



Estudio dinámico de un agitador de la estación depuradora de aguas residuales de Galindo

Charles Pinto¹, Iker Castellano¹, Javier Corral¹, Natalia Alegría², Igor Peñalva²

¹ Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad del País Vasco (UPV/EHU),
charles.pinto@ehu.eus, icastellano003@ikasle.ehu.eus, j.corral@ehu.eus

² Departamento de Ingeniería Energética, Universidad del País Vasco (UPV/EHU),
natalia.alegria@ehu.eus, igor.penalva@ehu.eus

El presente trabajo presenta un análisis detallado de los fallos detectados en la estructura que soporta un agitador de la zona anóxica de la Estación Depuradora de Aguas Residuales (EDAR) de Galindo (Sestao, Vizcaya). Dichos fallos generan una parada del proceso de depuración con el vaciado de las balsas, con los derivados problemas tanto técnicos como económicos.

Mediante simulaciones por elementos finitos, se identifica que la causa principal es una amplificación dinámica de fuerzas generadas desde el agitador, lo cual lleva a un fallo a fatiga en los tirantes de la estructura. A pesar de no poder identificar el origen de esta fuerza, la vibración problemática tiene una frecuencia igual a la velocidad de rotación del agitador por el número de palas. Estas dos afirmaciones se validan mediante un ensayo experimental en condiciones operativas llevadas a cabo en la propia EDAR.

Tras la fase de validación del fenómeno, se propone un rediseño centrado en la configuración de los tirantes para reducir la sensibilidad en las frecuencias de trabajo y mejorar el comportamiento de la estructura en su conjunto.

Los resultados planteados permiten reducir las cargas transmitidas a los soportes del agitador, aumentando la vida útil del sistema. Y finalmente, se procede a instrumentalizar el conjunto para la obtención de datos característicos en funcionamiento, con objeto de la implementación de un control preventivo frente a posibles fallos.

1. Introducción

Los gestores del agua tienen como función principal la prestación de los servicios de Abastecimiento de Agua y Saneamiento en los municipios que gestionan asegurando el ciclo del agua urbana, la calidad del servicio y la regulación tarifaria asociada a dichos servicios.

En Bizkaia, el Consorcio de Aguas Bilbao-Bizkaia (CABB) tiene las competencias de gestión integral del agua de todos los municipios consorciados. En la Figura 1 se muestra el mapa con los 97 municipios que componen el consorcio a los que abastece de agua potable y sanea las aguas residuales para un total de alrededor de un millón de ciudadanos [1]. