

Las Bombas SW de la C. N. Almaraz: “La Investigación sobre su Estado Vibratorio que ha permitido reducir su “criticidad””. Lecciones Aprendidas.

D. Ángel Benito, D. Domingo Sustacha, Dña. Julia Gomez Parra, D. Antonio Calero, D. Víctor Rojas, D. Ricardo Gonzalez, D. Enrique Delgado´
C.N. Almaraz.
D. Publio Beltrán, D. Oscar Zaba.
TSI-Técnicas y Servicios de Ingeniería, S.L. (tsi@tsisl.es)

Resumen – *Las Bombas SW de Servicios Esenciales de la C. N. Almaraz, desde su puesta en servicio, han venido presentando episodios de niveles de vibración muy aleatorios. Estos niveles de vibración controlados mediante el programa de vigilancia y seguimiento establecidos, se han mantenido, en todo momento, por debajo de los Niveles de Fallo prefijados. Ello ha requerido, en determinados casos, actuaciones mecánicas dirigidas a introducir (dentro de límites) ligeros cambios en la “rigidez dinámica” del conjunto Motor-Bomba.*

Dos eventos consecutivos (Septiembre 2015, y Enero 2016) dieron lugar al establecimiento de un plan de vigilancia y seguimiento del comportamiento vibratorio de todas estas unidades. C.N. Almaraz procedió, además de a una revisión electro-mecánica de todos los motores de accionamiento, a la “monitorización en continuo” de los niveles de vibración en las cinco unidades desde Febrero de 2016 hasta la actualidad.

Durante este periodo, y fundamentalmente en la Unidad SW1-PP01B, independientemente del motor instalado, una vez revisados todos ellos, se han venido observando “excursiones” de los niveles globales de vibración, así como “ciclos o cambios de amplitud” relacionados con los cambios de temperatura día/noche. Este comportamiento condujo a CNA a la apertura de una “investigación especializada” sobre este comportamiento, como fase previa para el establecimiento de un Plan Correctivo Definitivo.

En el presente trabajo se detallan los aspectos técnicos más sobresalientes de esta investigación que ha permitido disponer de un diagnóstico preciso de la problemática de estas unidades que ha facilitado el establecimiento de actuaciones de control y que han hecho que los niveles globales de vibración actuales, en todas ellas, se sitúen en valores de entre 2-4 mm/s (0-p), y por debajo. Asimismo, poder disponer de una Propuesta de Actuaciones para la corrección definitiva de la problemática observada y que ha sido validada experimentalmente.

1. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES



FIGURA 1.- Disposición de Unidades SW en C.N.A.-

de la CNA. La disposición general de estas unidades se ha recogido en la **Figura 1** adjunta.

El grupo de bombeo de Servicios Esenciales (SW) de la Central Nuclear de Almaraz-CNA- está constituido por un conjunto de cinco (5) unidades de disposición vertical constituidas, cada una de ellas, por un Motor Eléctrico y una Bomba vertical sumergida en la cántara, cuya misión operativa es proveer la refrigeración de los Servicios Esenciales de las dos (2) Unidades

Del examen del Histórico de Vibraciones de las mismas se deduce que, concretamente la Unidad SW1-PP-01B, ha venido presentando niveles de vibración inestables, con ciclos evolutivos día/noche así como cierta estacionalidad a lo largo del año. Ello hace que estos niveles de vibración tengan que corregirse, cuando se sitúan por encima del Nivel de Alerta establecido (Según ASME OM CODE 2014: 8,2 mm/s-(0-p), para Motor Cojinete 1-LOA), mediante equilibrados dinámicos, con colocación de masa/s de compensación en el ventilador del motor, así como por medio de la variación del par de apriete de los pernos de la placa base de la bomba.

Asimismo, en el Historial más reciente de la bomba SW1-PP-01B aparecen dos sucesos originadores que se resumen seguidamente:

- El 29/09/2015 se detectaron ruidos anormales en el motor s/n 400472_5-3, que estaba instalado en ese momento en la bomba SW1-PP-01B. Se desmonta y envía a GAMESA para su revisión, y se instala en su lugar el motor 400472_5-5.
- Posteriormente, el 11/01/2016 (R124) se produce una subida de la temperatura del rodamiento inferior del motor de la bomba SW1-PP-01B.

