
Evaluación estructural de plataformas marinas mediante análisis de riesgo y confiabilidad

Ramos-Sánchez, L.^{1*}, Silva-González, F. L.², Hernández-Contreras, M. A.¹,
Silva-Ortega, M.¹, Rosas-Huerta, E. D.¹ y Hernández-Hernández, J.¹

1 Maestría en Ingeniería Aplicada, Facultad de Ingeniería de la Construcción y el Hábitat, Universidad Veracruzana. Fraccionamiento Costa Verde, C.p. 94294 Boca del Río, Veracruz-Llave, México.

2 Instituto Mexicano del Petróleo, Eje central Lázaro Cárdenas Norte #152. Col. San Bartolo Atepehuacan, Delegación Gustavo A. Madero.

Cd. De México Cp. 07730.

* lilirs0926@gmail.com



Abstract

Risk analysis and structural reliability are presented in the design and evaluation phase of marine structures. The evaluation refers to the case of existing platforms where for some reason it is considered necessary to carry out a review and diagnosis of their integrity. The reasons for conducting an evaluation vary. It can be a change in the acting loads because of the incorporation of equipment in the platform, damages reported after a high intensity environmental event, or a change in the service provided by the structure. The decision-making consists in selecting the required level of safety and the corresponding factors for the design or evaluation of the structures. That is why this article depicts the factors to be considered to get an adequate structural reliability and do not produce price collapse for future offshore platform designs and have an adequate safety factor to be examined in the design of the structure.

Keywords: structural reliability, probability of failure, marine platforms, structural evaluation of platform and total expected cost.

Resumen

El análisis de riesgo y confiabilidad estructural se presenta en la fase de desarrollo de diseño y evaluación de estructuras marinas. La fase de diseño se refiere al desarrollo detallado del proyecto donde se presta atención a cada característica que asegure la confiabilidad de la estructura, mientras que la evaluación se refiere al caso de estructuras marinas existentes en donde por alguna razón se considera necesario efectuar una inspección de su integridad y generar un diagnóstico que asegure la confiabilidad estructural. Entre las razones para realizar dicho diagnóstico se encuentra: un cambio en las cargas actuantes que son producto de la adición de equipo en la plataforma, daño reportado después de un evento ambiental de gran intensidad o un cambio en el servicio que brinda la estructura. Por lo tanto se presenta un problema en la toma de decisión, el cual consiste en seleccionar el nivel de seguridad adecuado y los correspondientes factores para el diseño o evaluación de las estructuras.

Es por eso por lo que este artículo se presenta como una guía para los factores que se deben de considerar en la evaluación de estructuras marinas y así garantizar la seguridad de las plataformas marinas basada en la relación de costo y falla. Presentando los factores que se deben considerar para obtener una confiabilidad estructural adecuada y no generar costos de colapsos para futuros diseños de plataformas marinas, así como tener un factor de seguridad apto que sea considerado en el diseño de la estructura a través de una evaluación estructural.

Palabras clave: Confiabilidad estructural, probabilidad de falla, plataformas marinas, evaluación de plataformas y costo total esperado.

La confiabilidad de una estructura es la capacidad de cumplir con su propósito de diseño durante un tiempo específico. En el sentido menos amplio, es la probabilidad de que una estructura falle para su estado límite para el cual se ha diseñado durante un periodo de referencia. Mientras que la probabilidad de falla se origina por fluctuaciones de las cargas, variaciones de las propiedades de los materiales; la incertidumbre de los modelos para el análisis generan una probabilidad de que un sistema no se comporte tal como fue proyectado.

1. Incertidumbre aleatoria: incertidumbre física e inherente, la cual no puede reducirse.
2. Incertidumbre epistémica: es la que se relaciona con el conocimiento de la cantidad de información. Existen tres tipos:
 - 2.1 Incertidumbre estadística: se cuenta con información limitada.
 - 2.2 Incertidumbre de modelado: imperfecciones, idealizaciones en el modelo tanto de comportamiento físico como probabilístico e hipótesis.
 - 2.3 Incertidumbre de medición: imperfección de instrumentos que incluye un error sistemático y un error aleatorio asociado con la precisión de la medición.

Un ingeniero en área de estructuras debe de tomar decisiones a lo largo de la vida del servicio de una estructura marina; estas decisiones son relacionadas con los conceptos de confiabilidad estructural, en donde se debe de tener en cuenta la probabilidad de falla y saber qué tipo de incertidumbres se presentan en el diseño, así como los niveles de seguridad. [1] Un ejemplo que se presenta en la toma de decisiones se encuentra en los factores de seguridad para el diseño de estructuras marinas o para su revisión ante la integridad mecánica de las estructuras ya existentes o las políticas de mantenimiento que permitan garantizar que la estructura opere en condiciones apropiadas de seguridad.

Estas decisiones se deben considerar en los ambientes que sean inapropiados para la seguridad ya que se relaciona con la incertidumbre. Estos peligros pueden ser en parte aleatoria o inherentes a los fenómenos naturales, y otra parte puede ser epistémica, debido a que la incertidumbre se encuentra en gran parte relacionada con la resistencia de los materiales, desde los que se presentan con el uso de modelos estructurales hasta los modelos constitutivos de los materiales.

