

## Evaluating the Dynamic Behavior of Pump Stations in Lake Maracaibo

Antonio R. Sarcos P.<sup>1</sup>, Lizbelángel Gordillo<sup>1</sup>, Igor Rodríguez<sup>1</sup>, Alexis Segovia<sup>1</sup>, Roberto Angulo<sup>2</sup> y Fernando Urdaneta<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Escuela de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia, Apartado Postal: Ipostel Bella Vista, Nº 10483. Maracaibo 4002-A, Venezuela. Tel/fax: +58-(061) 212711. E-mail: asarcos@luz.ve.

<sup>2</sup>Lagoven.

### Abstract

Moderate motion in LAGOVEN'S Flow Station EF-LL-87 in Lake Maracaibo prompted the search for the cause of these displacements, which create indisposition and concern among people working on the station. The aim of this paper is to determine the causes of this appreciable motion in Flow Station EF-LL-87 by means of an experimental and analytical dynamic evaluation of the structure. Data were collected *in situ*, on the accelerations generated on the platform over a long period of time, as well as pump speeds and vibration frequencies associated with the reciprocating pumps located on the platform, excitation frequencies and expected wind and swell speeds, among others. STAD-III, a structural analysis software program, was used simultaneously to develop a structural 3-D model of the platform in order to calculate the structure's natural vibration frequencies and thus identify which exciting frequency or frequencies of the different stimuli affecting the platform come closest to its fundamental vibration frequency, thus amplifying its displacements. The results show that the operative vibration frequencies of pumps are very closed to fundamental vibration frequency of platform, and it produces resonance effect.

**Key words:** Vibration modes, flow stations, resonance, reciprocating pumps.

## Evaluación del comportamiento dinámico de estaciones de flujo situadas en el Lago de Maracaibo

### Resumen

Debido a la aparición de movimientos moderados en la Estación de Flujo EF-LL-87, de la empresa LAGOVEN situada en el Lago de Maracaibo, se establece la necesidad de localizar las causas de estos desplazamientos que ocasionan malestar y preocupación a las personas que allí laboran. El objetivo de este trabajo es la determinación, a través de una evaluación dinámica experimental y analítica de la estructura, de las causas que generan movimientos apreciables de la Estación de Flujo EF-LL-87. Para ello, fue necesario recopilar datos en sitio de las aceleraciones que se generan en la plataforma durante un período largo de tiempo, así como las velocidades y las frecuencias de vibración asociadas a las bombas reciprocantes ubicadas sobre la plataforma, las frecuencias de excitación y velocidades esperadas para el viento y el oleaje en la zona, entre otros. Paralelamente fue necesario realizar un modelo estructural tridimensional de la plataforma utilizando el Software de análisis estructural STAD-III a fin de calcular las frecuencias naturales de vibración de la estructura e identificar así cual ó cuales de las frecuencias excitadoras de los diversos estímulos que inciden en la plataforma se aproximan más a la frecuencia fundamental de vibración de la misma amplificando sus desplazamientos. Los resultados demuestran que las bombas utili-

zadas presentan una frecuencia de vibración de operación muy cercana a la frecuencia natural de vibración de la plataforma, razón por la cual se origina el fenómeno de resonancia.

**Palabras clave:** Modos de vibración, estaciones de flujo, resonancia, bombas reciprocantes.

## Introducción

La presencia de vibraciones en varias de las estructuras que conforman las instalaciones de la Industria Petrolera, Petroquímica y Carbonífera Nacional (IPPCN) ha generado diversos estudios por parte de las Empresas Filiales de PDVSA, siendo LAGOVEN S.A quien se dio a la tarea de identificar la causa de los movimientos generados en una de sus estaciones de flujo. Para ello, se utilizaron diversas excitaciones que pudieran generar vibraciones en este tipo de instalaciones, como son: el oleaje, el viento, el efecto de las bombas reciprocantes, entre otros [1]. La revisión bibliográfica indica la existencia de estudios similares realizados por la industria petrolera a otras plataformas, tales como los trabajos de Tallavo y Martínez [2]. En todos ellos se intenta identificar las posibles causas de las vibraciones excesivas en las estructuras, sin embargo, en el caso objeto del presente estudio la incidencia de múltiples factores externos en la vibración de la plataforma hace más compleja la investigación.

