

DETECCIÓN DE DAÑO EN RISERS DE ACERO EN CATENARIA EN AGUAS PROFUNDAS A PARTIR DE REGISTROS DE ACELERACIONES NUMERICAS

Victor F. Hernández Abraham, Instituto Politécnico Nacional (Estructuras), correo: vhernandez0902@ipn.mx
Ramsés Rodríguez Rocha, Instituto Politécnico Nacional (Estructuras), correo: rrodriguezr@ipn.mx
Faustino Pérez Guerrero, Instituto Mexicano del Petróleo (Programa explotación de campos en aguas profundas),
correo: fperezg@imp.mx
Rommel Burbano Bolaños, Instituto Mexicano del Petróleo (Programa de explotación de campos en aguas profundas), correo: rburbano@imp.mx
Francisco J. Rivero Ángeles, SEISMIC Ingeniería y Construcción, S.A de C.V (Señales), correo: f.rivero@seismic.mx

RESUMEN

Los sistemas de transporte de hidrocarburos necesitan programas de inspección de su integridad estructural que permitan un adecuado funcionamiento durante su vida de diseño. Si una falla estructural es detectada con anticipación durante los trabajos de inspección y monitoreo los costos por operación pueden ser reducidos considerablemente.

La metodología de Monitoreo de Salud Estructural (MSE) consiste en la adquisición continua de datos acerca del estado actual de la estructura sin requerir de una inspección visual. Con ello, se pueden tomar acciones anticipadas a la falla evitando consecuencias fatales. Estas consecuencias pueden estar asociadas con afectaciones humanas, contaminación del medio ambiente y pérdidas económicas.

Este trabajo presenta los resultados de detección de daño en dos modelos de risers de acero en catenaria (Steel Catenary Riser, SCR) en aguas profundas. El daño es simulado por la degradación de la rigidez del ducto en ciertas zonas susceptibles a falla. Se realizaron análisis con un software comercial que incorpora comportamiento no lineal. Se procesaron registros de aceleraciones, en varias localizaciones en la longitud del riser, utilizando el método de Descomposición en el Dominio de la Frecuencia para obtener parámetros modales. Los resultados obtenidos con la aplicación del método de Índice de Daño (Stubbs et. al, 1993) demuestran la viabilidad de la aplicación del MSE para detectar daño en SCR en aguas profundas.

MÉTODO DE DESCOMPOSICION EN EL DOMINIO DE LA FRECUENCIA (DDF)

Los parámetros modales de la respuesta dinámica del riser serán calculados usando el método de Descomposición en el Dominio de la Frecuencia (DDF) propuesto por Brincker et al. (2000) donde la relación entre la excitación desconocida $x(t)$ y la respuesta medida $y(t)$ puede ser expresada como sigue:

$$\Phi_{yy}(f) = H(f) \Phi_{xx}(f) \bar{H}(f)^T \quad (1)$$

Donde $G_{xx}(f)$ es la matriz de potencia espectral de la excitación de dimensión $r \times r$, r es el numero de registros entrantes; $G_{yy}(f)$ es la matriz de potencia espectral de la respuesta de dimensión $q \times q$, q es el numero de registros de respuesta. $[H(f)]$ es la matriz de la respuesta en función de la frecuencia de dimensión $q \times r$. La barra superior indica el complejo conjugado y T la transpuesta.

El primer paso usando el método DDF es para estimar la matriz de potencia espectral de la respuesta. Esta matriz calculada es llamada $[\hat{G}_{yy}(f)]$ y opera en frecuencias discretas $f=fp$, donde p es una seria discreta para cada dominio de frecuencia. $[\hat{G}_{yy}(f)]$ puede ser estimada como:

$$\hat{G}_{yy}(f) = \bar{Y}(f)^T \bar{X}(f) \quad (2)$$

Donde $[Y(f)]$ es la respuesta transformada en el dominio de la frecuencia para cada valor de frecuencia f . Subsecuentemente, la matriz de potencia espectral de la ec. (2) se descompone como:

$$\hat{G}_{yy}(f) = U_p S_p U_p^T \quad (3)$$

Donde $[U_p] = [\{u_{p1}\}, \{u_{p2}\}, \dots, \{u_{pn}\}]$ es una matriz que contiene vectores singulares o formas modales $\{u_{pk}\}$, y $[S_p]$ es una matriz diagonal compuesta de valores singulares s_{pk} . Entonces estos valores singulares son graficados con respecto a la frecuencia f y máximos valores son observados correspondiendo a las frecuencias de vibración del sistema.