Pero ¿por qué es importante el análisis de riesgo y confiabilidad en el área de estructuras? Es importante debido a que la mayoría de las ocasiones, las decisiones sobre seguridad tienen impacto económico. Realizar el diseño de una estructura para cierto nivel de seguridad conlleva un alto costo inicial con una baja probabilidad de tener costos de falla. Por lo contrario, realizar un diseño para un nivel de seguridad bajo conlleva tener un alto costo de fallas debido a un colapso estructural en el futuro. Este tipo de decisiones y consideraciones son las que se producen al realizar y darle la importancia al análisis de riesgo y confiabilidad estructural, ya que es una herramienta que permite tomar en cuenta las incertidumbres involucradas en estos problemas de decisión, así como encontrar relaciones óptimas entre el nivel de seguridad y costos.



Diseño de una estructura marina

El análisis de confiabilidad se considera desde el diseño de una plataforma marina, por lo tanto, el diseño abarca los siguientes puntos.

- **Identificación de las cargas significativas en una estructura**

La estructura de una plataforma marina tiene la función de soportar los equipos necesarios para las operaciones de perforación, proceso y auxiliares, necesarios para la extracción, adecuación y transporte de los hidrocarburos.

Las cargas más significativas para el diseño de plataformas son: el peso propio, oleaje, corrientes marinas, mareas, vientos, sismos y efectos dinámicos. Para tener en cuenta las cargas significativas que interactúan en una plataforma se realizan mediciones de la estructura para ajustar modelos matemáticos, mediante los cuales se determinan valores de parámetros metoceánicos como la altura y periodo de las olas, velocidades de las corrientes marinas y del viento, así como sus correspondientes direcciones. También se utilizan con huracanes o tormentas de invierno para diferentes periodos de retorno.

Evaluación estructural
de plataformas marinas
mediante análisis de
riesgo y confiabilidad



- **Vida útil**

La evaluación estructural de plataformas marinas ha adquirido gran relevancia debido a que con el mejoramiento de las técnicas de perforación, recuperación y operación de pozos petroleros la vida económicamente productiva de los yacimientos se ha incrementado. Por lo que se requiere que su vida útil se prolongue y se vuelva más exigente en los aspectos de seguridad de la instalación y la vida humana.

- **Modelación matemática en la etapa del diseño**

El propósito de la modelación matemática del diseño es lograr obtener plataformas marinas seguras, funcionales y económicas. Esto se logra generando modelos matemáticos para calcular y verificar los esfuerzos en cada miembro y conexión de las plataformas.

El modelo integra la forma geométrica de la estructura, propiedades de sus elementos, equipos, propiedades del suelo ya que se utiliza para simular la estructura bajo diversas condiciones de carga que se presentan durante la construcción, instalación y operación.

- **Fabricación e instalación**

Los módulos, la superestructura y el casco se fabrican y equipan en patios en posición vertical; se cargan, transportan e izan con ayuda de una embarcación desde la cual se va posicionando la estructura a su lugar de operación.

La figura 1 y figura 2 muestra la fabricación y el transporte de una plataforma.



Figura 1. Construcción de una plataforma marina.[2]



Figura 2. Transporte de la plataforma marina.[2]

La instalación de una estructura marina depende mucho del tipo de plataforma que sea, ya que existen estructuras fijas y estructuras móviles.

Las estructuras fijas son las que se seguran al suelo marino mediante incrustación en el lecho marino o por gravedad, mientras las estructuras flotantes son instaladas con un sistema de anclaje. Se componen de una estructura rígida flotante cuyos grados de libertad en posicionamiento, dependen del tipo de anclaje utilizado para fijarla al lecho marino. [3]

Las primeras plataformas marinas en aparecer fueron las plataformas fijas ya que los yacimientos abarcaban los 300 metros de profundidad y conforme se fueron descubriendo mayores yacimientos a mayor profundidad fue necesario el desarrollo de nuevas técnicas de exploración y se empezaron a diseñar plataformas flotantes.

En la figura 3 se muestran los diferentes tipos de plataformas marinas existentes.

PLATAFORMAS PETROLERAS

OFF SHORE

El petróleo y el gas natural "off-shore" (en el mar, alejado de la costa) se extraen mediante plataformas que también son utilizadas para la producción y almacenaje de hidrocarburos. Conoce los tipos existentes y su profundidad de perforación.

