

## DEFECTACIÓN DEL SISTEMA DE PROPULSIÓN DE BUQUES MEDIANTE VIBRACIONES EMPLEANDO ACELERÓMETROS

<sup>1</sup>Fernández Ruiz A., <sup>2</sup>Pérez Rivero E., <sup>3</sup>Morales Mantilla A.

<sup>1, 2, 3</sup>Centro de Investigación y Desarrollo Naval

<sup>1</sup>Filiación 1981, <sup>2</sup>Filiación 1365, <sup>3</sup>Filiación 1979

afdezruiz92@gmail.com

### RESUMEN

La presencia de vibraciones en las embarcaciones es causada por factores asociados a desperfectos en máquinas y sistemas. Una forma de determinar sus causas sería analizar sus características, es por ello que en la industria, el transporte y otras muchas esferas de la producción, las vibraciones son empleadas como método predictivo por parte de los equipos de técnicos e ingenieros de mantenimiento. Luego de un proceso de realineación efectuado a un buque auxiliar perteneciente a la empresa Prácticos de Cuba, la tripulación manifestó que las máquinas perdían potencia y se percibían vibraciones anormales, los tripulantes las asociaban a problemas de alineación. Se demandó estudiar el fenómeno y para ello era necesario un equipo de medición de vibraciones, los cuales se pueden adquirir en el extranjero a un precio relativamente asequible pero en un considerable tiempo de arribo. Se empleó un acelerómetro como instrumento de medición y se desarrolló un método para procesar las aceleraciones y obtener los valores de amplitud y velocidad característicos de las vibraciones presentes en el cuarto de máquinas con los que comparar contra las normas. Para el procesamiento, luego de las mediciones, se emplearon técnicas propias del tratamiento digital de señales, en particular la Transformada Rápida de Fourier con la ayuda del programa Matlab y mediante las ecuaciones clásicas que definen los fenómenos vibratorios se determinó los parámetros necesarios para dictaminar si son aceptables las cargas vibratorias presentes en la embarcación.

Palabras claves: Vibraciones, procesamiento de señales, valores RMS de amplitud y velocidad.

## 1- INTRODUCCIÓN

Una vibración se puede considerar como un movimiento repetitivo alrededor de una posición de equilibrio. En la construcción naval, es un tema de gran connotación no solo por lo que significa a nivel de percepción física y/o auditiva, sino además por ser la respuesta concreta y real del estado técnico de las máquinas. Las vibraciones siempre estarán presentes en las máquinas, por lo que se busca mantenerlas dentro de rangos aceptables. [1]

Las máquinas son las principales generadoras de vibraciones porque aportan un gran número de modos de vibración debido a la cantidad de mecanismos que las componen, también las hélices; debido al mal contrapesado y a otros fenómenos asociados a la interacción de estas con el agua, y otras causas y fuentes son: las desalineaciones de la línea de eje, las plantas generadoras de corriente, e incluso los propios efectos del mar. Analizando las frecuencias de los diferentes modos de vibraciones se puede discernir entre el amplio espectro los más energéticos que se transmiten a través de las estructuras del barco, por ello en la industria naval se emplean equipos de medición de vibraciones especializados en este tipo de análisis que simplifican significativamente el trabajo de los técnicos e ingenieros. [2]

En nuestro Centro no contamos con este tipo de equipamientos por lo que decidimos emplear como instrumento de medición una Unidad de Medición Inercial (IMU), la cual está compuesta; entre otros sensores, por tres acelerómetros orientados para medir la aceleración por cada uno de los tres ejes de coordenadas. Se trabajó con la IMU MTi-300, ver figura 1, que ha sido empleada con anterioridad en pruebas en bancos de ensayo de vibraciones.



Figura 1. Unidades de Medición Inercial IMU MTi-300.

Este instrumento, a través del software MT Manager, permite registrar de forma gráfica (Figura 2) y tabulada los valores de aceleración medidos con una frecuencia de muestreo de 2000 Hz; valor máximo programable en este instrumento y necesario para poder cuantificar vibraciones con frecuencias de hasta 1000 Hz.



Figura 2. Interfaz gráfica del software MT Manager. Gráfico de aceleraciones.

