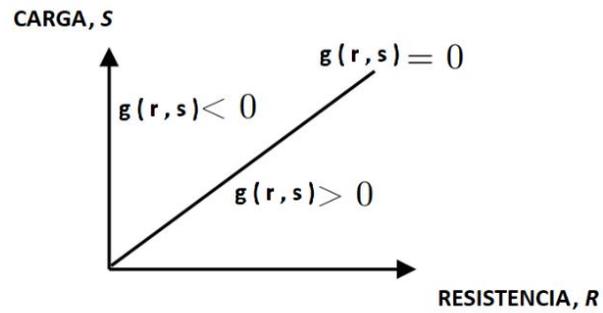


Figura 61 Función de estado límite

La falla en la estructura ocurre cuando las resistencias menos las cargas son menores que cero ver la ecuación (5-4):

$$R - S \leq 0 \quad (5-4)$$

5.1. INTRODUCCIÓN A LA CONFIABILIDAD

La confiabilidad estructural, para el caso fundamental, consiste en evaluar la función de estado límite asociada a un criterio de falla que puede ser planteada con la ecuación (5-5):

$$P(R - S \leq 0) \quad (5-5)$$

donde R y S son variables aleatorias independientes con función de densidad de probabilidad PDF (por sus siglas en inglés *Probability Density Function*) $f(R)$ y $f(S)$ y además con función de distribución acumulada CDF (por sus siglas en inglés *Cumulative Distribution Function*) $F(R)$ y $F(S)$. La estructura falla si la carga S excede la resistencia R , por tanto, la probabilidad de falla queda definida como:

$$p_f = P(\text{falla}) ; p_f = P(R \leq S) \quad (5-6)$$

Si r es la realización de la variable aleatoria R , entonces la probabilidad de falla se calcula con:

$$p_f = P(r \leq S) ; P_f = \int_r^{\infty} f_S(s) ds = 1 - F_S(r) \quad (5-7)$$

Si la resistencia es aleatoria, entonces:

$$p_f = \int_{-\infty}^{\infty} (1 - F_S(r)) f_r(r) dr \quad (5-8)$$

La ecuación (5-8) establece que es necesario conocer las PDF de las 2 variables, cargas y resistencias, para determinar la probabilidad de falla.

MÉTODOS DE CONFIABILIDAD ESTRUCTURAL

Los métodos de confiabilidad que son usados para calcular la probabilidad de falla dependen del margen de seguridad y de las variables aleatorias involucradas. El caso más simple es cuando el margen es lineal y las variables aleatorias tienen una distribución normal.

Desafortunadamente esos casos solo se presentan en el aula de clases y en problemas muy básicos donde lo más importante es entender los conceptos fundamentales. En el mundo real los fenómenos aleatorios no siempre tienen distribuciones de probabilidad normal y la mayoría de las veces estos fenómenos están correlacionados por ejemplo, para modelar la tasa de ocurrencia de los defectos que presentan las computadoras o los automóviles se usa la distribución de Poisson, la distribución exponencial se usa para modelar la vida media de muchos artículos, la distribución de Weibull se emplea para programar actividades de inspección así como mantenimiento preventivo, solo por mencionar algunos ejemplos. De forma general y, en resumen, las variables aleatorias no siempre están normalmente distribuidas y el margen de seguridad no es lineal, por lo que es necesario usar los siguientes métodos de aproximación:

Método de Confiabilidad de Primer Orden FORM (por sus siglas en inglés *First Order Reliability Method*).

Esta solución se usa para obtener una buena aproximación de la probabilidad de falla, basándose en el cálculo del índice de confiabilidad β_{HL} propuesto por Hasofer y Lind. Este método consiste en hacer un cambio de variables partiendo del espacio de variables físico hacia el espacio de variables normales estándar U , con media cero y desviación estándar igual a uno (para variables estadísticamente dependientes e independientes). β_{HL} es la menor distancia desde el origen hasta la superficie de falla en el espacio U , el plano tangente interseca a la función límite en el punto P , llamado punto de falla o punto de diseño. Desafortunadamente el grado de aproximación depende de la no linealidad de la función de estado límite, es decir, cuando la función límite es lineal y las variables de base normales el resultado es exacto.

Método de Confiabilidad de Segundo Orden (SORM por sus siglas en inglés *Second Order Reliability Method*).

Este método usa una aproximación cuadrática para el margen de seguridad y generalmente es más preciso que FORM, sin embargo, puesto que SORM requiere del cálculo de derivadas parciales de segundo orden no resulta tan eficiente cuando dichas derivadas tienen que calcularse numéricamente. Adicionalmente SORM necesita evaluar más veces la función de falla que FORM.

La naturaleza del problema planteado en este trabajo nos indica que el análisis de confiabilidad es para variables correlacionadas no-normales. Existen dos transformaciones que se usan para los análisis de confiabilidad; la transformación de Rosenblatt y la transformación de Nataf, cada una de ellas se describe brevemente a continuación;

Transformación de Rosenblatt (1952).

Sea la transformación:

$$\Phi(u_1) = F_{X_1}[(x_1)] \quad (5-9)$$

$$\Phi(u_2) = F_{X_2|X_1}(x_2|x_1) \quad (5-10)$$

...

$$\Phi(u_n) = F_{X_n|X_1, X_2, \dots, X_{n-1}}(x_n|x_1, x_2, \dots, x_{n-1}) \quad (5-11)$$

Donde Φ es la distribución normal estándar y $F_{X_n|X_1, X_2, \dots, X_{n-1}}$ son densidades de probabilidad condicional. U_1, U_2, \dots, U_n tienen una distribución conjunta normal estándar no correlacionada.

Transformación de Nataf (1962).

Sea la transformación:

$$\Phi(y_i) = F_{X_i}(x_i) \quad ; \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (5-12)$$

Donde Φ es la distribución normal estándar y F_{X_i} son distribuciones de probabilidad marginal (continuas y monótonicamente crecientes).

$$y_i = \Phi^{-1}(F_{X_i}(x_i)) \quad ; \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (5-13)$$

Se asume que Y_1, Y_2, \dots, Y_n tienen una distribución conjunta normal estándar con matriz de correlación $R_y = E[YY^T]$.

5.2. CARACTERIZACIÓN DE LAS VARIABLES ALEATORIAS

ESTADOS DE MAR EXTREMOS, DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD CONJUNTA

En el enfoque probabilístico SRA la incertidumbre involucrada en varios parámetros se modela haciendo uso de diferentes funciones de densidad de probabilidad ya que el objetivo fundamental consiste en aceptar el carácter aleatorio de las variables involucradas en los sistemas estructurales. Cuando no se dispone de información detallada para caracterizar las cargas o resistencias DNV (1992) recomienda hacer uso de la distribución normal o lognormal. Usualmente la distribución lognormal se aplica para las variables aleatorias de las cargas y la distribución normal para las variables aleatorias de resistencias, sin embargo, una variable que se sabe nunca debe tomar valores negativos, como en este caso es la tensión efectiva, momento flexionante (valor absoluto) y la curvatura se debe asignar una distribución lognormal en lugar de la distribución normal. Para el uso de otra distribución que no sea la normal o lognormal es necesario realizar un análisis estadístico (haciendo uso de la información disponible de observaciones realizadas) para determinar el tipo de distribución, así como la estimación de los parámetros asociados a esta.

En este análisis de confiabilidad existen 5 variables aleatorias caracterizadas por las siguientes distribuciones de probabilidad:

V.A.1 Carga	H_s	Distribución de probabilidad Weibull
V.A.2 Carga	T_p	Distribución de probabilidad lognormal
V.A.3 Resistencia	M_R	Distribución de probabilidad lognormal
V.A.4 Resistencia	TE_R	Distribución de probabilidad lognormal
V.A. 5 Resistencia	κ_R	Distribución de probabilidad lognormal

Donde H_s y T_p son variables aleatorias correlacionadas. M_R es el momento flexionante resistente, TE_R la tensión efectiva resistente y κ_R la curvatura resistente.

A continuación, se presenta la distribución conjunta de probabilidad de las variables aleatorias de carga obtenidas por Perez, R. (2018) y las superficies de respuesta asociadas a estas variables, después se describen las distribuciones de probabilidad de las resistencias. Para el caso particular del cable umbilical planteado en este trabajo de tesis se hará uso de los dos métodos de aproximación para determinar la probabilidad de falla; FORM y SORM haciendo uso de la transformación de Nataf.