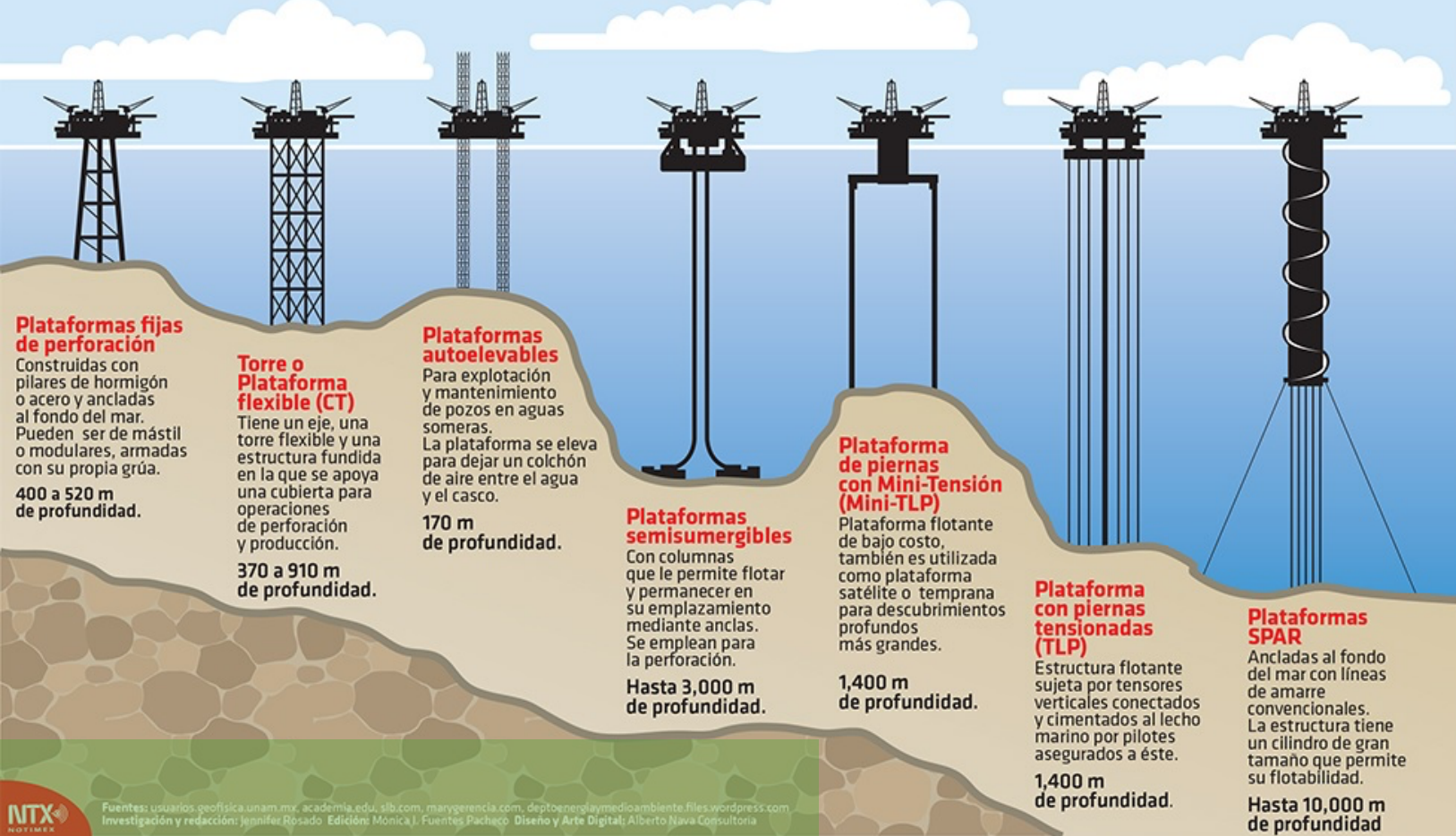


Figura 3. Tipos de plataformas marinas. [4]

Normas y aplicaciones

Para las plataformas marinas se aplican normas basadas en los conceptos de confiabilidad y riesgo. El método de Factores de Carga y Resistencia (LRFD) es un método de diseño determinista basado en confiabilidad estructural que en la práctica no requiere explícitamente de una descripción probabilística de las variables, sino que los factores de carga y resistencia se determinan con un nivel de confiabilidad aplicando el método de calibración, el cual usa métodos de confiabilidad avanzados; donde al finalizar el diseñador solamente aplica un conjunto de factores que amplifica sus cargas y disminuye sus resistencias.

Ejemplos de normas basadas en riesgo y confiabilidad en el área de estructuras implementadas por la casa clasificadora DNV-GL

Offshore Standard, DNV-OS-E301. Position Mooring, July 2018. Esta norma tiene como objetivo dar un nivel uniforme de seguridad para los sistemas de amarre, consistente en cadenas, cables de acero y cables de fibra. [5]

Recommended Practice, RP-E301. Design and Installation of Fluke Anchors in Clay, 2000.

Esta norma tiene como objetivo el aplicar el diseño geotécnico y la instalación de anclajes de platija en arcilla para sistemas de amarre de catenaria dando un nivel de seguridad de dicho sistema.[6]

Recommended Practice, DNV-RP-E302. Design and Installation of Plate Anchors in Clay, December 2002.

Al igual que la norma anterior tiene como objetivo como diseñar los sistemas de anclaje para satisfacer los requerimientos de seguridad. [7]

Recommended Practice, D N V - R P - E 3 0 3 . Geotechnical Design and Installation of Suction anchors in Clay, October 2005.

Es una parte más formal de la práctica recomendada en el sentido de que especifica los requisitos, en lugar de la orientación, con respecto a los cuales se cumplirán las normas de diseño y qué factores de seguridad parciales se utilizarán en el diseño de pilotes de succión. [8]

Instituto Americano del Petróleo

El Instituto Americano del Petróleo (API) es una organización de comercio que la comprenden empresas petroleras integradas y principalmente extractoras, y que trabaja en favor de las metas comunes de la industria del petróleo. Se basan en salvaguardar la vida humana y la afectación al medio ambiente sin tomar en cuenta el sector económico.[9]

Existen diferentes apartados y normas que se basan en estructuras costa afuera tanto fijas como móviles. Muchas de ellas consideran los diseños de factores de carga y resistencia.

