

RESONANCIAS EN SISTEMAS DE PROPULSION DE BUQUES RELACIONADO CON LA OPERACIÓN PROLONGADA A TRAVÉS DE LOS AÑOS DE SERVICIO

Torres Cuevas A. A

Astilleros y Maestranzas de la Armada, Chile
e-mail: atorresc@asmar.cl

RESUMEN

Las estructuras de los buques son en general estables a lo largo de su vida útil, sin embargo, existen embarcaciones que pasado prolongados años de operación suelen presentar modos de vibración atípicos en alguno de los componentes del sistema. De los casos que se han estudiado, esta problemática se ha podido catalogar como un fenómeno de resonancia. El presente trabajo tiene por finalidad proponer una metodología simple de medición y análisis de la respuesta vibratoria para la identificación de algunos tipos de resonancias en sistemas propulsores. El resultado evidenció que la resonancia genera un incremento drástico en el nivel vibratorio y síntomas característicos que permiten diferenciarlos de otras fallas convencionales. El cambio en las propiedades de rigidez y forma respecto del diseño original, generan el entorno para la aparición de este fenómeno, pudiendo ser detectable a través del análisis de vibraciones.

Palabras claves: Sistema propulsor, resonancia, vibraciones, reparación.

1- INTRODUCCIÓN

Un buque es un complejo conjunto de componentes estructurales y mecánicos estimulados bajo la acción de fuerzas dinámicas [3]. Estas fuerzas dinámicas de excitación son las que ocasionan que un sistema vibre y dañen los componentes del sistema propulsor si no son debidamente controladas.

Uno de los problemas que puede reducir la vida útil de la maquinaria, es la resonancia. Se dice que un sistema está en condición de resonancia cuando la frecuencia de excitación que actúa sobre este coincide con alguna de sus múltiples frecuencias naturales del sistema. En teoría, al igualarse tales frecuencias, la amplitud de las fuerzas actuantes incrementa de manera significativa los niveles vibratorios, en especial en sistemas poco amortiguados Fig.1, pudiendo superar los niveles máximos recomendados. La importancia de la correcta identificación radica en evitar una prolongada exposición que pueda llevar a la fatiga de los componentes más vulnerables del sistema.

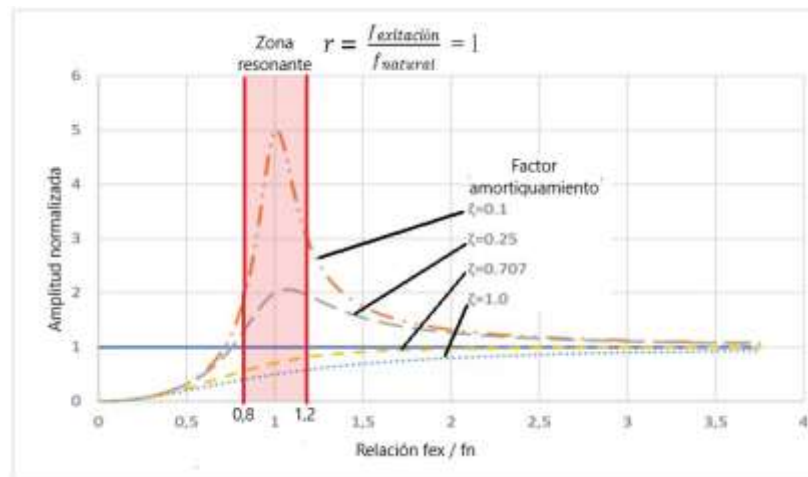


Fig. 1. Gráfico adimensional del desplazamiento vibratorio de maquinaria

Para sistemas con un grado de libertad, la resonancia puede ser expresada mediante la relación:

$$\omega = \omega_n \quad (1)$$

Donde:

ω – frecuencia de excitación, rad/s.

ω_n – frecuencia natural de vibrar del sistema, rad/s.

En construcción naval, los buques son normalmente diseñados para que la frecuencia fundamental o velocidad crítica este siempre fuera del rango de operación. Con el transcurso del tiempo, las embarcaciones pueden sufrir pérdidas de rigidez por deterioro de las uniones estructurales, corrosión de las bases, grietas, alteraciones respecto a su diseño original, generando cambios en la frecuencia natural que pueden conducir a este fenómeno.