Los estados de mar para condiciones extremas en el GoM pueden modelarse con una distribución de probabilidad conjunta representada mediante el modelo de Nataf de las variables ambientales H_s y T_p . Pérez, R. (2018) obtuvo esta distribución (5-14) mediante un ajuste probabilístico analizando información de eventos extremos registrados (huracanes y tormentas) desde 1980 hasta 2018, es decir, datos de una boya instalada cerca del campo Trion.

$$f_{H_s, T_p}(h, t) = \frac{f_{H_s}(h)f_{T_p}(t)}{\phi(\Phi^{-1}(F_{H_s}(h)))\phi(\Phi^{-1}(F_{T_p}(t)))} \times \phi_2(\Phi^{-1}(F_{H_s}(h)), \Phi^{-1}(F_{T_p}(t)), \rho_N) \quad (5-14)$$

donde $F_{H_s}(h)$ y $F_{T_p}(t)$ son las funciones marginales ajustadas de probabilidad acumulada de H_s y T_p , respectivamente, $f_{H_s}(h)$ y $f_{T_p}(t)$ son sus correspondientes funciones de densidad de probabilidad marginal, $\phi(\cdot)$ es la función de densidad de probabilidad de una variable normal estándar y $\Phi^{-1}(\cdot)$ representa el inverso de la función de probabilidad acumulada, $\phi_2(\cdot, \cdot, \rho_N)$ representa una función de densidad bidimensional conjunta de dos variables normales estándar y el coeficiente de correlación equivalente de Nataf se obtiene con la ecuación (5-15):

$$\rho_{H_s, T_p} = \int_0^\infty \int_0^\infty \left(\frac{F_{H_s}^{-1}(\Phi^{-1}(x)) - \mu_{H_s}}{\sigma_{H_s}} \right) \left(\frac{F_{T_p}^{-1}(\Phi^{-1}(y)) - \mu_{T_p}}{\sigma_{T_p}} \right) \times \phi_2(y, x, \rho_N) dx dy \quad (5-15)$$

donde ρ_{H_s, T_p} es el coeficiente de correlación lineal entre H_s y T_p calculado a partir de los datos disponibles de $F_{H_s}^{-1}$ y $F_{T_p}^{-1}(\cdot)$ representa la función inversa de probabilidad acumulada marginal de H_s y T_p , respectivamente. μ_{H_s} y μ_{T_p} son los valores medios, σ_{H_s} y σ_{T_p} las correspondientes desviaciones estándar.

La ecuación (5-16), describe la PDF Weibull marginal para la variable H_s :

$$f_{H_s}(hs) = \frac{\beta_{H_s}}{\alpha_{H_s}} \left(\frac{hs - u}{\alpha_{H_s}} \right)^{\beta_{H_s}-1} e^{-\left(\frac{hs-u}{\alpha_{H_s}} \right)^{\beta_{H_s}}} ; \quad hs > 0 \quad (5-16)$$

donde

α_{H_s}	Parámetro de escala	0.6499
β_{H_s}	Parámetro de forma	0.8804
u	Parámetro de localización (umbral)	5.25 m
H_s	Altura de ola significativa	

Mientras que la ecuación (5-17), describe la PDF lognormal marginal para la variable T_p :

$$f_{T_p}(tp) = \frac{1}{\xi_{T_p} tp \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln(tp) - \lambda_{T_p}}{\xi_{T_p}} \right)^2}; \quad tp > 0 \quad (5-17)$$

donde

λ_{T_p}	valor medio del logaritmo de T_p	2.3364
ξ_{T_p}	desviación estándar de logaritmo de T_p	0.1585
T_p	Periodo pico	

La matriz de correlación lineal entre ambas variables resultó de:

$$\rho_{H_s, T_p} = \begin{bmatrix} 1.00 & 0.4990667 \\ 0.4990667 & 1.00 \end{bmatrix} \quad (5-18)$$

CARGAS ACTUANTES/SUPERFICIE DE RESPUESTA PARA OFFSET 10% DE LA PROFUNDIDAD, *NEAR* Y *FAR*

Las superficies de respuesta son una herramienta muy útil en los análisis de confiabilidad de sistemas estructurales complejos ya que simplifican los cálculos de la respuesta. La estimación de las cargas actuantes sobre el cable umbilical se determinó haciendo una propuesta de 9 puntos, es decir, 9 densidades espectrales de oleaje adicionales en la zona del contorno ambiental donde se presentaron los mayores valores MPM de tensión efectiva, momento flexionante y curvatura, es decir entre las densidades espectrales 5 y 6 ver la **Figura 62**.

Con estas 9 densidades espectrales de oleaje se hicieron las siguientes simulaciones en el dominio del tiempo y para 3 horas de tormenta cada una:

- 9 simulaciones cuando el FPSO se encuentra en su posición inicial
- 9 simulaciones cuando el FPSO se traslada un 10% de la profundidad en dirección *far*
- 9 simulaciones cuando el FPSO se traslada un 10% de la profundidad en dirección *near*

En total se realizaron 27 simulaciones y para cada una de ellas se obtuvieron 3 registros de series temporales en el nodo 241 (ver la **Figura 40**) que es donde se presentan los valores más críticos:

- tiempo vs tensión efectiva en el nodo 241
- tiempo vs momento flexionante en el nodo 241.
- tiempo vs curvatura en el nodo 241.

Con los datos de las series temporales extraídas posteriormente se calcularon los valores MPM con la ecuación (4-17) para la tensión efectiva, el momento flexionante y la curvatura.

La **Tabla 10** presenta los valores MPM para la tensión efectiva en el nodo 241. Analizando los resultados donde los esfuerzos se presentan en mayor magnitud son para el caso *far* (*offset* 10% de la profundidad). Esto es lógico pues el FPSO se aleja de su posición inicial y esto hace que tire del umbilical lo que físicamente se traduce en un mayor esfuerzo de tensión efectiva.

La **Tabla 11**, presenta los MPM para el momento flexionante en el nodo 241. Los resultados indican que los mayores esfuerzos se presentaron en el caso *near* (*offset* 10% de la profundidad). Físicamente la traslación del FPSO en esa dirección provoca que la catenaria superior del cable umbilical se sumerja más, esto genera que la curvatura aumente y por lo tanto el momento flexionante.

Con los resultados obtenidos de los valores MPM de tensión efectiva y momento flexionante en función de H_s y T_p , se realizó un ajuste por mínimos cuadrados para obtener un modelo cuadrático (polinomio de segundo grado que geométricamente representa una superficie). La ecuación (5-19) y ecuación (5-20) representan estas superficies de respuesta respectivamente y están graficadas en la **Figura 63**.

Nodo 241, tensión efectiva *far offset* 10% de la profundidad (H_s, T_p) unidades N.

$$TE(H_s, T_p) = -94,521.20 + 20,790.20H_s - 395.43H_s^2 + 3,136.03T_p - 878.78H_sT_p + 176.43T_p^2 \quad (5-19)$$

Nodo 241 momento flexionante *near offset* 10% de la profundidad (H_s, T_p) unidades N-m.

$$M(H_s, T_p) = 1,519.76 + 0.18H_s + 0.17H_s^2 - 22.87T_p - 0.27H_sT_p + 0.88T_p^2 \quad (5-20)$$

El objetivo de obtener los valores de tensión efectiva y momento en función de H_s y T_p es que podemos usar las PDF marginales de cada una de ellas obtenidas por Pérez, R. (2018) para aplicarlas en el cálculo de confiabilidad haciendo uso de superficies de respuesta en el margen de seguridad.