Dando como factores de evaluación las diferentes situaciones y condiciones que se presentan en estructuras costa afuera [10], [11]:

- Adición de personal.
- Aumento significativo de equipo, tal cual exceda las cargas de diseño.
- Incremento significativo en la combinación de cargas ambientales más cargas de operación.
- Altura insuficiente de la primera cubierta sobre el nivel medio del mar.
- Daños significantes encontrados durante las inspecciones.

Los casos descritos anteriormente hablan del concepto significativo que se aplica a daños y que generan cambios que alteran el diseño original disminuyendo la resistencia de la plataforma o incrementando las cargas en más de 10% .

Sin embargo, las plataformas también se evalúan de acuerdo con su categoría de exposición a la cual le corresponde un criterio de evaluación y las categorías establecidas para la seguridad de la vida que son [12]:

- **Tripulada no evacuada** durante el evento ambiental considerado para su diseño.
- **Tripulada-evacuada** durante el evento ambiental considerado para su diseño.
- **No tripulada.**

Mientras que las categorías establecidas para la seguridad de la vida son:

- **Impacto ambiental significativo.**
- **Impacto ambiental insignificante.**

El impacto ambiental es causado cuando por el colapso de la estructura se derrama aceite o gas que estuviese almacenado en las cubiertas o circulando por los ductos instalados en la estructura. En el caso de ser una plataforma no tripulada-impacto ambiental insignificante, se le denomina plataforma de mínima consecuencia.[12]

Evaluación de estructuras marinas

Para realizar una evaluación debe recopilarse información suficiente del estado estructural general de la plataforma. Esta información es recopilada durante inspecciones programadas, aplicando diferentes niveles de inspección dependiendo del daño encontrado.

Tipos de evaluaciones

Durante la evaluación de las estructuras existen diferentes niveles de análisis de diferente

complejidad, al satisfacerse uno de ellos se considera que la estructura cumple con las condiciones necesarias para seguir operando.

Análisis simplificado de evaluación

El análisis simplificado tiene como propósito identificar de manera rápida el estado en el que se encuentre la estructura, la información estructural y de inspección disponible, así como las cargas utilizadas para el diseño de la plataforma. Los conceptos que se toman en cuenta en este análisis son:

- Causas que originan la evaluación.
- Categorización.
- Evaluación de las condiciones estructurales.
- Revisión de las bases de diseño

Se dice que si al aplicar un análisis simplificado se identifica que la plataforma en cuestión no tiene daños significantes, tiene una altura adecuada en su primera cubierta. De tal manera que el oleaje de tormenta no la golpee y no haya sufrido cambios significantes desde su diseño, se considera como aceptable para continuar en condiciones de servicio.

Análisis elástico estructural a nivel de diseño

Si una plataforma no cumple con el análisis simplificado, el segundo nivel consiste en un análisis elástico a nivel de diseño.

El análisis a nivel de diseño es similar al aplicado durante el diseño de plataformas nuevas. Además, se consideran todos los factores de seguridad y se utilizan los esfuerzos nominales en vez de los esfuerzos de fluencia.

Análisis de resistencia última

Si una plataforma no cumple con el análisis elástico a nivel de diseño, se podrá realizar un tercer análisis el cual consiste en un análisis de resistencia última. Este tipo de análisis puede ser efectuado empleando métodos elásticos o métodos inelásticos. El primer caso se aplica para verificar que las juntas y elementos no excedan su resistencia última e inclusive puede realizarse un análisis a nivel de diseño eliminando todos los factores de seguridad, tanto en cargas como en materiales. En el segundo caso se toma en cuenta el comportamiento no lineal de elementos en el modelo estructural, y la plataforma debe de ser capaz de soportar las cargas definidas de acuerdo con su categoría de exposición, sin colapsarse.

Análisis de costos

El análisis de costo se debe tomar en cuenta en la fase de evaluación ya que se considera una decisión importante para el diseño de futuras plataformas marinas. El cálculo del costo total esperado es la suma del costo inicial y el costo futuro ponderado por la probabilidad de colapso. [1], [12], [13]

El costo inicial abarca la suma de los costos asociados con la puesta en operación de la plataforma, como lo son:

- los costos de diseño,
- los costos de fabricación,
- instalación,
- arranque.

Mientras que el costo futuro se ve reflejado por los siguientes conceptos:

- el costo de reposición de la plataforma,
- incluyendo material, equipos y pozos (cuando corresponda),
- costos de mantenimiento e inspección,
- costos de falla.

El costo por producción diferida se trata de una variación que depende del año en que ocurra el colapso, el costo por pérdida o lesiones de vidas humanas, y otros costos los cuales abarcan daños al medio ambiente y multas por incumplimiento de contratos de comercialización de producción. [1], [13]

La pérdida por producción diferida es la que controla el costo futuro, un ejemplo de esto es cuando existen planes de contingencia y las estructuras marinas se pueden evacuar antes de que ocurra un evento extremo.

Cálculo de la confiabilidad estructural y probabilidad de falla en plataformas marinas

Es de relevancia que en el análisis de confiabilidad se deba de tomar en cuenta que al paso del tiempo las estructuras están expuestas al deterioro progresivo.

