

# Un método para monitorear la posición planar de unidades flotantes amarradas

**M. A. García Domínguez \*, C. A. Nunes Dias \*\***

\* Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría  
Facultad de Ingeniería Mecánica. Departamento de Mecánica Aplicada  
Calle 127 s/n, Marianao 15, Ciudad de La Habana, Cuba.

\*\* Escuela Politécnica de la Universidad de São Paulo  
Departamento de Ingeniería Naval y Oceánica., Brasil.

( Recibido el 3 de diciembre de 1998; aceptado el 12 de febrero de 1999 )

## Resumen

Este trabajo aborda el problema del posicionamiento de plataformas semi-sumergibles. Inicialmente, es desarrollado un método para monitorear en tiempo real la posición planar de unidades flotantes amarradas, partiendo de las mediciones de las tensiones generadas en el tope de las líneas que componen su sistema de amarre.

Para monitorear la posición planar de la unidad flotante se desarrolló un programa de computación para esta finalidad. Con el objetivo de poder validar el método propuesto es utilizado un banco de ensayos, el cual está compuesto de un modelo en escala reducida de plataforma así como de un sistema de sensores dinámicos para la adquisición y el análisis de las tensiones. Finalmente, se presentan y analizan los resultados obtenidos a través de las simulaciones de movimientos efectuados en el banco de ensayos para evaluar y comprobar el desempeño del sistema propuesto..

**Palabras claves:** Tiempo real, posicionamiento de plataformas, monitorear unidades flotantes y programa para cálculo de posición.

## 1. Introducción

En los inicios de los años 50 la exploración y producción de petróleo se extendió para la plataforma continental de los países. Día a día, la continua necesidad del incremento de la producción de petróleo, a nivel mundial, incentivó las investigaciones en bahías oceánicas y la descubierta, de reservatórios de petróleo localizados en el subsuelo de la plataforma continental de los países productores, motivó a las grandes compañías de petróleo y de esta forma se hizo posible la exploración de estos campos.

Con el pasar de los años, y el advenimiento de nuevas descubiertas en láminas de agua más profundas, fue necesario la utilización de plataformas flotantes semi-sumergibles. La plataforma semi-sumergible, es una derivación de la plataforma sumergible, la diferencia fundamental esta en la filosofía empleada para mantenerla en su posición de localización. Mientras que la plataforma sumergible utiliza su propia inercia como elemento de fijación, la plataforma semi-sumergible tiene que disponer de otros medios que permitan su posicionamiento,

garantizando la integridad de los dispositivos que unen la plataforma con el pozo productor [1].

Un cuerpo flotando libremente en el mar presenta movimientos de traslación y rotación, resultantes de la acción de fuerzas y momentos inducidos por el viento, las olas y las corrientes marinas.

Por otro lado en las operaciones realizadas en el mar, es común la necesidad de mantener un vehículo posicionado en un determinado sitio, independientemente de la influencia de los agentes ambientales.

Para poder mantener un vehículo posicionado en las condiciones descritas anteriormente, hasta hoy día es usualmente utilizado el proceso de “*amarre*”. En este proceso un vehículo cualquiera es mantenido en una posición determinada, por medio del uso de un sistema de anclaje, formado por: líneas en forma de catenaria, que une a la plataforma con el fondo del mar que, a través de mudanzas de configuración, se producen las fuerzas necesarias para mantener la unidad de producción en la posición deseada. [2].

Uno de los factores cruciales, para la viabilización de estos sistemas de producción, es poder mantener la posición

de la unidad que, de forma permanente, debe garantizar la seguridad de las operaciones sobre las acciones ambientales de las olas, vientos y corrientes marinas.

Los desplazamientos de los puntos de amarre de la unidad flotante, impuestos por los movimientos de esta, causan tensiones medias y oscilatorias en cada una de las líneas que, para su seguridad, deben estar sobre los límites considerados aceptables, que son en términos de la resistencia estática, y sobre la óptica de la vida útil de resistencia la fatiga de los cables y cadenas que componen el sistema de anclaje de la plataforma.

Actualmente, diversos Centros de Investigación han dedicado especial atención al desarrollo de sistemas de análisis para prever el comportamiento dinámico de estos sistemas de amarres; no solamente en términos de previsión de las fuerzas de tracción en el tope las líneas, sino también para la verificación de la resistencia y vida útil de los diversos elementos que componen este sistema.

En este ámbito, la verificación experimental de los resultados teóricos puede ser ejecutada a través del registro de las cargas de tracción actuantes en el tope de las líneas componentes del sistema, contabilizándose sus valores máximos, medios y mínimos, en un dado período de tiempo, en función de los desplazamientos de la plataforma. De esta forma, el desarrollo de un sistema computacional, que permita, el registro en tiempo real de estas tensiones dinámicas con sus componentes de alta y baja frecuencia, además de ser un grande avance en el sentido de poder obtener datos experimentales que permitan validar y comprobar las normas aplicadas en los proyectos de sistemas de amarre para unidades flotantes de producción en aguas profundas, podrá ser utilizado para establecer un proceso para monitorear la posición planar de la unidad en función de las tensiones medias obtenidas en el tope de las líneas que lo componen.

Así, de poseer un sistema confiable para el registro de las cargas actuantes en las líneas de amarre, se puede desarrollar un sistema computacional que permita monitorear la posición de la plataforma en el plano de la línea de agua, en relación a una referencia predeterminada. Una vez que, como procedimiento usual de operación, es de gran importancia verificar si el movimiento lateral de la plataforma está dentro de los límites permisibles de los equipamientos que unen el pozo submarino con la unidad flotante.

Actualmente, en el Brasil es la PETROBRÁS quien realiza el monitoreo de la posición de las plataformas semi-sumergibles, en la gran mayoría de los casos, mediante la utilización de un emisor acústico, que además de tener un alto costo el error es del orden del 1% de la lámina de agua de operación de la unidad flotante. Particularmente en

aguas profundas, este error de posicionamiento, puede ser considerado alto[3].

El presente trabajo trata, en primera instancia, en el desarrollo de un método para monitorear en tiempo real la posición planar de unidades flotantes amarradas. Esto es posible mediante el uso de un programa de computación realizado para este fin, partiendo como base exclusivamente de la configuración del sistema de amarre y del registro de las tensiones medias que actúan en el tope de las líneas que lo componen. Se opta, inicialmente, por el proyecto de una banco de ensayos a escala reducida para validar el método propuesto, compuesto por tres sensores solamente, teniendo en cuenta la mayor facilidad de verificar experimentalmente a nivel de laboratorio el correcto funcionamiento del sistema.