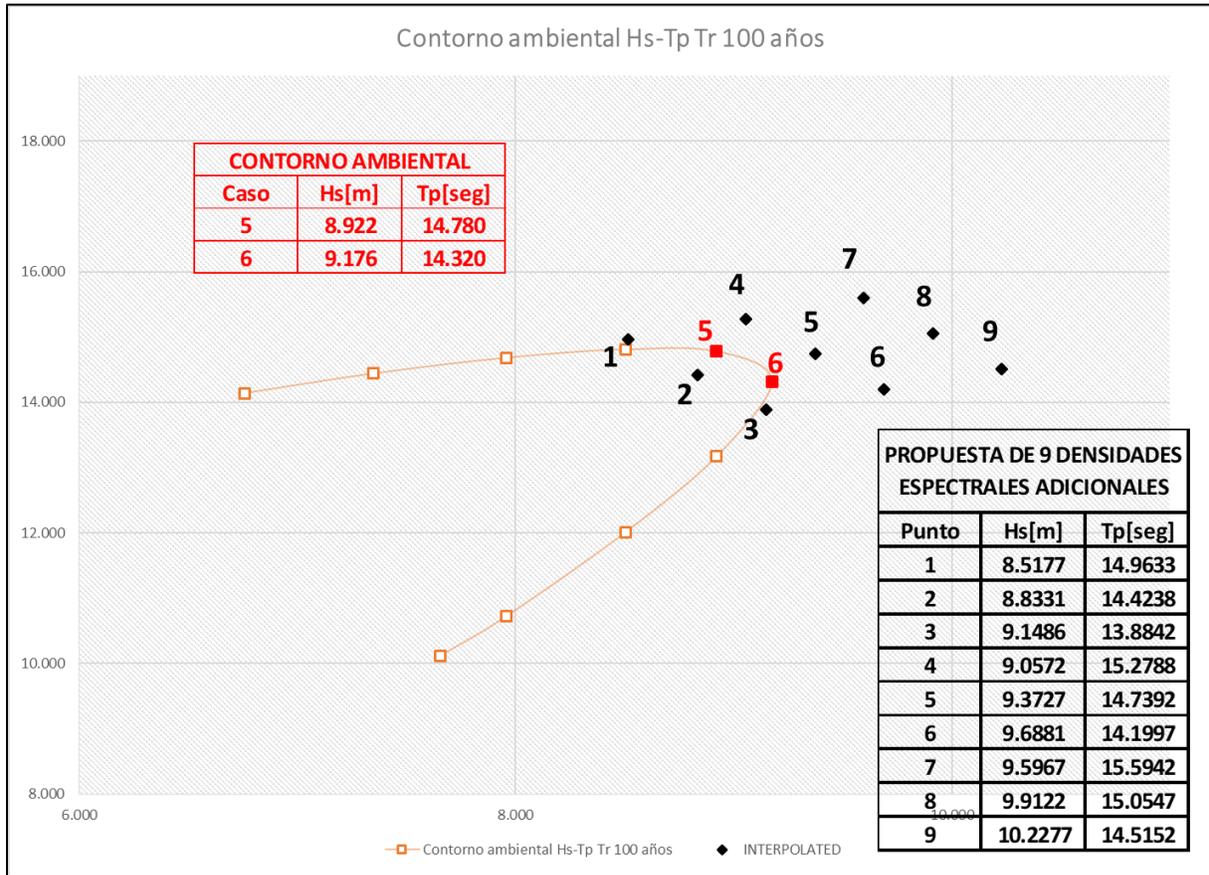


Figura 62 Propuesta de 9 densidades espectrales de oleaje adicionales

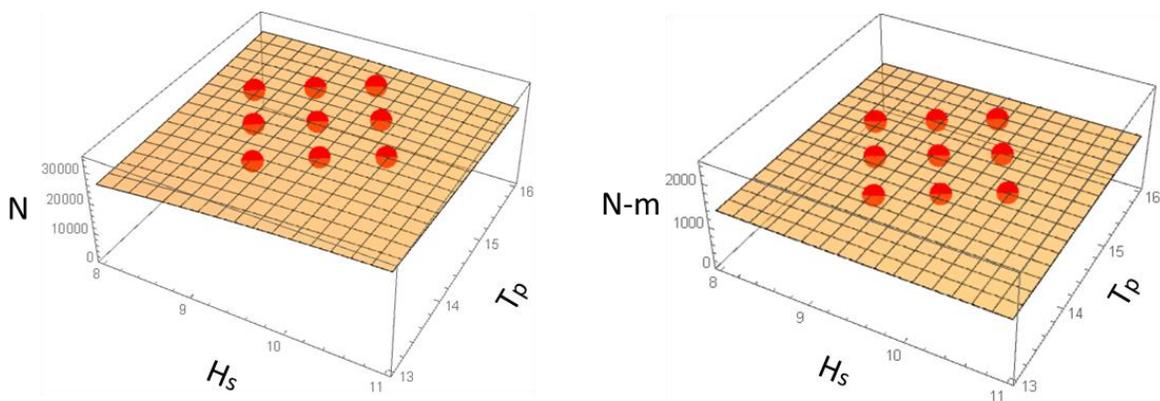


Figura 63 Superficies de respuesta de tensión efectiva (izquierda) y momento flexionante (derecha)

Tabla 10 Tensión Efectiva, offset 10% de la profundidad, Nodo 241

Hs [m]	Tp [seg]	Máximo Posición Inicial [Newton]	Máximo FAR [Newton]	Máximo NEAR [Newton]
8.51770	14.96330	19,695.70	28,367.94	13,239.84
8.83310	14.42380	19,601.42	28,299.08	13,185.94
9.05720	15.27880	20,078.85	28,683.45	13,263.32
9.14860	13.88420	19,816.07	28,390.29	13,166.77
9.37270	14.73920	19,770.11	28,674.80	13,290.90
9.59670	15.59420	20,134.81	28,958.12	13,333.97
9.68810	14.19970	19,999.21	29,223.73	13,291.66
9.91220	15.05470	19,893.73	28,790.68	13,426.87
10.22770	14.51520	19,915.99	28,875.21	13,386.13

Tabla 11 Momento Flexionante, offset 10% de la profundidad, Nodo 241

Hs [m]	Tp [seg]	Máximo Posición Inicial [N-m]	Máximo FAR [N-m]	Máximo NEAR [N-m]
8.51770	14.96330	920.70	467.72	1,353.69
8.83310	14.42380	918.03	472.35	1,352.13
9.05720	15.27880	925.62	473.52	1,353.14
9.14860	13.88420	917.53	501.60	1,352.93
9.37270	14.73920	917.32	471.75	1,351.89
9.59670	15.59420	928.20	479.22	1,352.85
9.68810	14.19970	920.22	528.41	1,352.89
9.91220	15.05470	925.28	474.83	1,353.45
10.22770	14.51520	921.24	562.28	1,351.33

La superficie de respuesta correspondiente a la curvatura resulta ser constante con un valor de 0.045 m^{-1} para el caso *near* ver la ecuación (5-21). Geométricamente representa un plano. La **Tabla 12** presenta los resultados de la curvatura del análisis hidrodinámico realizado.

Tabla 12 Curvatura, offset 10% de la profundidad, Nodo 241

Hs [m]	Tp [seg]	Máximo Posición Inicial [1/m]	Máximo FAR [1/m]	Máximo NEAR [1/m]
8.51770	14.96330	0.0310	0.0160	0.0450
8.83310	14.42380	0.0310	0.0160	0.0450
9.05720	15.27880	0.0310	0.0160	0.0450
9.14860	13.88420	0.0310	0.0190	0.0450
9.37270	14.73920	0.0310	0.0160	0.0450
9.59670	15.59420	0.0310	0.0180	0.0450
9.68810	14.19970	0.0310	0.0200	0.0450
9.91220	15.05470	0.0310	0.0170	0.0450
10.22770	14.51520	0.0310	0.0210	0.0450

Nodo 241 curvatura *near* offset 10% de la profundidad (H_s, T_p) unidades 1/m.

$$M(H_s, T_p) = 0.045 \quad (5-21)$$

RESISTENCIA

Debido a que la información de la capacidad en los cables umbilicales para el dominio público es muy escasa y además el modelado probabilístico es muy variado para cada tipo de cable, es necesario hacer los siguientes supuestos para modelar probabilísticamente su capacidad de resistencia. Las fuerzas resistentes se consideraron con un modelo de distribución lognormal y un COV de 0.15. La ecuación (5-22) describe la PDF lognormal para la variable de la tensión efectiva:

$$f_{TE}(te) = \frac{1}{\sigma_{TE} te \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln(te) - \mu_{TE}}{\sigma_{TE}} \right)^2}; \quad te > 0 \quad (5-22)$$

El valor medio se calculó con la ecuación (5-23) mientras que la desviación estándar se calculó con la ecuación (5-24) estas expresiones, así como el valor del COV se obtuvieron del trabajo realizado por Matrisk:

$$\mu_{TE} = \frac{T_{MPM}}{(1 - 2\delta_{TE})\gamma_{TE}} = 75,129 [N] \quad (5-23)$$

$$\sigma_{TE} = \frac{\mu_{TE}}{2} - \frac{T_{MPM}}{2\gamma_{TE}} = 11,269 [N] \quad (5-24)$$

donde

- T_{MPM} valor máximo más probable de tensión efectiva, resultado del análisis caso 6 *far* 10%
- δ_{TE} COV igual a 0.15
- γ_{TE} factor de seguridad igual a 0.55 utilizado por recomendación de la especificación API (2002)