Un ejemplo de este daño acumulable es el causado por la fatiga que se produce por las cargas hidrodinámicas de oleaje operacional, trayendo como consecuencia la aparición de grietas en las juntas de la estructura, generando una acumulación de daño durante la vida de la plataforma con la propagación de nuevas grietas o crecimiento de estas. Esto ocasiona un deterioro de la capacidad estructural de la plataforma y trayendo un incremento en el riesgo de falla durante eventos extremos como lo son los huracanes.

Probabilidad de falla

Sea la probabilidad de falla anual de estructuras marinas para eventos máximos, P_a . La probabilidad de falla acumulada para t años, si se considera independencia estadística entre eventos máximo-anales, se puede calcular. [13]

$$P_F(t) = 1 - \prod_{j=1}^t [1 - P_a(j)] \quad (1)$$

Donde $P_a(j)$ es la probabilidad de falla anual en el año j . Si los valores de $P_a(j)$ son pequeños se puede aproximar la ecuación anterior como [11]:

$$P_F(t) \cong \sum_{j=1}^t P_a(j) \quad (2)$$

Si se considera que la estructura tiene N estados de daño independientes uno de otro (lo cual es conservador) en cada año, la probabilidad de falla anual en el año t será, $P_a(j)$:

$$P_a(t) = P_{a,0}P_{nd}(t) + \sum_{j=1}^N P_{a,j}P_{di}(t) \quad (3)$$

Donde:

- $P_{a,0}$: Probabilidad de falla anual sin daño (estructura intacta);

- $P_{nd}(t)$: Probabilidad de que la estructura este intacta en el año t .

- $P_{a,j}$: Probabilidad de falla anual dado el estado de daño j ;

- $P_{di}(t)$: Probabilidad de que el estado de daño j se represente en el año t ;

$$P_{nd}(t) = \sum_{i=1}^N (1 - P_{di}(t)) \quad (4)$$

Reemplazando la ecuación (3) en la ecuación (1).

$$P_F(t) = 1 - \prod_{j=1}^t \left[1 - \left(P_{a,0}P_{nd}(j) + \sum_{i=1}^N P_{a,i}P_{di}(j) \right) \right] \quad (5)$$

O de manera aproximada, si los valores de $P_a(j)$ son pequeños, de la ecuación 2:

$$P_F(t) \cong \sum_{j=1}^t \left[P_{a,0}P_{nd}(j) + \sum_{i=1}^N P_{a,i}P_{di}(j) \right] \quad (6)$$



Observamos que la evaluación de la probabilidad de falla acumulada requiere conocer la probabilidad de falla anual dado el estado de daño i , P_{ai} , y la probabilidad de que el estado de daño i se presente en el año t , $P_{ai}(t)$. Si los estados de daño se refieren a daño por fatiga estos estarán conformados por conjuntos de juntas con daño por fatiga. Una opción en el análisis es considerar cada estado de daño como aquel en el que una junta ha fallado por fatiga, es decir que el tamaño de la grieta ha alcanzado un tamaño crítico, por ejemplo, el espesor de los elementos tubulares. Por lo tanto, la probabilidad de que el estado de daño i se presente en el año t , $P_{ai}(t)$, se puede calcular mediante técnicas de confiabilidad usando modelos de mecánica de fractura. [13], [14]

Probabilidad condicional de falla

La probabilidad condicional de falla de una plataforma intacta o la probabilidad condicional de falla dado un estado de daño se evalúa mediante simulación de Monte Carlo donde se utiliza una función de estado límite global, $g(Z)$, en términos del cortante actuante y resistente en la base del jacket [12], [13] como se muestra en la ecuación (7):

$$g(Z) = \gamma_s JC - (\gamma_j Q_j(H) + \gamma_d Q_d(H) + Q_w) \quad (7)$$

Donde:

- Z: Vector de variables aleatorias,
- H: Altura de ola significativa máxima,
- JC: Cortante basal resistente del jacket,
- Q_j : Carga debida al oleaje y corriente sobre el jacket,
- Q_d : Carga debida al oleaje sobre la cubierta,
- Q_w : Carga debido al viento sobre la cubierta,
- γ_d : Sesgo de la carga de oleaje sobre la cubierta,
- γ_j : Sesgo de la carga de oleaje sobre el jacket.

Las variables involucradas en la función de estado límite habrán de corresponder al caso de la plataforma intacta o algún estado de daño. [14] La probabilidad de falla se puede calcular como:

$$P_f = Pr[g(Z) \leq 0] \quad (8)$$

Funciones en el estado límite

Altura de ola significativa

Para la altura de ola significativa se modela a través de una variable aleatoria extrema con distribución de Gumbel. [14] En la ecuación (9) se describe.

$$F_H(h) = \exp\{-\exp[-a(h - u)]\} \quad (9)$$

Los parámetros a y u de la distribución de Gumbel se determinan de análisis de valores extremos de registros estadísticos o información oceanográfica que es generada mediante modelos de reproducción histórica de tormentas para el sitio en que se encuentra la plataforma. Así, el análisis de resistencia última se efectúa bajo un perfil de carga de oleaje que se asocia con una altura de ola significativa extrema. Un criterio para la selección de dicha altura de ola es seleccionar aquella que corresponde a un periodo de retorno asociado con la probabilidad de falla admisible para la evaluación de la integridad estructural de la plataforma existente. [13], [14]

Carga de oleaje

Para el cálculo de la carga de oleaje y corriente sobre el jacket se utiliza la siguiente empírica en función de la altura de ola significativa máxima, H [13] como se describe en la ecuación (10).

$$Q_j = KH^a \quad (10)$$

Dónde:

El parámetro K depende del número de piernas de la plataforma,

El parámetro a es prácticamente independiente del número de piernas y varía entre 2 y 2.4.

