

Efecto de las Vibraciones Ambientales y Forzadas sobre las Estructuras y los usuarios

Effect of Environmental and Forced Vibrations on Structures and Users

Escamilla-García, M.A.^{1*} , Méndez-Romero, H.² , Ayala-Milián, A.G.³ , Caballero-Garatachea, O.¹ ,
Bañuelos-García, F.H.⁴  (*mescamillag21@gmail.com)

Recibido: 14-06-2024 Aceptado: 26-09-2024

RESUMEN

En los últimos años el conocimiento sobre los efectos de las vibraciones en estructuras ha aumentado; sin embargo, la comprensión sobre su efecto en los usuarios no ha mostrado mejoras significativas. Actualmente, la información sobre la influencia en confort humano sigue siendo relativamente escasa, debido a esto, en el presente artículo se describe un estudio experimental en donde se utilizó normativa internacional para medir los niveles de tolerancia en las estructuras y en los humanos. Para ilustrar

la influencia de las vibraciones en la salud estructural y en los usuarios se presenta el ejemplo de la super-estructura de una plataforma marina donde se detectaron vibraciones anómalas que afectaron las actividades de usuarios.

Palabras clave: salud estructural, vibraciones ambientales, vibraciones forzadas, propiedades dinámicas, confort de los usuarios.

ABSTRACT

In recent years, knowledge about the effects of vibrations on structures has increased; however, understanding of their effect on users has not shown significant improvements. Currently, information on the influence on human comfort remains relatively scarce, due to this, this article describes an experimental study where international standards were used to measure tolerance levels in structures and humans. To illustrate the influence of vibrations on

structural health and on users, the example of the superstructure of an offshore platform is presented, where anomalous vibrations were detected that affected user activities.

Keywords: structural health, environmental vibrations, forced vibrations, dynamic properties, user comfort.

¹Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Carretera Pachuca-Tulancingo km 4.5 S/N, Mineral de la Reforma, Hidalgo, México, CP 42184.

²Ingeniería y Consultoría, Norte 23 No 310, Valle de Chalco Solidaridad, Estado de México, México, CP 56617.

³Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Avenida Universidad 3000, Ciudad de México, México, CP 04510.

⁴Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma del Estado de México, Paseo Universidad S/N, Toluca, Estado de México, México, CP 50130.



INTRODUCCIÓN

En la actualidad el monitoreo de la salud estructural, evaluación de los efectos de las vibraciones ambientales y forzadas en una estructura, se ha convertido en una consideración importante en la práctica profesional de la ingeniería. En algunos casos es esencial considerar su influencia en los sistemas de piso, principalmente cuando estos son expuestos a vibraciones fuertes inducidas por equipos electromecánicos de sistemas de bombeo, los cuales, pueden afectar a la seguridad estructural, el confort y las actividades de los usuarios.

No obstante, que el monitoreo de la salud estructural ha sido muy aceptado en la ingeniería estructural práctica debido a que estos estudios proporcionan información relevante sobre los cambios de la rigidez de la estructura, la fatiga de los elementos estructurales, entre otros. En la actualidad las investigaciones sobre el efecto de las vibraciones en los seres humanos dentro de un edificio son relativamente escasos, tomando como referencia los trabajos sobre el monitoreo de la salud estructural. Debido a esto los índices de tolerancia, para medir el confort de los usuarios de un edificio, propuestos por las normas actuales, son poco conocidos en la ingeniería práctica profesional.

En el presente artículo se presentan los resultados de una investigación sobre el efecto de las vibraciones en las estructuras y en la percepción de sus usuarios. Se realizó una revisión de la normativa internacional especializada vigente respecto a los niveles de seguridad y la tolerancia en los usuarios; asimismo, una síntesis sobre la magnitud de la vibración a la que esta puede influir en el correcto funcionamiento de una estructura y en las actividades de las personas y, finalmente, para ilustrar la influencia de las vibraciones forzadas y ambientales en la salud estructural y en el confort humano se presenta un ejemplo práctico en donde los trabajadores de una plataforma petrolera detectaron desplazamientos aparentemente fuera de lo normal y vibraciones anómalas, las cuales poco a poco afectaron su confort, el rendimiento en sus actividades diarias y su sensación de seguridad. Los resultados obtenidos del estudio experimental se compararon con los umbrales máximos de tolerancia establecidos en normatividades internacionales vigentes. Para el estudio de vibraciones se utilizaron 6 acelerómetros tridimensionales, Figura 1. Los sensores se ubicaron en diferentes puntos de la estructura, particularmente en donde los usuarios detectaron las aceleraciones máximas, de acuerdo con su percepción.