## 2- MATERIALES Y MÉTODOS

### Método de procesamiento.

Las características más importantes de las vibraciones son: la frecuencia de la onda sinusoidal, el desplazamiento, la velocidad y la aceleración, pero debido a que en los cuartos de máquinas trabajan simultáneamente múltiples máquinas, mecanismos y partes, cada uno de ellos moviéndose periódicamente en diferentes direcciones e intervalos de tiempos, no se puede hablar de un único valor de frecuencia, desplazamiento, velocidad y aceleración sino de un espectro de vibraciones que varían aleatoriamente en el tiempo característico de señales ruidosas. [3] Para el procesamiento se exportaron las datas registradas por el MT Manager hacia el Excel, donde se eliminaron los valores innecesarios como la velocidad angular, datos asociados al campo magnético, orientación y otros que entrega la IMU, para solo quedarnos con las aceleraciones respectivas a cada eje. Se reduce el tamaño de la trama a cinco segundos de medición que debido a la elevada frecuencia de

muestreo; igual a 2000 Hz, guarda datos cada 0.5 milisegundos tomando un total de 10000 valores de aceleración por cada eje, ver figura 3.

Estas hojas de cálculo se importaron en Matlab y luego de acomodar los datos al nuevo lenguaje, se le aplicó a cada señal de aceleración la Transformada de Fourier (FFT, por sus siglas en inglés). Esta es un conjunto de operaciones matemáticas que transforma una señal que está en el dominio del tiempo al dominio de frecuencia y viceversa.

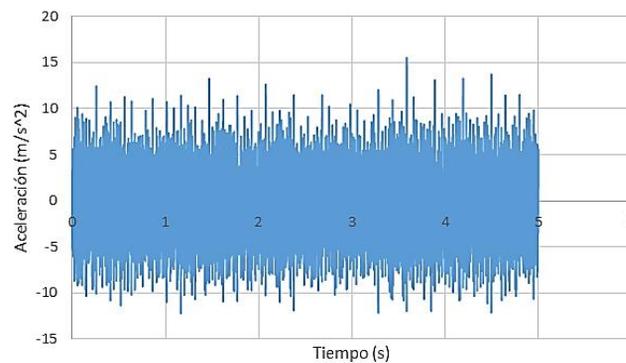


Figura 3. Gráfico de aceleraciones medidas en los primeros cinco segundos.

De esta forma se puede conocer los modos de vibración más peligrosos y analizando sus valores de amplitud y frecuencia se puede determinar la fuente que lo genera y corregir el causante. Al aplicarla se pierde información respecto a aquellos modos de vibración cuyas frecuencias sean mayores que la mitad de la frecuencia de muestreo, en nuestro caso igual a 2000 Hz. Por ende las fuentes excitadoras cuyas frecuencias superen o se aproximen a 1000 Hz no serán contempladas o lo serán pero con baja fiabilidad, lo cual no resulta un inconveniente para nuestro trabajo ya que la frecuencia de las máquinas en regímenes de trabajo normales, se encuentran por debajo de estos valores alcanzando picos de aceleración con valores apreciables para frecuencias inferiores a los 750 Hz, esto se evidencia en los gráficos de aceleración contra frecuencia de las pruebas realizadas de los que; a continuación ponemos un ejemplo:



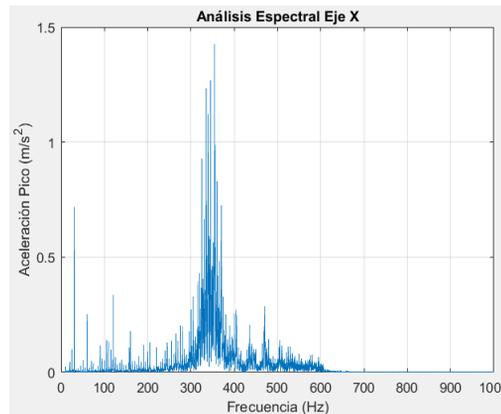


Figura 4. Gráfico de aceleración contra frecuencia.