En ese momento se emitieron las condiciones anómalas CA-AL-16/003 y CA-AL2-16/003, y al no poderse determinar la causa origen del fallo del motor s/n 400472_5-5 se impusieron unas medidas compensatorias excepcionales en la condición anómala y se inició un Plan de Investigación sobre el origen del fallo del citado motor. A raíz de estos incidentes C.N.A establece un Plan de Vigilancia que se materializa en la instalación provisional de un Sistema de Monitorización en Continuo de las vibraciones en todas las unidades SW, y en el establecimiento de un Plan o Programa de Vigilancia y Seguimiento exhaustivo del parámetro vibraciones.

En paralelo, se desarrolla una Investigación Detallada sobre estas unidades que permita, en primer lugar, conocer y entender el comportamiento dinámico de las mismas, en particular de la Unidad SW1-PP-01B, para seguidamente definir y aplicar las Modificaciones de Diseño que se estimen oportunas.

En el presente trabajo se resumen las diferentes Fases o Etapas de la Investigación Detallada llevada a cabo, así como las diferentes actuaciones y/o Modificaciones de Diseño aplicadas.

2. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LAS BOMBAS

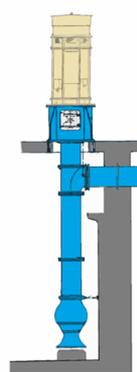
Las unidades SW están constituidas, cada una de ellas, por una bomba vertical de pozo profundo con una sola etapa accionada por un motor eléctrico de doble envuelta. Las características principales de la bomba y su motor se muestran en la **Figura 2** adjunta.

3. DESCRIPCIÓN DE LA “INVESTIGACIÓN DETALLADA”

Esta investigación se inicia con la evaluación de los Gráficos de Tendencia de los Niveles de Vibración de las diferentes unidades, y en particular de la unidad SW1-PP01B con el Motor 400472_5_3.

3.1 Metodología de análisis empleado

En base a experiencias previas, el método de análisis para la identificación de la causa raíz del comportamiento vibratorio de estas unidades se basa en el establecimiento de una serie de hipótesis plausibles y sus validación o descarte mediante datos experimentales, registros y/o observaciones que permitan su aceptación o rechazo, respectivamente. Este método permitirá,



CARACTERÍSTICAS DEL MOTOR

- Fabricante BBC
- Modelo QRV630IA6
- Potencia 660kW
- Tensión/frecuencia 6kV / 50Hz
- Velocidad Nominal 992 r.p.m.
- No. Pares de polos 3

CARACTERÍSTICAS DE LA BOMBA

- Fabricante KSB
- Modelo SEZ 600-720
- Velocidad Nominal 992 r.p.m.
- Nº. Palas 5

FIGURA 2.- Características de las Bombas SW.-

asimismo, responder a los dos objetivos básicos que se han fijado durante el desarrollo de este trabajo.

- **Objetivo 1:** Identificar una “solución paliativa” provisional que permita controlar la situación actual de inestabilidad de niveles de vibración en la unidad SW1-PP01B, independientemente del Motor que se instale en la misma.
- **Objetivo 2:** Disponer de un Diagnóstico preciso que permita aplicar la “solución definitiva y estable” al problema que nos ocupa.

El establecimiento de las diferentes hipótesis de trabajo, durante el desarrollo de la investigación, ha sido el resultado de las contribuciones de los departamentos involucrados: Ingeniería y Resultados-IR, Ingeniería de Planta-TJ, Operación-O2 y Mantenimiento Mecánico-MM, en base a su experiencia operativa directa y sus observaciones.

3.2 **FASE 1. Primera evaluación de Histórico y datos disponibles (29 de marzo a 18 de abril 2016)**

En esta **Fase 1** de la Investigación se procedió al establecimiento de unas primeras hipótesis que, en base a los históricos de vibraciones obtenidos por medio del Sistema de Monitorización en continuo instalado en las diferentes unidades, permitiesen una aproximación al comportamiento vibratorio observado. En los siguientes apartados se resumen los diferentes aspectos de esta fase 1 de la investigación.