NORMAS PARA MEDIR LOS EFECTOS DE LAS VIBRACIONES EN LOS USUARIOS DE LAS ESTRUCTURAS

La sensibilidad humana a las vibraciones puede variar drásticamente de una persona a otra, por lo que estimar sus efectos en los usuarios se ha convertido en una tarea demasiado complicada para la práctica profesional de la ingeniería. Investigaciones han detectado que el cuerpo humano percibe aceleraciones de 0.5 % g, [1]. La reacción humana a una vibración dentro de un edificio depende de factores físicos, propios de la intensidad de las vibraciones, *e.g.*, la amplitud del desplazamiento, la velocidad, la aceleración, la duración de las vibraciones y la frecuencia de vibración. Sin embargo, la percepción humana a las vibraciones también puede depender de factores ajenos a la ingeniería estructural como son: la posición de los usuarios en el momento que se presenta la vibración, la dirección de incidencia de la vibración respecto a la columna vertebral [2], Figura 2.

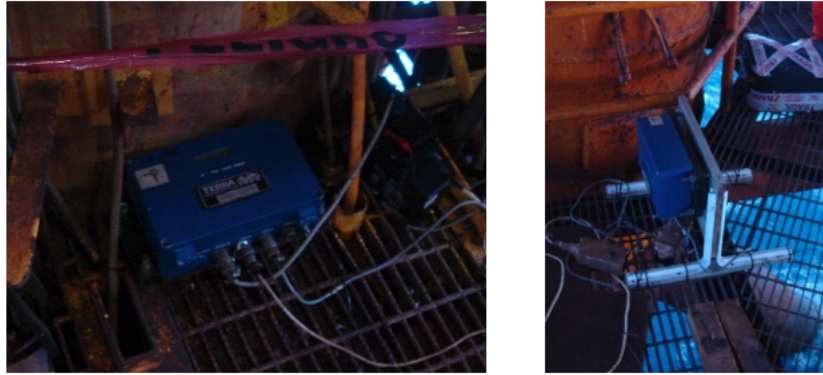


Figura 1: *Equipos de medición utilizados en el estudio, acelerómetros tridimensionales.*

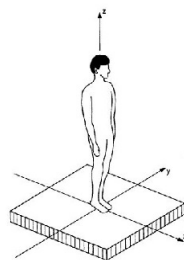


Figura 2: *Posturas y ejes coordenados de referencia para estimar el efecto de las vibraciones en los usuarios de un edificio, [2].*

Otros factores que influyen significativamente son la actividad que esté desarrollando el usuario, la edad de las personas, la frecuencia y hora de ocurrencia de las vibraciones, la costumbre de percibirlas, entre otras. Para considerar estos factores algunas normas especializadas internacionales BS 6472 y AS 2670 [2, 3] han propuesto procedimientos para evaluar el efecto de las vibraciones en los usuarios de los edificios, en las cuales se estiman los límites de tolerancia asociados a una media cuadrática, RMS, de las vibraciones registradas y no a umbrales máximos, los cuales no siempre alteran el confort de los usuarios.

Considerar el efecto de las vibraciones en el diseño de estructuras es relativamente reciente (finales del siglo pasado) sin embargo, existen algunas especificaciones que miden su efecto en el ser humano desde mediados del siglo XX [4, 5]. Este documento propone umbrales máximos de aceleración para diferentes niveles de tolerancia de los usuarios, considerando estructuras con frecuencia fundamentales menores a 10 Hz. Cuando el edificio presenta frecuencias superiores a 10 Hz los valores máximos se expresan en velocidades.

La norma alemana DIN 4150-2 [6] es una de las especificaciones más utilizadas en el mundo, principalmente se utiliza en países donde no cuentan con una normatividad local. La percepción de las vibraciones en el ser humano, dentro de los edificios se estiman en un rango de frecuencias acotadas entre valores de 1 y 80 Hz. Esta norma usa una ecuación que ofrece a los analistas una idea aproximada si los efectos de las vibraciones pueden ser perjudiciales para la salud o confort de los usuarios. La sensación de la vibración en los usuarios se estima mediante un factor adimensional llamado $KB_{\text{máx}}$, el cual se calcula de la velocidad máxima de la partícula y su frecuencia asociada, Ec. (1) [6]. El valor de $KB_{\text{máx}}$ se compara con el valor de tolerancia (A_o) propuesto por la norma y mostrado en la Tabla 1.

$$KB = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{v_{\text{máx}}}{\sqrt{1 + \left(\frac{f_0}{f}\right)^2}} ; \quad KB_{\text{máx}} = KBcF \quad (1)$$

donde $v_{\text{máx}}$ es velocidad máxima de la partícula en mm/s, f es frecuencia de vibrar de la estructura en Hz, f_0 es frecuencia de referencia en Hz, cF es factor que depende de la resonancia, KB es factor asociado a la percepción de la vibración de los usuarios.