Para llevar a cabo esta investigación fue necesario realizar una serie de mediciones de vibración en sitio, colocando un acelerómetro triaxial en la parte superior de la plataforma y capturando continuamente datos de la aceleración de la estructura durante un período prolongado de tiempo. Las señales proporcionadas por el instrumento se generaron en dos direcciones horizontales ortogonales y en la dirección vertical a las cuales se les calculó el espectro de Fourier respectivo. Paralelamente se construyó un modelo matemático de la estructura tridimensional de la plataforma mediante el programa STAD-III de cuyo análisis estructural fueron obtenidas las formas modales y las frecuencias naturales de vibración de la estructura, al tiempo que se inicia una búsqueda de información respecto a las frecuencias predominantes de las distintas fuentes de excitación para determinar cuál de ellas se acerca más a las frecuencias naturales de la estructura, e identificar finalmente cuáles de los estímulos causan las vibraciones medidas en si-

to y buscar la solución que aminore los movimientos de la plataforma.

## Parte Experimental

La etapa experimental de este estudio se basó fundamentalmente en la medición de aceleraciones en sitio, para lo cual se instaló un acelerómetro triaxial modelo SSA-2 de Kinemetrics capaz de registrar las aceleraciones en las direcciones transversal, longitudinal y vertical [3]. Estas mediciones fueron continuas durante un período de tiempo considerable [2, 4] a fin de registrar las condiciones de respuesta máxima que pudieran generar factores externos como el viento, el oleaje, la actividad sísmica, impacto y vibraciones de origen operativo de la estructura. Para proteger el instrumento de la intemperie, se instaló una caja metálica. Una vez colocado éste se seleccionó un nivel umbral de disparo, de esta manera sólo se registrarían eventos de intensidad apreciable. Este umbral osciló entre 0.1% y 5% de la aceleración de la gravedad.

Las mediciones se realizaron en un período aproximado de 10 meses durante los cuales se registraron 217 eventos entre las fechas 02/06/95 y 02/04/96. Para el procesamiento de las señales dinámicas se utilizaron los programas para ordenador PITSA y DEGTRA 6, mediante los cuales se les eliminó el error de calibración del instrumento a los registros a través de técnicas de corrección de la línea base.

Además de las mediciones de vibración en sitio, se revisó ampliamente la información técnica sobre los efectos generados por las bombas reciprocantes, la acción del viento y del oleaje para esa zona del Lago [5]. Estas bombas se colocan en las Estaciones de Flujo para bombear el crudo hacia los tanques de almacenamiento que se encuentran en la estación para luego ser igualmente conducido a estaciones más cercanas a la costa del Lago de Maracaibo. Estas bombas generan fuerzas oscilatorias que dependen de las siguientes ecuaciones:

$$F_1 = (W + W_r) * r * \omega^2 * \cos(\omega t) / 894.56 \quad (1)$$

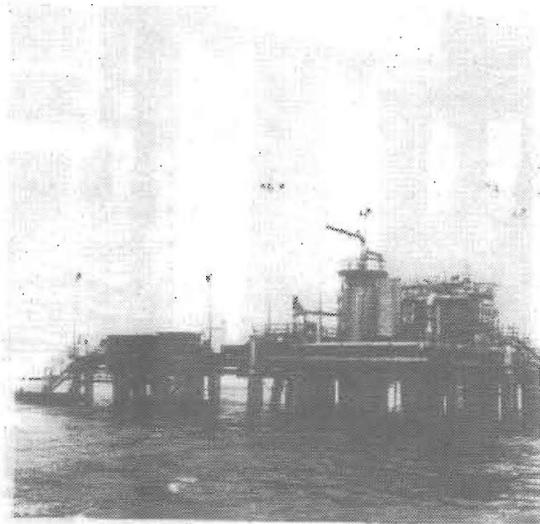


Figura 1. Vista general de la estación de flujo EF-LL-87.