- En el año 2008 se realizaron Ensayos de Análisis Modal en todas las Bombas SW comprobándose que la Primera Frecuencia Propia del Conjunto Motor-Bomba se sitúa en torno a la excitación 1xRPM del Desequilibrio Dinámico que se localiza en **16,6 Hz**.
- El estado vibratorio global está condicionado fundamentalmente por la componente 1xRPM, asociada con el desequilibrio dinámico de la unidad.

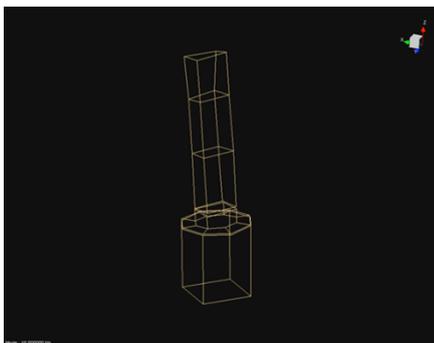


FIGURA 3.- Unidad SW1-PP-01B. ODS a 16,66 Hz.

De acuerdo con el Plan de Actuaciones propuesto se realizó un ensayo detallado de Modos de Vibración en Operación (ODS) en la Unidad SW1-PP01B con el Motor 400472_5_5. En la **Figura 3** adjunta se recoge el modo de vibración correspondiente a la frecuencia de excitación 1xRPM (16,66 Hz) del desequilibrio dinámico. Del examen de la **Figura 3** se destacan las siguientes observaciones

- No se han observado "debilidades" en la brida de unión Motor-Linterna.
- Se confirma que todas las unidades con la EXCEPCIÓN de la SW1-PP01A, están operando en RESONANCIA o próxima a ella.

• A pesar de ello, los Niveles Globales de Vibración en operación se han mantenido dentro de valores ACEPTABLES según ASME y diferentes Normativas.

Un análisis detallado del espectro en frecuencia en el entorno de la frecuencia del desequilibrio dinámico, permitió constatar la existencia de Bandas Laterales separas 0,6 Hz, frecuencia que se corresponde con la de paso de polo del motor eléctrico (400.472_5_3), que actualmente estaba montado en esta unidad. Se ha evidenciado que la primera frecuencia propia del conjunto motor-bomba se localizaba en el rango de frecuencias excitadoras, desequilibrio 1xRPM, y las bandas laterales a +/- 0,6 Hz.

Como primeras recomendaciones se decide:

- Realizar un Modelo de Elementos Finitos, que permita, disponer de una Solución de Mejora del Diseño Dinámico, así como evaluar la sensibilidad de los tirantes de la Bomba a la Cantara.
- La Solución de Ingeniería, su ejecución y validación deberían dejarse PENDIENTES hasta que se disponga de un DIAGNÓSTICO preciso de los incidentes.
- Revisión completa de los motores.

3.3 FASE 2. Análisis de los datos y medidas complementarias en las unidades SW's.

En base al análisis de los nuevos datos experimentales obtenidos, se decidió emprender una FASE 2 que abordó las actuaciones que se detallan.

En la **Figura 4** adjunta se recogen el esquema general de la Metodología empleada, así como el “balance de situación” una vez completadas las actividades que se engloban dentro de las Fases Experimentales 1 y 2, ya completadas.

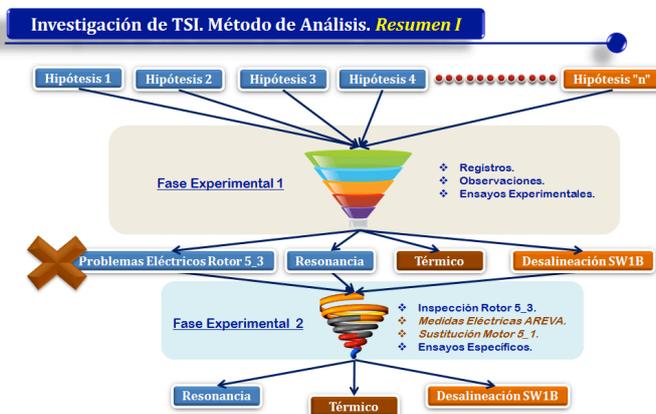


Figura 4. Balance de Situación: Hipótesis pendientes sobre el estado vibratorio de Unidades SW's.-

- **Desalineación de la Unidad SW1-PP-01B como consecuencia de la deformación de su silleta o de su placa base.**

La “resonancia” como causa raíz del comportamiento vibratorio de la unidad SW1-PP-01B

La valoración/validación de la Hipótesis de Resonancia como causa “única” del Comportamiento Vibratorio de la Unidad SW1-PP-01B tras el cambio de motor, se ha resumido en la **Figura 5**, adjunta.