Tabla 1: Valores límite para estimar la tolerancia humana a las aceleraciones, [6]

Tipo de estructura	A_o (día) adimensional	A_o (noche) adimensional
Edificio con fines comerciales	6	0.6
Edificio con fines comerciales y similares	6	0.4
Otras estructuras	5	0.3
Edificios de vivienda	3	0.2
Edificios que necesitan una protección especial	3	0.15

Las normas internacionales ISO 2631-1 y 2631-2, [7, 8], establecen límites para la percepción humana asociados a las aceleraciones. Los criterios de aceptación humana hacia las vibraciones dependen del

tiempo de exposición y de la posición relativa entre la columna vertebral del individuo y la dirección de la oscilación. Para la sensación de confort esta norma presenta los niveles de percepción humana expresados en la Tabla 2.

Tabla 2: Valores guía para estimar percepción humana a las aceleraciones

Grado de confort	Aceleración (m/s ²)
Confortable	< 0,315
Poco confortable	0.315 – 0.63
Muy inconfortable	0.50 – 1.0
Molesto	0.80 – 1.60
Muy molesto	1.25 – 2
Insoportable	> 2,0

La Norma Australiana AS 2670-1 y 2670-2 [9, 10] propone límites de exposición humana ante vibraciones, en los cuales la percepción de las vibraciones dentro de los edificios depende de la dirección del movimiento (horizontal o vertical), la frecuencia vibrar y de las aceleraciones de vibración registradas. Esta norma propone una curva base graficada en escala logarítmica (Figura 3), que debe ser multiplicada por un factor para determinar si los umbrales de aceleración registrados son valores admisibles (Tabla 3).

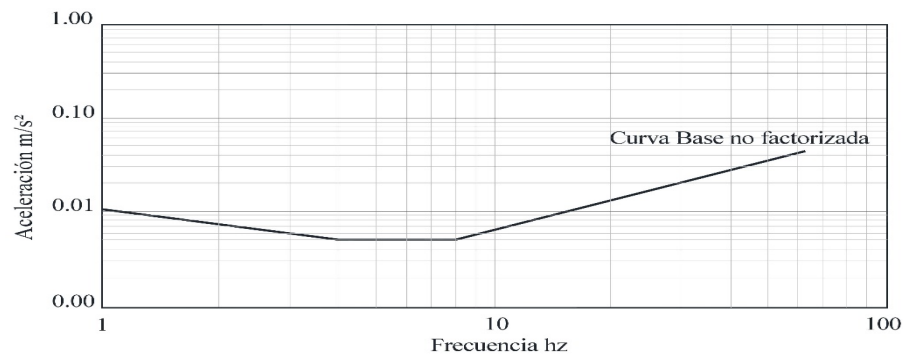


Figura 3: Curva para definir el nivel permisible de vibraciones asociadas a el confort de los usuarios del edificio, [9, 10].

Tabla 3: Factor que multiplica la curva base para diferentes usos de edificaciones

Uso de la edificación	Turno	Vibración (unidimensional)	
		Vibración continua	Vibración transitoria
Áreas de trabajo crítico e.g., Quirófanos de hospitales, laboratorios de precisión	Día	1	1
	Noche	1	1
Residencial	Día	2-4	30-90
	Noche	1.4	1.4-20
Oficinas	Día	4	60-128
	Noche	4	60-128
Edificios industriales	Día	8	90-128
	Noche	8	90-128

NORMATIVIDAD PARA MEDIR EL EFECTO DE LAS VIBRACIONES EN LA ESTRUCTURA

La norma DIN 4150-3 [11] propone valores indicativos para evaluar el efecto de las vibraciones en estructuras sometidas a acciones externas. Los límites de tolerancia propuestos por esta norma utilizan los umbrales máximos de la aceleración, la disminución de rigidez y resistencia de los sistemas de piso. La norma DIN 4150-3 [11] generalmente es utilizada en diversos países que no cuentan con normatividad para conocer el efecto de las vibraciones en la salud estructural. Esta norma se basa en los siguientes criterios de aceptación: 1) vibraciones estructurales de corta duración y 2) vibraciones de larga duración.

La Tabla 4 y la Figura 4 muestran los valores máximos de velocidad para evaluar cimentaciones y niveles superiores, asociados a diferentes usos de edificios y válidos para intervalos de corta duración [10]. Si los umbrales máximos de velocidad estimados son mayores a los estados límite establecidos los efectos dinámicos son considerados como no deseables, lo que puede provocar daños en la estructura y pérdida de funcionalidad, lo que perjudica significativamente las actividades del usuario. En la Tabla 5 se muestran los umbrales límite asociados a velocidades en el plano horizontal del piso de azotea para evaluar los efectos en las estructuras con periodos de vibraciones de larga duración [11].