$$F_2 = W \cdot r \cdot \omega^2 \cdot \cos(2\omega t) / 894.56 \quad (2)$$

$$F_3 = W_r \cdot r \cdot \omega^2 \cdot \cos(\omega t) / 894.56 \quad (3)$$

donde:

$F_1$  : es la fuerza primaria paralela al movimiento del pistón en kg-f

$F_2$  : es la fuerza secundaria paralela al movimiento del pistón en kg-f

$F_3$  : es la fuerza perpendicular al movimiento del pistón en kg-f

$t$  : es el tiempo en segundos

$W$  : es el peso total del pistón en kgf

$W_r$  : es el peso de la manivela en kgf

$r$  : es el radio de la biela en metros

$\omega$  : es la velocidad en R.P.M.

Se pudo constatar en sitio y de acuerdo con manuales suministrados por los fabricantes de las bombas que la frecuencia promedio de esos motores es de 1.16 Hertz.

La fuerza que transmite el oleaje a la estructura depende fundamentalmente de la forma geométrica de los elementos que se oponen al flujo y del peso específico del fluido, sin embargo, según estudios realizados a las corrientes del Lago de Maracaibo se ha establecido que las frecuencias del oleaje oscilan entre 0.12 Hertz y 0.55 Hertz [5].

## Planteamiento del Problema

La Estación de Flujo en estudio ha venido presentando movimientos horizontales de cierta consideración durante el tiempo en que ha operado. La Figura 1 muestra una vista general de la misma.

La idealización estructural fue realizada mediante el programa STAD-III [6], para lo cual se consideró toda la geometría original en el cálculo del peso propio y masa de la plataforma y fueron tomados en cuenta básicamente tres grados de libertad. La Figura 2 muestra el modelo estructural tridimensional de la plataforma.

Los modos naturales de vibración de la estructura fueron obtenidos del análisis estructural del modelo y se observó que el porcentaje de participación sísmica de las masas fue de 99.87% para los tres primeros modos, de los cuales el primero es la traslación a lo largo de la dirección Z, el segundo es la traslación en dirección X y el tercer modo resultó ser una torsión alrededor del eje vertical.

Se realizaron cuatro análisis independientes del modelo considerando variaciones en el nivel de suministro de los tanques de almacenamiento y asumiendo distintas constantes de rigidez en las uniones pilotes-cabezal.

Lo anterior se hizo con la finalidad de identificar la influencia de esos parámetros en los modos naturales de vibración de la estructura [7, 8], ya que en la inspección en sitio de la plataforma se pudo apreciar que los tanques no siempre se encuentran llenos e igualmente se notó que las uniones entre los pilotes y los cabezales no son totalmente rígidas, posiblemente debido al proceso constructivo utilizado. En la Tabla 1 se muestran los periodos de los tres primeros modos para los cuatro casos analizados.

En la Tabla 1 se observa que los modos de vibración son poco afectados, sin embargo, el coeficiente de magnificación del desplazamiento estático para una excitación dinámica del tipo armónico resulta ser:

$$m = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{p^2}{\omega^2}\right)^2 + 4\xi^2 \frac{p^2}{\omega^2}}} \quad (4)$$