Una vez obtenido el espectro de frecuencia y sus correspondientes aceleraciones pico fue necesario calcular los valores de velocidad RMS y desplazamiento RMS de cada una de sus componentes, ya que son estos valores los referenciados en las normas con las que se trabajó. El valor RMS de una señal cualquiera se corresponde al valor constante que contendría la misma energía que posee la onda sinusoidal, expresado matemáticamente es la raíz cuadrada del valor medio cuadrático de la señal y para nuestro caso, que se puede descomponer la señal en la suma de varias ondas sinusoidales, se simplifica al valor pico de la señal entre la raíz cuadrada de dos, según se muestra en las siguientes expresiones:

$$A_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} (A \sin(\omega t + \varphi))^2 dt} = \frac{A}{\sqrt{2}} \quad (1)$$

Donde:

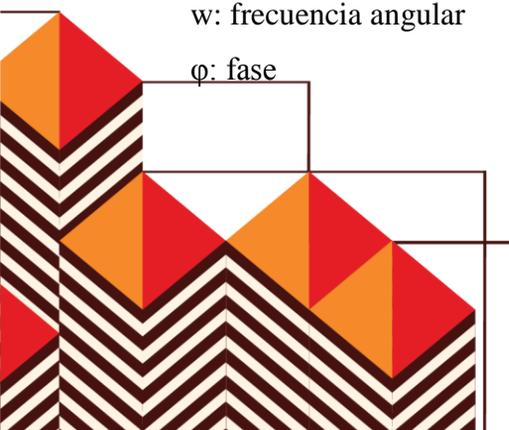
$A_{RMS}$ : valor RMS de la amplitud

t: instante de tiempo

A: amplitud de la señal

w: frecuencia angular

$\varphi$ : fase



La expresión matemática que describe el movimiento oscilatorio, específicamente la posición, de una partícula o cuerpo vibrando es:

$$x(t) = X \operatorname{sen}(wt + \varphi) \quad (2)$$

Donde:

x: posición en un determinado instante de tiempo

X: amplitud máxima del desplazamiento

Derivando obtenemos la ecuación que define su velocidad (ec.3) y derivando esta última obtenemos la correspondiente a la aceleración (ec.4).

$$\frac{dx}{dt} = v(t) = wX \operatorname{cos}(wt + \varphi) \quad (3)$$

$$\frac{d^2x}{dt^2} = a(t) = -w^2 X \operatorname{sen}(wt + \varphi) \quad (4)$$

Donde:

v : velocidad en un instante de tiempo dado

a: aceleración en un determinado instante de tiempo

En la expresión tres el valor correspondiente al producto de la frecuencia angular y la amplitud del desplazamiento equivale al valor de la máxima velocidad (ec.5) que alcanza el cuerpo o la partícula (V). Lo mismo ocurre en la expresión cuatro, pero esta vez como resultado del producto de la frecuencia angular al cuadrado y la amplitud del desplazamiento, que equivale a la aceleración máxima (A), reflejada en la ecuación 6.

$$V = wX \quad (5)$$

$$A = w^2 X \quad (6)$$



Conociendo que la frecuencia angular es igual a dos veces la frecuencia por el valor de la constante Pi y sustituyendo en las ecuaciones (5) y (6), obtenemos las expresiones para el cálculo de velocidad y aceleración máximas en función de la frecuencia. Teniendo los valores de aceleración y sus respectivas frecuencias obtenidas mediante la FFT (ver gráfico de la figura 4), podemos obtener los desplazamientos máximos y velocidades máximas despejando de las ecuaciones cinco y seis, que acomodando convenientemente nos quedarían ajustados a valores RMS y en las unidades de medidas requeridas para comparar contra la norma.

$$X_{RMS} = \frac{10^{-6}A}{4\pi^2 f^2 \sqrt{2}} [\mu m] \quad (7)$$

$$V_{RMS} = \frac{10^{-3}A}{2\pi f \sqrt{2}} \left[ \frac{mm}{s} \right] \quad (8)$$

Estos procedimientos se aplicaron para las tres series de datos correspondientes a la medición de las aceleraciones de cada eje de coordenada en cada una de las maniobras realizadas. Obteniéndose finalmente un gráfico de aceleraciones pico, velocidades y desplazamientos RMS como se muestra en la figura 5.