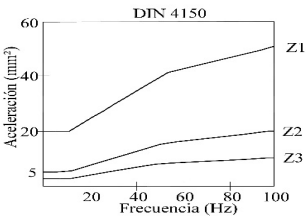


Figura 4: Velocidades máximas para evaluar la salud estructural,[11].

Tabla 4: Valores máximos para velocidad de partícula

Tipo de estructura	Velocidad (mm/s)			
	1-10 Hz	Cimentación		Niv. superior Cualquier frecuencia
		Frecuencia fundamental 10-50 Hz	50-100 Hz	
Edificaciones Industriales, oficinas y similares o con diseños robustos, Z1	20	20-40	40-50	40
Edificaciones residenciales y construcciones similares, Z2	5	50-15	15-20	15
Edificios no incluidos en los puntos anteriores, Z3	3	3-8	8-10	8

Tabla 5: velocidad máxima recomendada para intervalos de larga duración

Tipo de estructura	Velocidad (mm/s)
Edificios con usos comerciales e industriales	10
Edificaciones de uso habitacional	5
Estructuras no clasificadas en las anteriores, muy sensibles, monumentos históricos	2.5

La norma internacional ISO 4866 [12] ha sido una base técnica para el desarrollo de normas en ciudades y países que no cuentan con los recursos necesarios para la elaboración de normas asociadas a sus propias investigaciones. La medición de los umbrales de vibraciones y/o estados límite se asocian al

estudio del problema de vibraciones, en donde se revisa el confort de los usuarios de las estructuras y la salud estructural de la edificación, control de umbrales máximos de vibración establecidos por diferentes agencias y documentación de acciones dinámicas

Uno de los puntos importantes en esta norma es que la duración de las vibraciones se considera relevante, lo cual solo se ha puesto en práctica en algunas de las normas actuales como: BS 6472, DIN 4150-3 y ISO 4866 [2, 11, 12]. La norma internacional ISO 4866 [12] clasifica la duración de la señal en vibración continua y transitoria. Para su cálculo se define una constante de tiempo donde se presenta resonancia, dada por la Ec. (2) [11].

$$r = 0,5 r f_r \quad (2)$$

donde r es una constante de tiempo y representa la influencia del amortiguamiento y depende de la excitación, f_r es la frecuencia de resonancia. Si el umbral de vibración es mayor de 5 veces r se considera que la vibración es continua y si es menor la vibración es transitoria. En el caso de las explosiones las vibraciones producidas se consideran transitorias.

MATERIALES Y MÉTODOS

En este artículo se presentan los resultados obtenidos de una investigación sobre el efecto de las vibraciones en las estructuras y sus usuarios producidas por el oleaje y equipos electromecánicos. Se presentan los resultados de la evaluación de las propiedades dinámicas de una plataforma marina estudiada por Méndez en 2015 [13], en la cual los usuarios de la estructura observaron movimientos anómalos y desplazamientos laterales que producen oscilaciones visibles en la tubería de perforación de la mesa rotaria. La amplitud de estos movimientos provocó algunas alteraciones en las actividades de la plataforma.

Con el objetivo de tener una idea más clara del tipo de problema y de por dónde atacarlo, pero sobre todo de entender la influencia de la vibración en los seres humanos, se realizó una encuesta a los técnicos que operan maquinaria en la plataforma en las áreas y horarios que se percibieron con más intensidad las vibraciones. En Figura 5 se muestran algunas de las preguntas realizadas y los porcentajes de cada una de sus respuestas.

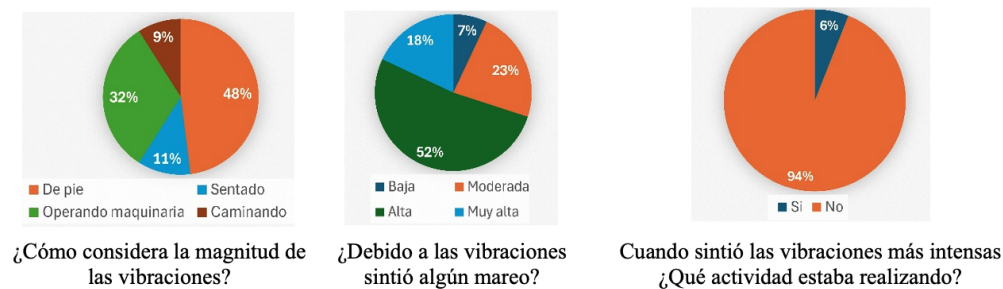


Figura 5: Resultados de encuestas realizadas a usuarios de la plataforma.