Si bien, la resonancia está relacionada a las variaciones de rigidez de los componentes o estructuras, existe también fenómenos resonantes asociados a la hélice propulsora; uno de ellos es conocido en la literatura como hélice cantora [1], condición que depende de la igualdad entre frecuencia natural de uno de sus modos de vibrar de la hélice y la frecuencia de desprendimiento de vórtices generada en el borde de salida de la pala [4], cuya respuesta genera altas vibraciones y ruido en la embarcación.

Una herramienta que ha mostrado ser eficaz para identificar la condición de resonancia, es a través del análisis de la señal vibratoria, mediante la cual es posible encontrar la relación existente entre la respuesta en frecuencia y la fuerza dinámica que la genera.

En el siguiente trabajo se presenta de manera práctica, una metodología para la identificación de condiciones resonantes en líneas de eje y hélices, basado en un análisis cuantitativo de la respuesta vibratoria observada durante rutinas de mantenimiento en diferentes tipos de embarcaciones.

2- MATERIALES Y MÉTODO

El método de obtención de datos corresponde al registro y análisis de la señal vibratoria medida durante pruebas de arribo en la mar. La aplicación de la metodología será a través del estudio de dos casos prácticos considerados como efectos resonantes, Tabla 1. Para el caso de vibraciones relacionadas con el eje propulsor, las unidades a analizar corresponden a embarcaciones que han



presentado un incremento en los niveles de vibración relacionado con el eje propulsor, superando el límite de vibración discreta de 8 mm/s en cualquiera de sus velocidades de operación. La tabla 2 muestra un resumen de la tendencia de las unidades con este tipo de problemas.

Tabla 1 Secuencia de pruebas efectuadas en navegación

Etapas	Prueba	Propósito	Eje	Hélice
1	Configuración del instrumento	Configurar rango de frecuencia y unidades de medida de acuerdo a normas de evaluación.	Si	Si
2	Medición con buque dando avance a M.C.R.	Evaluar severidad vibratoria, adecuar configuración del instrumento al rango de frecuencia y amplitud de interés	Si	Si
3	Ubicación del sensor	Caso resonancia en eje: descanso soporte de tramo de eje con mayor relación largo / diámetro. Caso resonancia en hélice: descanso más cercano a la hélice.	Si	Si
4	Medición variando velocidad del eje (tiempo real)	Identificar rango generación de resonancia o amplificación	Si	Si
5	Buque dando atrás	Descartar origen mecánico de vibración	No	Si
6	Medición de fase entre posición radial vertical y radial horizontal	Diferencia condición de resonancia respecto de desbalance.	Si	No

Tabla 2 Número de buques con altos niveles de vibración a M.C.R.

	Unidades con nivel de vibración satisfactorio	Unidades nivel de vibración no satisfactorio
Año 2004	13	3*
Año 2022	9	7

*causa no relacionada a resonancia.

Para el caso de vibraciones en hélices, la tabla 3 detalla una estadística de las embarcaciones en las cuales ha sido detectado este fenómeno, destacándose el caso a analizar.



Tabla 3 Embarcaciones en las cuales se ha detectado el fenómeno en los últimos 10 años

Tipo de embarcación	Año construcción	Tipo de hélice	Diámetro de hélice (m)	Cantidad de líneas propulsoras	Paso	Condición de borde en hélice
Transporte de Pasajeros	1990	High skew	3,2	2	Fijo	Bisel no definido
Pesquero	1986	Convencional	2	1	Fijo	Bisel no definido
Servicio costero	1995	Convencional	1	2	Fijo	Protección con polímero
Transbordador de pasajeros	1973	Convencional	1,5	1	Fijo	Borde deformado / pérdida de paso
Servicio costero	2002	Convencional	1	2	Fijo	Bisel no definido

La instrumentación utilizada para la medición de vibraciones, configuración, condiciones de pruebas y límites se detallan a continuación:

- Equipo utilizado: Analizador de vibraciones Microlog AX80
- Sensores: Acelerómetros de 100 mV/g (cantidad acelerómetros 2)
- Rango de frecuencias: 2 a 1000 Hz / 2 a 2000 Hz (depende del rango de resonancia)
- Condiciones de navegación: Estado de mar fuerza 3 o menor, curso recto de navegación con caídas de timón restringido a 2° a babor / 2° a estribor [5].
- Límite de vibración para resonancia en eje: 8 mm/s valor discreto del eje [6]
- Límite de vibración para resonancia en hélice: 5 mm/s valor global medida en descanso [7].

