



STRUCTURAL PARAMETER ESTIMATION IN MARINE RISERS USING EXTENDED KALMAN FILTERS

Torres Lizeth

► To cite this version:

Torres Lizeth. STRUCTURAL PARAMETER ESTIMATION IN MARINE RISERS USING EXTENDED KALMAN FILTERS. 2013. hal-01010944

HAL Id: hal-01010944

<https://hal.science/hal-01010944>

Submitted on 20 Jun 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS ESTRUCTURALES EN RISERS MARINOS UTILIZANDO FILTROS DE KALMAN EXTENDIDOS

STRUCTURAL PARAMETER ESTIMATION IN MARINE RISERS USING EXTENDED KALMAN FILTERS

LIZETH TORRES ORTIZ

Instituto de Ingeniera, Universidad Nacional Autónoma de México, ftorreso@iingen.unam.mx

Este artículo abierto con fines didácticos y de divulgación presenta una versión modificada y en español del artículo: L. Torres, C. Verde, O. Vázquez, "Parameter identification of marine risers using an extended Kalman filter". Under review (second round) to Ocean Engineering, 2014.

RESUMEN: Se presenta una metodología para estimar (identificar) los parámetros estructurales de *risers* marinos, tal que las estimaciones puedan emplearse para la evaluación de posibles daños en su estructura (Sistema de Monitoreo de Salud Estructural). Para la identificación paramétrica se propone un filtro de Kalman extendido, tomando en cuenta que el comportamiento del *riser* es no lineal y que las señales de los sensores de posición pueden contener ruido de medición. Para la elaboración de los filtros se considera: (1) un modelo no lineal de parámetros distribuidos descrito por un sistema de ecuaciones diferenciales parciales de cuarto orden cuasi-lineal, y (2) la discretización espacial de tal modelo utilizando el método de diferencias finitas. Se presentan algunos resultados en simulación para mostrar la factibilidad de la metodología propuesta.

PALABRAS CLAVE: Análisis de *risers*, Detección de Fallas, Estimación de Daños, Filtros de Kalman, Monitoreo de Salud Estructural, Identificación de parámetros.

ABSTRACT: This paper presents a methodology to estimate (to identify) structural parameters of marine risers, so that the estimation can be employed in the evaluation of possible damages in the structure (Structural Health Monitoring). In order to carry out the parameter identification, an extended Kalman filter is proposed taking into account the nonlinear behavior of the riser and the possibility of noise in the measurement signals. To design the filters, two points are considered: (1) a nonlinear model described by a system of quasi-linear partial differential equations with distributed parameters, and (2) the spatial discretization of such model using the Finite Difference Method. Some results in simulation about the proposed methodology are presented in order to show its feasibility.

KEYWORDS: Riser Analysis, Fault detection, Damage Estimation, Kalman Filters, Structural Health Monitoring, Parameter Estimation.

1. INTRODUCCIÓN

Los *risers* marinos juegan un papel muy importante en la producción y perforación para la extracción de petróleo costa afuera [1]. Son la conexión entre una plataforma y el cabezal de un pozo en el fondo del mar, y pueden utilizarse para la transportación del petróleo, para proteger la columna de perforación o para transportar el lodo resultante cuando se está perforando. Los *risers* pueden ser rígidos, flexibles,

o híbridos; y pueden representarse como ductos sumergidos en el mar sobre los que se presentan fuerzas externas que producen grandes desplazamientos y vibraciones (transversales y longitudinales). A su vez estas excitaciones provocan esfuerzos torsionales, axiales, flectores, etc. Así pues, el comportamiento dinámico de un *riser* se puede modelar numéricamente como un oscilador armónico con parámetros distribuidos (masas, resortes y

amortiguadores) a lo largo de su estructura, el cual además está sujeto a fuerzas externas (corrientes oceánicas, oleaje, movimiento de la plataforma, etc.) que determinan su comportamiento en el tiempo [2, 3]. En general los sistemas de ingeniería que poseen masa y elasticidad pueden presentar movimientos relativos. Si este movimiento se repite después de un determinado intervalo de tiempo el movimiento se conoce como vibración. Cuando una estructura es excitada por fuerzas externas con frecuencias cercanas a sus frecuencias naturales, la vibración en la estructura se amplifica y el sistema se puede volver inestable. Este fenómeno se conoce como *resonancia*. Dependiendo de los sistemas o de la aplicación, el fenómeno de resonancia puede ser deseado o no. En las estructuras mecánicas las vibraciones pueden provocar desgastes que pueden producir fallas y a la vez catástrofes. En la actualidad el fenómeno de vibración y resonancia es muy estudiado sobre todo en la construcción de grandes estructuras. Una de las estructuras donde comúnmente se presenta el fenómeno de la vibración son los puentes, en los cuales si no se hace un cálculo adecuado de la frecuencia natural pueden llegar a colapsarse. Durante el proceso de exploración y explotación de petróleo en aguas profundas, también se presenta el fenómeno de vibración. Este fenómeno se produce principalmente por la fuerza que ejercen las corrientes marinas (vórtices) y las fuerzas de oleaje y viento sobre las estructuras que se utilizan en la extracción del petróleo. La vibración a su vez causa tensión mecánica en la estructura del *riser*, desencadenando problemas de fatiga y propagación de grietas, que ligadas al desgaste por corrosión interna (debido al hidrocarburo) requieren inspecciones y reparaciones costosas. Aunado al problema de vibración, está el hecho de que muchos de los campos petrolíferos marinos se encuentran en posiciones geográficas propensas a huracanes, tormentas tropicales, tormentas invernales, etc. Esto hace a muchas instalaciones petroleras costa afuera más susceptibles a daños estructurales a causa del oleaje y viento extremo [4]. Así pues, para evitar consecuencias catastróficas y enormes daños económicos y al medio ambiente, es necesario tener un sistema de monitoreo automático que no interrumpa el proceso, adecuado para estimar continuamente cambios estructurales en los *risers* que puedan indicar posibles daños irreversibles a corto, mediano y largo plazo. Varias metodologías han sido desarrolladas para supervisar las