La ecuación (5-25) describe la PDF lognormal para la variable del momento flexionante:

$$f_M(m) = \frac{1}{\sigma_M m \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln(m) - \mu_M}{\sigma_M} \right)^2}; \quad m > 0 \quad (5-25)$$

El valor medio se calculó con la ecuación (5-26) que considera la interacción del momento flexionante y la tensión efectiva, formulada a partir de la ecuación (4-42) y además considerando el valor de la media menos 2 veces la desviación estándar de cada variable:

$$\left[\frac{1.3M_{MPM}}{\mu_M - 2\sigma_M} \right] + \left[\frac{1.3T_{MPM}}{\mu_{TE} - 2\sigma_{TE}} \right]^2 = 1.0 \quad (5-26)$$

Y recordando que $\sigma_{TE} = \mu_{TE} \times \delta_{TE}$ y que $\sigma_M = \mu_M \times \delta_M$, obtenemos la ecuación (5-27):

$$\left[\frac{1.3M_{MPM}}{\mu_M(1 - 2\delta_M)} \right] + \left[\frac{1.3T_{MPM}}{\mu_{TE}(1 - 2\delta_{TE})} \right]^2 = 1.0 \quad (5-27)$$

donde

M_{MPM} valor máximo más probable de momento flexionante resultado del análisis caso 6 *near* 10%

δ_M COV igual a 0.15

El resultado del valor medio obtenido de resolver la ecuación (5-27) es de:

$$\mu_M = 5,137 [N - m] \quad (5-28)$$

La desviación estándar se calculó con la ecuación (5-29):

$$\sigma_M = \mu_M \delta_M = 771 [N - m] \quad (5-29)$$

Finalmente, la resistencia de la curvatura se consideró con una PDF lognormal ecuación (5-30):

$$f_{\kappa}(\kappa) = \frac{1}{\sigma_{\kappa} \kappa \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln(\kappa) - \mu_{\kappa}}{\sigma_{\kappa}} \right)^2}; \quad \kappa > 0 \quad (5-30)$$

El valor medio se calculó con la ecuación (5-31), mientras que la desviación estándar se calculó con la ecuación (5-32), estas expresiones se obtuvieron del trabajo realizado por Matrisk:

$$\mu_{\kappa} = \frac{1}{MBR(1 - 2\delta_{\kappa})} = 0.1190 \left[\frac{1}{m} \right] \quad (5-31)$$

$$\frac{1}{MBR} = \mu_{\kappa} - 2\sigma_{\kappa} ; \sigma_{\kappa} = 0.01783 \left[\frac{1}{m} \right] \quad (5-32)$$

donde

MBR Mínimo radio de curvatura para condiciones de operación, información del fabricante

δ_{κ} COV igual a 0.15

5.3. MARGEN DE SEGURIDAD

Una vez definido el caso de estudio con la configuración del umbilical apropiada para que cumpla con los requerimientos de curvatura y fuerzas, se procede a realizar el análisis de confiabilidad. Se planteó el margen de seguridad ecuación (5-33) en términos del momento flexionante y la tensión efectiva y la ecuación (5-34) en términos de la curvatura.

$$M (M_R, TE_R, H_S, T_p) = 1 - \left[\left[\frac{M_S(H_S, T_p)}{M_R} \right] + \left[\frac{TE_S(H_S, T_p)}{TE_R} \right]^2 \right]^2 \quad (5-33)$$

donde:

M	Margen de seguridad para momento flexionante y tensión efectiva
M_R	Momento Flexionante Resistente, considerado como una variable aleatoria con distribución de probabilidad lognormal, ecuación (5-25)
TE_R	Tensión Efectiva Resistente, considerado como una variable aleatoria con una distribución de probabilidad lognormal, ecuación (5-22)
$M_S(H_S, T_p)$	Momento Flexionante originados por las condiciones de oleaje, modelado mediante una superficie de respuesta, ecuación (5-20) obtenida con los resultados de las simulaciones numéricas
$TE_S(H_S, T_p)$	Tensión Efectiva originados por las condiciones de oleaje, modelado mediante una superficie de respuesta, ecuación (5-19) obtenida con los resultados de las simulaciones numéricas

$$G (\kappa_R, \kappa_S) = \kappa_R - \kappa_S \quad (5-34)$$

donde:

G	Margen de seguridad para la curvatura
κ_R	Curvatura resistente, considerada como una variable aleatoria con distribución de probabilidad lognormal ecuación (5-30)
κ_S	valor máximo más probable de curvatura, resultado del análisis caso 6 <i>near</i> 10%, ver la ecuación (5-21)

La probabilidad de falla se determinará como:

$$p_f = P(M \leq 0) \quad (5-35)$$

Y

$$p_f = P(G \leq 0) \quad (5-36)$$

La cual se determinará con el método de confiabilidad FORM y SORM.

5.4. CÁLCULO DE LA CONFIABILIDAD ESTRUCTURAL

Actualmente existe un *software* específico para el análisis SRA llamado COMREL®. Este programa informático nos permite obtener los índices de confiabilidad y la probabilidad de falla a partir del margen de seguridad del estado límite en función de las variables aleatorias y su correlación lineal. Los resultados para el margen de seguridad (5-33) son:

$$\beta_{FORM} = 2.733$$

$$P_{f_{FORM}} = 3.14 \times 10^{-3}$$

$$\beta_{SORM} = 2.754$$

$$P_{f_{SORM}} = 2.95 \times 10^{-3}$$

y para el margen de seguridad (5-34) son:

$$\beta_{FORM} = \beta_{SORM} = 6.451$$

$$P_{f_{FORM}} = P_{f_{SORM}} = 5.58 \times 10^{-11}$$

Los coeficientes de sensibilidad asociados al valor medio para el margen de seguridad (5-33) se presentan en la **Figura 64**.

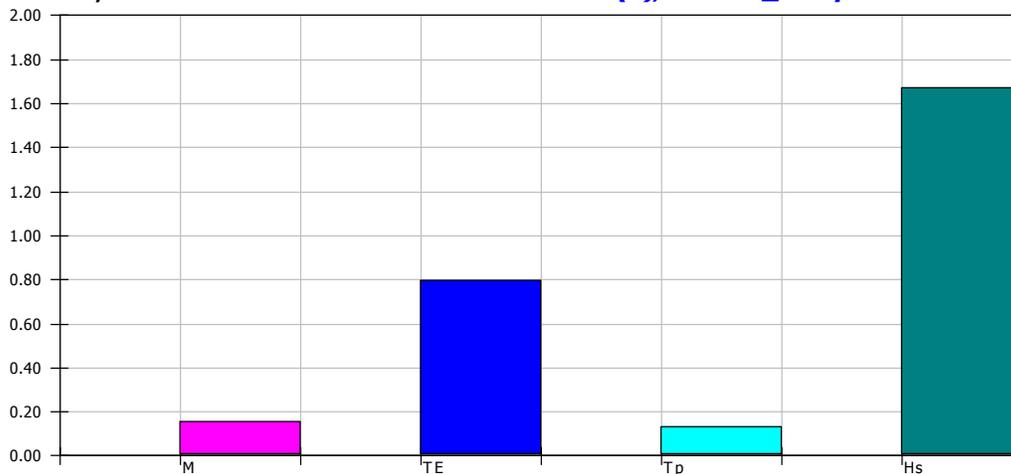


Figura 64 Coeficiente de sensibilidad asociados al valor medio

Los coeficientes de sensibilidad asociados a la desviación estándar para el margen de seguridad (5-33) se presentan en la **Figura 65**.