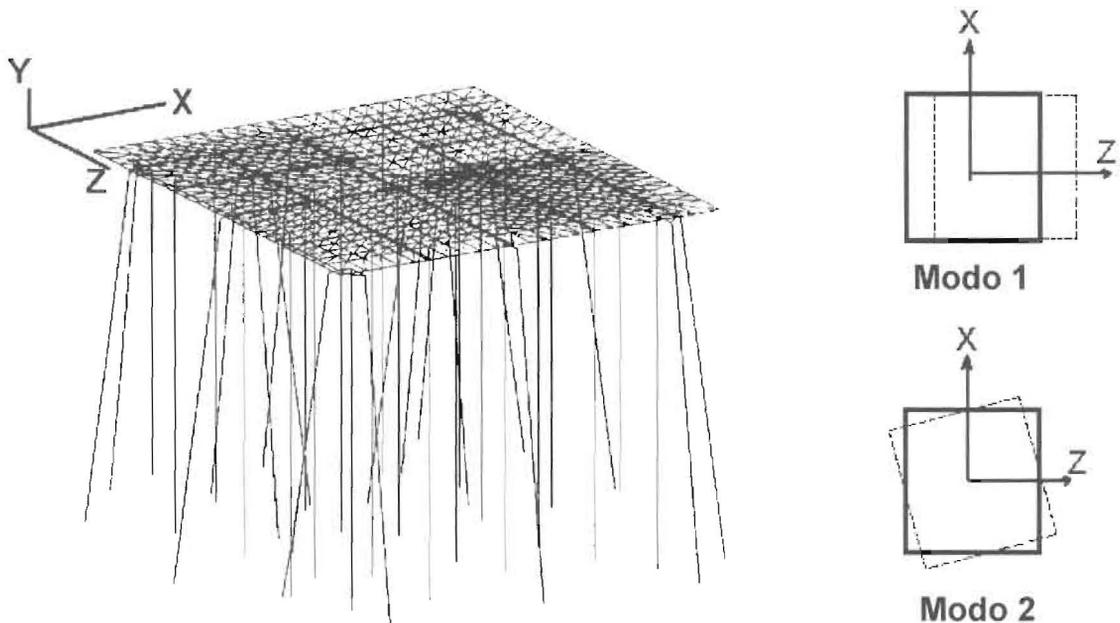


Figura 2. Modelo estructural tridimensional de la plataforma.

Tabla 1

Períodos de vibración para los tres primeros modos para los cuatro tipos de análisis

Caso de Estudio	A	B	C	D
%Rigidez Pilote-Cabezal	100%	100%	100%	50%
% Masa en los Tanques	100%	50%	0%	50%
Modos				
1	0.991 s	0.991 s	0.971 s	1.068 s
2	0.925 s	0.926 s	0.915 s	1.036 s
3	0.813 s	0.813 s	0.793 s	0.895 s

que para el caso de resonancia;  $m = 1/(2\xi)$ , así una variación del 13% de la frecuencia de excitación con respecto a la frecuencia natural de vibración de la estructura, para un amortiguamiento estructural de  $\xi = 0.05$  podría hacer variar el coeficiente de magnificación desde 10 hasta 5 veces, aproximadamente, pero como no se sabe exactamente la frecuencia natural de vibración de la plataforma, esta variación pudiera acercarse e incluso llegar a la resonancia, dependiendo de la variación de los parámetros considerados en los cuatro tipos de análisis estructural. De acuerdo con la dirección de colocación del sistema de bombeo el primer modo (modo traslacional en dirección Z) es perpendicular al desplazamiento de los pistones de las bombas y el segundo modo (traslación en dirección X) está en la dirección longitudinal de los pistones de las bom-

bas. Los modos fueron tomados en cuenta al incluir las formas de vibrar de los modos 1 y 2.

Una vez registradas las señales emitidas por el acelerómetro y almacenadas en un ordenador matemático digital, se calculó la transformada rápida de Fourier (FFT) de las señales en las tres direcciones medidas, con lo cual se identificó que la frecuencia predominante en cada uno de los espectros corresponde a la de las bombas recíprocas.

### Análisis de Resultados

Como puede observarse en los análisis dinámicos efectuados al modelo estructural de la plataforma, las variaciones de la masa de los tanques y de la rigidez pilotes-cabezal no generaron

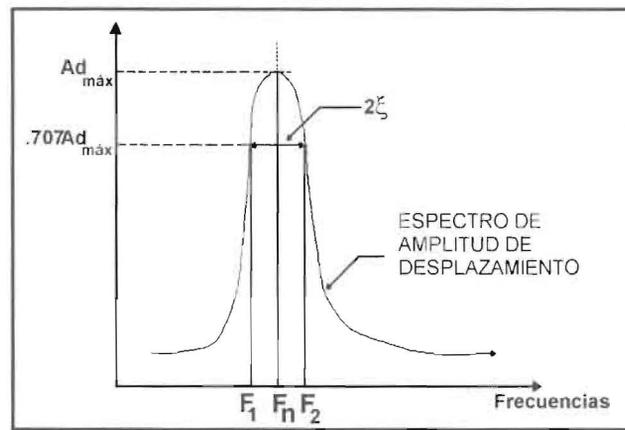


Figura 3. Representación gráfica del cálculo del amortiguamiento estructural.

cambios apreciables en los periodos correspondientes a los tres primeros modos de vibración.