condiciones estructurales de los *risers*. Una de las más empleadas es el uso de datos de prueba dinámicos con la finalidad de actualizar continuamente los valores de rigidez de un modelo de la estructura, tales datos se obtienen utilizando registros de aceleración y técnicas de medición de vibraciones. A esta metodología se le conoce como *Sistema de Monitoreo de Salud Estructural* (Structural Health Monitoring, SHM, en inglés), que desde hace mucho tiempo se ha vuelto indispensable para evaluar los posibles daños en estructuras marinas, en particular los daños que con técnicas de inspección visual no se pueden detectar. Así pues, un Sistema de Monitoreo de Salud Estructural para *risers* debe concebirse como un sistema complementario a los sistemas de inspección visual en aguas submarinas como son los Vehículos Operados Remotamente (Remotely Operated Vehicles, ROV, en inglés) utilizados cuando los buzos no pueden llegar a mayores profundidades.

2. MODELO DINÁMICO DE UN RISER

El comportamiento de los *risers* se puede modelar como el de un oscilador armónico compuesto de masas, amortiguadores y resortes distribuidos, sujeto además a fuerzas externas que determinan la evolución de su trayectoria en el tiempo. En el caso de un *riser*, la parametrización depende del tiempo y el espacio, por lo que un *riser* debe modelarse con ecuaciones diferenciales parciales (PDE por sus siglas en inglés). En caso de que no exista una solución exacta para las PDE, se puede calcular una solución aproximada utilizando alguno de los diversos métodos numéricos de integración. Uno de los métodos más empleados en el caso de tratar con modelos unidimensionales (dependientes de una sola coordenada espacial), es el Método de Diferencias Finitas (FDM por sus siglas en inglés). Empleando el FDM puede obtenerse un modelo de ecuaciones diferenciales ordinarias (ODE por sus siglas en inglés), cuyo orden (dimensión) dependerá del número de secciones de discretización espacial empleado. La elección

de este número de secciones dependerá de los objetivos de modelado como pueden ser:

- *La frecuencia máxima que se requiere representar.* Si sólo se requiere representar las dinámicas lentas del *riser*, el número de secciones puede ser reducido, en caso contrario, el número de secciones debe ser mayor obteniendo un modelo complejo y de gran dimensión. Para caracterizar esta condición de modelado se debe realizar un análisis en frecuencia y obtener el ancho de banda en función del espacio.
- *El número de mediciones disponible.* Esta condición de modelado aplica para la elaboración de algoritmos de identificación, de control y detección de fallas, ya que los objetivos de estos no es modelar en precisión el comportamiento del *riser* sino controlar y detectar fallas. En este caso el número de secciones estará delimitado por los puntos de medición (sensores) a lo largo de la tubería ascendente. Una vez obtenido un modelo discreto en el espacio representado por un sistema ODE, pueden elaborarse algoritmos para la estimación de los parámetros que conforman el modelo de la tubería ascendente.

2.1 Ecuaciones gobernantes

El comportamiento dinámico de un *riser* sujeto a una excitación externa $f(z, t)$, puede describirse con la siguiente PDE de cuarto orden cuasi-lineal [2,3]

$$EI \frac{\partial^4 v(z, t)}{\partial z^4} - T(z, t) \frac{\partial^2 v(z, t)}{\partial z^2} + m \frac{\partial^2 v(z, t)}{\partial t^2} + c \frac{\partial v(z, t)}{\partial t} + p(\cdot) = f(z, t) \quad (1.1)$$

donde $(z, t) \in (0, L) \times (0, \infty)$ son las coordenadas del tiempo y del espacio respectivamente, $v(z, t)$ es el desplazamiento horizontal del *riser*, m es la masa por unidad, c es el coeficiente lineal de arrastre viscoso, $T(z, t)$ es la tensión, EI la rigidez flexional, y el término $p(\cdot)$ representa la fuerza de restauración no lineal.

2.2 Discretización espacial

El sistema PDE (1.1), no tiene una solución analítica, así que en este trabajo se propone el FDM para obtener una solución aproximada. Tal solución se expresa como

$$EI \Lambda^{(i)} - T(z, t) Y^{(i)} + m \ddot{v} + c \dot{v} + p(\cdot) = f(z, t) \quad (1.2)$$

con:

$$\Lambda^{(i)} = \left(\frac{v^{(i+2)} - 4v^{(i+1)} + 6v^{(i)} - 4v^{(i-1)} + v^{(i-2)}}{(\Delta z)^4} \right),$$

$$Y^{(i)} = \left(\frac{v^{(i+1)} - 2v^{(i)} + v^{(i-1)}}{(\Delta z)^2} \right).$$

$i = 1, \dots, N$ es el índice de la sección de discretización y N es el número total de secciones.