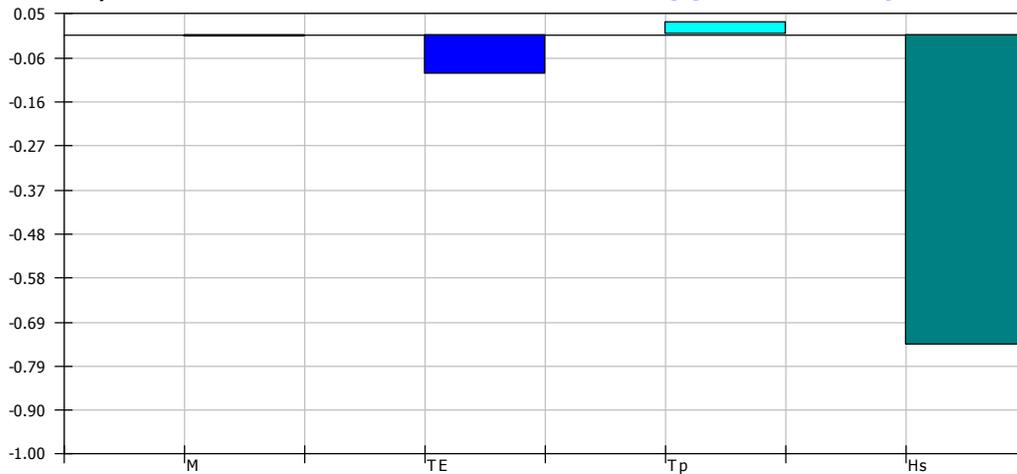


Figura 65 Coeficiente de sensibilidad asociados a la desviación estándar

Los coeficientes de sensibilidad son un valor indicativo de la influencia en el índice de confiabilidad que tienen cada una de las variables aleatorias (debida a cambios en los parámetros de las distribuciones) y podemos ver que la variable aleatoria H_s es la que tiene más influencia, en el caso de la desviación estándar es un valor negativo porque un aumento en la desviación estándar disminuye la confiabilidad.

6. RESULTADOS

El análisis comparativo entre considerar las variables como determinista y de forma aleatoria indican que:

Haciendo uso de la relación de interacción que toma en cuenta el efecto combinado del momento flexionante, la tensión efectiva y la presión externa para el ULS concluimos que el umbilical puede operar en el campo Trion incluso con traslaciones de hasta 10% el tirante de profundidad.

Al determinar la confiabilidad del umbilical con el método FORM y SORM los resultados muestran que la probabilidad de falla obtenida con el margen de seguridad (5-33) sobrepasa el valor aceptable mínimo de probabilidad de falla anual recomendado por DNV (1992) **Tabla 13**, asociada al **tipo de falla II poco serio** $P_f \times 10^{-4}$, por lo tanto no es recomendable el uso del cable umbilical Abgami en el GoM.

Tabla 13 Valores aceptables de probabilidad de falla anual y confiabilidad objetivo

Valores aceptables de probabilidad de falla anual P_f (y confiabilidad objetivo (β_o))		
Tipo de falla	Consecuencia de la falla	
	Poco serio	Serio
I - Estructura redundante	$P_f = 10^{-3}$ $\beta_o = 3.09$	$P_f = 10^{-4}$ $\beta_o = 3.71$
II - Advertencia significativa antes de la ocurrencia de falla de una estructura no redundante	$P_f = 10^{-4}$ $\beta_o = 3.71$	$P_f = 10^{-5}$ $\beta_o = 4.26$
III - Sin advertencia antes de la ocurrencia de falla de una estructura no redundante	$P_f = 10^{-5}$ $\beta_o = 4.26$	$P_f = 10^{-6}$ $\beta_o = 4.75$

Esta discrepancia de resultados indica que estamos subestimado al cable umbilical, es decir, que puede fallar en cualquier momento por la combinación de la tensión efectiva y momento flexionante.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Este trabajo se desarrolló para determinar el SRA correspondiente al ULS de un cable umbilical, la respuesta a corto plazo se obtuvo mediante un análisis estructural 3D hidrodinámico no lineal en el dominio del tiempo y se consideró la conexión entre el FPSO y el cable umbilical Agbami. Del trabajo realizado se concluye que:

La configuración *Lazy-Wave* distribuye la fuerza de la tensión efectiva en dos zonas del cable, donde se conecta al FPSO en la superficie y la parte definida como *Lower Catenary Last* (catenaria inferior) también elimina el TDZ pues los flotadores crean una doble sección en catenaria sin embargo y debido a eso es que existe una zona (nodo 241) en donde la curvatura y el momento flexionante presentan los valores más críticos MPM.

La caracterización probabilística de las variables aleatorias es muy importante ya que los valores estadísticos, así como el tipo de distribución de probabilidad empleada influyen en gran medida la probabilidad de falla del análisis SRA.

La relación de interacción que se usó proporcionó buenos resultados pues considera la combinación dinámica entre el momento flexionante y la tensión efectiva.

La probabilidad de falla por curvatura es mucho menor que la probabilidad de falla por momento flexionante y tensión efectiva, en otras palabras, es más probable que el cable falle por la combinación del momento flexionante y la tensión efectiva que por la curvatura.

El análisis de sensibilidad de las variables aleatorias que influyen en el índice de confiabilidad es muy interesante pues en algunos casos es posible reducir el número de variables aleatorias haciendo deterministas aquellas con menor sensibilidad.

El intervalo de la probabilidad de falla de los márgenes de seguridad ecuación (5-33) y ecuación (5-34) es muy amplio por lo que se recomienda para futuros trabajos en donde se analicen sistemas en paralelo el uso de la frontera de Quek y Ang (1986).

Los periodos naturales de vibrar obtenidos de realizar el análisis modal están lejanos a los periodos de oleaje predominantes en el GoM que oscilan entre los 5 a los 8 segundos.

Determinar una buena aproximación de la confiabilidad estructural depende en gran parte de la cantidad y calidad de información disponible de la estructura que se quiera analizar, por

ejemplo: tipos y propiedades de los materiales, geometrías, especificaciones del fabricante, metodologías de diseño, planos de diseño, planos *as built*, cargas residuales, por consecuencia, la probabilidad de falla tendrá mayor certeza o no, otros factores importantes que influyen son las herramientas que se empleen, ya sea, metodologías, reglamentos, códigos, algoritmos, *software*, además de todas las decisiones que el ingeniero consultor tome basándose en las incertidumbres que aún existan y no se puedan cubrir con la información disponible, por consecuencia, un análisis de confiabilidad estructural no puede ser juzgado como correcto e incorrecto sino como una aproximación basada en información encontrada y/o proporcionada.

La metodología y el proceso de análisis de confiabilidad mostrados en este trabajo puede extrapolarse y ampliarse para cualquier estructura en la que se desee obtener la probabilidad de falla, en resumen y de forma general se recomienda lo siguiente;

Definir el estado límite que se desea analizar; ALS, FLS, SLS y/o ULS, así como la normatividad específica a seguir para verificar que la estructura no rebese dicho estado límite analizado, es decir revisar que el caso de estudio cumpla con el estado límite para el que fue diseñado. Esta es una de las principales restricciones al momento de realizar el análisis de confiabilidad de alguna estructura ya diseñada y construida, pues no es tan sencillo modificar sus características físicas reales (aumentar su resistencia), contrario al diseño por confiabilidad en la que inicialmente se plantea una probabilidad de falla (asociado a un estado límite) que la estructura no debe rebasar y así se obtienen la resistencia que debe cumplir.

Obtener toda la información posible de la estructura y si es necesario realizar estudios de campo y laboratorio para obtener la resistencia de los materiales, así como sus características. Esta parte es fundamental para obtener menos incertidumbres en el cálculo de la probabilidad de falla, ante menos incertidumbre mayor certidumbre en los resultados.

Definir el tipo de análisis que más se asemeje al comportamiento real de la estructura que se desea analizar, es decir un análisis estático, cuasi estático o dinámico (en el dominio del tiempo o de la frecuencia), y resolverlo, preferentemente, con el *software* específico que simule de la mejor manera el comportamiento, esto nos dará resultados de las respuestas más fidedignos.

Las futuras líneas de investigación se deben enfocar en realizar un análisis SRA para los estados límites ALS, FLS y SLS, con las configuraciones *Lazy-S* y *Steep Wave*, así como a la calibración de factores de seguridad tomando en cuenta todas las variables ambientales. También es muy importante trabajar mano a mano con las empresas que fabrican cables umbilicales ya que la información disponible muchas veces no es suficiente para obtener buenos resultados.

GLOSARIO

Aker Solutions. Empresa trasnacional que fabrica productos, sistemas y servicios para la industria mundial del gas y el petróleo.

Tensión efectiva. Es la fuerza axial que se presenta en un cable umbilical o *risers* considerando las contribuciones de las presiones externas e internas.

Análisis global. Análisis de todo el cable umbilical.