El amortiguamiento estructural de la plataforma,  $\xi$ , fue calculado en forma aproximada según la expresión:

$$\frac{F_n}{F_2 - F_1} = \frac{1}{2\xi} \quad (5)$$

tal como se muestra en la Figura 3.

Al aplicar la ecuación (5) se obtuvo  $\xi \approx 0.06$  el cual representa un amortiguamiento similar al utilizado en el análisis dinámico de edificios ( $\xi = 0.05$ ), por lo que se demuestra que la estructura tiene suficiente amortiguamiento para impedir que los desplazamientos de la plataforma aumenten considerablemente, sin embargo, en el caso de resonancia, el coeficiente de magnificación del desplazamiento tiende a  $1/2\xi$ , o sea, 10 veces el desplazamiento estático alcanzado con el peso asociado a la vibración de la bomba.

Tomando en cuenta que la frecuencia de operación promedio de las bombas es de 1.16 Hertz (período = 0.862 s) se aprecia que ésta es muy similar a la frecuencia natural de vibración de la plataforma (1.080 Hertz, es decir, un período = 0.926 s) en la dirección traslacional X, o sea, la relación entre la frecuencia de excitación y la frecuencia natural de la estructura en ese modo es de 1.044. Lo anterior evidencia claramente un problema de resonancia y es muy probable que un gran número de plataformas que cuenten con este tipo de bombas y se encuentren desplanta-

das a profundidades del Lago similares a la estación estudiada estén presentando el mismo fenómeno.

Las frecuencias del oleaje son menores a las de las bombas y oscilan entre 0.12 y 0.55 Hertz. En la Figura 4, donde se muestra la amplitud de la transformada de Fourier de uno de los 217 eventos registrados por el acelerómetro colocado en la plataforma, puede apreciarse un pico pequeño cercano a 0.5 Hertz que corresponde al oleaje y otro más grande en coincidencia con la frecuencia de 1 Hertz que representa las frecuencias de las bombas recíprocas.

## Conclusiones

1.- La frecuencia de operación de las bombas recíprocas resulta ser peligrosamente cercana a la frecuencia natural de la estructura lo que ocasiona la resonancia. El amortiguamiento estructural impide que la amplitud de los desplazamientos aumenten indefinidamente, sin embargo, la vibración continua causa un proceso de fatiga en parte de los elementos estructurales de la plataforma, lo que podría llevar a que a lo largo del tiempo los materiales constructivos se deterioren y pierdan un porcentaje importante de su capacidad para resistir los esfuerzos.

2.- Se hace necesario diseñar un sistema de aislamiento entre las bombas y la plataforma para aminorar la vibración que esta última produce. Esta opción resulta ser la más aconsejable desde el punto de vista de costos. Adicionalmente, podría diseñarse un sistema de operación de