De los resultados de las encuestas se observó una relación entre las características estructurales del área donde se perciben las vibraciones, los equipos de bombeo y la percepción de los usuarios, proporcionando

a los evaluadores de la estructura una idea más clara de la problemática y así establecer una estrategia para solucionar el problema.

El mal funcionamiento de la plataforma se asoció a diferentes hipótesis, la más razonable, de acuerdo con lo visto por el personal técnico de la estructura, fue la vibración excesiva que se genera en la cubierta del segundo nivel, área donde se ubican varios sistemas de bombeo. Sin embargo, debido al desconocimiento en la fuente y las características de la vibración forzada ocasionada por los sistemas electromecánicos, particularmente los sistemas de bombeo, y como se trasmite al edificio, la investigación se dividió en 2 fases. En la primera etapa, se hizo un recorrido físico de la infraestructura en estudio donde se buscó conocer a detalle la estructura y sus componentes principales; en la segunda, se realizó el registro de aceleraciones generadas por el sistema de bombeo en las cubiertas superiores. En esta actividad se buscó conocer y estimar los diferentes parámetros para calibrar los acelerómetros que se utilizarían en el estudio formal de vibraciones. Adicionalmente a esto se verificaron las restricciones de los apoyos de los equipos de bombeo con el objetivo de entender si existía una relación entre las vibraciones y el mal funcionamiento detectado por los técnicos y operadores de la plataforma. La estructura analizada es una plataforma marina de perforación de acero estructural de 2 niveles (Figura 6) localizada en la sonda de Campeche.



Figura 6: *Plataforma marina estudiada en esta investigación [13].*

El estudio de las señales registradas se realizó mediante un análisis de Fourier. Para estimar los registros de aceleraciones se utilizaron 6 sensores tridimensionales marca Terra “Technology” con un intervalo de registro entre 0.25 y 2 veces la aceleración de la gravedad como los mostrados en la Figura 1.

Para identificar las propiedades dinámicas de la estructura se utilizaron los 6 acelerómetros registrando en sincronía, se distribuyeron en las diferentes cubiertas. Para el estudio de vibraciones ambientales y forzadas se realizaron 7 arreglos. En el arreglo 1, se realizó una distribución vertical de acelerómetros, algunos de ellos se colocaron en la superestructura y otros en subestructura (zona de embarcadero); en el arreglo 2, los sensores se distribuyeron en la cubierta N1, ubicada a 15.85 m sobre la superficie libre del agua, SLA; en el 3, los sensores se colocaron en la cubierta N2 ubicada a 24.69 m SLA; en el 4, los sensores se colocaron en la torre de perforación, distribuidos de forma vertical; en el arreglo 5, los sensores se ubicaron en la subestructura de la plataforma, área de acceso al embarcadero de la plataforma, sensores ubicados a 6.7 m SLA; en arreglo 6, los sensores se colocaron en la cubierta superior y la torre de perforación y en el arreglo 7, se colocaron los equipos en los niveles inferiores de la torre de perforación.

De los diferentes registros de aceleraciones obtenidos se estimaron las propiedades dinámicas de la estructura *e.g.*, frecuencias y porcentaje del amortiguamiento crítico. Del análisis de señales se obtuvieron los desplazamientos relativos, con los que se evaluó el daño en la superestructura y torre de perforación, considerando la norma DIN [11]. Se utilizaron los umbrales máximos de las aceleraciones para definir el efecto de las vibraciones en los usuarios, de acuerdo con la normatividad internacional vigente, en este caso se utilizó la australiana AS 2670-1 y 2670-2 [9, 10], debido a que se consideró la opción más adecuada de acuerdo con la problemática detectada.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Propiedades Dinámicas de la Cubierta

Del análisis de señales se obtuvieron las propiedades dinámicas de la estructura. En la Figura 7 se muestran las frecuencias fundamentales de vibrar de la plataforma en estudio y en la Tabla 6 se muestran las frecuencias de vibrar asociadas al primer modo, proyección en la dirección longitudinal y transversal de la estructura. Se presentan las frecuencias del cuerpo principal de la plataforma y la torre de perforación. Las frecuencias del cuerpo principal se obtuvieron del análisis de señales de los arreglos 1, 2 y 3 y las frecuencias de la torre de perforación de los arreglos 5, 6 y 7.