La figura 2 muestra los puntos de control para análisis. Una vez efectuada las mediciones, la información es descargada en el software de análisis de vibraciones Aptitude Analyst de SKF.



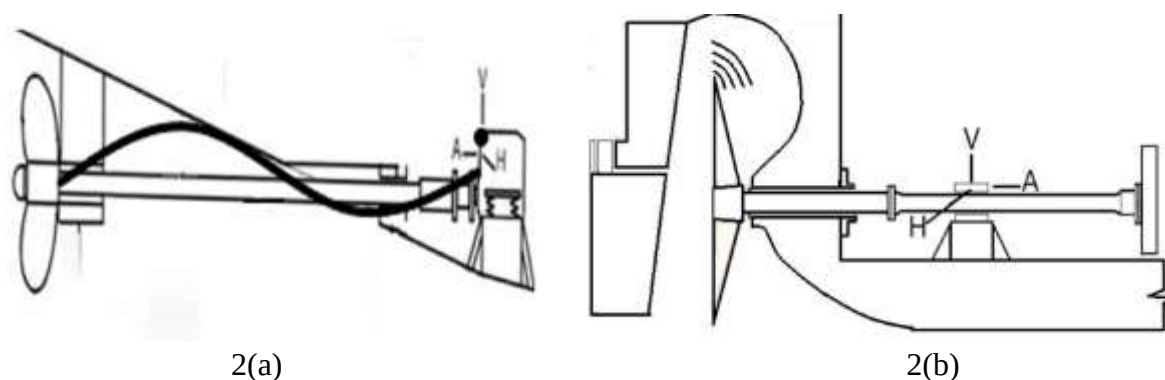


Fig. 2. Esquema y puntos de control, resonancia en eje 2(a) resonancia en hélice 2(b)

3- RESULTADOS

Análisis caso 2a: resonancia en eje

El primer caso corresponde a embarcaciones construidas con estructura de aluminio, eslora 33 metros, manga 6,6 metros, desplazamiento 125 toneladas y velocidad máxima 25 nudos. La tabla 4 muestra compara la magnitud que pueden alcanzar las vibraciones en las embarcaciones clasificadas como no satisfactorias respecto de una con niveles de vibración satisfactorios a M.C.R.

El análisis de la respuesta vibratoria puede ayudar a distinguir a la resonancia de otras fallas con características similares. Los datos obtenidos de la secuencia de pruebas son observados en la fig. 3. Se puede apreciar la existencia de una componente dominante a 1X RPM altamente direccional. Los registros de fase relativa (sensores dispuesto a 90°) mostraron un valor de 39°. La relación de amplitudes entre los espectros de la Fig. 3(a) y Fig. 3(b) es de 4,7 veces. De acuerdo con las referencias obtenidas de la literatura [2], el resultado de la medición de fase, la diferencia entre la amplitud radial vertical y amplitud radial horizontal superior a 3 y la alta direccionalidad contempla la resonancia como causa, descartando otras causas similares como el desbalance o flexión de eje.

La Fig. 3 evidencia, además, una distribución de las componentes armónicas del giro del eje de

poca incidencia en el valor global de los espectros (1X, 2X, 3X), desestimando al desalineamiento.

Tabla 4 Comparación niveles de vibración entre embarcaciones comisionadas en mismo año

Dirección de medición	Embarcación en rango no satisfactorio			Embarcación en rango satisfactorio		
	Nivel global mm/s	Nivel discreto 1X, mm/s	Relación nivel discreto/ nivel global	Nivel global mm/s	Nivel discreto 1X, mm/s	Relación nivel discreto/ nivel global
Vertical	25	22,2	89%	9,5	4,8	51%
Horizontal	16	4,71	29%	11	4,43	41%
Axial	9,7	1,05	15%	10	0,76	8%