As-built. Planos finales de como quedo construida una obra. Registro final detallado de un proyecto culminado.

Redundancia. Es la capacidad de un componente o sistema para mantener o restaurar su función cuando se produce una falla. La redundancia se puede lograr, por ejemplo, mediante la instalación de más unidades o elementos para restringir las cargas, o por medios alternativos para realizar una función.

REFERENCIAS

Tesis

Andersson, C. (2014). "*Rigid Pipelay Curve Stability*". Tesis de maestría. Norwegian University of Science and Technology.

Cisneros, F. (2018). "*Análisis de Estabilidad e Hidrodinámicos de Sistemas Flotantes de Producción Tipo FPSO*". Tesis de maestría. Universidad Nacional Autónoma de México.

Fraile, A. (1997). "*Fiabilidad en Obras Subterráneas*". Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid.

Finstad, M. (2017). "*Torsion instability of Dynamic Cables during Installation*". Norwegian University of Science and Technology. Tesis de maestría.

Godoy, O. (2010). "*Análisis Dinámico de Líneas de Amarre a Base de Poliéster para Sistemas Flotantes de Producción en Aguas Profundas*". Tesis de licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México.

Hovde, M. (2017). "*Electromagnetic modelling of power umbilical system*". Tesis de maestría. Norwegian University of Life Sciences. 2017.

Karimi, M. (2012). "*Installation of Steel Pipelines and Flexible Pipelines in Sideway Current*". Tesis de maestría. University of Stavanger.

Lu, X. (2013). "*Dynamic Response of Flexible Pipes During Installation*". Tesis de maestría. Norwegian University of Science and Technology.

Mohammad, S. (2014). "*Snaking Behavior of Umbilicals*". Tesis de maestría. Norwegian University of Science and Technology.

Pérez, R. (2018). "*Método de cuadratización equivalente estocástica para el análisis de confiabilidad del estado límite de colapso progresivo de plataformas de piernas atirantadas*". Tesis doctoral. UNAM

Rudolf, P. (2012). "*Advancing Reliability Information for Wave Energy Converters*". Tesis doctoral. University of EXTER.

Suñé, D. (2008). "*Análise de Confiabilidade Estrutural de Cabos Umbilicais*". Tesis de maestría. Escola Politécnica da Universidade de Sao Paulo, Brazil.

Thorsen, S. (2012). "*Conceptual Design and Review of Open Plet System*". Tesis de maestría. University of Stavanger.

Tinoco, S. (2014). "*Análisis sobre la estrategia de explotación de hidrocarburos del Proyecto Área Perdido*". Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México.

Vázquez H. (2004). "*Metodologia de calibração de fatores parciais de segurança para projeto de linhas de ancoragem baseada em confiabilidade*". Tesis doctoral. COPPE/UFRJ, Brasil 2004.

Zárate, L. (2015). "*Validación de Corrientes Geostróficas en el Golfo de México*". Tesis de licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México.

Paper's

Alvim, R., Ribeiro, E., Labanca, E. y Veras, O. (2013). "*New Approach for Assessment of Flexible Risers Interference in Shallow Waters*". Proceedings of OMAE13. 32nd International Conference on *Offshore* Mechanics and Arctic Engineering. June 9-14, 2013, Nantes, France

Anderson, K. y O'Connor, M. (2012). "*The Evolution of Lazy-S Flexible Riser Configuration Design for Harsh Environments*". Proceedings of the ASME 2012 31st International Conference on Ocean, *Offshore* and Arctic Engineering. OMAE2012. July 1-6, 2012, Rio de Janeiro, Brazil.

Ang A.H-S y Tang W.H, (1984), "*Probability Concepts in Engineering Planning and Design. Volume I: Basic Principles*". John Wiley & Son.

Bryant, M. (1990). "*Umbilical failure-Mkchahishs amd avoidance*". Subsea Control Data Acquis. Technol. Exp. 22, 177.

Geovana P., Ilson P., Bianca C. y Segen F. (2018). "*Pipelines, risers and umbilicals failures: A literature review*". Ocean Engineering 148 (2018) 412–425.

Liu P.L. y Der Kiureghian A. (1986), "*Multivariate Distribution Models with Prescribed Marginals and Covariances*". Probabilistic Engineering Mechanics, 1986, Vol. 1, N°2, 105-112.

Martinez, M., Perdrizet, T. y Probyn, I. "*Development of 3D finite element model of umbilical systems for offshore application*".

Nataf, A. (1962). "*Determination des distribution dont les marges sont donnees*". CR Acad Sci 1962;225:42-3.

O. O. Ajayi , O. O. Aribike. (2015). "*Modelling and Simulation of Subsea Umbilical Dynamics: a Numerical Approach*". International Journal of Computer Techniques -- Volume 2 Issue 1, 2015.

Rosenblatt, M., (1952). "*Remarks on a multivariate transformation*". Ann. Math. Stat. 23, 470-472.

S. Sævik y J. K. Ø. Gjøsteen. (2012). "*Strength Analysis Modelling of Flexible Umbilical Members for Marine Structures*". Hindawi Publishing Corporation, Journal of Applied Mathematics, Volume 2012, Article ID 985349, 18 pages doi:10.1155/2012/985349.

Silva, F., Vázquez, A., Sagrilo, L. y Cuamatzi, R. (2005). "*The effect of some uncertainties associated to the environmental contour lines definition on the extreme response of an FPSO under hurricane conditions*". Applied Ocean Research (2005) 190-199.

Silva-González F.L. y Heredia-Zavoni E. (2007), "*Estimación de Hipersuperficies de Peligro Ambiental Mediante Distribuciones de Probabilidad Marginal*". XVI Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica. Ixtapa-Zihuatanejo, Guerrero.

Thies, P., Johanning, L., y Smith, G. (2011). "*Assessing mechanical loading regimes and fatigue life of marine power cables in marine energy applications*". CEMPS – College of Engineering, Mathematics and Physical Science, Renewable Energy Research Group, University of Exeter, Penryn, UK.

Yan, J., Lu, H., Lu, Q. y Yue, Q. (2014). "*Nonlinear Bending Stress Analysis on Dynamic Umbilical*". Proceedings of the ASME 2014 33rd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. OMAE2014. June 8-13, 2014, San Francisco, California, USA.

Yasseri, R., Yasseri, S. y Wang, B. (2014). "Integrity of Subsea Control Umbilical". Proceedings of the 34th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering June 8-13, 2014. Proceeding of OMAE2014, San Francisco, United State.

Libros

Bai, Yong & Bai, Qiang (2010). "Subsea Engineering Handbook". MA, USA: Elsevier Inc.

Delgado, G. (2009). "Tecnología WTSV: un sistema para la reducción de gases efecto invernadero durante la prueba de pozos en el mar".

Ditlevsen, O. y Madsen, H. (2005). "Structural Reliability Methods". Lyngby, Dinamarca: por Coastal, Maritime and Structural Engineering Department of Mechanical Engineering Technical University of Denmark.

Kumar, A., Ajit, S. y Rao, D. (2015). "Reliability and Safety Engineering". USA: Springer.

Quek, S.T. y Ang, A.H.-S. "Structural System Reliability by the Method of Stable Configuration, Civil Series". SRS 529. University of Illinois at Urbana-Champaign, (1986).

Silva, R. (2005). "Análisis y Descripción Estadística del Oleaje". Ciudad de México: ISBN 970-32-2813-5.

Wilson, J. (2003). "Dynamics of offshore structures". New Jersey, USA: John Wiley & Sons. Inc.

Revistas

Barton, C., Hambling, H., Albaugh, E., Mahlstedt, B. y Davis, D. (2017, Mayo). 2017 Deepwater Solutions & Records for Concept Selection. *Offshore Magazine*. Poster 129.

C- Ray Medina, Inc. (2016, Abril). 2016 Survey of Offshore Non-Chemical Flow Assurance Solutions. *Offshore Magazine*. Poster 124.

Davis, D. y Albaugh, K. (2017). *México 2017 Oil & Gas Concession Map*. *Offshore Magazine*.

Hambling, H., Barton, C., Kurt, E., Mahlstedt, B., y Davis, D. (2016, Mayo). 2016 Deepwater Solutions & Records for Concept Selection. *Offshore Magazine*. Poster 125.

Hambling, H., Barton, C., Kurt, E., Mahlstedt, B., y Davis, D. (2016, Mayo). *2016 Worldwide Survey of Floating Production, Storage and Offloading (FPSO) Units*. *Offshore Magazine*. Poster 126.