Según Brincker et al., (2000) la derivación del método continúa bajo la suposición de que la excitación es ruido blanco y por consiguiente su matriz espectral de potencia es constante con respecto a la frecuencia. Siempre y cuando la excitación se represente efectivamente por un ruido blanco el método proveerá óptimos resultados (MacMillan et al., 2004).

CRITERIO DE ASEGURAMIENTO MODAL (MAC)

La correlación de las formas modales ha sido siempre un trabajo difícil. El enfoque de la comparación elemento por elemento para un par de vectores puede conducir a resultados pocos razonables si las diferencias entre algunos de los elementos correspondientes de los dos vectores son grandes.

La literatura recomienda la comparación entre parámetros modales usando el criterio de aseguramiento modal (Modal assurance Criteria, MAC). La función del MAC es proporcionar una medida de la consistencia (grado de linealidad) entre las estimaciones de un vector modal. Esto proporciona un factor de confianza adicional en la evaluación de un vector modal desde diferentes lugares de excitación o diferentes algoritmos de estimación de parámetros modales, según Allemang et al. (1982) esto se puede calcular como:

$$MAC(u, v) = \frac{(u \bullet v)^2}{(u \bullet u)(v \bullet v)} \quad (4)$$

Donde u y v son los vectores de modos a ser comparados y \bullet representa la operación de producto escalar.

El MAC considera valores de cero por no tener correspondencia constante y unos significan una correspondencia consistente. Por lo tanto, si los vectores modales en consideración verdaderamente muestran una relación constante y lineal, el criterio de aseguramiento modal debe acercarse a la correspondencia de la unidad la cual se considera razonable.

MÉTODO DE ÍNDICE DE DAÑO (MID)

El Método de Índice de Daño, Stubbs y Kim (1993), localiza daño estructural, debido a cambios en las formas modales. Para una estructura que puede ser representada como una viga, un índice de daño, β , basado en cambios en la curvatura del i -ésimo modo en la localización j es:

$$\beta_{ji} = \frac{\left(\int_a^b \Phi_i^{*''} \Phi_i^{-z} dx + \int_0^L \Phi_i^{*''} \Phi_i^{-z} dx \right) \cdot \int_0^L \Phi_i'' \Phi_i^{-z} dx}{\left(\int_a^b \Phi_i'' \Phi_i^{-z} dx + \int_0^L \Phi_i'' \Phi_i^{-z} dx \right) \cdot \int_0^L \Phi_i^{*''} \Phi_i^{-z} dx} \quad (5)$$

Donde $\Phi''(x)$ y $\Phi^{*''}(x)$ son la segunda derivada de la i-ésima forma modal correspondiendo a las estructuras sin daño y dañada, respectivamente. L es la longitud de la viga. a y b son los límites de un segmento de la viga donde el daño está siendo evaluado. Cuando aplicamos el Método de ID a los datos, los valores de las amplitudes de la forma modal en el lugar entre los sensores son determinados mediante un ajuste, ya sea una interpolación lineal cubica o un polinomio de tercer grado a los datos de los lugares de medición.

Métodos estadísticos son usados para normalizar estos indicadores y proporcionar un criterio más sólido en la localización del daño. El índice de daño normalizado, Stubbs et al.(1992), para el elemento j, z_j , esta dado por:

$$z_j = \frac{\beta_j - \bar{\beta}}{\sigma_\beta} \quad (6)$$

Donde $\bar{\beta}$ y σ_β representan el promedio y la desviación estándar de todos los indicadores, respectivamente.

Para determinar la magnitud del daño, el daño es expresado como el cambio fraccional en la rigidez de un elemento:

$$\alpha_j = \frac{k_j^* - k_j}{k_j} = \frac{1}{\beta_j} - 1 \quad (7)$$

El estado sin daño es presentado cuando $\alpha_j=0$; si hay daño es presentado entonces $\alpha_j<0$. Nótese también que si $\alpha_j=-1$ toda la capacidad de rigidez ha sido perdida para el elemento.

EJEMPLOS

Los modelos matemáticos en elementos finitos de un riser fueron desarrollados usando un software comercial llamado FLEXCOM, Marine Computation Services Ltd (2008), para dinámicas de risers y analizado no linealmente en el dominio del tiempo.