2.3 Condiciones de frontera

En este trabajo se asume que la plataforma a la que está sujeta el *riser* se desplaza por el movimiento de las olas, considérese entonces a $q(t)$ como una función en el tiempo de la posición de la plataforma. Así pues, para un *riser* con ambas extremidades conectadas a soportes fijos, las condiciones de frontera son: $v(L, t) = q(t)$, en la cima de la tubería conectada a la plataforma y $v(0, t) = 0$ en la parte inferior conectada a un punto fijo del fondo marino. Finalmente debido a la condición de rigidez impuesta en los puntos de sujeción del *riser* $(\partial v / \partial z)(L, t) = (\partial v / \partial z)(0, t) = 0$ son también condiciones de frontera [9].

2.4 Fuerza de restauración no lineal

En este trabajo se considera un término de restauración-amortiguamiento no lineal basado en la combinación de no linealidades tipo Duffing y Van der Pol [2].

$$p(\cdot) = k_3 v^3(z, t) + \frac{c_3}{3} \frac{\partial v^3(z, t)}{\partial t} \quad (1.3)$$

donde k_3 es el coeficiente de Duffing y c_3 es el coeficiente de Van der Pol. La no linealidad de Duffing actúa como un resorte artificial con rigidez positiva y variable que se incrementa conforme el desplazamiento

$v(z,t)$ se incrementa. La no linealidad de Van der Pol actúa como un amortiguador adicional.

2.5 Fuerzas hidrodinámicas

Las fuerzas hidrodinámicas que actúan sobre los *risers* se calculan utilizando la ecuación de Morison modificada para un cilindro en movimiento. De esta manera, la fuerza horizontal hidrodinámica puede expresarse como:

$$f(x,t) = \rho_w C_M \frac{\pi D^2}{4} \frac{\partial u(x,t)}{\partial t} + \frac{1}{2} \rho_w C_D D (v(x,t) - u(x,t)) |v(x,t) - u(x,t)| \quad (1.4)$$

Los coeficientes que intervienen en esta ecuación son C_M , el coeficiente de inercia y C_D , el coeficiente de arrastre. ρ_w es la densidad del agua, D es el diámetro del *riser*, mientras que $u(x,t)$ y $\partial u(x,t)/\partial t$ son la velocidad y la aceleración de las olas, las cuales pueden calcularse mediante las siguientes expresiones:

$$u(x,t) = \sum_{j=1}^{\infty} A_j \omega_j \frac{\cosh(k_j x)}{\sinh(k_j d)} \cos(\omega_j t + \phi_j)$$

$$\frac{\partial u(x,t)}{\partial t} = \sum_{j=1}^{\infty} A_j \omega_j \frac{\cosh(k_j x)}{\sinh(k_j d)} \sin(\omega_j t + \phi_j)$$

Donde A_j es la amplitud del oleaje, ω_j es la frecuencia de las olas, ϕ_j es el ángulo de fase aleatorio asumido distribuido en el intervalo $[0, 2\pi]$, y k_j es el número de ola, relacionado con ω_j a través de la siguiente relación de dispersión lineal en aguas profundas $d > 500$ [m]:

$$\omega_j^2 = g k_j \tanh(k_j d) \quad (1.5)$$

2.6 Representación en espacio de estados

Denotando $x_1^{(i)} = v^{(i)}(t)$, $\dot{x}_1^{(i)} = \dot{v}^{(i)}(t) = x_2^{(i)}$, $\dot{x}_2^{(i)} = \ddot{v}^{(i)}(t)$, en (1.2), se obtiene el vector de estados

$$x^{(i)}(t) = \begin{bmatrix} x_1^{(i)}(t) & x_2^{(i)}(t) \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} v^{(i)}(t) & \dot{v}^{(i)}(t) \end{bmatrix}^T \quad (1.6)$$

y el siguiente sistema en espacio de estados:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1^{(i)} &= x_2^{(i)} \\ \dot{x}_2^{(i)} &= m^{-1} \left[-EI \Lambda^{(i)} + T Y^{(i)} - c x_2^{(i)} - k_3 v^3(z,t) - \frac{c_3}{3} \frac{\partial v^3(z,t)}{\partial t} + f^{(i)} \right] \end{aligned} \quad (1.7)$$

donde las matrices $\Lambda^{(i)}$ y $Y^{(i)}$ devienen

$$\Lambda^{(i)} = \begin{pmatrix} \frac{x_1^{(i+2)} - 4x_1^{(i+1)} + 6x_1^{(i)} - 4x_1^{(i-1)} + x_1^{(i-2)}}{(\Delta z)^4} \\ Y^{(i)} = \begin{pmatrix} \frac{x_1^{(i+1)} - 2x_1^{(i)} + x_1^{(i-1)}}{(\Delta z)^2} \end{pmatrix} \end{pmatrix}$$

2.7 Simulación numérica de un riser

Para la programación del simulador en ambiente MATLAB, se consideraron los parámetros listados en la **Tabla 1**.