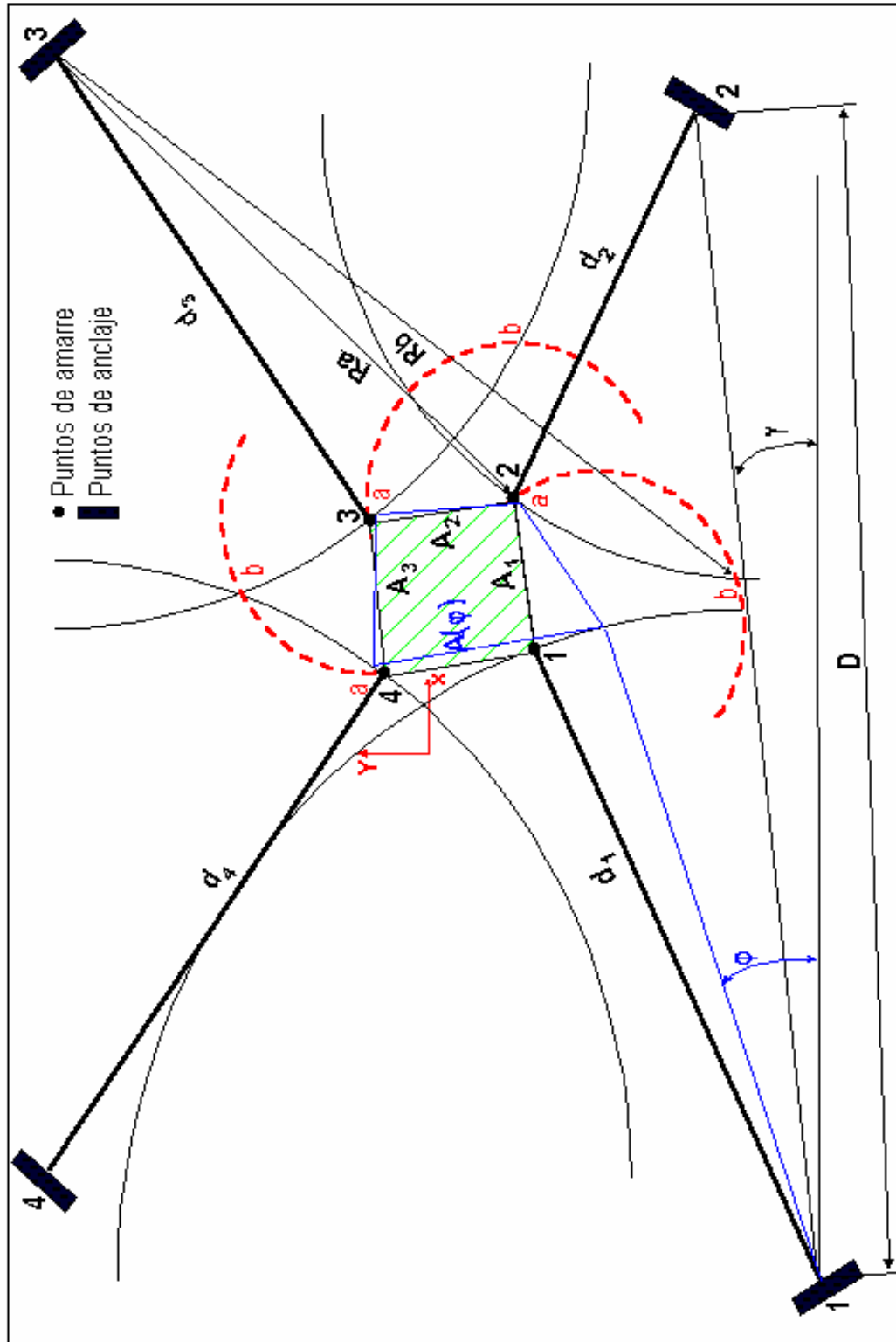
## 2. Determinación de la posición planar de la unidad flotante

Para la obtención de la posición planar de la unidad flotante mediante la utilización de las variaciones de las tensiones en las líneas de amarre, se desarrolló un programa en Turbo Pascal [4], que permite calcular y monitorear en la pantalla de la computadora la posición relativa al sistema de referencia predeterminado del centro de gravedad de la unidad flotante, según el procedimiento, que será expuesto la continuación.

### 2.1 procedimiento para el cálculo de la posición planar

Del sistema de adquisición de datos se obtiene, en tiempo real, a cada nueva posición, las distancias entre los puntos de amarre y de anclaje, conocidas como radios de anclaje y aquí definidos por:  $d(i)$ ;  $i=1,2,3$ . Por otro lado, también son conocidas, como datos del problema, las dimensiones de las aristas del cuadrilátero que define la forma de la plataforma a través de los puntos de amarre, aquí definidos por:  $A(i)$ ;  $i=1,2,3,4$ .

Así, conocidos los  $d(i)$  y  $A(i)$ , trata de resolverse un problema geométrico mediante el cálculo sucesivo de intersecciones de circunferencias, para el cual se adopta la siguiente hipótesis *“La unidad flotante, definida por los puntos de amarre, estará siempre circunscrita a la región definida por las intersecciones entre las circunferencias de los radios de anclaje (líneas continuas) y las circunferencias de los radios de las aristas (líneas discontinuas) del polígono formado por los puntos de amarre”*. (ver figura 1)



**Fig. 1.** Procedimiento para la determinación de la posición de la plataforma.

A partir de este contexto, tomase una posición angular inicial arbitraria ( $\phi$ ), de la primera línea de amarre, para de ella como en lo adelante veremos, obtener la distancia (**A**) entre el último y el primer punto de amarre (ver nuevamente la figura 1).

De este modo, datos:

$X(i), Y(i)$  = coordenadas de los puntos de anclaje, para  $i=1,2,3,4$ ;

$d(i)$  = radios de anclaje obtenidos en función de las tensiones en las líneas de amarre, para  $i=1,2,3$ ;

$A(i)$  = dimensiones de las aristas del cuadrilátero que define la plataforma por los puntos de amarre, para  $i=1,2,3,4$ .