Como se puede ver por la misma, la existencia de un “fenómeno de resonancia”, como “causa raíz única” del comportamiento vibratorio observado en la Unidad SW1-PP01B, NO PERMITE explicar las “excursiones” que se vienen observando en el comportamiento vibratorio. Así, y en función de la mayor o menor severidad de esta resonancia condicionada por los dos aspectos siguientes: mayor o menor desequilibrio residual de los motores y de la mayor o menor proximidad entre las excitaciones identificadas, tanto la mecánica (1xRPM) como las eléctricas, darían lugar a mayores o menores niveles de vibración pero siempre “estables”.

Como se puede comprobar del examen de la referida **Figura 4**, los “Problemas Eléctricos en el Motor 400.472_5_3” han quedado experimentalmente descartado en base a las actuaciones llevadas a cabo durante la Fase Experimental 2. De acuerdo con ello, quedan como “Hipótesis pendientes” de validar, como posible/s causa/s del comportamiento vibratorio de la Unidades SW's, las siguientes:

- **Resonancia.**
- **“Térmico” en los diferentes motores eléctricos.**

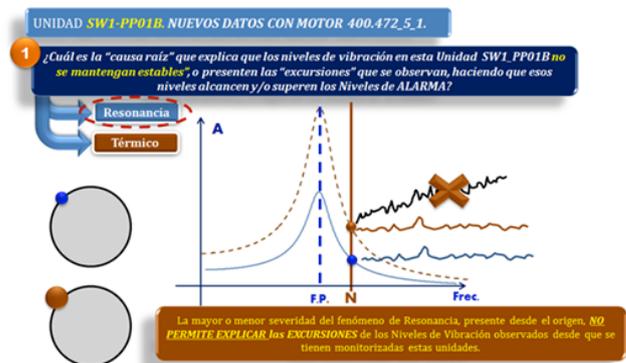
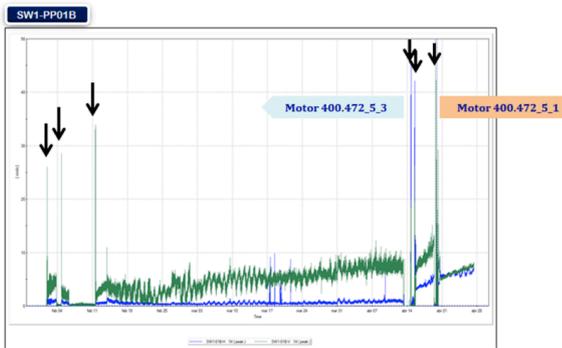


FIGURA 5.- Hipótesis de RESONANCIA.-

En consecuencia, los análisis siguientes se han centrado en evaluar/validar la “Hipótesis del Térmico” como posible causa que contribuye al comportamiento vibratorio observado, según se desarrolla en los siguientes apartados.

Análisis del térmico: unidad SW1-PP-01B. Correlación temperaturas / vibraciones.

El examen de diferentes registros correspondientes a transitorios de arranque de las diferentes



unidades, tras la instalación del Sistema de Monitorización, h evidenciado al existencia de fenómenos térmicos que condicionan, en mayor o menor medida el estado vibratorio de las diferentes unidades en los instantes posteriores a este proceso. En la **Figura 6** adjunta se detallan (flechas) dichos transitorios en la unidad SW1-PP-01B.

En base a los datos obtenidos por Ingeniería y Resultados-IR e Ingeniería de Planta-TJ, sobre temperaturas de devanados, rodamientos, ambiente, junto con los datos de vibraciones aportados por el Sistema, se han podido correlacionar estas dos

FIGURA 6.- Análisis de Térmico en Unidad SW1-PP-01B.- variables: Temperatura/Vibraciones. En la **Figura 7** se recoge la evolución de ambas variables.