Carga de viento

Mientras que para evaluar la carga del viento se emplea una función empírica que resulta de un ajuste de regresión en términos de la altura de ola [14]. En este caso el tipo de función que se usa un polinomio de cuarto grado que se describe en la ecuación (11).

$$Q_w = a.H^4 + b.H^3 + c.H^2 + d.H \quad (11)$$

Relación entre el costo total y la probabilidad de falla

La probabilidad de falla es aquella probabilidad en el que cortante basal actuante producto del viento, oleaje y corrientes marinas sea mayor que el cortante basal resistente. Es por eso que el colapso se refiere al acontecimiento de que alguna falla implique o genere la pérdida total de la estructura marina y sus equipos sobre la cubierta. Por lo tanto, la confiabilidad se calcula en términos de la probabilidad de que la estructura no colapse como se muestra en la ecuación (12).

$$P_f = \Phi(-\beta) \quad (12)$$

Donde Φ es la función de distribución normal estándar.

$\beta = \frac{\mu_M}{\sigma_M}$ Es la distancia de la recta de la falla al origen del sistema, conocido como el índice de confiabilidad de Cornell.

En la figura 4 se muestra el comportamiento del costo total esperado, relacionado con la probabilidad de falla ante los términos de decisión en el diseño [12]. Se muestra que el costo inicial va decreciendo con relación a la probabilidad de colapso. Por lo que se puede invertir en un costo inicial alto garantizando que haya una probabilidad de colapso pequeña, o se puede invertir muy poco al inicio, y así diseñar y construir una estructura con una alta probabilidad de colapso durante su servicio. Mientras que el costo futuro esperado se incrementa con la probabilidad de falla.

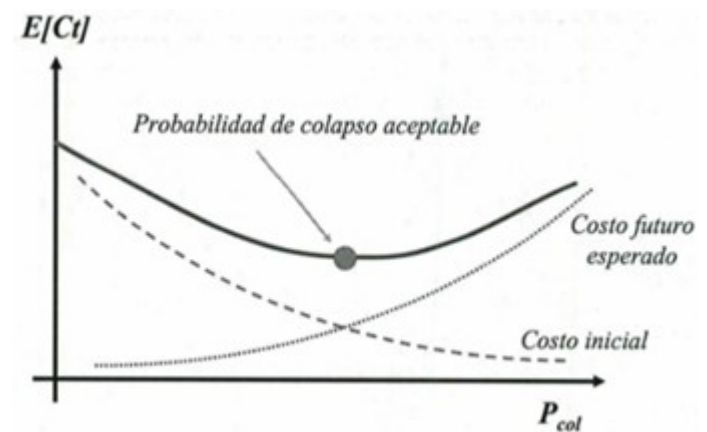


Figura 4. Costo inicial relacionado con la probabilidad de falla. [1]

En la ecuación (13) se observan todos los elementos para obtener el costo total.

$$E[C_t] = E[C_R] + E[(C_F)]$$

Donde:

- C_T : costos totales
- C_I : costos iniciales
- C_R : costos de mitigación del riesgo
- C_F : costos de falla
- $E[.]$: operador valor esperado

Los costos de mitigación de riesgo (reparación) son obtenidos con la ecuación (14):

$$E[C_{R,R}] = \sum_{i=1}^n C_{R,i} P_R(t_i) (1 - Pf(t_i)) \frac{1}{(1 + r_i)^{t_i}} \quad (14)$$

Donde:

- n : número total de reparaciones.
- t_i : tiempo en el que se efectúa la reparación i .
- $C_{R,i}$: costo de la reparación i .
- $P_R(t_i)$: probabilidad de ocurrencia de reparación i .

Los costos para la falla (en valor presente son obtenidos con la ecuación (15).

$$E[C_F] = \int_0^L C_{FE}(t) Pf(t) \text{Exp}(-rt) dt \quad (15)$$

Donde:

- $C_{FE}(t)$: costo asociado con la falla en el tiempo t .
- $Pf(t)$: probabilidad de falla por unidad de tiempo (anual).
- r : tasa neta de descuento o de interés.
- L : vida de servicio.

Sea el costo total esperado:

$$E[C_T] = C_{IR} + E[C_F] \quad (16)$$

Donde C_{IR} incluye los costos iniciales y de mitigación de riesgo el cual se modela como:

$$C_{IR} = C_0 - C_1 \log_{10}(Pf) \quad (17)$$

Y C_1 es el costo necesario para reducir la probabilidad de falla por un factor de 10.