Se establece el siguiente procedimiento para el cálculo de  $A(\phi)$ :

i) Cálculo de las coordenadas del primer punto de amarre:

$$\bar{X}(1) = X(1) + d(1) \cdot \cos \phi \quad (1)$$

$$\bar{Y}(1) = Y(1) + d(1) \cdot \sin \phi \quad (2)$$

ii) Cálculo de las demás coordenadas para los restantes puntos de amarre:

para:

$$j = 1, 2, 3$$

$$j_1 = j + 1$$

$$j_2 = j + 2$$

Inter Cir [ $\bar{X}(j)$ ,  $\bar{Y}(j)$ ,  $A(j)$ ,  $X(j_1)$ ,  $Y(j_1)$ ,  $d(j_1)$ ]  $\Rightarrow$   $X_a$ ,  $Y_a$ ,  $X_b$ ,  $Y_b$

Si  $J_2 > 4$  entonces  $j_2 = 1$

$$Ra = \sqrt{[Xa - X(j_2)]^2 + [Ya - Y(j_2)]^2} \quad (3)$$

$$Rb = \sqrt{[Xb - X(j_2)]^2 + [Yb - Y(j_2)]^2} \quad (4)$$

De los dos posibles puntos de intersección (a y b), entre ambas circunferencias, se toma aquel que queda más cerca del punto de anclaje con coordenadas  $X(j+2)$ ,  $Y(j+2)$  “. Ver nuevamente la figura 1.

La función “Inter Cir”, citada, trata del cálculo de las intersecciones entre dos circunferencias, la primera de radio

$A(j)$  centrada en el punto de amarre en  $\bar{X}(j)$ ,  $\bar{Y}(j)$  y la segunda de radio  $d(j+1)$  centrada en el punto de anclaje en  $X(j+1)$ ,  $Y(j+1)$ .

El sistema de ecuaciones para el algoritmo de la función “Inter Cir”, no se incluye en el trabajo, para no extender demasiado este tópico y el lector pueda perder la secuencia del procedimiento que está siendo expuesto, el interesado puede consultar la referencia [5].

iii) En los cálculos anteriores, se establece la función  $A(\phi)$  como:

$$A(\phi) = \sqrt{(\bar{X}_4 - \bar{X}_1)^2 + (\bar{Y}_4 - \bar{Y}_1)^2} \quad (6)$$

Cuando la distancia  $A(\phi)$  obtenida por la ecuación (6) fuera igual al tamaño de la última arista, queda, entonces, determinada la posición de la plataforma. En este contexto, se establece el problema matemático de extracción de las raíces de la función definida por:

$$f(\phi) = A(\phi) - A_4 \quad (7)$$

Donde  $A_4$  es el valor de la última arista del cuadrilátero. Note que, para la definición del problema así formulado, basta, eventualmente, trabajar con apenas tres radios de anclaje, cuando se admite forma rectangular conocida para la plataforma. En este caso la distancia  $d_4$  es redundante.

En la figura 2 se ilustra el comportamiento de la función  $f(\phi)$  según (7), de la cual se desea obtener las raíces, para esto, se utilizó el Método de la Secante [6] para ambos lados del punto de mínimo observado

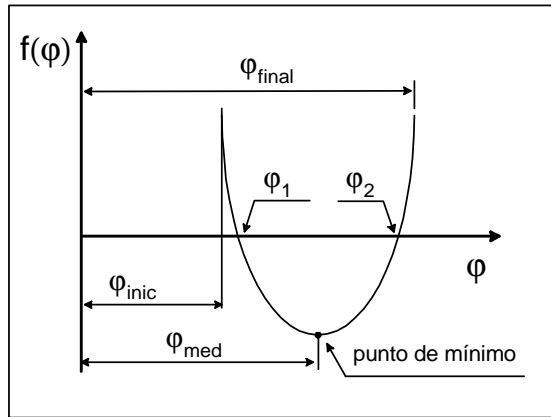


Fig. 2. Cálculo de las raíces de la Función  $A(\phi)$ .

Fuera del intervalo establecido por los valores  $\phi_{\text{inic}}$  y  $\phi_{\text{final}}$ , por razones del cálculo geométrico, la función no tiene valor definido, ya que el problema queda sin solución. Una vez conocido el valor de  $\phi_{\text{med}}$ , se torna bastante simple aplicar el Método de la Secante para obtención de las raíces  $\phi_1$  y  $\phi_2$ .

## 2.2 obtención de los valores extremos del ángulo $\phi$

Los valores extremos del ángulo  $\phi$ , para definir el intervalo de la función donde estará el valor mínimo y las raíces, dependen de las posiciones límites que puede tener la unidad flotante en función de la geometría definida por los puntos de amarre y los radios de anclaje  $d_2$  y  $d_4$ , pues tales posiciones quedan definidas por la intersección de las circunferencias de esos radios de anclaje, sumándoles la arista  $A_4$ , con la circunferencia de radio  $d_1$ .

Conocidos los radios de anclaje  $d_1$ ,  $d_2$  y  $d_3$ , el mayor ángulo posible de alcanzar ( $\phi_{\text{final}}$ ), donde puede quedar el punto de amarre 1, es aquel donde se interceptan las circunferencias de radio de anclaje  $d_1$  y de radio igual a  $(d_2 + A_4)$ , pues, para que exista otro mayor que ese, tendría que aumentar el valor de  $d_2$  o  $A_4$ , lo que es imposible.

Para el caso de la determinación del menor ángulo posible ( $\phi_{\text{inic}}$ ), ocurre situación similar definida por la intersección de las circunferencias de radio  $(d_4 + A_4)$  y la de radio  $d_1$ .

Por otro lado, es preciso calcular el valor del radio  $d_4$ , que nos permita obtener el valor de  $\phi_{\text{inic}}$ , pues  $d_4$  no es leído inicialmente, tal como ya fue explicado anteriormente (resulta redundante para el caso de geometría rectangular). Se opta por arbitrar un valor ficticio para  $d_4$  en función del valor leído para  $d_2$  y de la distancia  $D_{24}$  (que separa a los puntos de anclaje 2 y 4 respectivamente), considerando que la mayor separación que puede existir entre el radio de anclaje  $d_2$ , y el radio de anclaje  $d_4$ , es la diagonal formada por las aristas  $A_4$  y  $A_1$ , o sea:

$$D_{24} = \sqrt{(X_4 - X_2)^2 + (Y_4 - Y_2)^2} \quad (8)$$

$$A_{14} = \sqrt{(A_1)^2 + (A_4)^2} \quad (9)$$

entonces:

$$d_4 = D_{24} - (d_2 + A_{14}) \quad (10)$$

En la figura 3 se muestran los parámetros geométricos, que permiten definir los valores extremos de  $\phi$ , que definen el intervalo donde la función  $f(\phi)$  tiene su valor mínimo.