Estas figuras son útiles para analizar las frecuencias más perjudiciales y definir las fuentes excitadoras porque muestra todo el espectro de frecuencias pero para contrastar con las normas resulta engorroso por ello como paso final se seleccionó el mayor valor de cada magnitud por eje ya que este resultará el más dañino de todo el espectro, junto con su correspondiente valor de frecuencia. [4]



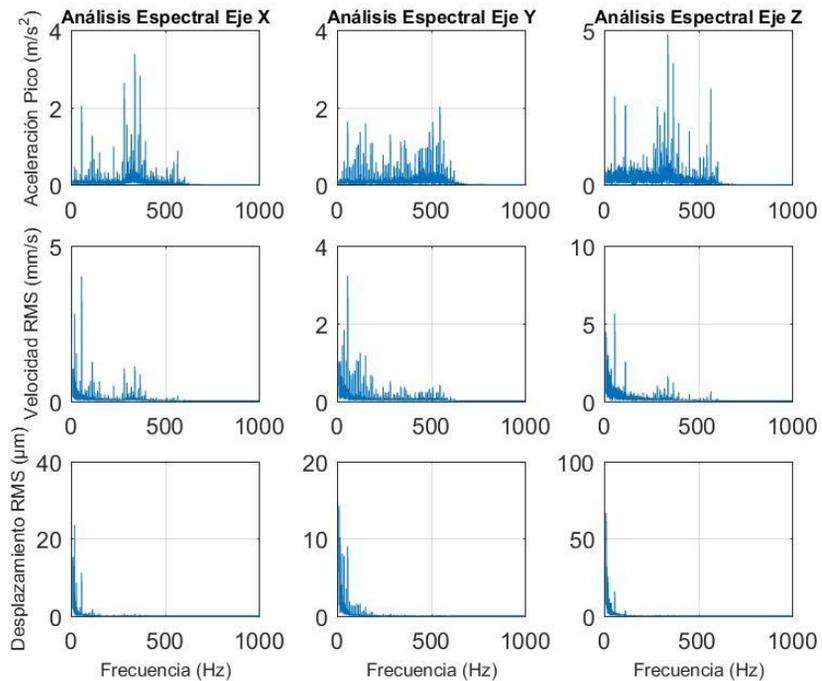


Figura 5. Análisis espectral de las mediciones por cada uno de los tres ejes.

### Normas consultadas.

Durante la búsqueda bibliográfica se consultaron varias normas que abordan el fenómeno desde distintos puntos de vista, uno de ellos es el impacto de las vibraciones en detrimento de la habitabilidad de la embarcación, asociado al confort requerido en cuanto a la acústica y la sensibilidad mediante el sentido del tacto. Estas normas son empleadas en buques de pasajeros y recreativos y en embarcaciones donde la tripulación convive durante largos períodos de tiempo a bordo, en nuestro caso, el cual no se enmarca en ninguna de las categorías anteriormente mencionadas, requiere de menores estándares de confort, sin restarle importancia pues pudiera incluso causar problemas de salud y desempeño de los tripulantes. Otro grupo de normas regulan las vibraciones pero atendiendo al buen funcionamiento de las máquinas, en aras de evitar desperfectos y roturas de las mismas. La norma ISO 6954 ofrece las bases para la realización de

mediciones en zonas habitables de barcos; se refiere a cómo realizarlas, la localización y orientación de los transductores, además de las condiciones y procedimiento de medición establece rangos para la evaluación de resultados. [5] La ISO 2372 es una norma para maquinaria rotativa operando desde 600 hasta 12000 rpm. Especifica niveles de velocidad general de vibración en lugar de niveles espectrales, resultados que pueden ser algo engañosos. La norma especifica los límites de velocidad de vibración basándose en los caballos de vapor de la máquina y cubre un rango de frecuencias desde 10 Hz hasta 1000 Hz. Debido al rango limitado de alta frecuencia, se puede fácilmente dejar pasar problemas de rodamientos con elementos rodantes. [6] Esta norma está considerada actualmente obsoleta siendo reemplazada por la actual ISO 10816 e ISO 4867. La norma ISO 4867 resulta más completa que la anterior, aunque no contiene la influencia de las vibraciones o ruido en espacios destinados a pasajeros, es decir a nivel de percepción. Contempla los parámetros a medir y los lugares dónde realizar las mediciones además de los aspectos a referir en el reporte. [7] La norma ISO 10816 brinda las guías para la evaluación de la severidad de las vibraciones medidas en apoyos, montajes o soportes de máquinas industriales. Consta de seis partes, asociadas cada una a diferentes tipos de máquinas con características de trabajo distintas. Esta al ser la que más se ajusta a los motores de la lancha, específicamente en su parte tres, fue la que empleamos como patrón y en ella se establecen zonas límites para las velocidades y el desplazamiento. [8]