Hambling, H., Barton, C., Kurt, E., Mahlstedt, B., y Davis, D. (2017, Agosto). *2017 Worldwide Survey of Floating Production, Storage and Offloading (FPSO) Units*. *Offshore Magazine*. Poster 130.

Jones, C. (2016, Marzo). *2016 Worldwide Survey of Subsea Processing: Separation, Compression, and Pumping System*. *Offshore Magazine*. Poster 123.

Moon, T. (2016, Noviembre). *2016 Worldwide Survey of Heavy Lift Vessels*. *Offshore Magazine*. Poster 127.

2016 The Gulf of Mexico. *Offshore Magazine*.

2017 The Gulf of Mexico. *Offshore Magazine*.

Reportes

Matrisk, *Reliability analysis for flexible risers ULS, Reliability analysis and code calibration – examples*.

Normas

API, Specification for Unbonded Flexible Pipe – API Specification J17 (2002). American Petroleum Institute.

API, Subsea Production System Reliability, Technical Risk & Integrity Management – API-RP-17N (2016). American Petroleum Institute.

API-RP-2SK (2005). "Recommended practice for Design and Analysis of Stationkeeping Systems for Floating Structures". 3rd Edition. American Petroleum Institute, (2005).

BS 5760-4:2003 (2003). Reliability of systems, equipment and components. Guide to the specification of dependability requirements. Standard, British Standards Institution, BSI.

Det Norske Veritas, DNV-OS-F101 (2017) Submarine Pipeline Systems, Oslo, DNV Standards.

Det Norske Veritas, DNVGL-ST-F201 (2018) Dynamic risers, Oslo, DNV Standards.

Det Norske Veritas, DNVGL-RP-F401 (2017) Electrical power cables in subsea applications, Oslo, DNV Recommended practice.

Det Norske Veritas, DNVGL-RP-C211 (1992) Structural reliability analysis, Oslo, DNV Recommended practice.

International Standards Organization, Petroleum and Natural Gas Industries, Design and Operation of Subsea Production Systems, Part 5: Subsea Umbilicals, ISO 13628-5, (2009).

ANEXO DE CONFIABILIDAD

Numerical Results (Resultados numéricos)

```
-----
Job name ..... :
Failure criterion no. :      1
Comment : No commen
Transformation type   : Nataf
Optimization algorithm: NLPQL
Date(dd.mm.yyyy) .... :
Time(hh:mm) ..... :
Comrel-TI, (Version 10), Copyright: RCP GmbH (1989-2018)
-----
```

Defined in State Functions Window for Symbolic Processor:

```
FLIM(1)=1-(((1519.76+0.18*Hs+0.17*Hs*Hs-22.87*Tp-0.27*Hs*Tp+0.88*Tp*Tp)/(M))+(((94521.20+20790.20*Hs-395.43*Hs*Hs+3136.03*Tp-878.78*Hs*Tp+176.43*Tp*Tp)/(TE))^2))^2)
```

```
-----
*****
Check Stochastic Model for COMREL-TI
No.of basic variables: NBV =      4
*****
```

```
-----
Variable: M          ; No. on X-vector =  1
Comment : Momento
Distribution Type..... : Lognormal (3)
Form of Input..... : Mean & Std.Dev. (0)
Mean value..... = 5137. ( 0.5137000000000000E+04)
Standard deviation..... = 771.0 ( 0.7710000000000000E+03)
Coefficient of Variation.. = 0.1501 ( 0.150087599766401E+00)
Distr.Param.no.1 : xi = 5080. ( 0.508010074257371E+04)
Distr.Param.no.2 : delta = 0.1493 ( 0.149252530136539E+00)
-----
```

```
-----
Variable: TE        ; No. on X-vector =  2
Comment : Tension Efectiva
Distribution Type..... : Lognormal (3)
Form of Input..... : Mean & Std.Dev. (0)
Mean value..... = 7.5129E+04 ( 0.7512900000000000E+05)
Standard deviation..... = 1.1269E+04 ( 0.1126900000000000E+05)
Coefficient of Variation.. = 0.1500 ( 0.149995341346218E+00)
Distr.Param.no.1 : xi = 7.4298E+04 ( 0.742978500305890E+05)
Distr.Param.no.2 : delta = 0.1492 ( 0.149161798436890E+00)
-----
```

```
-----
Variable: Tp        ; No. on X-vector =  3
Comment : Periodo
Distribution Type..... : Lognormal (3)
Form of Input..... : Dist.Parameters (1)
Mean value..... = 2.366 ( 0.236593290740872E+01)
Standard deviation..... = 0.3774 ( 0.377367952358858E+00)
Coefficient of Variation.. = 0.1595 ( 0.159500698932401E+00)
Distr.Param.no.1 : xi = 2.336 ( 0.2336400000000000E+01)
Distr.Param.no.2 : delta = 0.1585 ( 0.1585000000000000E+00)
-----
```

```
-----
Variable: Hs        ; No. on X-vector =  4
Comment : Altura de ola significativa
Distribution Type..... : Weibull (min) (9)
-----
```

```

Form of Input..... : Mean & Std.Dev. (0)
Mean value..... = 5.942 ( 0.594200000000000E+01)
Standard deviation..... = 0.7884 ( 0.788380000000000E+00)
Coefficient of Variation.. = 0.1327 ( 0.132679232581622E+00)
Distr.Param.no.1 : w = 5.899 ( 0.589944034130404E+01)
Distr.Param.no.2 : k = 0.8800 ( 0.880014844210809E+00)
Distr.Param.no.3 : tau = 5.250 ( 0.525000000000000E+01)
    
```

```

-----Correlations of variables on input to Nataf-Transformation -----
1.000
0.000 1.000
0.000 0.000 1.000
0.000 0.000 0.499 1.000
    
```

```

-----Equivalent correlation matrix for Nataf-Transformation -----
1.000
0.000 1.000
0.000 0.000 1.000
0.000 0.000 0.556 1.000
    
```

```

-----Cholesky decomposition of correlation matrix f. UtoX transf.-----
1.000
0.000 1.000
0.000 0.000 1.000
0.000 0.000 0.556 0.831
    
```

```

(Lower bounds on U-space variables)
(M ; 1; -30.00 ) (TE ; 2; -30.00 )
(Tp ; 3; -30.00 ) (Hs ; 4; -30.00 )
    
```

```

----- U-start as given by user -----
(M ; 1; 0.000 ) (TE ; 2; 0.000 )
(Tp ; 3; 0.000 ) (Hs ; 4; 0.000 )
    
```

```

----- X-start computed from U-start -----
(M ; 1; 5080. ) (TE ; 2; 0.7430E+05)
(Tp ; 3; 2.336 ) (Hs ; 4; 5.678 )
    
```

```

(Upper bounds on U-space variables)
(M ; 1; 30.00 ) (TE ; 2; 30.00 )
(Tp ; 3; 30.00 ) (Hs ; 4; 30.00 )
    
```

```

Echo of Control Switches (integer parameters) for this run :
IMETH , IALFA , NSIMUL, IUDEF , IGRFL ,MAXIT1, MAXIT2
2 2 0 1 0 50 50
    
```

```

Echo of Control Constants (real parameters) for this run :
EPSCON=1.00E-03, SMU=0.10, SIMSTA=1.000000
SCALing constant (set by COMREL) = 0.9099
    
```

```

***** RESULTS: *****
First-Order reliability index : (FORMBE) = 2.733
Corresponding approximate prob.of failure = 3.1374E-03
    
```

```

-----
Scaled State-Function value at x-(u-*)= -0.5106E-06
and Vector u-* (beta-point) :
(M ; 1; -0.1646 ) (TE ; 2; -0.7784 )
(Tp ; 3; 1.317 ) (Hs ; 4; 2.259 )
Normalized U-space gradient (alfa-U) with norm = 1.619 :
(M ; 1; 6.0141E-02) (TE ; 2; 0.2848 )
(Tp ; 3; -0.4818 ) (Hs ; 4; -0.8265 )
Normalized Representative alfa-values with norm = 1.108 :
(M ; 1; 5.4334E-02) (TE ; 2; 0.2569 )
(Tp ; 3; -0.4347 ) (Hs ; 4; -0.8614 )
    
```

```

-----
Solution in Basic- (X-) space (x-*):
(M ; 1; 4957. ) (TE ; 2; 6.6153E+04)
(Tp ; 3; 2.879 ) (Hs ; 4; 9.661 )
Gradient in Basic- (X-) space (scaled by 1/SCAL, see above):
(M ; 1; 1.3162E-04) (TE ; 2; 4.6727E-05)
(Tp ; 3; 0.2508 ) (Hs ; 4; -0.5930 )
    
```

 Constant Parameters (PVEC):

Statistics after beta-point search
 Gradient evaluations : 15
 Calls of state-function : 79

Influence of Distribution Parameters of Basic Variables on beta :
 Part one: Sensitivities of Distribution Parameters.