Tabla 1. Parámetros del *riser* simulado [2]

Table 1. Parameters of the simulated riser [2]

Parámetro	Unidad	Valor
Diámetro	[m]	1.4
Longitud	[m]	873
Masa por unidad longitudinal	[kg/m]	912
Coef. de arrastre viscoso	[Ns/m]	120
Coef. de Duffing	[N/m ³]	8000
Coef. de Van der Pol	[N/m ³]	5000
Tensión	[N]	7x10 ⁶
Rigidez flexional	[Nm ²]	10 ⁷
Coeficiente de inercia	-	1.05
Coeficiente de arrastre	-	1.2
Densidad del agua	[Kg/m ³]	1,025
Periodo de las olas	[s]	11.3
Amplitud de las olas	[m]	7.5

En la **Figura 1** se muestra la respuesta del simulador del *riser* cuando la plataforma se desplaza periódicamente. En este caso, la función de desplazamiento de la plataforma flotante es $q(t) = 5 \sin 0.1t$ [m] y no se considera la acción de las fuerzas hidrodinámicas.

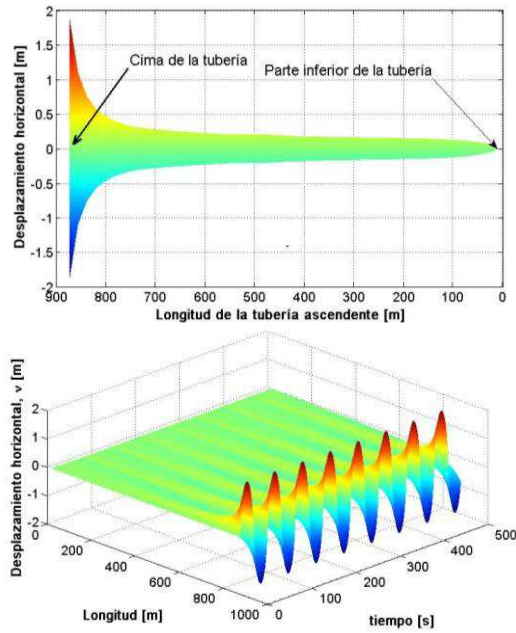


Figura 1. Respuesta del riser con movimiento periódico de la plataforma

Figure 1. Riser response with periodic movement of the platform

En la **Figura 2** se muestra la respuesta del simulador del riser cuando la plataforma se desplaza aleatoriamente.

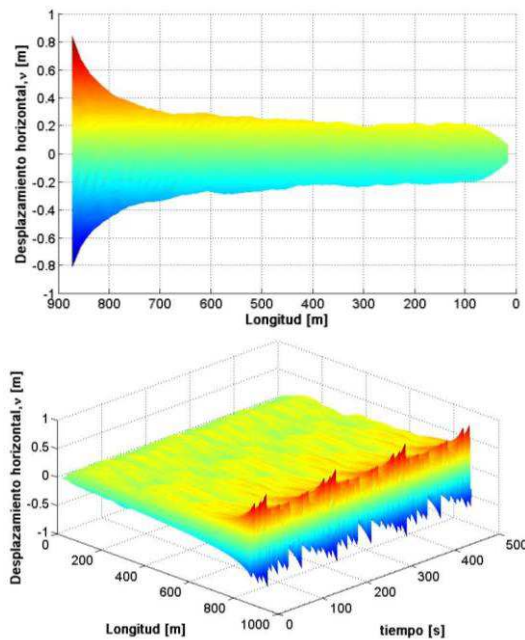


Figura 2. Respuesta del riser con movimiento aleatorio de la plataforma

Figure 2. Riser response with random movement of the platform

3. SISTEMA DE MONITORO DE SALUD ESTRUCTURAL

Un campo relevante de la ingeniería y de la investigación científica es el Monitoreo de Salud Estructural, que se refiere al uso *in situ* de pruebas no destructivas (Non Destructive Testing, NDT, en inglés) y al análisis de las características de un sistema, incluyendo su respuesta estructural, con el fin de detectar cambios en el sistema que puedan indicar daños o degradación. Aplicaciones en este campo se conforman de una amplia gama de estructuras civiles terrestres, aeronáuticas, marítimas, etc. [5] El enfoque más común para el problema de SHM y detección de daños estructurales se basa en técnicas lineales de identificación de parámetros, las cuales en su mayoría se han propuesto para analizar e interpretar datos medidos antes y después de eventos severos como terremotos o huracanes. Cuando un daño ocurre, parámetros estructurales como la rigidez pueden degradarse, y una manera usual para evaluar las condiciones de la estructura es comparando las alteraciones de estos parámetros. Obviamente, es necesario conocer un estado previo de la estructura y el valor de sus parámetros en condiciones *nominales* (sin daño). La elección de los parámetros a monitorear depende de diversos factores. Por ejemplo, si la estructura se localiza en un área altamente sísmica, la rigidez, la deformación o la tensión mecánica de la estructura deben monitorearse. Si la estructura es un riser cuya respuesta está sujeta a condiciones ambientales como oleaje, viento y corrientes marinas, los parámetros de amortiguamiento y rigidez deben ser supervisados. Aunque también la masa puede sufrir modificaciones con el pasar del tiempo. Con la tendencia hacia la extracción de petróleo y gas en aguas profundas y ambientes cada vez más hostiles, la respuesta de los risers bajo variadas condiciones ambientales y estados del mar se vuelve cada vez más compleja, *ergo*, el comportamiento estructural de la tubería ascendente es altamente no lineal. Por estas razones, en el caso de los risers, las técnicas de identificación lineal de parámetros usualmente empleadas para el monitoreo de