### **Preparación de la prueba.**

La primera solicitud para realizar una prueba de este tipo, fue generada a raíz del criterio emitido por la tripulación de la embarcación, quienes manifestaban vibraciones anómalas durante la ejecución de la maniobra de máquina babor atrás, a diferencia de la misma maniobra pero con la máquina de estribor. La prueba se concibió de tal forma que se midieron las aceleraciones en cada una de las máquinas por separado y en los mismos regímenes de trabajo, no se ejecutó mar adentro sino en el interior de la bahía del Mariel, los regímenes que se analizaron fueron: marcha libre,



marcha atrás a 600 rpm, marcha adelante a 600 rpm, a 700 rpm, a 900 rpm, a 1000 rpm y a 1200 rpm.

La IMU se colocó entre las tuercas de fijación de uno de los calzos de la caja reductora (ver figura 6) empleando un angular de seis milímetros garantizando una fijación rígida. La orientación de la misma aunque no fue una exigencia que nos impusimos quedó colocada coincidiendo en dirección el eje Y de la IMU con la línea de crujía de la embarcación y el eje Z con el vector gravedad, según se aprecia en la figura 7.



Figura 6. Punto de fijación de la IMU.



Figura 7. Orientación de la IMU.

Las mediciones se registraron una vez que se logró la estabilidad en cada uno de los regímenes, esperando un tiempo prudente entre el cambio de régimen y el inicio de la grabación de los datos medidos.

### 3- RESULTADOS

Del procesamiento de la información se obtuvieron los valores máximos RMS de velocidad y desplazamiento para cada régimen medido.



## Máquina de Babor

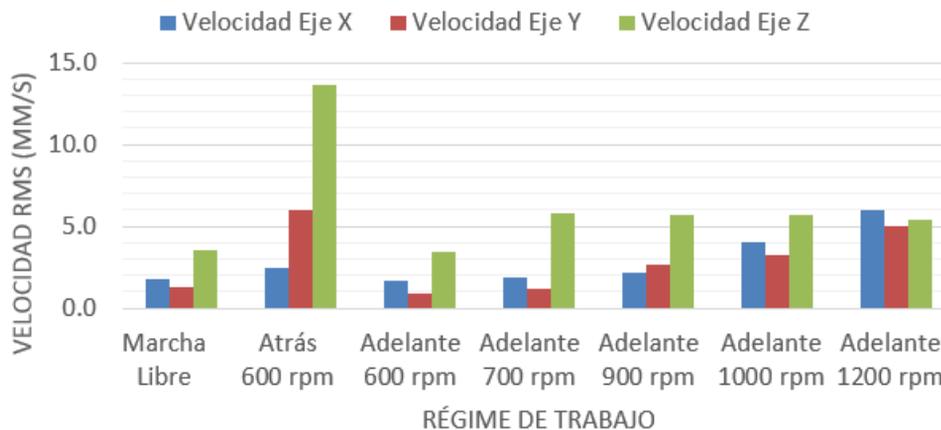


Figura 8. Gráfico de velocidades RMS máximas detectadas en cada régimen.