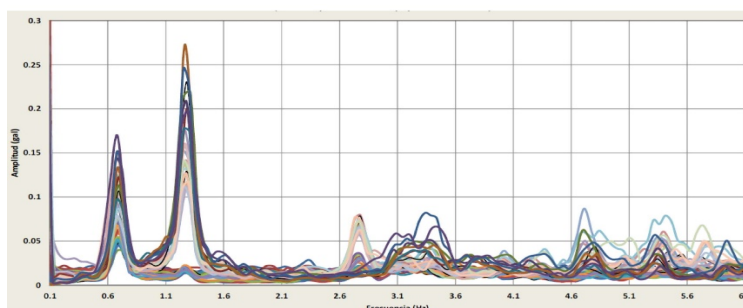


Figura 7: *Envolvente de los espectros de Fourier en el arreglo No 6, dirección longitudinal.*

Tabla 6: Frecuencias de la estructura estimadas del obtenidos del estudio de vibraciones

Arreglo	Dirección longitudinal Hz		Dirección Transversal Hz	
	Plataforma	Torre	Plataforma	Torre
No. 6	0.679	1.26	0.664	1.51
No. 7	0.682	1.29	0.679	1.53
Promedio	0.681	1.275	0.672	1.520

Para definir el porcentaje de amortiguamiento se utilizó el método propuesto por Kawasumi y Shima [14]. Se eligieron las señales de mejor calidad, donde se observó con mayor claridad las propiedades

dinámicas de la estructura. Principalmente se utilizaron los espectros de potencia estimados de señales registradas en sensores ubicados en centro de la cubierta y generados en los primeros arreglos de medición. Se realizó un promedio del análisis de 10 espectros de potencia en ambas direcciones, 5 en dirección longitudinal y 5 en dirección transversal.

Para el cálculo del porcentaje de amortiguamiento crítico de la torre de perforación se utilizaron los espectros de potencia obtenidos de las señales registradas en los equipos ubicados en zona superior de la torre. Los porcentajes de amortiguamiento crítico, en sus 2 componentes longitudinal y transversal se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7: Fracción de Amortiguamiento del cuerpo principal de la estructura

Dirección	
Longitudinal (Hz)	Transversal (Hz)
5.0 a 5.5	6.0 a 6.5

Revisión del efecto de las vibraciones en la estructura

Para evaluar el posible daño en la estructura se calcularon los desplazamientos relativos del cuerpo principal de la estructura y los de la torre de perforación. Para estos desplazamientos entre las cubiertas de la plataforma marina se estimaron los desplazamientos absolutos de los diferentes arreglos para un mismo instante de tiempo, siendo de interés el instante en el que se produce el desplazamiento máximo.

En las Tablas 8 y 9 se muestran los desplazamientos relativos máximos de la plataforma (Cubierta inferior y superior). Se observa que sus valores máximos son muy pequeños, tomando como referencia los establecidos en la norma DIN [11] por lo cual se concluye que la plataforma marina estudiada no presenta un daño significativo que ponga en peligro la salud de la estructura o la de sus ocupantes.

Tabla 8: Desplazamientos relativos, Arreglo 1. (Cálculo de desplazamientos laterales, para las direcciones longitudinal.

Desplazamiento lateral en dirección Longitudinal		
No. de Disparo	Desplazamiento Absoluto (cm)	
	Cubierta No.1	Cubierta No.2
	Elev. (+) 15.850 m	Elev. (+) 24.689 m
1	0.8289	0.0058
2	0.1852	0.0115
3	0.5886	0.0212
4	0.0046	0.7956
5	0.0066	0.2447

Tabla 9: Desplazamientos relativos, Arreglo No.1. (Cálculo de desplazamientos laterales, para las direcciones transversal.

Desplazamiento lateral en dirección transversal (3)			
No. de Disparo	Desplazamiento (cm)		Desplazamiento Relativo (cm)
	Cubierta No.1 15.850 m (SLA)	Cubierta No.2 24.689 m (SLA)	
1	1.3656	0.0758	0.00146
2	0.0056	0.2398	0.00026
3	0.0102	1.1958	0.00134
4	0.0008	0.1076	0.00012
5	0.0073	0.2668	0.00029

Los desplazamientos relativos de la torre de perforación se calcularon de cada registro, los máximos se obtuvieron de los arreglos 6 y 7. Los desplazamientos laterales absolutos registrados en los diferentes arreglos también son pequeños de acuerdo con lo establecidos en las normas [10, 11]. En el arreglo 6 se registró 0.57 cm en dirección longitudinal y 0.43 cm en transversal, y en arreglo 7 se midió 0.65 cm en sentido longitudinal y 0.60 cm transversal. En las Tablas 10 y 11 se muestran los valores de los desplazamientos relativos de la torre con respecto a la cubierta.

Tabla 10: Desplazamientos relativos obtenidos en la torre de perforación, Arreglo No.6.