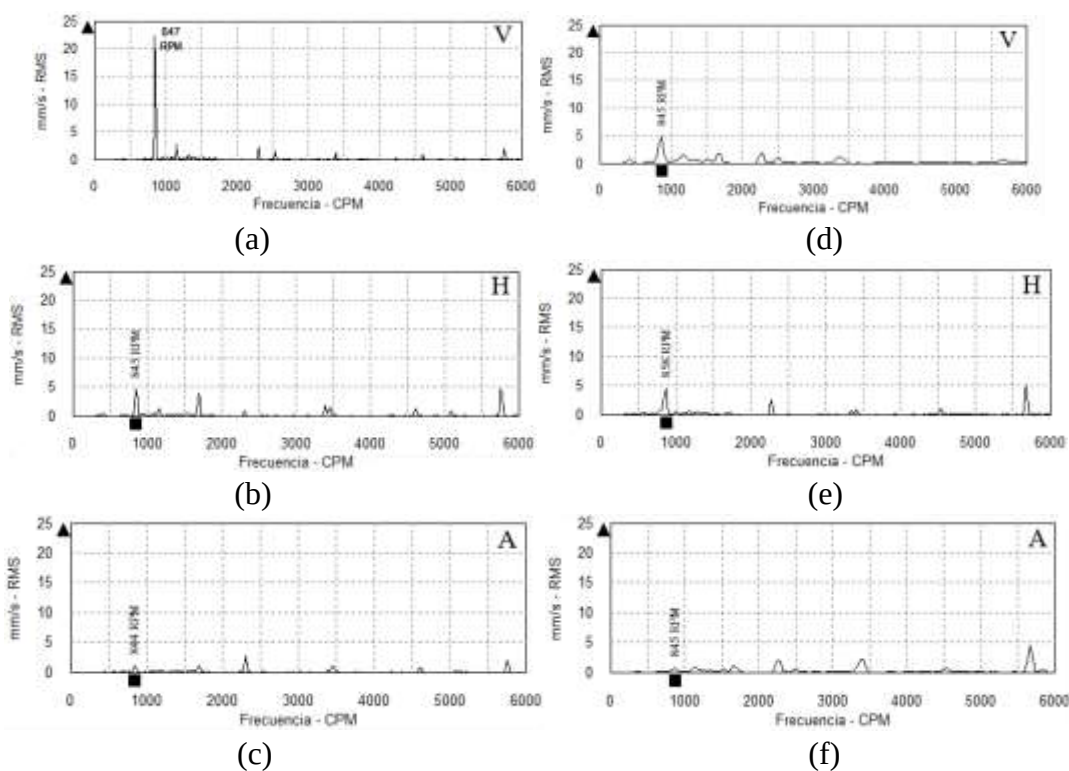


Fig. 3. Espectros de buque en condición no satisfactorio (a), (b) y (c); espectros de buque en condición satisfactorio (d), (e) y (f).

La fig. 4 muestra el incremento de la amplitud discreta a diferentes velocidades. Se puede apreciar

que un pequeño cambio en la velocidad de operación incrementa la amplitud discreta al doble, para luego disminuir su valor a velocidades de operación superiores. Esta respuesta refleja el comportamiento de la línea de eje al pasar por su velocidad crítica.

Objeto reforzar el planteamiento anterior, se empleó el análisis del arreglo general de la línea de eje, como se indica en la Fig. 5, detectando que la disposición de los apoyos y su proporción respecto del diámetro del eje mantiene una relación $L_1 / D = 34,6$ veces; algunas Sociedades Clasificadoras [8] sugieren efectuar un análisis de vibraciones específico (whirling) cuando la relación L_1 / D superen el valor de $450 \cdot \sqrt{\text{diámetro del eje}}$, muy cercana a la distancia actual. Se estima que mayores longitudes entre descanso aumentan la posibilidad de vibración relacionada a resonancia.

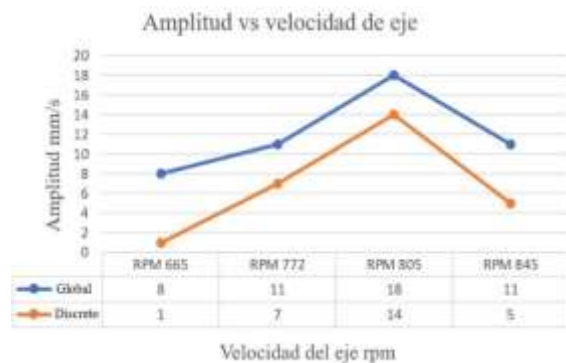


Fig. 4. Relación amplitud vertical vs rpm.