Si se considera que la probabilidad de falla anual es constante y que la falla ocurre sólo una vez en la vida útil de la estructura y la falla es igualmente probable en cualquier entonces C_{FE} y Pf son constantes describiéndola en la ecuación (18):

$$E[C_F] = C_{FE} Pf V \quad (18)$$

Donde:

$$V = \frac{1 - \text{Exp}(-rL)}{r} \quad (19)$$

Por lo tanto:

$$E[C_T] = C_0 - C_1 \log_{10}(Pf) + C_{FE} Pf V \quad (20)$$

Y derivando con respecto de Pf e igualando a cero:

$$\frac{\partial}{\partial Pf} E[C_T] = -\frac{C_1}{Pf \ln(10)} C_{FE} V = 0 \quad (21)$$

Se obtiene la probabilidad de falla óptima.

$$Pf_o = \frac{C_1}{\ln(10) C_{FE} V} \quad (22)$$

El criterio de probabilidad de falla aceptable consiste en seleccionar aquella para la cual el costo total esperado es mínimo. Con la probabilidad de falla anual de la estructura, el costo total esperado se puede modelar como en la ecuación (23):

$$E(C_t) = C_i + C_f P_{col} V(r, T) \quad (23)$$

Donde:

- C_i : Costo inicial.

- C_f : Costo futuro equivalente. El costo futuro equivalente toma en cuenta la distribución de la probabilidad del tiempo en que ocurre el colapso, la duración de los trabajos de reposición de la plataforma, el perfil de producción y las posibles lesiones o pérdidas de vidas humanas.

- $V(r, T)$: Función de valor presente. Esta función modela la pérdida del valor del dinero con el tiempo y depende de la vida de servicio de la plataforma T y de la tasa neta de descuento r .

Evaluación de la integridad estructural de plataformas en el campo

La Dirección de Servicios de Ingeniería del Instituto de Petróleo (IMP) formuló el proyecto *Servicios de Integridad Estructural para las Plataformas Marinas del Golfo de México*, el cual tiene como objetivo definir acciones concretas y prioritarias para mitigar los riesgos críticos e integrar estrategias óptimas para el manejo del negocio a través de la evaluación de las condiciones de integridad mecánica estructural actual y futura de plataformas marinas de Pemex Exploración y Producción (PEP). [15]

El personal del IMP tendrá que considerar los siguientes puntos para la inspección:

- Evaluar el estado de salud y determinar los procedimientos que deberán seguir, de tal forma que se cumpla con los protocolos de salud y seguridad.
- Evaluación y optimización del sistema de protección catódica.
- Elaboración de planes de inspección.
- Retroalimentación de planes de inspección.
- Validación de planes de inspección.
- Evaluación de la integridad estructural de plataformas marinas fijas.
- Análisis de la extensión de vida útil estructural de plataformas marinas fijas.

En la figura 5 se muestran las actividades realizadas por los trabajadores del IMP

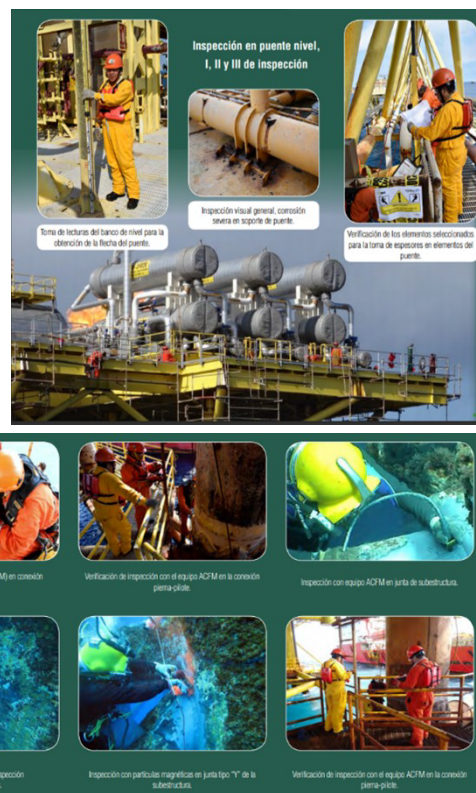


Figura 5. Puntos evaluados por el personal del IMP. [15]

Mientras que Servicios Estructurales Costa Afuera (SYCEC) ofrece el sistema de Pronóstico de Evaluación de Integridad Estructural de Plataformas Marinas “SiProEs”, la cual es una herramienta del estado del arte de tres áreas del conocimiento científico (dinámica de fluidos, mecánica estructural y tecnologías de la información), que permite a un operador petrolero contar con información en tiempo real del pronóstico del estado mecánico estructural de las plataformas costa afuera [16]

Consideraciones de medidas mitigantes

Cuando una plataforma ha sido evaluada y no cumple con los requerimientos definidos por alguno de los análisis mencionados anteriormente, será necesario aplicar medidas mitigantes para cumplir con el análisis de diseño o el de resistencia última. [12] Las medidas mitigantes son modificaciones estructurales o procedimientos de operación para la reducción de cargas, incremento en la resistencia de la plataforma o la reducción de consecuencias en caso de falla.

Las medidas mitigantes más comunes son:

1. Reducción de cargas

- Reducción de cargas gravitacionales.
- Reducción de fuerzas hidrodinámicas removiendo elementos no estructurales tales como atracaderos, defensas y crecimiento marino.

2. Reforzamiento de la plataforma

- Refuerzo local de la estructura.
- Refuerzo global de la estructura.
- Mejoramiento de la vida por fatiga.
- Reparación de daños existentes.