Un SCR con un diámetro interno de 0.2286m a 1800m de profundidad con 2720 elementos de 1m de longitud cada uno. Una junta flexible en el lado superior fue considerada.

De acuerdo a Rivero (2009), los datos del estado de mar se muestran en la Tabla 1, donde Hs y Tp son la altura de ola y el periodo pico respectivamente.

Tabla 1. Datos de estado de mar.

Hs (m)	Tp (s)	Periodo de retorno (años)
4.4	9.1	25

15 registros de aceleraciones fueron medidos en coordenadas verticales (sensores) (Figura 1).

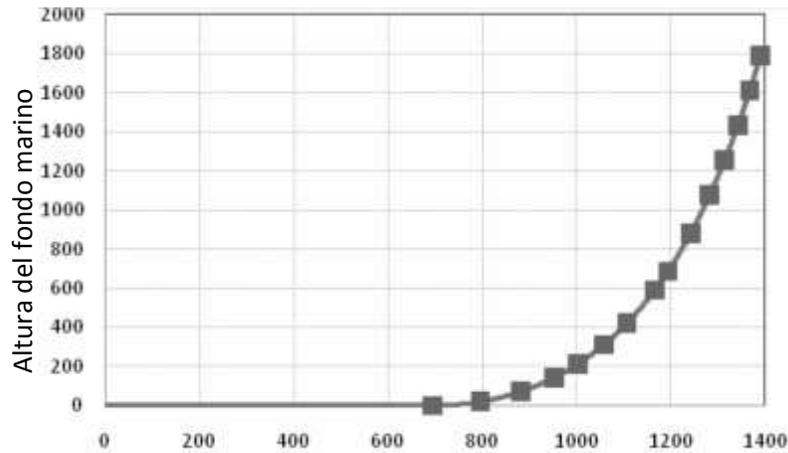


Figura 1. Posición de sensores.

Otro SCR es de 2706m de longitud, situado en 2000m en aguas profundas, el cual es llenado con exportación de crudo con una presión interna de $1.9822E+07$ Pa. El SCR se fija al fondo marino a una PLET y está conectado a una semi-sumergible a través de una junta flexible con una rigidez rotacional de 12.56 kN-m° . En la Tabla 2 se muestran sus características de oleaje asociadas a un periodo de retorno de 10 años.

Un total de 501 elementos fueron usados en el modelo, de los cuales 499 son elementos del SCR. La longitud máxima de elemento es de 15.5m, la longitud de los elementos adyacentes se reducen hasta una longitud mínima de 2m de situado en la zona de contacto y en la región de la conexión al sistema flotante.

Tabla 2. Características de oleaje.

Altura de ola (m)	9.4
Periodo pico (s)	12.4

Para el SCR 1800 se simuló 2 casos de daño uno en el elemento 900 y otro en el elemento 1600 con 10% y 15% de degradación de rigidez a flexión únicamente, de donde se obtuvieron en los 15 sensores aceleraciones en estado sin daño y para cada caso de daño.

La Figura 2 los valores singulares de acuerdo al DDF utilizando los 15 sensores. La línea punteada indica los periodos teóricos.

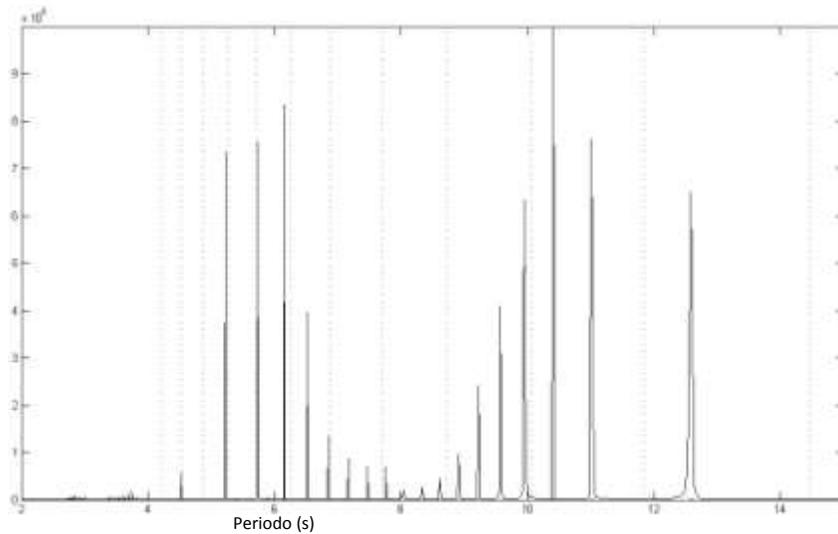


Figura 2. Valores singulares del DDF.