estructuras marinas deben extenderse, modificarse y desarrollarse para lidiar con la identificación no lineal de parámetros distribuidos. La identificación de estructuras con comportamiento no lineal es un problema que ya se ha abordado en ingeniería civil [6, 7, 8]. Una alternativa para identificar parámetros de modelos estructurales no lineales, actualizados antes y después de potenciales cambios estructurales, es el empleo de observadores de estado. La primera elección para el uso de observadores no lineales es el Filtro de Kalman Extendido (EKF por sus siglas en inglés) [10, 11, 12], pese a que la estabilidad y desempeño del EKF no están garantizados y dependen fuertemente de la aplicación específica. Esta elección se fundamenta en el hecho de que en general para sistemas no lineales, no existe un filtro de dimensión finita que resuelva el problema de filtrado óptimo (observador óptimo de estados) de manera similar al filtro de Kalman. El método de aproximación más simple al problema del filtrado no lineal es mediante el EKF, que es una versión extendida del filtro de Kalman originalmente concebido para sistemas lineales. Así pues, en este trabajo se presenta una metodología para la estimación de daños estructurales considerando como daño de la estructura evaluada a la desviación no permitida de los valores de alguno de sus parámetros. En esta metodología, la estimación de los daños estructurales se lleva a cabo identificando los parámetros estructurales modificados mediante un filtro de Kalman extendido. Una vez realizada la identificación, una evaluación de daños puede llevarse a cabo a partir de la valoración de las desviaciones permitidas de los parámetros.

4. OBSERVADORES DE ESTADO

Los enfoques basados en *observadores de estado* requieren que el sistema en estudio se encuentre representado en *espacio de estados*. Una representación en espacios de estados es un modelo matemático de un sistema físico descrito mediante un conjunto de entradas, salidas y variables de estado relacionadas por ecuaciones diferenciales de primer orden que se combinan en una ecuación diferencial matricial de primer orden. Así, cualquier modelo dinámico expresado en ecuaciones diferenciales, incluyendo el modelo de un *riser* (1.7), puede representarse en espacio de estados de la forma general siguiente:

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= f(x(t), u(t), \theta(t)) \\ y(t) &= h(x(t))\end{aligned}\tag{1.8}$$

donde $x \in \mathbb{R}^n$ son los estados del sistema, $u \in \mathbb{R}^m$ las entradas exógenas o señales de control, mientras que $y \in \mathbb{R}^p$ representa las salidas, i.e, los estados medidos con sensores. Finalmente $\theta(t) \in \mathbb{R}^{n_\theta}$ es el vector de los parámetros físicos del sistema. En muchas aplicaciones de ingeniería se requieren variables y parámetros físicos que no se pueden medir directamente, ya sea porque instalar sensores físicos resulta costoso o porque éstos sensores no existen. Una alternativa viable es producir una estimación dinámica de las variables y los parámetros deseados utilizando *observadores de estados*, también conocidos como *sensores virtuales* [14]. Existen numerosas razones por las que se requiere la estimación de parámetros o variables. En el contexto de automatización, estas pueden ser categorizadas en: supervisión, diagnóstico de fallas, y control automático [15, 16]. En este trabajo, los observadores de estados que se presentan tienen como propósito estimar cambios drásticos de rigidez, amortiguamiento y tensión, para que después tales estimaciones puedan utilizarse en un diagnóstico de daños. Una definición general para observador de estados es dada a continuación.

Definición 1. Un observador de estados es un algoritmo dinámico cuyo propósito es estimar las variables de un proceso utilizando: (a) su modelo matemático representado en espacio de estados, (b) las mediciones disponibles del proceso (entradas y salidas), y (c) un término de corrección en función del error que garantice la convergencia del algoritmo.

El diagrama a bloques de un observador conectado a un proceso tiene la estructura de la **Figura 3**, donde $e(t)$ se define como el error de estimación, $e(t) = y(t) - \hat{y}(t)$, i.e., la diferencia entre la salida medida del proceso $y(t)$ y la salida estimada $\hat{y}(t)$. El objetivo del observador es hacer converger el error a 0 cuando $t \rightarrow \infty$.

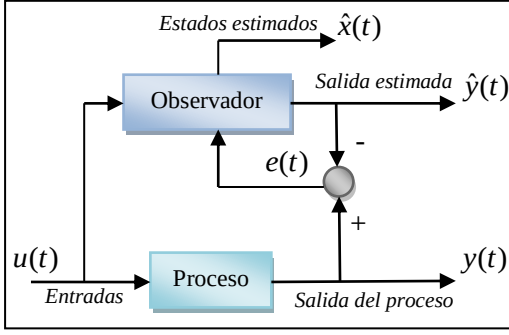


Figura 3. Esquema de estimación de estados con un observador

Figure 3. Schema of state estimation using observers

Los observadores de estado pueden clasificarse en: (a) observadores lineales y (b) observadores no lineales. Para los sistemas lineales invariantes en el tiempo y observables, el problema de diseño de estos observadores está prácticamente resuelto. Sin embargo, para el caso de sistemas no lineales, no existe una solución general, por lo que existen diferentes enfoques para casos particulares de sistemas no lineales, [14]. Dado el comportamiento de los risers, la estimación de parámetros para la detección de daños debe realizarse empleando observadores no lineales. La información que necesitarán los observadores, que en este trabajo son EKF, está en función de las mediciones disponibles (posiciones), de las fuerzas hidrodinámicas que afectan al sistema y del movimiento de la plataforma, ver **Figura 4**.