3. Reducción de consecuencias de operación

- Convertir a la plataforma a no tripulada.
- Estancia del personal únicamente durante el día.
- Incrementar los sistemas de seguridad para evitar descontroles.
- Evitar el almacenaje de materiales contaminantes a bordo.



Conclusión

La evaluación de plataformas existentes aplicando metodologías que se presentan en diversas normas como lo son API RP2A y PEMEX adaptadas al ámbito nacional, permiten tomar decisiones fundamentales desde el punto de vista técnico, repercutiendo también en el aspecto económico. Esto conduce a que las plataformas que han consumido gran parte de su vida útil, o que presentan daños o cambios significantes puedan continuar operando en condiciones seguras tanto para el personal como para el medio ambiente. [10], [11], [17]

La aplicación de este tipo de metodologías también permite que las plataformas sean certificables, cumpliendo con la normatividad internacional y que puedan enfrentarse a diversos riesgos salvaguardando la vida humana.[18]

Por lo que se concluye que es de suma importancia formular modelos matemáticos para obtener la confiabilidad estructural, ya que se puede administrar el riesgo desde la planeación, diseño y operación de la plataforma a través de evaluaciones de la confiabilidad del sistema (sin daño, en condiciones de daño y deterioro). El incluir el costo total esperado se relaciona con el deterioro o daño estructural acumulado con el tiempo, lo que permite la reducción de costos por inspecciones, reparaciones y fallas, y así no generar consecuencias como la interrupción de la producción, lesiones o pérdidas de vidas humanas, daños a la instalación, equipos y daños al medio ambiente.



Evaluación estructural
de plataformas marinas
mediante análisis de
riesgo y confiabilidad

Referencias

- [1] Heredia Z. E., "Análisis de Riesgo y Confiabilidad en la Ingeniería Estructural de Plataformas Marinas en México: Avances y Perspectivas, Instituto Mexicano del Petróleo, 2005.
- [2] Roca J. A., "ABB instala el más potente centro de energía eólica marina del mundo", El periódico de la energía (2015), Disponible: [ABB instala el más potente centro de energía eólica marina del mundo - El Periodico de la Energía I \(elperiodicodelaenergia.com\)](#)
- [3] Ageitos, S. A. "Sistemas de anclaje y posicionamiento de buques y plataformas offshore", tesis, Depto. náutica y transporte marítimo, Univ. De la Laguna, España, Isla de Tenerife, 2015.
- [4] Ecología Hoy, "Plataformas petroleras peligro para el ambiente", Disponible: [Plataformas petroleras peligro para el ambiente | Ecología Hoy \(ecologiahoy.net\)](#)
- [5] DNV-GL, "Position mooring", DNVGL-OS-E301, Offshore standards, julio 2018. Disponible: [DNVGL-OS-E301 Position mooring](#)
- [6] DNV-GL, "Design and Installation of Fluke Anchors in Clay", DNVGL-RP-E301, Offshore standards, 2000.
- [7] DNV-GL, "Design and Installation of Plate Anchors in Clay", DNV-RP-E302, Offshore standards, Diciembre 2002.
- [8] DNVGL, "Geotechnical design and Installation of Suction anchors in Clay", DNV-RP-E303, Offshore standards, Octubre 2005.
- [9] Instituto Americano del Petróleo (API), Glossary Terms, OPIS, 2020. Disponible: [Instituto Americano del petróleo \(API\) - OPIS Spanish \(opisnet.com\)](#)
- [10] API, "Recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore platforms" (API RP-2A), American Petroleum Institute twentieth edition, 1993.
- [11] PEMEX, "Diseño y Evaluación de Plataformas Marinas Fijas en la Sonda de Campeche", Norma de Referencia NRF-003-PEMEX-2000, Comité de Normalización de Petróleos Mexicanos y Organismos Subsidiarios, 2007.
- [12] Valle M. O., and Rodríguez S. E. "Evaluación Estructural de Plataformas Marinas para la Explotación de Hidrocarburos", Instituto Mexicano del Petróleo, Revista Ingeniería, 1996.
- [13] Heredia Z. E., Montes I. R., Inda D y Soriano A., "Análisis de Confiabilidad Global de Plataformas Marinas sometidas a daño por fatiga y aplicaciones a la inspección basada en riesgo, Instituto del petróleo, Sociedad Mexicana del Petróleo.
- [14] Montes R. y Heredia E. "A bayesian model for the probability distribution of fatigue damage in tubular joints' Journal of Offshore Mechanics and Artic Engineering, ASME, en prensa, 2004.
- [15] Instituto Mexicano del Petróleo (IMP), "Evaluación de la Integridad Estructural de Plataformas Marinas, 2020 Disponible: [Gaceta-279-om.pdf \(www.gob.mx\)](#)
- [16] Sistema de Pronóstico de Evaluación de Integridad Estructural de Plataformas Marinas, "Servicios Estructurales Costa Afuera", 2019. Disponible: [Sycec - Estructural](#)
- [17] Petróleos Mexicanos, "Comité de Normalización de Petróleos Mexicanos y Organismos Subsidiarios", Aviso de consulta pública de los proyectos de normas y referencias. 2007.
- [18] Martínez E., "Seguridad en plataformas marítimas", Junio 2021. Disponible: [SEGURIDAD EN PLATAFORMAS MARÍTIMAS \(seguridadenamerica.com.mx\)](#)