Siguiendo la metodología propuesta se obtuvieron los resultados mostrados en la Figura 3 para el daño en el elemento 900, obteniendo un error de 0% en la localización del daño, utilizando 700 frecuencias y obteniendo una magnitud de daño de -0.82.

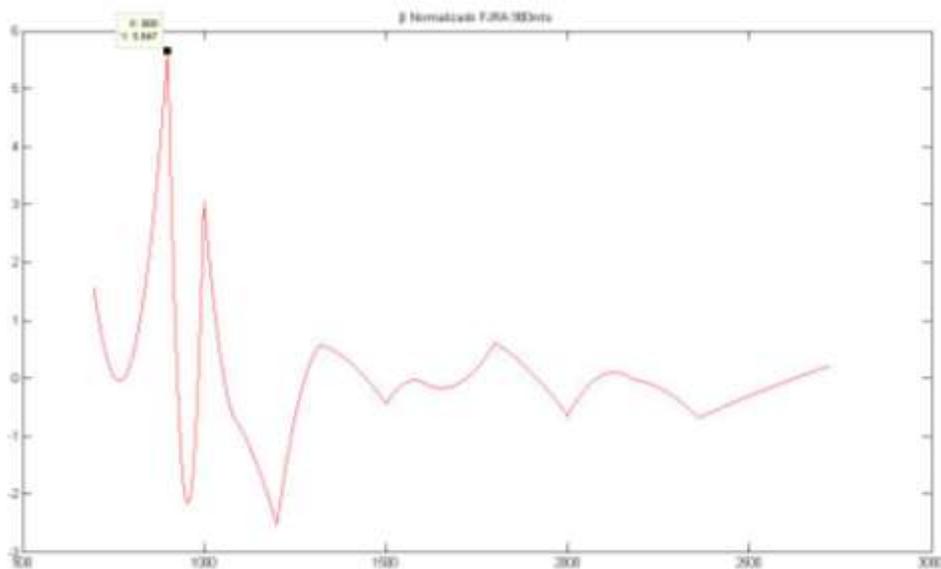


Figura 3. Índices de daño para el daño en el elemento 900.

En la Figura 4 para el daño en el elemento 1600, obteniendo un error de 0% en la localización del daño, utilizando 19 frecuencias más notables en la densidad de potencia espectral y obteniendo una magnitud de daño de -0.81%.

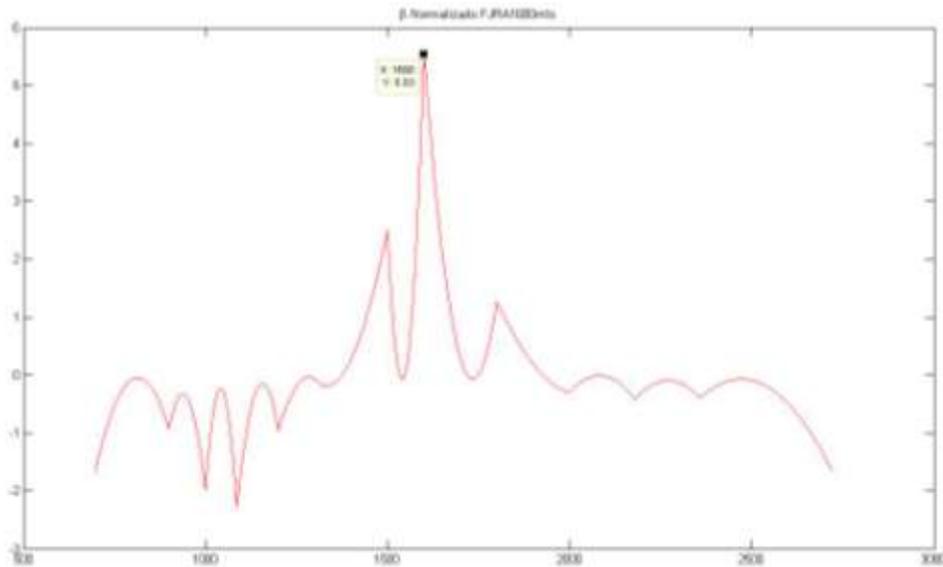


Figura 4. Índices de daño para el daño en elemento 1600.