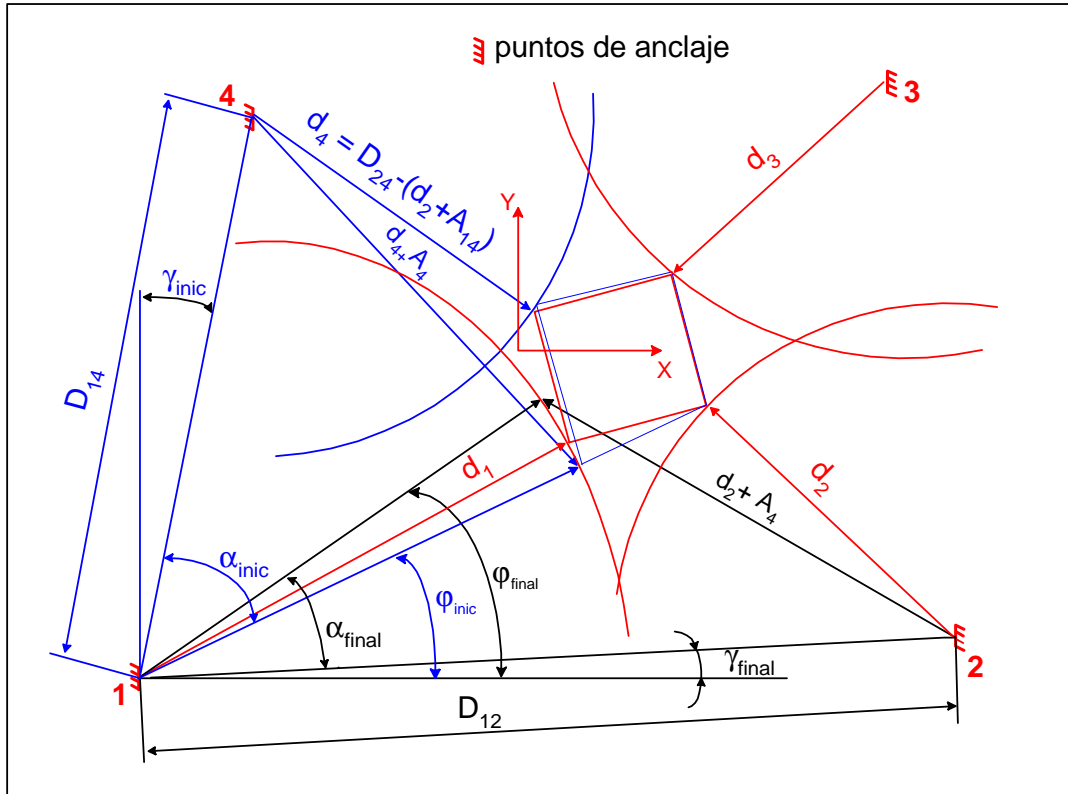


Fig. 3. Esquema para obtener los valores extremos del ángulo  $\phi$ .

Del análisis de la geometría, se tiene:

$$D_{12} = \sqrt{(X_2 - X_1)^2 + (Y_2 - Y_1)^2} \quad (11)$$

$$D_{14} = \sqrt{(X_4 - X_1)^2 + (Y_4 - Y_1)^2} \quad (12)$$

que son las distancias que existen entre los puntos de anclaje 1 y los puntos 2 y 4, respectivamente. Así, aplicando la ley de los cosenos [7], los ángulos  $\alpha_{\text{inic}}$  y  $\alpha_{\text{final}}$ , de la figura 4, son obtenidos por:

$$\alpha_{\text{inic}} = \arccos\left(\frac{d_1^2 + D_{14}^2 - (d_4 + A_4)^2}{2 \cdot d_1 \cdot D_{14}}\right) \quad (13)$$

$$\alpha_{\text{final}} = \arccos\left(\frac{d_1^2 + D_{12}^2 - (d_2 + A_4)^2}{2 \cdot d_1 \cdot D_{12}}\right) \quad (14)$$

Por otro lado, lo mismo para el ángulo  $\gamma$  que fácilmente es obtenido por:

$$\gamma_{\text{inic}} = \arcsen\left(\frac{X_1 - X_4}{D_{14}}\right) \quad (15)$$

$$\gamma_{\text{final}} = \arcsen\left(\frac{Y_2 - Y_1}{D_{12}}\right) \quad (16)$$

donde, finalmente, tenemos:

$$\phi_{\text{mín}} = \pi/2 + \gamma_{\text{inic}} - \alpha_{\text{inic}} \quad (17)$$

$$\phi_{\text{máx}} = \alpha_{\text{final}} + \gamma_{\text{final}} \quad (18)$$

### 2.3 Método para la obtención del valor de $\phi_{\text{med}}$ .

Para la obtención del valor de  $\phi_{\text{med}}$ , donde se da el valor mínimo de la función  $f(j)$ , se utiliza el método de busca del valor mínimo [8], cuya condición necesaria y suficiente es tener certeza que exista un valor mínimo en el intervalo (a, c), que precisamente son las condiciones de nuestro problema.

Por lo tanto, conocidos  $\phi_{\text{inic}}$  y  $\phi_{\text{final}}$  del ángulo  $\phi$ , es utilizado el algoritmo según la referencia [8] para establecer la función “Gold” que trata de la obtención del valor de  $\phi_{\text{med}}$  donde se da el valor mínimo de la función  $f(\phi)$ .

Una vez obtenido el valor  $\phi_{\text{med}}$ , entonces son calculadas las dos raíces por el Método de la Secante como ya fue

indicado anteriormente. Las dos raíces, de modo general presentes, representan, las dos posibles soluciones del problema geométrico, distintas una de la otra, de acuerdo con la posible posición angular que pudiera tener la plataforma en un momento dado.

### 2.4 Patogenia del problema geométrico

Como ya fue comentado anteriormente, existen dos soluciones del problema geométrico, como se ilustra en el caso patológico simple de la figura 4. De modo general, para cualquier conjunto de radios de anclaje  $d(i)$  siempre habrá dos soluciones que se distinguen, básicamente, por el valor diferenciado del ángulo de  $Y_{aw}$ .

Así, la decisión sobre cual de las raíces tomar, de forma de conducir a la real posición angular de la plataforma, debe ser respaldada en información adicional, relacionada con los parámetros geométricos ya definidos. Como solución, optamos por imponer el monitorear el ángulo “ $y_{aw}$ ” de manera tal de tomar aquel que, dentro de los dos geoméricamente posibles en cada nueva posición de la plataforma, sea compatible con el histórico pasado del movimiento de la plataforma.