## Máquina de Estribor

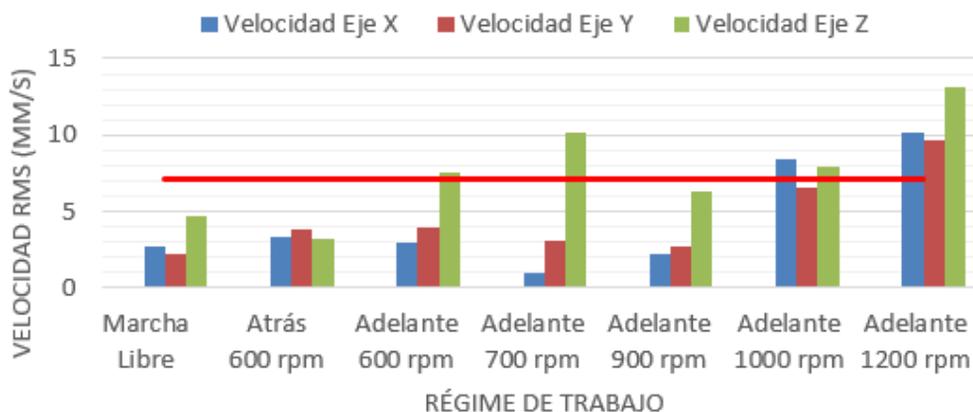


Figura 9. Gráfico de velocidades RMS máximas detectadas en cada régimen.



En el caso de los desplazamientos estos fueron los resultados de las mediciones:

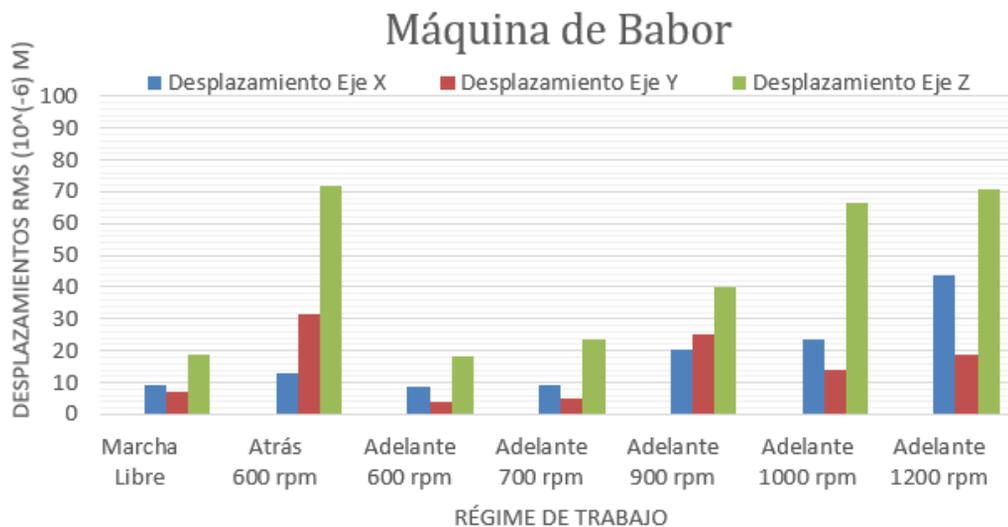


Figura 10. Gráfico de desplazamientos RMS máximos.

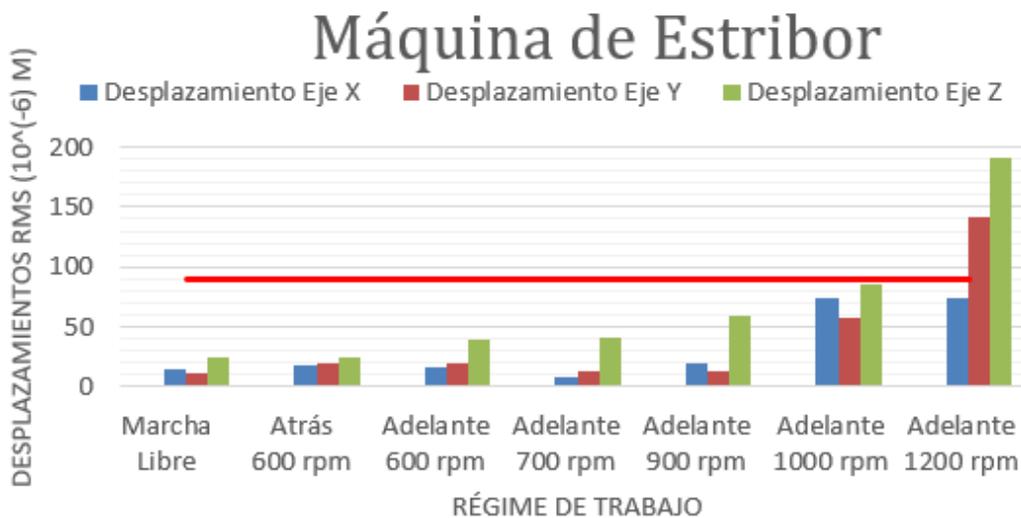


Figura 11. Gráfico de desplazamientos RMS máximos.