Desplazamiento lateral dirección Longitudinal (2)		Desplazamiento lateral dirección Transversal (3)	
Equipo	Despl. relativo	Equipo	Despl. relativo
E1	0.000187	E1	0.000165
E2	0.000216	E2	0.000155
E3	0	E3	0
E4	0.000227	E4	0.000170
E5	0.000224	E5	0.000169
E6	0.000221	E6	0.000137

Tabla 11: Desplazamientos relativos obtenidos en la torre de perforación, Arreglo No.7.

Desplazamiento lateral dirección Longitudinal		Desplazamiento lateral dirección Transversal	
Equipo	Despl. relativo	Equipo	Despl. relativo
E1	0	E1	0
E2	0.000258	E2	0.000235
E3	0.000249	E3	0.000232
E4	0.000261	E4	0.000239
E5	0.000234	E5	0.000236
E6	0.000258	E6	0.000240

Se observa de la Tablas 10 y 11 que valores máximos son menores a los establecidos en las normas por lo cual se concluye que la torre de perforación no presenta un daño significativo que ponga en peligro la salud de la estructura.

Revisión de estados límite de vibraciones para confort humano

La vibración excesiva en estructuras puede dar lugar a efectos perjudiciales para los usuarios y es deseable que sea evaluada utilizando criterios de aceptación. En este trabajo, la revisión de estados límite se basó en el criterio establecido por la norma australiana AS 2670-3 [3], en la cual se revisan de los efectos de las vibraciones en los usuarios considerando un intervalo de frecuencias entre 1 a 80 Hz. Se consideraron los datos obtenidos del estudio de vibración como la frecuencia fundamental del cuerpo principal de la estructura, Tabla 12.

Tabla 12: Frecuencias naturales de vibrar de estructura y torre de perforación.

Campaña de medición	Frecuencias identificadas asociadas a los modos dominantes			
	Dirección longitudinal (Hz)		Dirección transversal (Hz)	
	Plataforma	Torre	Plataforma	Torre
Primera	0.62	1.26	0.65	1.51
Segunda	0.68	1.275	0.67	1.52

Se graficaron las frecuencias vs las aceleraciones máximas para determinar si los niveles de vibración son aceptables (Figura 7). La aceleración pico se presenta en la dirección longitudinal de la plataforma. De acuerdo con la norma australiana AS 2670-1 y 2670-2[9, 10] se rebasa el límite permisible de los usuarios. Los valores de aceleración pico registrados en la torre de perforación superan los umbrales permisibles; sin embargo, en este caso de estudio se superan los límites en ambas direcciones asociadas

a las frecuencias de sus modos traslacionales. En conclusión, el caso de estudio de la plataforma marina, si excede los límites permitidos para el confort humano de acuerdo con las normas AS 2670-2 y DIN 4150-3 [9, 10]. En la Tabla 13 y Figura 8 se presentan las comparativas de los niveles de aceleración medidos contra los permisibles de las señales en el tiempo.

Tabla 13: comparativas de los niveles de aceleración de las señales.

Campaña medición	de	Aceleraciones máximas registradas				acc. max AS2670 mm/s ²
		Dirección longitudinal Hz		Dirección transversal Hz		
		Plataforma	Torre	Plataforma	Torre	
Primera		0.0108	0.1732	0.0255	0.3732	0.045
Segunda		0.1155	0.1381	0.0181	0.1933	0.045

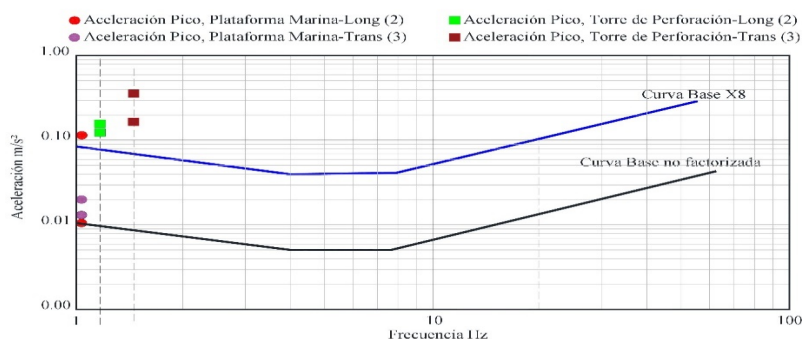


Figura 8: Aceleraciones permisibles para la comodidad de los usuarios,[9, 10].

CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos en la presente investigación se concluye lo siguiente.

Los desplazamientos relativos, producto de las vibraciones ambientales y forzadas en el cuerpo la estructura y su torre de perforación, no generan evidencia de daño en la estructura.

Los umbrales máximos de aceleración registrados, en algunos puntos de la plataforma, particularmente en la zona donde se ubican los sistemas de bombeo, sobrepasaron los límites de aceptación propuestos por una normatividad internacional, lo cual indica que estas vibraciones registradas generan molestia constante a los usuarios y por consiguiente un sentimiento de inseguridad.