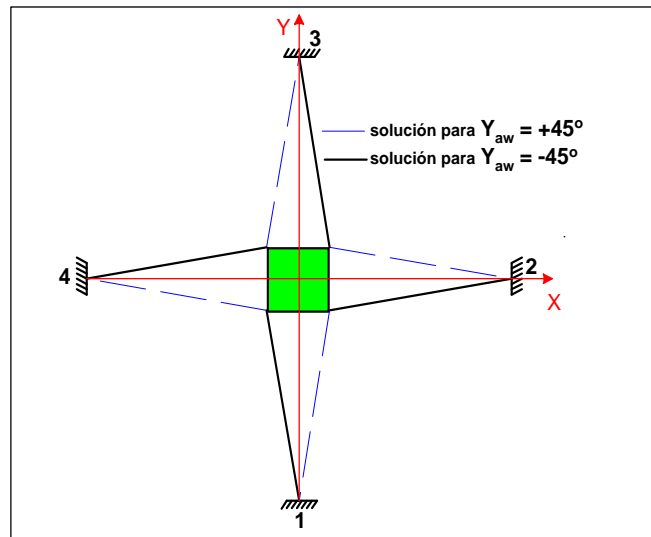


Fig. 4. Patogenia del Problema Geométrico

## 2.5 Posición del centro de gravedad de la unidad

Finalmente, las coordenadas del centro de gravedad de la unidad flotante quedan determinadas por las siguientes ecuaciones:

$$X_G = \frac{\sum \bar{X}(i)}{4} \quad (19)$$

$$Y_G = \frac{\sum \bar{Y}(i)}{4} \quad (20)$$

Obtenidas las coordenadas del centro de gravedad de la unidad, podemos calcular la magnitud y dirección del vector que caracteriza el "OFFSET", para cada nueva posición adoptada por la unidad flotante durante su movimiento.

Así, para la amplitud, tenemos:

$$DIST_{OFF} = \sqrt{X_G^2 + Y_G^2} \quad (21)$$

y para la dirección:

$$\theta_{OFF} = \arctan\left(\frac{Y_G}{X_G}\right) \quad (22)$$

El programa desarrollado, además del cálculo en tiempo real de las coordenadas del centro de gravedad de la unidad flotante, muestra en la pantalla de la computadora el monitoreo de la posición de la unidad, los radios de anclaje obtenidos, la amplitud y dirección del "Offset" calculado, así como la etapa de funcionamiento en que se encuentra el programa, sea lectura de la placa o cálculo, en el caso que el cálculo obtenido este fuera de la tolerancia impuesta, entonces es indicado una señal de alarma y se muestra en la pantalla el aviso "PRECISION LACK". Si, por acaso, la unidad estuviera, fuera del "Offset limite" es indicado una nueva señal de alarma.

En la figura 5 se muestra la pantalla que el programa desarrollado utiliza para monitorear la posición planar de la unidad flotante

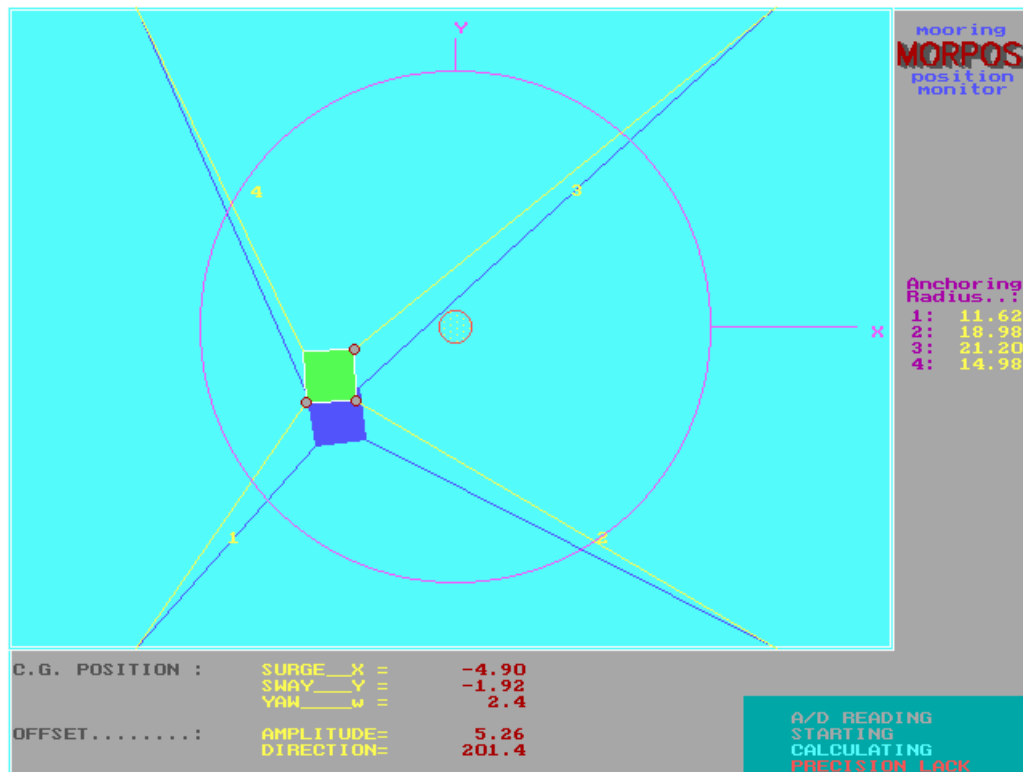


Fig. 5. Pantalla de los resultados obtenidos por el programa en el monitoreo de la posición.

Después de explicado todo el procedimiento para la obtención de la posición de la unidad flotante (*"plataforma"*) es preciso la realización de los ensayos para poder evaluar todo el sistema desarrollado en el trabajo, considerando la posibilidad de aplicación de monitorear en tiempo real.

### 3. Ensayos para evaluación del sistema propuesto

Para poder evaluar el método propuesto fue desarrollado un banco de ensayos que incluye: el modelo en escala reducida, aquí denominado *"plataforma"*, el sistema de amarre, aquí llamado *"amarras"*, el sistema de adquisición y análisis de las tensiones y el programa desarrollado para monitorear la unidad. En la figura 6 se muestra un esquema simplificado del mismo.