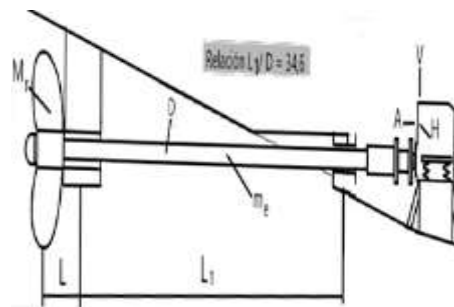


Fig. 5. Arreglo general y relación L_1 / D .

Para la validación de modo de vibrar anterior y bajo la hipótesis de resonancia, se efectuó un modelamiento de la línea de eje. Lo anterior fue realizado mediante la aplicación del software ShaftDesigner. La frecuencia natural calculada por el software fue de 13,7 Hz, lo cual indica que la línea de eje se encontrará en una condición de máxima amplificación de los niveles vibracionales cuando la frecuencia natural coincida con las revoluciones del eje a 822 RPM Fig. 6.

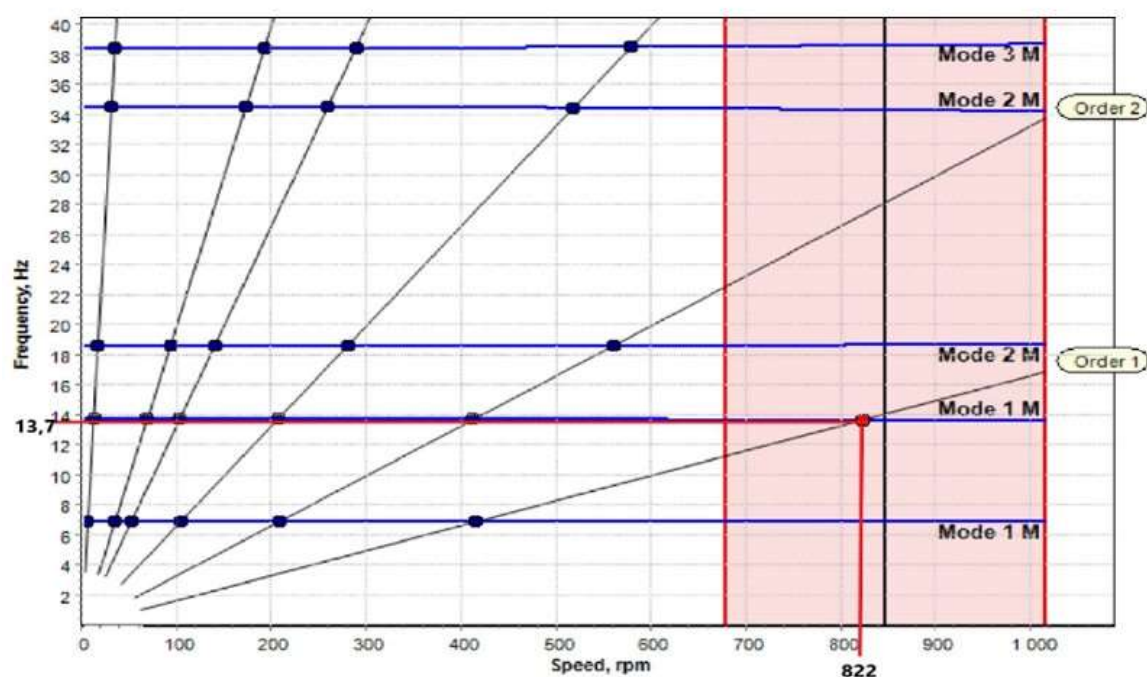


Fig. 6. Diagrama de Campbell para frecuencias críticas.

Análisis caso 2b: resonancia en hélice

El segundo caso de resonancia es uno que afecta a algunos tipos de hélices, produciendo altos niveles de vibración y ruido. La tabla 3 expone las embarcaciones que evidenciaron este problema. El caso en estudio corresponde a una hélice convencional de 3 palas de paso fijo, instalada en un transbordador de pasajeros de eslora 24 metros, manga 6,7 metros, desplazamiento 165 toneladas y una velocidad máxima de 9 nudos y con solo una línea propulsora. La hélice presenta daño en su borde y pérdida de paso de una de sus palas.

La tabla 5 resume el resultado de las pruebas efectuadas. El término revolución y frecuencia resonante se definieron como aquellos a la cual se produce la mayor amplitud de vibraciones en todo el rango de aparición del fenómeno.