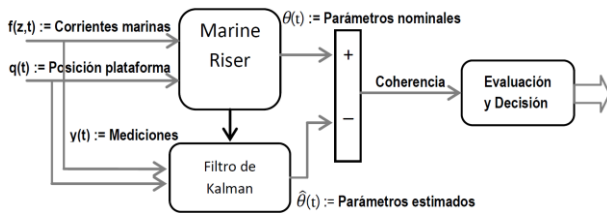


Figura 4. Esquema de detección de daños en risers

Figure 4. Schema of damage detection in risers

4.1. Estimación de parámetros

Recientemente se ha propuesto identificar parámetros usando observadores de estado en donde el vector $x(t)$ del sistema (1.8) se aumenta con los parámetros que se desean identificar (que en este trabajo son los parámetros estructurales del riser). Es decir, considerando que el vector $\theta(t) \in \mathbb{R}^{n_\theta}$ contiene los parámetros a identificar, el nuevo

vector de estados aumentado $x^a(t)$ se forma de la siguiente manera

$$x^a(t) \rightarrow \begin{bmatrix} x(t) \\ \theta(t) \end{bmatrix} \quad (1.9)$$

donde $x_a(t) \in \mathbb{R}^{n+n_\theta}$ denota el espacio aumentado del nuevo sistema aumentado:

$$\begin{aligned} \dot{x}^a(t) &= f(x^a(t), u(t)) \\ y(t) &= h(x^a(t)) \end{aligned} \quad (1.10)$$

Una ventaja de este tipo de estimación es que permite estimar conjuntamente estados y parámetros, que en este caso son posiciones, velocidades y parámetros estructurales respectivamente. A continuación se describe brevemente el algoritmo utilizado para la identificación.

4.2 Filtro de Kalman Extendido

Supóngase que se desea diseñar un observador para un sistema modelado en espacio de estados aumentado, representado por (1.10). Para este sistema un observador candidato está dado por la siguiente ecuación:

$$\dot{\hat{x}}^a(t) = \underbrace{f(\hat{x}^a(t), u(t))}_{\text{Modelo}} + \underbrace{K(t)(y(t) - \hat{y}(t))}_{\text{Corrección}}, \quad (1.11)$$

donde $\hat{y}(t)$ y $\hat{x}^a(t)$ representan las salidas y los estados estimados. Nótese que el observador (1.11) se conforma de una copia del modelo (1.8), más un término de corrección a su vez conformado por el error de estimación $e(t) = y(t) - \hat{y}(t)$ y la ganancia del observador, $K(t)$. Esta ganancia que asegura la convergencia de la estimación, $e(t) \rightarrow 0$, es una matriz de talla $q \times m$ variante en el tiempo, y se calcula de la siguiente manera:

$$K(t) = S(t)C^T(t)R^{-1}$$

donde $S(t)$ es una matriz variante en el tiempo calculada a través de la siguiente ecuación de Ricatti:

$$\dot{S}(t) = (A(t) + \lambda I)S(t) + S(t)(A^T(t) + \lambda I) - (S(t)C(t)R^{-1}C(t)S(t)) + Q$$

donde $A(t)$ y $C(t)$ son matrices resultantes de la linealización del sistema (1.8) para $x^a = \hat{x}^a$ y calculadas mediante los siguientes Jacobianos:

$$A(t) = \left. \frac{\partial f(x^a(t), u(t))}{\partial x^a(t)} \right|_{x^a = \hat{x}^a}, C(t) = \left. \frac{\partial h(x^a(t))}{\partial x^a(t)} \right|_{x^a = \hat{x}^a}$$

Para la implementación y funcionamiento de este Filtro de Kalman Extendido se debe asegurar $S(0) = S(0)^T > 0$, $Q = Q^T \geq 0$ y $R = R^T \geq 0$. Donde Q y R son matrices de covarianza cuyos elementos se eligen para el filtrado óptimo del ruido. Finalmente el término $\lambda > 0$ se utiliza para regular el tiempo de convergencia de la estimación.

5. FILTRO DE KALMAN EXTENDIDO PARA ESTIMACIÓN DE DAÑOS ESTRUCTURALES

Considérese que para la estimación de daños estructurales se requiere identificar los parámetros $EI^{(i)}, k_3^{(i)}$ en un punto i , entonces estos conforman el vector de parámetros

$$\theta(t) = [EI^{(i)}, k_3^{(i)}]^T \quad (1.12)$$

el cual es utilizado para aumentar el vector de estados (1.6) del modelo del riser. Así pues según (1.9), el vector de estados aumentado es

$$x^a(t) \rightarrow \begin{bmatrix} x^{(i)}(t) \\ \theta(t) \end{bmatrix}^T = [x_1^a, x_2^a, x_3^a, x_4^a]^T \quad (1.13)$$

$$= [\nu^{(i)}, \dot{\nu}^{(i)}, EI^{(i)}, k_3^{(i)}]^T$$

y el modelo del riser en representación de estados aumentado deviene

$$f(x, t) \begin{cases} \dot{x}_1^a = x_2^a \\ \dot{x}_2^a = m^{-1} [-x_3^a \Lambda^{(i)} + T \Upsilon^{(i)} - c x_2^a \\ -x_4^a x_1^a + \frac{c_3}{3} x_2^a + f^{(i)}] \\ \dot{x}_3^a = \dot{x}_4^a = 0 \\ y = x_1^a \end{cases} \quad (1.14)$$

Nótese que la dinámica de los parámetros $EI^{(i)} = x_3^a$ y $k_3 = x_4^a$, i.e., sus derivadas son igualadas a cero, ya que son parámetros constantes considerados a cambiar de valor en un solo instante.