Del conjunto de señales registradas se observó que las vibraciones que más influyen en los valores máximos que afectan el confort de los usuarios son producto de vibraciones forzadas provocadas por los sistemas de bombeo.

Con los resultados de las encuestas realizadas a los usuarios se concluye que las vibraciones que percibieron con mayor intensidad fueron las provocadas por los equipos de bombeo y su incidencia en el cuerpo fue a través de las extremidades inferiores, vía los sistemas de piso.

De las vibraciones ambientales producidas por el oleaje se concluye que en este caso éstas no tienen la magnitud necesaria para afectar el confort de los usuarios en este estudio.

Finalmente se observó que los datos obtenidos de las encuestas realizadas a los usuarios son esenciales, particularmente cuando las vibraciones son producidas por diferentes mecanismos que producen vibraciones con diferentes frecuencias durante las 24 horas y ofrecen una guía de la percepción de las vibraciones, la magnitud, las zonas afectadas, los horarios y lo más importante la posible fuente de las vibraciones. Con estos datos se puede plantear una estrategia para los trabajos de campo y la planeación de la solución.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la empresa Grupo Especializado en Obras Marítimas S.A. de C.V y a Petróleos Mexicanos (PEMEX) por su apoyo en la realización del proyecto, base este artículo.

DECLARACIÓN DE CONTRIBUCIÓN DE AUTORES Y COLABORADORES

Marco Antonio Escamilla García: Conceptualización, Investigación, Metodología, Software, Curación de datos, Redacción- Preparación del borrador original y Edición. **Herlindo Méndez Romero:** Metodología, Software y Curación de datos, **Gustavo Ayala Milián:** Supervisión, Revisión y Edición. **Omar Caballero Garatachea:** Software, Validación y Revisión. **Francisco Héctor Bañuelos García:** Supervisión, Revisión y Edición.

REFERENCIAS

- [1] D. E. Allen. Building Vibrations from Human Activities. *Concrete International, Design and Construction, American Concrete Institute*, vol. 12, no. 6, pp. 66–73, 1990.
- [2] BS 6472. Evaluation of human exposure to vibration in buildings (1 Hz to 80 Hz). British Standards Institute, Londres, Reino Unido, 2008.
- [3] AS 2670. Evaluation of human exposure to whole body vibration. Part 3: Evaluation of exposure to whole body x axis vertical vibration in the frequency range 0.1 to 0.63 Hz. Standards Australia, Sydney, Australia, 1990.
- [4] Ministry of Metallurgy and Chemical Engineering. Instruction I 200-54, Planning and calculation of building structures for dynamic loading from machinery. URSS, 1955.
- [5] A. M. Eiband. Human Tolerance to Rapidly Applied Accelerations: A Summary of the Literature. NASA Memo 5-19-59E, National Aeronautics and Space Administration, Washington, D.C., 1959.
- [6] DIN 4150-2. Vibrations in buildings, Effects on persons in buildings. Part 2. Deutsches Institut für Normung, Berlín, Alemania, 2022.

-
- [7] ISO 2631-1. Mechanical vibration and shock. Evaluation of human exposure to whole-body vibration, Part 1: General requirements. International Organization for Standardization, Ginebra, Suiza, 2010.
 - [8] ISO 2631-2. Evaluation of human exposure to whole-body vibration. Part 2: Continuous and shock-induced vibrations in buildings. International Organization for Standardization, Ginebra, Suiza, 2003.
 - [9] AS 2670. Evaluation of human exposure to whole-body vibration. Part 1: General requirements. Standards Australia, Sydney, Australia, 2001.
 - [10] AS 2670. Evaluation of human exposure to whole body vibration. Part 2: Continuous and shock-induced vibration in buildings (1 to 80 Hz). Standards Australia, Sydney, 1990.
 - [11] DIN 4150-3. Structural vibration, Effects of vibration on structures. Part 3. Deutsches Institut für Normung, Berlín, Alemania, 2016.
 - [12] ISO 4866. Mechanical vibration and shock. Measurement and evaluation of vibration effects on building, Guidelines for the Measurement of Vibrations and Evaluation of Their Effects on Structures. International Organization for Standardization, Ginebra, Suiza, 2010.
 - [13] R. H. Méndez. Identificación de las propiedades dinámicas de una plataforma marina de perforación, basada en el monitoreo de vibraciones. Tesis de Maestría en Ingeniería (Estructuras), Posgrado en Ingeniería, UNAM, México, 2015.
 - [14] H. Kawasumi and E. Shima. Some Applications of a Correlator to Engineering Problems. In *III World Conference Earthquake Engineering*, vol. 2, Nueva Zelanda, 1965.