Tabla 5 Resultado pruebas y mediciones efectuadas hélice instalada en transbordador.

Tipo de buque	Revolución máxima eje (RPM)	Velocidad máxima del buque (m/s)	Velocidad del fluido en la pala (m/s)	Revolución resonancia eje (RPM)	Velocidad de resonancia (m/s)	Frecuencia resonancia (Hz)
Transbordador de pasajeros	405	4,6	15,4	257	3,13	511,9

El análisis de la señal vibratoria se presenta en la Fig. 7. El espectro de la Fig. 7(a) corresponde a la condición de navegación a avante a 257 RPM del eje y muestra la relación entre la frecuencia resonante y amplitud. El espectro de la Fig. 7(b) corresponde a la condición navegación atrás a 257 RPM. Se observa que en la condición dar atrás desaparece complétame dicha frecuencia. La Fig. 7(c) muestra la señal en el dominio tiempo, donde es posible visualizar las modulaciones relacionadas con la velocidad de giro del eje propulsor. El comportamiento modulado y permanente permite diferenciarlas de problemas hidrodinámicos como la cavitación y turbulencia.

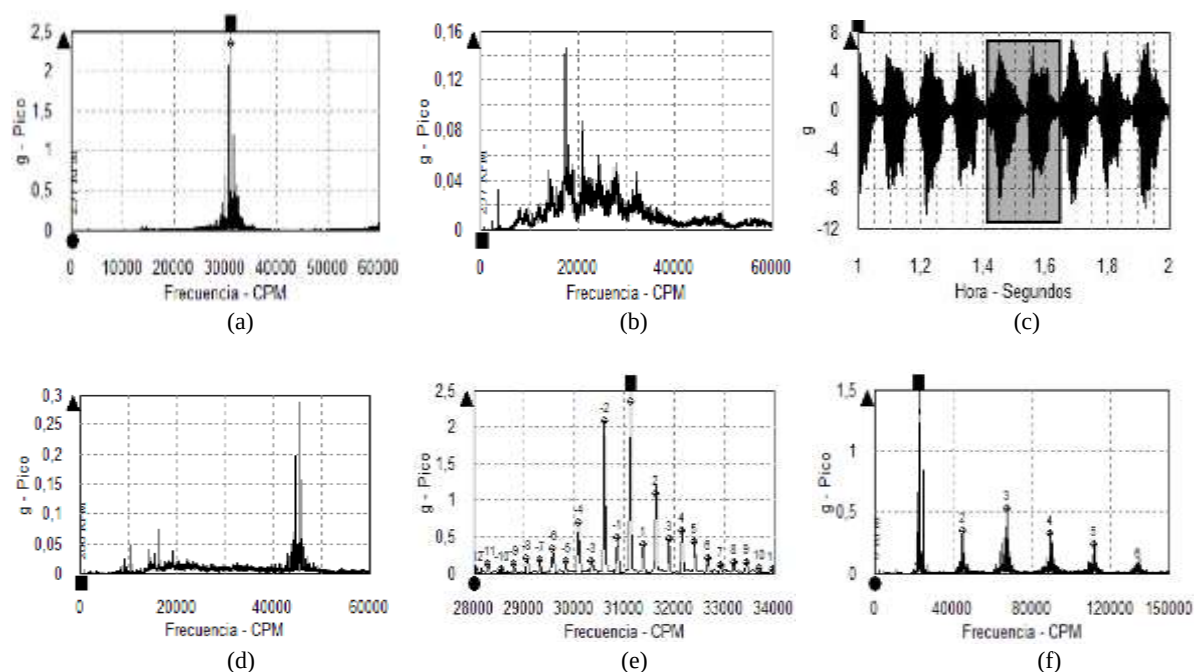


Fig. 7. Espectros y onda temporal de una embarcación con resonancia en la hélice.

La Fig. 7(e) muestra las modulaciones alrededor de la frecuencia central de la Fig. 7(a), con componentes espaciadas exactamente a las velocidades de giro del eje, llamadas bandas laterales, siendo esta una de las características que se mantiene en todas las hélices analizadas.