A partir del modelo (1.14), se puede diseñar un EKF utilizando el procedimiento de la sección 4.2. Para el diseño del filtro considérese que sólo se cuenta con mediciones de posición como se muestra en la **Figura 5**.

Por otro lado, dado que en el modelo extendido $\Lambda^{(i)}$ y $\Upsilon^{(i)}$ representan funciones que requieren 5 y 3 valores de posición respectivamente, entonces el EKF basado en el modelo (1.14) requiere también esta información (proporcionada por sensores de posición) para evaluar la rigidez en un solo punto i a lo largo del riser. Así pues, el número de posiciones requeridas para evaluar rigidez en n puntos del riser es $n_p = n + 5$ y se necesitarán n EKF para realizar la estimación (ver **Figura 5** y **Figura 6**). Para la implementación del EKF es preciso calcular los Jacobianos del sistema no lineal. Así pues, considerando que sólo mediciones de posición están disponibles, el Jacobiano de la matriz de salidas es $C = (1 \ 0 \ 0 \ 0)$. Es decir, que a partir del valor de la posición (x_1^a) en el punto i , el filtro estimará la velocidad correspondiente ($\hat{x}_2^a$), la posición medida ($\hat{x}_1^a$), así como la rigidez lineal ($\hat{x}_3^a$) y no lineal ($\hat{x}_4^a$) en dicho punto. El segundo Jacobiano se muestra a continuación:

$$A = - \left(\frac{1}{m} \right) \cdot \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{2T}{(\Delta z)^2} + 3(x_1^a)^2 x_4^a + \frac{6x_3^a}{(\Delta z)^4} & c_3(x_2^a)^2 + c & \Lambda^{(i)} & (x_1^a)^3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

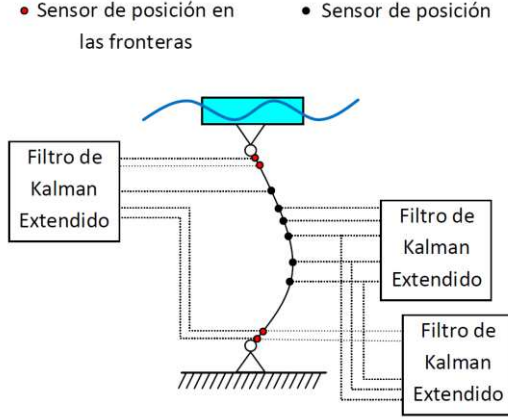


Figura 5. Esquema de adquisición de datos de posición para la identificación paramétrica con EKF, $n=3$

Figure 5. Schema of the acquisition of position data for the identification using an EKF, $n=3$

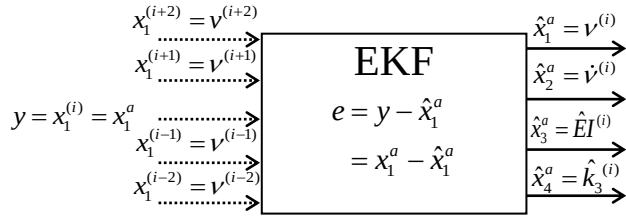


Figura 6. Esquema de estimación estructural con un EKF

Figure 6. Schema of the structural estimation with an EKF

A continuación se presentan algunos resultados de la identificación paramétrica realizada por el EKF diseñado para identificar EI y k_3 . Para las pruebas de estimación se consideró como sistema ‘real’ al riser simulado presentado en la Sección 2.7 con 50 secciones de discretización. El filtro se calibró con $S(0) = I_d$ (matriz identidad), $R = 1$, $Q = I_d$, $\lambda = 0.1$ y se inicializó con valores paramétricos diferentes al del riser para verificar la convergencia de las estimaciones a los verdaderos valores del riser. En la primera prueba, se consideró a la rigidez lineal con un valor nominal de 1×10^7 [Nm²], el cual cambia a 0.5×10^7 [Nm²] al instante $t = 500$ [s], emulando una degradación. En la segunda prueba, la rigidez no lineal tiene un valor nominal de 8000 [N/m³]. En la **Figura 7** se muestra la estimación de la rigidez EI , podemos notar que la estimación del EKF es correcta. Primero el valor nominal de la rigidez es estimado aproximadamente a los 300 [s] y después cuando hay un cambio en la rigidez, el EKF también es capaz de estimarlo.

En la **Figura 8** se ilustra la estimación del coeficiente de Duffing, el EKF estima correctamente tanto el valor nominal como el cambio que éste sufre. En la **Figura 9** se muestran las señales utilizadas para la estimación. Tales señales fueron alteradas con señales aleatorias para simular ruido de medición. A pesar de la presencia de ruido, la estimación no se vio afectada gracias a las propiedades de filtrado del EKF.