Así para el SCR 2000, los registros de aceleraciones se obtuvieron con base en la distribución de sensores utilizada en el SCR 1800, el daño se simuló a una distancia de 360m de la conexión en el fondo marino.

Aplicando la metodología se obtuvo la Figura 5 donde se observa que la localización del daño se encuentra en 359.5m utilizando 637 frecuencias del PSD, con lo que si calculamos su error relativo con respecto a la distancia real del daño simulado se obtiene un 0.13%, con lo que se puede concluir que la metodología para este caso es aceptable.

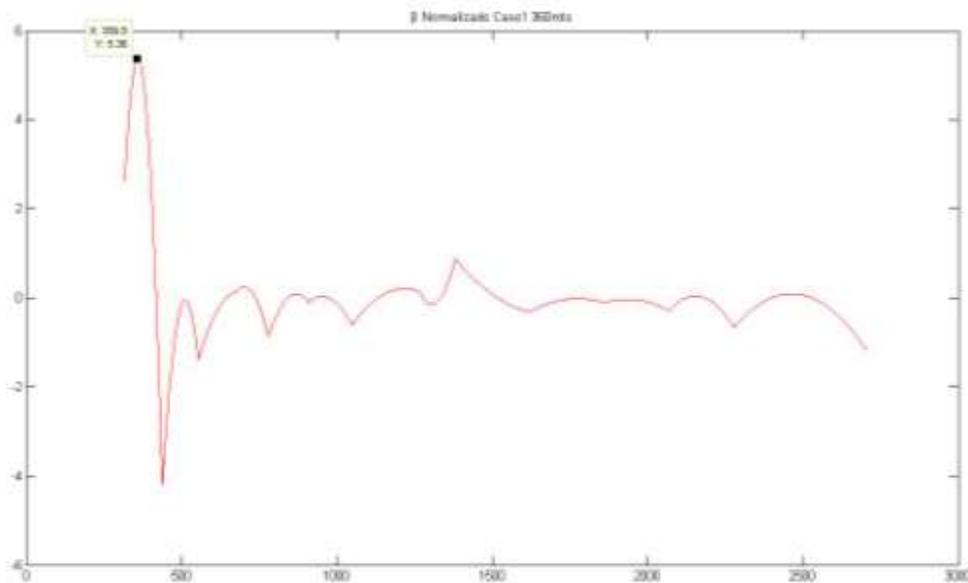


Figura 5. Índice de daño y localización para un daño simulado a 360m.

CONCLUSIONES

La variación del número de frecuencias utilizadas en el SCR1800 y SCR2000 es notable y se atribuye a la fuerza de excitación a la cual fueron sometidos los modelos numéricos.

Al utilizar registros de aceleraciones en el elemento dañado nos proporciona la variación en esa localidad, por lo que los resultados pueden estar relacionados a ello y no completamente al comportamiento general del sistema.

La presente metodología muestra resultados adecuados para detección de daño en risers y futuros estudios de MSE se pueden llevar a cabo.

Se recomienda obtener un mayor número de mediciones y excluir los de la localidad dañada, así como someter ambos modelos a las mismas condiciones de excitación.

REFERENCIAS

Allemang, Brown (1982): Correlation coefficient for modal vector analysis. Proceedings of the International Modal Analysis Conference & Exhibit, pp. 110-116.

Brincker, Zhang, Andersen (2000): Modal identification from ambient responses using frequency domain decomposition, *18th International Modal Analysis Conference, IMAC XVIII*, San Antonio, Texas.

MacMillan, Batel, Dascotte, Verbeeck (2004): "OMA testing by SLDV with FEM pre and post test analysis", 22nd International Modal Analysis Conference (IMAC XXII), Detroit, Michigan.

Marine Computation Services Ltd. (2008): FLEXCOM, Galway Technology Park, Galway, Ireland.

Rivero (2009): Reporte postdoctoral "Análisis y comportamiento dinámico de risers de acero en catenaria (Steel Catenary Riser, SCR) utilizados en aguas profundas", IMP, México.

Stubbs, Kim, Topole (1992): An Efficient and Robust Algorithm for Damage Localization in Offshore Platforms, ASCE 10th Structures Congress, San Antonio, Texas, 543-546.