El espectro de la Fig. 7(d) corresponde a una velocidad mayor a la del espectro 7(a); puede observarse que la frecuencia de resonancia cambia el valor de su frecuencia central. El espectro de la Fig. 7(f) muestra que se pueden excitar armónicos de la frecuencia resonante, manteniéndose las bandas laterales alrededor de cada uno de los armónicos.

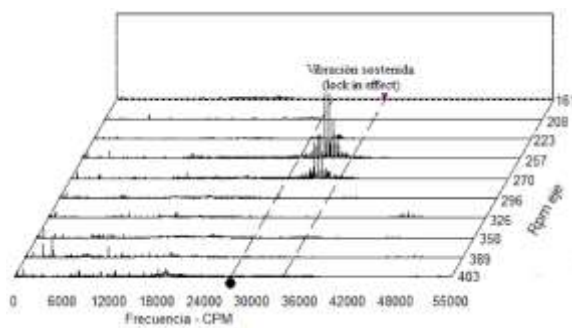


Fig. 8. Efecto de vibración sostenida



Fig. 9. Amplitud de la vibración vs rpm del eje.

La gráfica de la Fig. 8 muestra el comportamiento de la vibración respecto de la amplitud y la velocidad de giro del eje propulsor. Se observa que la condición resonante de la hélice se manifiesta en un rango bien definido de revoluciones. Se evidenció además que, aunque la velocidad de rotación del eje aumente, la frecuencia de resonancia se mantiene, lo cual se conoce como vibración sostenida o “lock-in effect” [2]. La Fig. 9, muestra el incremento de la amplitud de vibración al pasar la zona resonante. La línea naranja muestra su atenuación posterior a la reparación.

En resumen, las pruebas efectuadas evidenciaron que este tipo de fenómeno tiene las siguientes características:

- Frecuencia central de gran amplitud en un rango bien definido de velocidades del eje.
- Disminución de amplitud fuera del rango resonante.

- La frecuencia central no coincide a alguna vibración armónica proveniente de otra fuente del sistema propulsor (engranaje, bombas hidráulicas, soldadura en descansos, etc.).
- Desaparición de la frecuencia resonante al efectuar pruebas dando atrás.
- Se evidencian bandas laterales alrededor de la frecuencia central de vibrar.
- Modulaciones evidenciables en forma de onda de todas las hélices analizadas.
- Expansión de la forma de onda muestra estabilización en periodo de la frecuencia central.

4- DISCUSIÓN

A partir del caso de resonancia en el eje, los resultados obtenidos mediante el análisis espectral, relaciones de amplitud, frecuencia y fase mostraron coincidencia con los síntomas esperados para esta condición [2]. La necesidad de efectuar el registro con diferentes parámetros es conveniente debido a la similitud del problema con otras fallas convencionales, lo cual puede llevar a un diagnóstico erróneo si solo se consideran los síntomas de forma aislada.

Una observación importante se evidenció a partir de la relación L_1/D . De acuerdo con la ecuación $\omega_n = \sqrt{k/m}$, que representa las variables contenidas en la frecuencia natural de un elemento, una disminución en el valor de la rigidez equivalente “ k ” del sistema, que puede lograrse al aumentar la distancia entre apoyos, reduce el valor de su frecuencia natural acercando las velocidades de operación al rango de resonancia. La estimación de la frecuencia fundamental de vibrar del eje obtenida por el software ShaftDesigner indica que el actual sistema propulsor efectivamente se encuentra trabajando en un rango de resonancia.

En síntesis, basado en la geometría de la instalación y los resultados obtenidos, se concluye que la frecuencia natural siempre ha estado en rangos muy cercanos a la frecuencia de rotación; con los años de operación, la mayor rigidez inicial de la estructura y amortiguamiento de sus montajes va



perdiendo la capacidad de controlar la amplitud o mantener el sistema fuera de la zona resonante, afectando su respuesta vibratoria, pudiendo de esta manera explicar el por qué durante su entrega el problema no estaba presente en las embarcaciones con este problema.

Para el caso de resonancia en la hélice, el resultado evidenció, al igual que en el caso anterior, un aumento significativo en los niveles vibratorio en un rango bien definido de operación. La evaluación de las componentes a distintas frecuencias resonantes pudo establecer que las bandas laterales mantienen su relación con los RPM del eje, independiente del modo de vibrar excitado.