#### 4- DISCUSIÓN

Analizado el gráfico de la figura 8 se aprecia que en todos los regímenes de trabajo ejecutados en la prueba, las vibraciones medidas alcanzan valores inferiores a los 7.1 mm/s (Aceptable), excepto para el régimen de máquina atrás donde por el eje Z llega a alcanzar 13.7 mm/s excediendo los 11 mm/s de velocidad, por lo que se enmarca en la Zona D según la norma con criterio de PELIGROSO para el funcionamiento. A diferencia de la máquina de estribor la cual para este régimen solo llega a censar 3.8 mm/s por el eje Y (ver figura 9), valor considerado ACEPTABLE y próximo al criterio de BUENO. Los resultados obtenidos para la maniobra de máquina atrás en babor y estribor evidencian, que tal y como expresaban los tripulantes, la máquina de babor presenta problemas manifestados a través de las vibraciones. Durante la instalación de la IMU se detectó que una de las tuercas de fijación del calzo se encontraba mal ajustada y tras su apriete cesaron las vibraciones, quedando conformes los tripulantes.

Observando el gráfico de la figura 9 se aprecia que en la máquina de estribor se registran valores INSATISFACTORIOS para los regímenes de máquina adelante a 600, 700 y 1000 rpm y en el caso de máquina adelante a 1200 rpm llega a superar los 11 mm/s de velocidad por lo que se considera PELIGROSO para el funcionamiento. Para determinar las causas que la generan se deberá realizar un estudio más profundo sobre las diferentes partes que componen el sistema propulsivo específicamente las correspondientes a la banda de estribor.

Como se puede apreciar en el gráfico de la figura 1, para la máquina de babor ninguno de los valores de desplazamiento supera los 90  $\mu\text{m}$  por lo que se puede afirmar que teniendo en cuenta lo establecido por la norma para el caso de los desplazamientos, la máquina de babor no presenta problemas. A diferencia de la máquina de estribor la cual para el régimen de trabajo a 1200 rpm registra desplazamientos por los ejes Y y Z superiores a los 140  $\mu\text{m}$  ubicándose en la zona de PELIGRO, al igual que sucedió con las velocidades, lo cual evidencia un problema de funcionamiento de alguno de sus elementos a esta frecuencia de trabajo.

## 5-CONCLUSIONES

- El método empleado para la medición arroja valores lógicos que demuestran la factibilidad de su empleo, lo que permitió el cumplimiento de los objetivos propuestos.
- Se detectaron vibraciones fuera de parámetros en la máquina de babor en el régimen de marcha atrás según referían los tripulantes, fue corregido el problema que las causaba y la tripulación quedó conforme con el desempeño de la embarcación.
- En la máquina de estribor a 1200 rpm se registraron velocidades y desplazamientos con criterio; según la norma, de PELIGROSO para el funcionamiento.

## 6- REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Diagnóstico por vibraciones en motores de combustión interna. Facultad de Ingeniería Mecánica. ISPJAE. La Habana, Cuba. 2014.
2. Estudio de las vibraciones de un buque en la etapa de diseño. Diplomatura en Máquinas Navales.
3. Mantenimiento predictivo de motores Diésel marinos mediante correlación de imágenes termográficas y análisis de vibraciones. Monografía. Universidad Tecnológica de Bolívar. Cartagena de India. Venezuela. 2018
4. Medición y análisis de vibraciones en el sistema propulsivo naval. Tesis de grado. Universidad Austral de Chile. Chile. 2019.
5. Norma ISO 6954: Vibraciones mecánicas. Directrices para la medición, reporte y evaluación de habitabilidad para barcos de pasajeros y mercantes.
6. Norma ISO 2372: Guía para la aceptación de la amplitud de vibración.
7. Norma ISO 4867: Código para la ejecución de mediciones vibracionales a bordo de buques y presentación de resultados.
8. Norma ISO 10816: Evaluación de máquinas. Vibraciones y medición de partes no rotativas.