A la vista de estos datos:
A) Se confirma una relación directa entre la tendencia del cambio de la Temperatura Ambiente y los Niveles de Vibración; **B)** Los cambios Día/ Noche, ya identificados constituye una segunda confirmación de este comportamiento térmico de estas unidades.

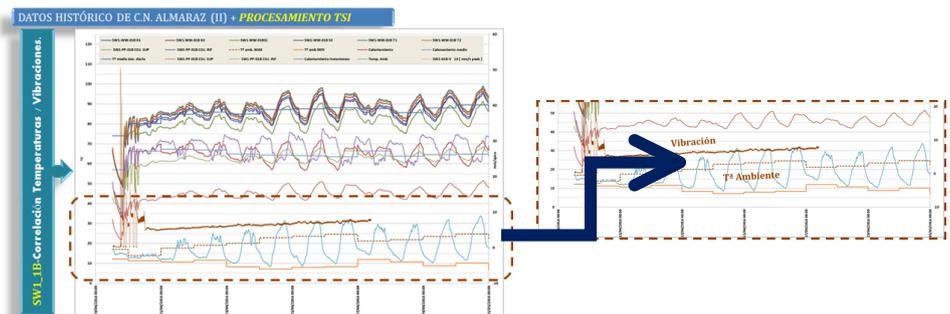


FIGURA 7.- Unidad SW1-PP-01B. Correlación Temperaturas /Vibraciones. Detalle.-

En base a estos resultados, se decidió la realización de medidas mediante cámara termográfica que permitiese identificar posibles “puntos calientes” en los motores de las unidades. Estas medidas, como consecuencia del tipo constructivo de estos motores (doble envolvente), no han permitido determinar la existencia de puntos calientes localizados en el rotor.

Asimismo, y mediante las medidas de Amplitud/Fase, una vez que se incorporó un captador del fase al Sistema de Monitorización, se pudo identificar la existencia de un “vector térmico” que condiciona el comportamiento vibratorio de esta unidad durante los transitorios de arranque.

3.4 FASE 3. Ensayos Complementarios

Los ensayos experimentales desarrollados durante esta última fase de la Investigación han ido dirigidos, fundamentalmente, a los siguientes Objetivos: **a)** Equilibrado “fino”, **b)** Monitorización complementaria para conocer el comportamiento/influencia de la Placa Base de la Unidad SW1-PP-01B.

A la vista de estos primeros resultados se confirmó que la placa base experimentaba deformaciones cíclicas con la temperatura Día /Noche, que pueden afectar el apriete de pernos y, en

consecuencia, a la Frecuencia Propia del conjunto.

Para poder evaluar y confirmar el "desplazamiento de la Frecuencia Propia", se realizó un análisis en banda estrecha de las frecuencias: $1xRPM-0,6$ Hz, $1xRPM$, y $1xRPM + 0,6$ Hz. Es decir de la frecuencia de excitación mecánica debida al desequilibrio dinámico y de las dos bandas laterales correspondientes a las excitaciones de origen eléctrico de estos motores. Una muestra de los resultados obtenidos para la Unidad SW1-PP-01B se ha recogido en la **Figura 7** adjunta.