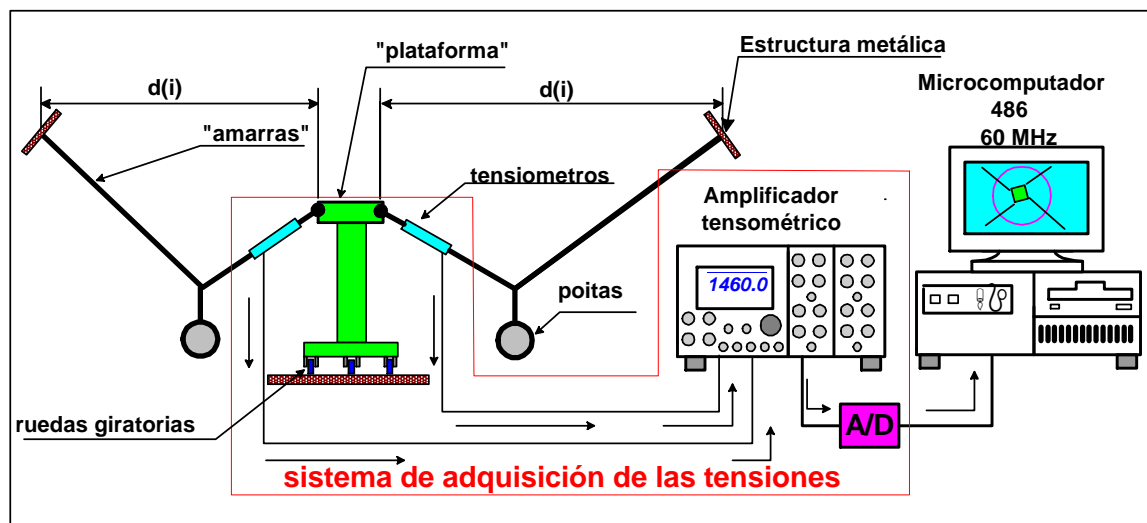


Fig. 6. Esquema de las componentes fundamentales utilizadas en el modelo de banco de ensayos.

El banco utilizado considera, esencialmente, los aspectos fundamentales que son importantes tener en cuenta en la evaluación de todos las componentes del sistema que nos permitirá, finalmente, monitorear en tiempo real el movimiento de la plataforma.

Es importante destacar que el banco no pretende simular el movimiento real de una unidad flotante, simplemente se desea simular desplazamientos en el plano horizontal que nos permitan, por su simplicidad, obtener una primera evaluación del método.

Los puntos de anclaje son simulados a través de la estructura metálica que permite la fijación de las *"amarras"*, por su extremo superior, a una determinada altura de los extremos amarrados a la *"plataforma"*. Esta solución, dada a las líneas de amarre, todavía no satisface el comportamiento de catenaria, pues es imposible obtenerlo dado el tamaño reducido del modelo.

El efecto de catenaria se obtiene por la utilización de pesos concentrados, llamados aquí de *poitas*, de forma tal que se puede tener tensiones medias medibles que varían con el cambio de posición de la plataforma.

El modelo consta de cuatro amarras, por tanto, cuatro puntos de amarre, distribuidos de manera que se garantice forma rectangular conocida. Para la definición del problema basta trabajar con apenas tres radios de anclaje en la determinación de la posición de la plataforma, como ya fueron explicados con más detalles anteriormente.

El sistema computacional, para la adquisición y análisis de la variación de las tensiones, es compuesto por tres tensiómetros, por el amplificador tensométrico tipo 2200 [9], por un conversor analógico digital CAD 12/32 de la Linx [10], una computadora IBM PC/AT y el programa que permite la obtención y el tratamiento de los valores de las tensiones en cada una de las tres líneas de amarre.

Se opta, en primera instancia, por evaluar separadamente el programa desarrollado y el sistema completo, para poder evaluar el cumplimiento de los requisitos necesarios para el tiempo real.



### 3.1. Ensayos para evaluar el programa desarrollado

El programa desarrollado en turbo Pascal, fue instalado en una Computadora 486 - 60 MHz, con la finalidad de evaluar la robustez del mismo y comprobar la confiabilidad de los cálculos realizados, mediante la utilización de archivos de datos que simulen las lecturas del conversor A/D. Estos archivos suministran al programa trayectorias conocidas del movimiento del centro de gravedad de la plataforma.

Se opta por este tipo de ensayo, para tener una primera evaluación si el procedimiento desarrollado para el cálculo de las coordenadas del centro de gravedad es válido, y si los métodos numéricos utilizados en el programa, para obtener el valor mínimo de la función y los valores de las raíces que permiten finalmente poder monitorear en la pantalla de la computadora la posición de la plataforma, tiene la rapidez y eficacia necesarias para ser utilizados en tiempo real.

Como el objetivo fundamental del programa es monitorear en tiempo real, los cálculos obtenidos precisan tener una repuesta mayor que, la repuesta de frecuencia de las condiciones ambientales que producen los desplazamientos de la plataforma, generalmente los movimientos de 1ª orden producidos en la unidad flotante por las condiciones ambientales de las olas, el período de estos movimientos son superiores a los 2.5 segundos [11], el cual nos permite establecer como requisito básico un tiempo de 1.5 segundos ha ser cumplido en el sistema propuesto, de esta forma se garantiza que los cálculos realizados por el programa sean obtenidos con tiempo suficiente para monitorear en tiempo real en la pantalla de la computadora la posición planar de la unidad.

En la realidad lo que es leído por el conversor A/D es un número  $n$  de valores de tensión en cada una de las amarras, con el cual, se calcula el valor medio de la muestra  $n$  seleccionada, estos valores tienen una determinada dispersión del valor exacto, entonces se puede obtener una semejanza con la realidad, aplicándoles a los valores exactos que son suministrados en los datos de los archivos que simulan trayectorias conocidas, un porcentaje de error aleatorio, en función de la tolerancia seleccionada para el cálculo, de esta forma, puede obtenerse una simulación de las lecturas del conversor A/D tal como si fuera lo que ocurre en la realidad.

Fueron aplicados dos tipos de trayectorias diferentes para evaluar el programa, la primera describiendo una circunferencia de radio constante, la segunda de radio variable describiendo una trayectoria en forma de un numero ocho horizontal ( $\infty$ ) en ambos casos, el movimiento de la unidad nunca excede el valor del “offset” limite suministrado en los datos iniciales del programa. Por último, a la trayectoria de radio variable es aplicado un valor de radio que alcance valores superiores al valor del “offset”

limite, para poder evaluar esa condición, prevista, con la emisión de una señal de alarma en el programa desarrollado.

Estos tres ensayos fueron realizados por más de 30 horas de funcionamiento continuo para poder tener una correcta evaluación de la robustez del programa, teniendo en cuenta que, en tiempo real, el programa en todo momento tiene que funcionar correctamente, durante todas las horas de duración, Se comprobó el correcto funcionamiento del programa desarrollado, pues se obtuvo el monitorear la correspondiente trayectoria del archivo de datos suministrado, siendo la respuesta dinámica obtenida muy superior a la requerida en la realidad.