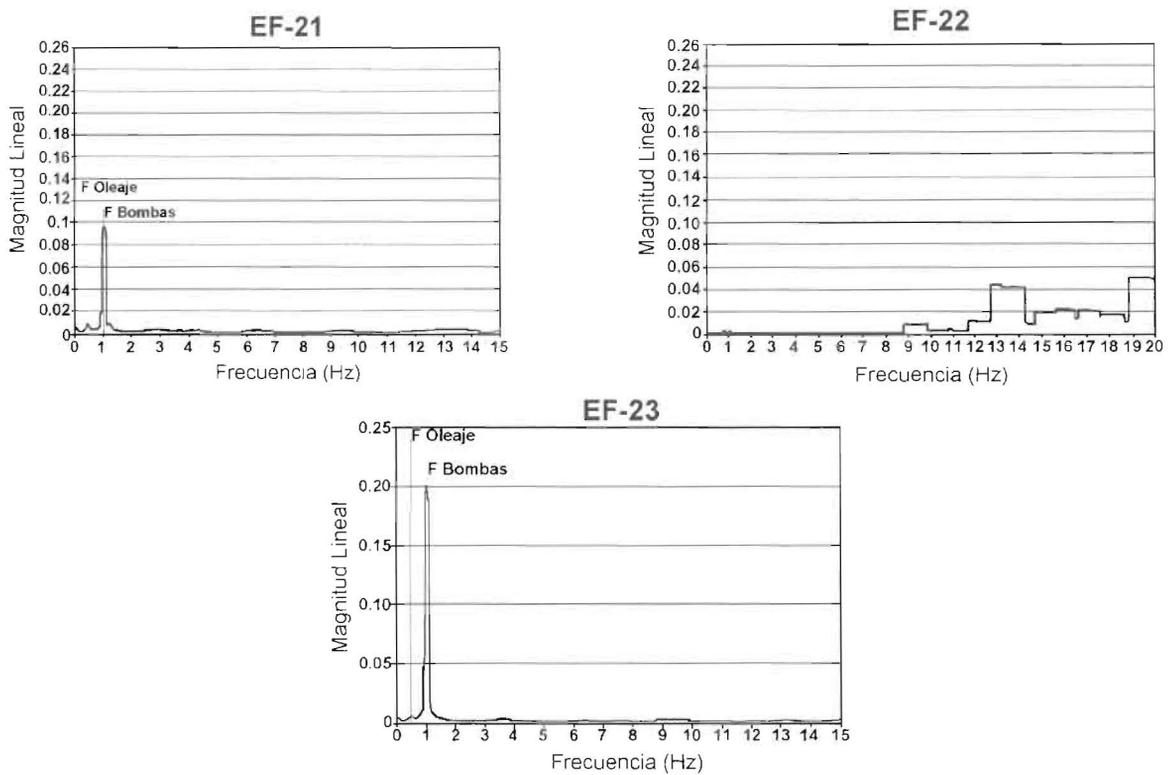


Figura 4. Espectros de Fourier de un evento registrado, en tres direcciones ortogonales el día 18/07/95. EF-21: dirección perpendicular a los pistones; EF-23: dirección paralela a los pistones; EF-22: dirección vertical.

las bombas tal que éstas operen en forma par, es decir, que una de las bombas actúe con un ángulo de  $90^\circ$  de desfase en la excitación con respecto a la otra empleando un dispositivo de unión entre ambas que vincule la operación, de esta manera la acción de una elimine la de la otra abatiéndose la respuesta de la estructura.

### Referencias Bibliográficas

- Gordillo, L.; Rodríguez, I. y Segovia, A. "Evaluación del Comportamiento Dinámico de Estaciones de Flujo situadas en El Lago de Maracaibo", Tesis de Grado. Facultad de Ingeniería, LUZ, 1997.
- Tallavo, F. y Martínez, M "Evaluación Experimental de Movimiento de la Planta de Generación Eléctrica, Complejo LAMA, ante Condiciones Ambientales Variables". INTEVEP S.A., Los Teques, Venezuela, 1993.
- Kinematics Systems "Operating Instruction for Model SSA-2 Solid State Accelerograph", L.A, California, USA, 1991.
- Tallavo, F. y Martínez, M. "Análisis del Movimiento Vibratorio de la Planta de Generación Eléctrica del Complejo LAMA", INTEVEP S.A, Los Teques, Venezuela, 1994.
- Hansen, B. H. "Apuntes de Teoría sobre Viento, Corrientes y Oleaje", LAGOVEN S.A, Venezuela, 1986.
- Research Engineers "Manual de Iniciación STAD-III", Revisión 14.2, Berkeley, CA, USA, 1992.
- Grases, J.; López, O.; Hernández, J " Edificaciones sísmo-resistentes", Manual de Aplicación de las Normas, Caracas, Venezuela, 1987.
- Paz, Mario "Structural Dynamic Theory & Computation", Segunda Edición. Editorial McGraw Hill, USA, 1985.

Recibido el 29 de Septiembre de 1998

En forma revisada el 15 de Septiembre de 2000