(Name; No.on X-vector; Sensitivity)
 For Distr. Param. #1 (=row on matrix VP):
 (M ; 1; 7.9319E-05) (TE ; 2; 2.5696E-05)
 (Tp ; 3; 0.1908) (Hs ; 4; -2.487)
 For Distr. Param. #2 (=row on matrix VP):
 (M ; 1; -6.6328E-02) (TE ; 2; -1.486)
 (Tp ; 3; 0.5871) (Hs ; 4; 3.515)
 For Distr. Param. #3 (=row on matrix VP):
 (M ; 1; 0.000) (TE ; 2; 0.000)
 (Tp ; 3; 0.000) (Hs ; 4; 2.121)
 For Distr. Param. #4 (=row on matrix VP):
 (M ; 1; 0.000) (TE ; 2; 0.000)
 (Tp ; 3; 0.000) (Hs ; 4; 0.000)

Part two: Elasticities of Distribution Parameters.
 (Name; No.on X-vector; Elasticity = %-change in beta)

For Distr. Param. #1 (=row on matrix VP):
 (M ; 1; 0.1474) (TE ; 2; 0.6985)
 (Tp ; 3; 0.1631) (Hs ; 4; -5.369)
 For Distr. Param. #2 (=row on matrix VP):
 (M ; 1; -3.6221E-03) (TE ; 2; -8.1107E-02)
 (Tp ; 3; 3.4049E-02) (Hs ; 4; 1.132)
 For Distr. Param. #3 (=row on matrix VP):
 (M ; 1; 0.000) (TE ; 2; 0.000)
 (Tp ; 3; 0.000) (Hs ; 4; 4.074)
 For Distr. Param. #4 (=row on matrix VP):
 (M ; 1; 0.000) (TE ; 2; 0.000)
 (Tp ; 3; 0.000) (Hs ; 4; 0.000)

Influence of Expectations of Basic Variables on beta :
 (Name; No.on X-vector; Elasticity = %-change in beta)
 (M ; 1; 0.1542) (TE ; 2; 0.7930)
 (Tp ; 3; 0.1340) (Hs ; 4; 1.669)

Influence of Std.Deviations of Basic Variables on beta :
 (Name; No.on X-vector; Elasticity = %-change in beta)
 (M ; 1; -6.8495E-03) (TE ; 2; -9.5660E-02)
 (Tp ; 3; 2.9544E-02) (Hs ; 4; -0.7422)

----- Second-Order Improvement : -----
 radii of curvature in U-space :
 -31.784 -40.629 80.413

----- Results of Second-Order improvement -----
 Second-Order reliability index = 2.754
 Corresponding prob. of failure = 2.94740E-03

Partial Safety Factors: Equival. x-* / Characteristic Value
 Basic Variable, Equival. x-* , Charact. Value, Part.Safety Fact.
 (M : 1) 4956.08 5137.00 0.965
 (TE : 2) 66096.6 75129.0 0.880
 (Tp : 3) 2.88319 2.36593 1.219
 (Hs : 4) 9.71427 5.94200 1.635

----- Statistics after COMREL-TI -----
 State Function calls = 94
 State Funct. gradient evaluations = 15
 Total computation time (CPU-secs.)= 0.05

```
The error indicator (IER) was = 0  
*****
```

Numerical Results (Resultados numéricos)

```
-----
Job name ..... :
Failure criterion no. :      1
Comment : No commen
Transformation type  : Nataf
Optimization algorithm: NLPQL
Date(dd.mm.yyyy) .... :
Time(hh:mm) ..... :
Comrel-TI, (Version 10), Copyright: RCP GmbH (1989-2018)
-----
```

```
-----
Defined in State Functions Window for Symbolic Processor:
```

```
FLIM(1)=k-0.045
-----
```

```
*****
Check Stochastic Model for COMREL-TI
No.of basic variables: NBV =      1
*****
```

```
Variable: k          ; No. on X-vector = 1
Comment : Curvatura
Distribution Type..... : Lognormal (3)
Form of Input..... : Mean & Std.Dev. (0)
Mean value..... = 0.1190 ( 0.119000000000000E+00)
Standard deviation..... = 1.7833E-02 ( 0.178330000000000E-01)
Coefficient of Variation.. = 0.1499 ( 0.149857142857143E+00)
Distr.Param.no.1 : xi = 0.1177 ( 0.117685891190398E+00)
Distr.Param.no.2 : delta = 0.1490 ( 0.149025883457124E+00)
-----
```

```
(Lower bounds on U-space variables)
(k ; 1; -30.00 )
```

```
----- U-start as given by user -----
(k ; 1; 0.000 )
```

```
---- X-start computed from U-start ----
(k ; 1; 0.1177 )
```

```
(Upper bounds on U-space variables)
(k ; 1; 30.00 )
-----
```

```
Echo of Control Switches (integer parameters) for this run :
  IMETH , IALFA , NSIMUL, IUDEF , IGRFL ,MAXIT1, MAXIT2
    2      2      0      1      0      50      50
Echo of Control Constants (real parameters) for this run :
  EPSCON=1.00E-03, SMU=0.10, SIMSTA=1.000000
  SCALing constant (set by COMREL) = 0.7269E-01
```

```
***** RESULTS: *****
First-Order reliability index : (FORMBE) = 6.451
Corresponding approximate prob.of failure = 5.5849E-11
-----
```

```
Scaled State-Function value at x-*(u-*)= 0.5827E-06
and Vector u-* (beta-point) :
(k ; 1; -6.451 )
Normalized U-space gradient (alfa-U) with norm = 0.9226E-01 :
(k ; 1; 1.000 )
Normalized Representative alfa-values with norm = 1.000 :
(k ; 1; 1.000 )
```

```
-----
Solution in Basic- (X-) space (x-*):
(k      ; 1; 4.5000E-02)
Gradient in Basic- (X-) space (scaled by 1/SCAL, see above):
(k      ; 1; 13.76   )
-----
```

```
Constant Parameters (PVEC):
-----
```

```
Statistics after beta-point search
Gradient evaluations : 5
Calls of state-function : 10
-----
```

```
Influence of Distribution Parameters of Basic Variables on beta :
Part one: Sensitivities of Distribution Parameters.
(Name; No.on X-vector; Sensitivity)
For Distr. Param. #1 (=row on matrix VP):
(k      ; 1; 57.02   )
For Distr. Param. #2 (=row on matrix VP):
(k      ; 1; -43.28  )
For Distr. Param. #3 (=row on matrix VP):
(k      ; 1; 0.000   )
For Distr. Param. #4 (=row on matrix VP):
(k      ; 1; 0.000   )
Part two: Elasticities of Distribution Parameters.
(Name; No.on X-vector; Elasticity = %-change in beta)
For Distr. Param. #1 (=row on matrix VP):
(k      ; 1; 1.040   )
For Distr. Param. #2 (=row on matrix VP):
(k      ; 1; -0.9999  )
For Distr. Param. #3 (=row on matrix VP):
(k      ; 1; 0.000   )
For Distr. Param. #4 (=row on matrix VP):
(k      ; 1; 0.000   )

Influence of Expectations of Basic Variables on beta :
(Name; No.on X-vector; Elasticity = %-change in beta)
(k      ; 1; 2.039   )

Influence of Std.Deviations of Basic Variables on beta :
(Name; No.on X-vector; Elasticity = %-change in beta)
(k      ; 1; -1.012  )
-----
```

```
-----
Partial Safety Factors: Equival. x-* / Characteristic Value
Basic Variable, Equival. x-* , Charact. Value, Part.Safety Fact.
(k      : 1) 0.450000E-01 0.119000 0.378
-----
```

```
----- Statistics after COMREL-TI -----
State Function calls = 11
State Funct. gradient evaluations = 5
Total computation time (CPU-secs.)= 0.02
The error indicator (IER) was = 0
*****
```