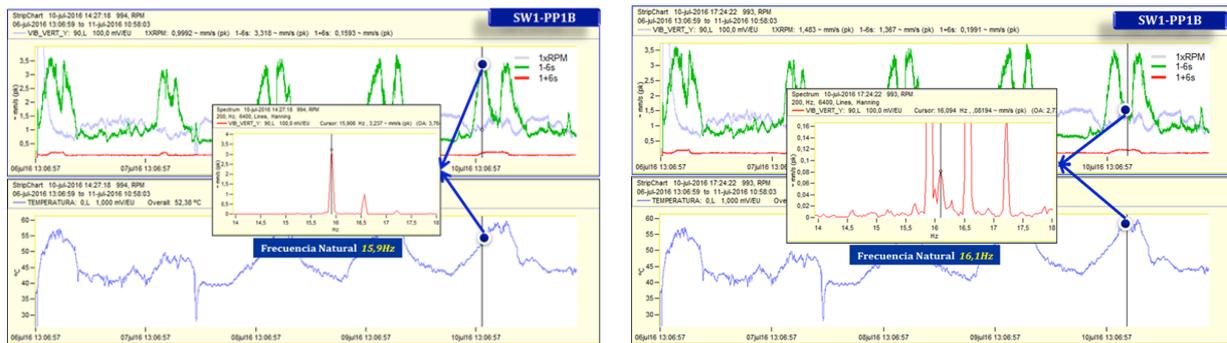


FIGURA 7.- "Desplazamiento de la Frecuencia Natural" de la Unidad SW1-PP-01B.-

4. CONCLUSIONES FINALES DE LA INVESTIGACIÓN Y PLAN DE ACTUACIONES

En base a los diferentes ensayos y análisis realizados durante las diferentes Fases de la Investigación dedicada a la Unidades SW's de la C.N. Almaraz, y en particular para la unidad SW1-PP-01B, se destacan las siguientes Conclusiones Finales:

- ❖ En la unidad SW1-PP-01B la primera frecuencia propia del conjunto motor-bomba se sitúa, dependiendo del grado de afloje y/o apriete de los pernos de anclaje, en las proximidades del rango de las frecuencias excitadoras de $1xRPM-0,6$ Hz a $1xRPM+0,6$ Hz.
- ❖ En la localización de esta frecuencia propia y su "desplazamiento" por efecto de los térmicos Día/Noche en la placa base y, en consecuencia, en el apriete de los pernos de anclaje, se encuentra la **"causa raíz" de las EXCURSIONES** de los Niveles de Vibración que se observan, más acusadamente en la Unidad SW1-PP01B.
- ❖ Para el resto de las unidades SW, con la excepción de la ya mencionada SW1-PP-01B, las respectivas localizaciones de sus frecuencias propias, más alejadas del rango de excitaciones mencionado, junto con la menor influencia de los térmicos Día/Niche en sus respectivas placas base, hace que todas ellas presenten Estados Vibratorios con calificación ACEPTABLE según las Normativas y Regulaciones aplicables.

Complementariamente a las Recomendaciones Parciales durante el desarrollo de la Investigación dirigidas a mantener la seguridad operativa de las unidades, en los siguientes puntos se resumen las Recomendaciones Finales de esta Investigación Detallada.

- Eliminar definitivamente y de forma estable, mediante las Propuestas de Modificaciones Estructurales (Parte I) presentadas por TSI, el Fenómeno de Resonancia y la mejora de la Placa Base.
- Realizar Ensayos Experimentales de Validación y "estabilidad" de la solución estructural adoptada.

4.1 Descripción de la solución planteada: Modificación de Diseño

La reducción del riesgo de resonancia de la bomba se basa en el incremento de la rigidez radial de la misma por encima de la cimentación. El incremento se hace necesario fundamentalmente en la dirección denominada como vertical por CNA (dirección radial de la bomba perpendicular a la descarga).

Tras diferentes análisis previos esta rigidización se decidió el arriostramiento de la bomba a la altura de la linterna. Con este planteamiento se acuerda una solución como la que se recoge en la **Figura 8**.



a) Reforzado de Linterna SW1-PP-01B.-



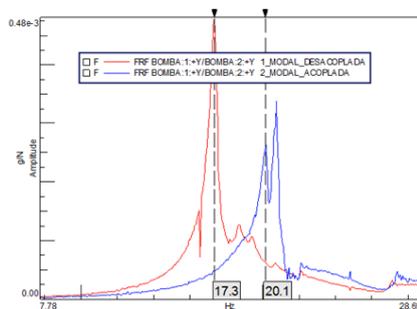
b) Reforzado de Placa Base.-

FIGURA 8.- Modificación de Diseño Unidad SW1-PP-01B.-

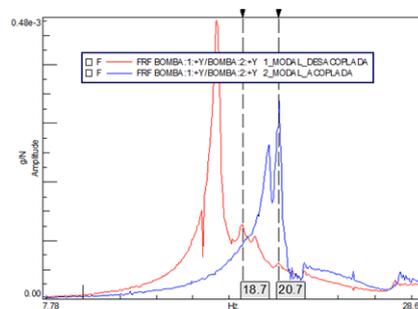
4.2 Ensayos de validación de la modificación de diseño.

Los Ensayos de Validación de la Modificación de Diseño adoptada consistieron en la realización de sendos Ensayos de Análisis Modal con la bomba sin y con el reforzado de la linterna seguido de un registro de vibraciones durante el arranque de la unidad.