Otra comprobación realizada durante los ensayos fue conferir el correcto funcionamiento de la solución utilizada en el programa para la selección de una de las dos raíces posibles dadas por la solución del problema geométrico como ya fue comentado anteriormente, se comprobó las tres posibilidades brindadas por el programa, la primera monitorar la trayectoria para la condición de  $y_{aw} = +45^\circ$ , la segunda tomando  $y_{aw} = -45^\circ$  y por último las dos soluciones simultáneamente durante el monitoreo de la unidad, se obtuvo en todos los casos los resultados esperados.

Después de los ensayos, se comprobó el correcto funcionamiento del programa desarrollado, presentando precisión, rapidez, eficacia y robustez en los cálculos obtenidos para el monitoreo de la posición. Por tanto, el método propuesto para el cálculo de las coordenadas del centro de gravedad de la unidad, así como los métodos utilizados en el algoritmo del programa para obtener el valor mínimo de la función y sus raíces, son válidos para el propósito establecido inicialmente para monitorear en tiempo real.

### 3.2. Ensayos realizados para evaluar el sistema propuesto utilizando mediante el banco de ensayos

Para la evaluación del sistema propuesto mediante el banco de ensayos ya expuesto anteriormente, se realizaron dos tipos de ensayos, el primero consiste en imponer desplazamientos rectilíneos discretos en el eje “X”, en el eje “Y” y el segundo en desplazamiento continuos en el plano horizontal.

El objetivo fundamental de este primer ensayo es obtener una evaluación cuantitativa de los resultados obtenidos por el programa, comparando los resultados experimentales obtenidos en la pantalla de la computadora durante el monitoreo en tiempo real con los resultados teóricos calculados por la geometría del banco en función de los desplazamientos discretos según la dirección del eje seleccionado.

Para garantizar desplazamiento en la dirección de los ejes “X” e “Y”, el modelo de la plataforma del banco fue

montado en guías rectilíneas que sólo permiten desplazamiento en la dirección que se quiere evaluar. Mediante un pie de rey acoplado en las guías se controla los desplazamientos impuestos en la dirección del eje seleccionado, siendo posible imponer desplazamientos hasta el valor máximo de 150 milímetros, por tanto, se toma para la realización de este ensayo el valor fijo de 10 mm para desplazar el modelo de la plataforma discretamente en ambos sentidos del origen del sistema de coordenadas relativo asumido en el programa hasta completar el desplazamiento máximo de 150 mm del pie de rey.

Se realizaron un total de 10 mediciones durante los diez días de duración de los ensayos, para poder obtener una mejor evaluación de los resultados y poder observar la estabilidad de las mediciones.

Es importante destacar que en este tipo de ensayo también fue posible obtener ensayos de movimientos continuos rectilíneos y observar el correcto monitoreo de la posición en tiempo real en la pantalla de la computadora durante más de quince idas de duración de los ensayos tanto en la dirección del eje “x” e “y”, aprovechándose esta instalación.

En las tablas 1 y 2 se muestran los resultados obtenidos en una de las mediciones hechas durante los ensayos realizados según la dirección del eje “x” e “y” respectivamente, se incluyen en las tablas los valores teóricos, aquí llamados de “real”, calculados mediante los datos de la geometría del banco de ensayos, los valores de los parámetros calculados por el programa mostrados en la pantalla de la computadora y el % del error según la comparación de los resultados obtenidos.

**Tabla 1.** Valores obtenidos en los desplazamientos en el eje “X” durante la realización de los ensayos para evaluar el sistema propuesto.

	COORDENADAS DO CENTRO DE GRAVEDAD [mm]						" OFFSET "					
[mm]	XG			$\Delta$ X			Y G	Amplitud [mm]			Amplitud [grados]	
Desplaz.	En la pantalla	real	% error	En la pantalla	real	% error	En la pantalla	En la pantalla	real	% error	En la pantalla	real
0,00	-88,70	-	0,34	0,00	0,00	0,00	0,80	88,70	89,00	0,33	179,50	180,00
10,00	-78,60	-	0,51	10,10	10,00	1,00	0,70	78,60	79,00	0,50	179,50	180,00
20,00	-68,70	-	0,43	9,90	10,00	1,00	0,80	68,70	69,00	0,43	179,40	180,00
30,00	-58,70	-	0,51	10,00	10,00	0,00	0,50	58,70	59,00	0,50	179,60	180,00
40,00	-48,80	-	0,41	9,90	10,00	1,00	0,40	48,80	49,00	0,40	179,60	180,00
50,00	-38,90	-	0,26	9,90	10,00	1,00	0,30	38,90	39,00	0,25	179,60	180,00
60,00	-28,75	-	0,86	10,15	10,00	1,50	-0,18	28,75	29,00	0,86	180,30	180,00
70,00	-18,82	-	0,95	9,93	10,00	0,70	-0,17	18,82	19,00	0,94	180,50	180,00
80,00	-8,74	-9,00	2,89	10,08	10,00	0,80	-0,20	8,74	9,00	2,86	181,20	180,00
90,00	0,98	1,00	2,00	9,72	10,00	2,80	-0,20	1,00	1,00	0,02	349,50	360,00
100,00	10,78	11,00	2,00	9,80	10,00	2,00	-0,25	10,78	11,00	1,97	358,80	360,00
110,00	20,90	21,00	0,48	10,12	10,00	1,20	-0,24	20,90	21,00	0,47	359,40	360,00
120,00	31,05	31,00	0,16	10,15	10,00	1,50	-0,22	31,05	31,00	0,16	359,60	360,00
130,00	41,21	41,00	0,51	10,16	10,00	1,60	-0,20	41,21	41,00	0,51	359,70	360,00
140,00	51,15	51,00	0,29	9,94	10,00	0,60	-0,23	51,15	51,00	0,30	359,80	360,00
150,00	60,95	61,00	0,08	9,80	10,00	2,00	-0,25	60,95	61,00	0,08	359,80	360,00
			$\Sigma$	149,65	150,00	0,23						

**Tabla 2.** Valores obtenidos en los desplazamientos en el eje “Y” durante la realización de los ensayos para evaluar el sistema propuesto.