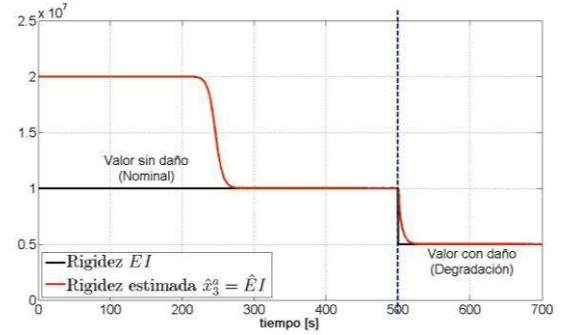


Figura 7. Estimación de la rigidez usando el EKF

Figure 7. Stiffness estimation using the EKF

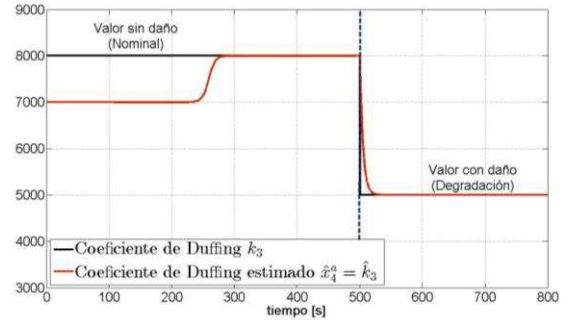


Figura 8. Estimación del coeficiente de Duffing

Figure 8. Estimation of the Duffing coefficient

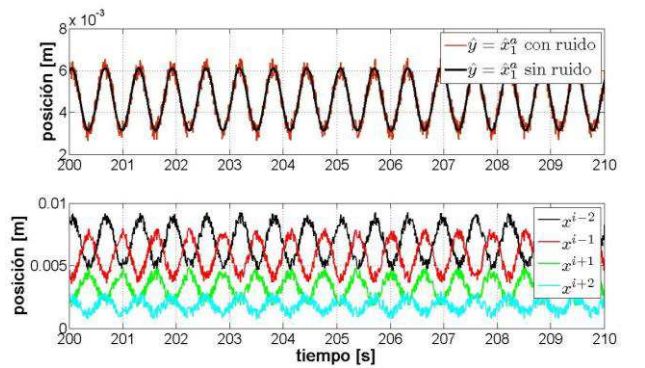


Figura 9. Señales inyectadas al EKF para la estimación

Figure 9. Injected signals to the EKF to estimate

6. CONCLUSIONES

En este artículo se presentó una metodología original para identificar (estimar) rigidez en un *riser* marino considerando las no linealidades del comportamiento del *riser*. Para la identificación se utilizó un Filtro de Kalman Extendido. Esta metodología puede extenderse para identificar conjuntamente parámetros de amortiguamiento y/o fuerzas hidrodinámicas, siempre y cuando se cumplan ciertas condiciones de observabilidad [10] y de una adecuada estructura del modelo para la concepción de los filtros u observadores no lineales. Los resultados de la evaluación de esta metodología, la hacen viable para su implementación en ductos marinos reales.

REFERENCIAS

- [1] Jaeyoung Lee, P.E., Introduction to Offshore Pipelines and Risers, 2nd ed., Houston, Estados Unidos, 2009.
- [2] Niedzwecki, J. M., y Liagre, P. Y. F., System identification of distributed parameter marine riser models, Ocean Engineering, Vol. 30, pp. 1387-1415, 2003.
- [3] Furnes, G. K., On marine riser responses in time-and-depth-dependent flows, Journal of fluids and structures, Vol. 14, pp. 257-273, 2000.
- [4] Kaiser, M. J., y Yu, Y., The impact of hurricanes Gustav and Ike on offshore oil and gas production in the Gulf of Mexico, Applied Energy, Vol. 87, pp. 284-297, 2010.
- [5] Doebling, S. W., Damage identification and health monitoring of structural and mechanical systems from changes in their vibration characteristics: A literature review, National Laboratory Report LA-13070-MS, Los Alamos, Estados Unidos, 1996.
- [6] Kerschena, G., Worden, K., Vakakis, A. F., y Golinvala, J., Past, present and future of nonlinear system identification in structural dynamics, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 20, pp 505-592.
- [7] Masri, S. F., Miller, R. K., Saud, A. F., y Caughey, T. K., Identification of nonlinear vibrating structures: Part II-Applications pplications, Journal of Applied Mechanics, Vol. 109, pp 923-929, 1987.
- [8] Dunbar, W. B., Damage detection in dynamic systems with nonlinearities, Tesis de Maestría, San Diego, Estados Unidos, University of California, 1999.
- [9] Fortaleza, E., Active control applied to offshore structures: Positioning and attenuation of vortex induced vibration, Paris, Francia, Tesis doctoral, École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2009.
- [10] Kalman, R., y Bucy, R. S., New results in linear filtering and prediction theory, Journal of Basic Engineering, Vol. 82, pp. 35-40, 1960.
- [11] Anderson, B.D.O., Moore, J., Optimal Control – Linear Quadratic Methods, Prentice Hall, Englewood Cliffs, Estados Unidos.
- [12] Torres, L., Besançon, y G., Georges, D., EKF-like observer with stability for a class of triangular nonlinear systems, IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 57, pp. 1570-1574, 2012
- [13] Domínguez, S., Campoy, P., Sebastián, J.M. y Jiménez, A., Control en espacio de estado, Prentice Hall, Madrid, España, 2002
- [14] Besançon, G., Nonlinear Observers and applications, Springer, 2007.
- [15] Torres, L., Verde, C., Besançon, G., y Gonzalez, O., High gain observers for leak location in subterranean pipelines of liquefied petroleum gas, International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2012.
- [16] Gauthier, J. P., Hammouri, H., y Othman, S., A simple observer for nonlinear systems-applications to bioreactors, IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 37 6, pp. 875-880, 1992.