En la **Figura 9** se recogen los resultados de estos análisis dinámico en ambas direcciones: Vertical (perpendicular a la descarga) y Horizontal (de la descarga de la bomba). Como puede verse por las mismas, las nuevas frecuencias propias del conjunto motor-bomba se localizan en 20,1 Hz y 20,7 Hz, para ambas direcciones respectivamente. Es decir con márgenes de separación del **16,8%** y **20,3%**, respecto al rango de las frecuencias excitadoras tanto de origen mecánico como eléctrico.



a) Frecuencia Propia dirección V



b) Frecuencia Propia dirección H

FIGURA 9.- Nuevas Frecuencias Propias de la Unidad SW1-PP-01B, después de la MD.-

Seguidamente y según el programa previsto se procedió a registrar los niveles de vibración en ambas direcciones durante el proceso de arranque y estabilización de la unidad. Los resultados correspondientes se recogen en la **Figura 10**.

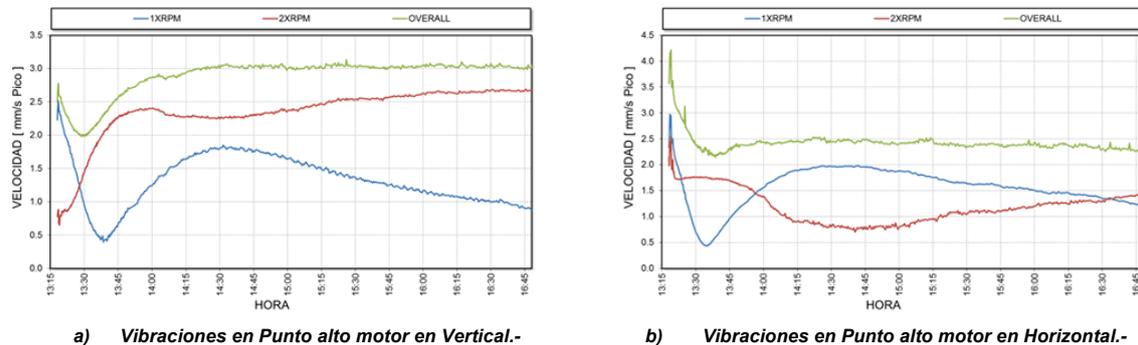


FIGURA 10.- Niveles de Vibración en la Unidad SW1-PP-01B, después de la MD.-

4.3 Valoración Final de Resultados.

En base a los resultados obtenidos se pueden establecer las siguientes CONCLUSIONES FINALES:

- ❖ El reforzado de la linterna de la bomba SW1-PP-01B, mediante la Modificación de Diseño aplicada a la misma, puede ser considerado **EFICAZ** y **ESTABLE** para la solución de la problemática vibratoria que ha venido aconteciendo históricamente a esta Unidad de la C.N.A.
- ❖ La frecuencia natural de la bomba en la dirección vertical (perpendicular a la descarga) se ha incrementado un **16%**, aumentando así el margen de seguridad frente a la resonancia.
- ❖ La principal prueba de la eficacia de la solución son los niveles de vibración obtenidos en el arranque desde frío del motor. Ha desaparecido el pico de vibraciones en el arranque, no ha sido necesario equilibrar el motor y los niveles de vibración tras el calentamiento son significativamente bajos (menores a 1mm/s-0-Pico @ 1xRPM).
- ❖ Con la excepción de la Unidad SW1-PP-01B, objeto de la investigación, el resto de las Unidades SW, debido a la localización de sus respectivas primeras frecuencias propias, presentan un Estado Vibratorio con Calificación ACEPTABLE.

5. LECCIONES APRENDIDAS

A juicio de los Autores la Metodología de Análisis seguida en esta investigación, mediante la combinación de observaciones operativas y ensayos especializados, constituye una herramienta eficaz en el Diagnostico y Solución de este tipo de averías.

AGRADECIMIENTOS.

Los Autores quieren agradecer a C.N. Almaraz y TSI las aportaciones de todos los departamentos y personas implicadas en el desarrollo de esta investigación. Sin su buen hacer y estas aportaciones, este trabajo no hubiera sido posible.

REFERENCIAS.

No aplican