[mm]	COORDENADAS DO CENTRO DE GRAVEDAD [mm]						" OFFSET "					
	YG			$\Delta Y$			X G	Amplitud [mm]			Amplitud [grados]	
Desplaz ..	En la pantalla	real	% error	En la pantalla	real	% error	En la pantalla	En la pantalla	real	% error	En la pantalla	real
0,00	-86,40	-86,00	0,47	0,00	0,00	0,00	0,55	86,40	86,00	0,47	270,40	270,00
10,00	-76,30	-76,00	0,39	10,10	10,00	1,00	0,40	76,30	76,00	0,40	270,30	270,00
20,00	-66,30	-66,00	0,45	10,00	10,00	0,00	0,45	66,30	66,00	0,46	270,40	270,00
30,00	-56,20	-56,00	0,36	10,10	10,00	1,00	0,40	56,20	56,00	0,36	270,40	270,00
40,00	-46,20	-46,00	0,43	10,00	10,00	0,00	0,45	46,20	46,00	0,44	270,60	270,00
50,00	-36,20	-36,00	0,56	10,00	10,00	0,00	0,25	36,20	36,00	0,56	270,40	270,00
60,00	-26,20	-26,00	0,77	10,00	10,00	0,00	0,10	26,20	26,00	0,77	270,20	270,00
70,00	-16,10	-16,00	0,62	10,10	10,00	1,00	-0,20	16,10	16,00	0,63	269,30	270,00
80,00	-6,13	-6,00	2,17	9,97	10,00	0,00	-0,25	6,14	6,00	2,25	267,70	270,00
90,00	3,82	4,00	4,50	9,95	10,00	0,50	0,20	3,83	4,00	4,37	87,00	90,00
100,00	13,75	14,00	1,79	9,93	10,00	0,70	0,35	13,75	14,00	1,75	88,50	90,00
110,00	23,85	24,00	0,62	10,10	10,00	1,00	0,45	23,85	24,00	0,61	88,90	90,00
120,00	33,80	34,00	0,59	9,95	10,00	0,50	0,34	33,80	34,00	0,58	89,40	90,00
130,00	43,90	44,00	0,23	10,10	10,00	1,00	0,20	43,90	44,00	0,23	89,70	90,00
140,00	54,15	54,00	0,28	10,25	10,00	2,50	0,28	54,15	54,00	0,28	89,70	90,00
150,00	64,10	64,00	0,16	9,95	10,00	0,50	0,30	64,10	64,00	0,16	89,70	90,00
			$\Sigma$	150,50	150,00	0,33						

Analizando los valores obtenidos durante este ensayo, se puede observar que el error cometido en el desplazamiento total de 150 mm no excede el 0.5%, en tanto, el error en el cálculo de la coordenada XG e YG fuera de los valores cerca de cero no exceden 1.0%. Por tanto según estos resultados, las hipótesis desarrolladas y los cálculos obtenidos a través del programa y el sistema presentado satisfacen los requisitos para el cual fue concebido.

#### 4. Conclusiones

Los ensayos realizados, para evaluar el sistema propuesto, permitieron obtener las siguientes conclusiones:

- El sensor dinámico para medir las tensiones en el tope de las líneas de amarre aquí denominado “*tensiómetro*” tiene una estabilidad en la medición de  $\pm 1\%$ , el desvío en las lecturas no excede el 1.5% del valor real.
- El sistema de adquisición y análisis de las tensiones compuesto por los tensiómetros, el conversor analógico

digital A/D, el programa desarrollado, satisface las condiciones necesarias y suficientes para la obtención de las lecturas de las tensiones en tiempo real.

- El programa, que utiliza como procedimiento el método desarrollado para el cálculo de las coordenadas del centro de gravedad de la unidad amarrada partiendo de las tensiones medias en el tope de las líneas, tiene precisión, robustez, y respuesta dinámica suficiente para el ser aplicado en tiempo real.
- El método propuesto, permite monitorear en tiempo real la posición planar de la unidad amarrada, mediante el uso del programa de computación desarrollado para este fin, y sólo precisa que los tensiómetros utilizados para el registro de las cargas actuantes en las líneas de amarre garanticen la estabilidad de las mediciones después de su instalación.

#### 5. Recomendaciones

Se recomienda, para tener una mejor evaluación del sistema propuesto, principalmente en el comportamiento dinámico, que el sistema pueda ser evaluado en una mesa "X Y" de control numérico, o por la aplicación en el banco de ensayo de un dispositivo con mecanismos que permitan movimientos de trayectorias conocidas con control de la velocidad de los movimientos impuestos y de esta forma poder evaluar con mayor exactitud la verdadera respuesta dinámica del sistema.

## Bibliografía

1. ANDRADE, B.L.R. ; BRINATI H.L. ; MORISHITA H.M ;FERRARI J.A.F. Jr. *Sistema de Anclaje e Posicionamento*. São Paulo 1995, v.1, curso de especialización - Convenio PETROBRÁS/USP, junho 1995.
2. DONHA, D.C. *Estudo do posicionamento dinâmico para plataforma semi-submersível*. São Paulo, 1983. Dissertação (Mestrado)- Escola Politécnica, Universidad de São Paulo.
3. MORGAN, M.J. *Dynamic positioning offshore vessels*. The petroleum Publishing Co. Oklahoma, 1978 . USA.
4. STEPHEN O'BRIEN. *Turbo Pascal Completo y Total*. Editora McGraw - Hill Ltda. São Paulo, 1993.
5. GARCÍA, M.A. *Um método para la monitoración da posição planar de unidades flutuantes amarradas*. São Paulo, 1997. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidad de São Paulo.
6. BATHE, K.J. ; WILSON, E.L. *Numerical Methods in Finite Element Analysis*. Prentice Hall. Inc. New Jersey, 1976.
7. SPIEGER, M.R. *Manual de fórmulas y tablas matemáticas*. Mc.Graw- Hill ,1980.
8. WILLIAM, H.P. ; BRIAN, P.F. ; SAUL, A.T.; WILLIAM, T.V. *Numerical Recipes in C*. v.2. Cambridge Univerity Press. New York . Port Chester, 1988.
9. Measuremnts Group, Inc. *Signal Conditioning System*. Instruction Manual Model 2200. North Carolina, 1985, USA.
10. Lynx, Tecnologia Eletrônica. Ltda. *Conversor analógico digital CAD 12/36*. Manual do Usuário y Referencia, São Paulo, 1990. Brasil.
11. MARTINS, R.M. *Procedimento de síntese de sistemas "Taut-Leg" para anclaje de unidades flutuantes*. São Paulo, 1996. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidad de São Paulo.

## A method for monitoring the planar position of tied floating units

### Abstract

This work studies semisubmersible platforms positioning problems. la method for real time monitoring of the moored floating units planar position was developed using the information obtained from the measuring of the generated tensions at the top of the mooring system component lines. The method was evaluated with la scale reduced model.

The monitoring of the floating unit planar position is obtained using la software speciquedally developed for this purpose. For evaluating the proposed method, la testing device composed by la reduced scale model of the platform and la dynamic sensors system to acquire and analyze the signals was used. The outputs obtained from the simulated movements induced in the model in order to evaluate the proposed system performance are presented and analyzed.

**Key words:** Real time, platform positioning, monitoring of floating units, programs for position calculation.