Por otro lado, los resultados de la prueba de dar atrás mostro la eliminación de la frecuencia resonante para la misma velocidad de operación de dar avante, permitiendo establecer la influencia en el cambio de las condiciones de entrada y salida del flujo y su incidencia en la generación de los vórtices, siendo una prueba iterativa válida para identificar el fenómeno.

Una comparación con las observaciones efectuadas por Carlton 2019 [1], muestran la coincidencia respecto al rango estimado de aparición del fenómeno, sus modulaciones y la incidencia de los cambios de geometría de la pala (daño) como una de las causas. No obstante, los datos obtenidos en referencia al tipo de buque no coincidirían plenamente con su investigación, debido que el fenómeno fue evidenciado tanto en buques rápidos y como en buques de bajo andar.

Debido a que la hélice del buque en estudio no había presentado este problema en años anteriores, mostraba pérdida de paso y daño en sus bordes y nunca ha sido cambiada, se establece que el parámetro más sensible en la generación de los vórtices corresponde a la geometría de la pala en su borde de salida. Si el perfil del borde cambia a causa de daños, descuido en la reparación o incluso mediante la aplicación de alguna protección polimérica, implica crear las condiciones para que la fuerza periódica generada por los vórtices llegue al punto de excitar una de las frecuencias naturales de las palas y, en consecuencia, entre en resonancia.



Algunas limitaciones para considerar al momento de utilizar la metodología durante las pruebas y análisis:

- El análisis de vibraciones se debe considerar como etapa de identificación de la condición resonante en líneas de eje que permite fijar rangos seguros de operación; las correcciones deben, en lo posible, ser analizadas a través de Software de cálculo e inspecciones.
- Considerar que el equipo analizador de vibraciones permita el análisis de fase relativa y cuente con una cantidad de líneas de resolución en lo posible superior a 1600.
- El alcance del caso 2 del estudio solo incorporó hélice de paso fijo, por lo cual no es posible asegurar obtener igual respuesta para hélices de paso variable o ajustable.

5- CONCLUSIONES

A partir del análisis de los resultados en los casos expuestos, es posible concluir lo siguiente:

- Existe una relación entre la aparición de resonancias en los componentes de sistemas propulsores y los años de operación, influenciados por factores dominantes como son cambios de forma y rigidez respecto a su configuración original.
- Se comprobó que, en ambos casos, la cercanía de una frecuencia de excitación con una de las múltiples frecuencias naturales de un elemento incrementa de manera importante la amplitud de las vibraciones.
- El análisis de la señal vibratoria es una técnica simple y eficaz para identificar resonancias en sistemas propulsores, pudiendo aislar el fenómeno de otras fallas convencionales.
- La importancia de identificar oportunamente si el comportamiento vibratorio corresponde a un estado de resonancia es determinar un plan de reparaciones para un próximo periodo



de dique o varadero, que incluya la revisión de soportes y estructuras e inspecciones en busca grietas producidas por fatiga del material.

Recomendaciones:

- Evitar la exposición prolongada de los componentes del sistema propulsor a los efectos de la resonancia, usualmente mediante el cambio en la velocidad de operación.

Agradecimientos

Genaro Riffo Paz, Ing. Civil Mecánico, revisión del documento.

Franklin J. Dominguez Ruiz, Ph.D. Naval Eng., revisión del documento.

6- REFERENCIAS

- [1] Carlton J.S.; “Marine Propellers and Propulsion”, 4th edition, Elsevier, 2019
- [2] Saavedra P. N.; “Análisis de Vibraciones de Máquinas Categoría III, ISO 18436-2”. Laboratorio de Vibraciones Mecánicas, Universidad de Concepción, Chile. 2012
- [3] Noonan E. F., Antonides G. P. and Wood W. A., “SSC-330: Practical Guide for Shipboard Vibration Control and Attenuation”, Ship Structure Committee, 1990
- [4] Lloyd’s Register 2006 Ship Vibration and Noise Guidance Notes
- [5] ISO 6954 (2000). Mechanical vibration - Guidelines for the measurement, reporting and evaluation of vibration with regard to habitability on passenger and merchant ships
- [6] ISO 10816-3:2009 Mechanical vibration — Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts
- [7] Det Norske Veritas. 2011. Rules for Classification of Ships - Part 6 Chapter 15: Vibration Class
- [8] American Bureau of Shipping 2016 Guide for Enhanced Shaft Alignment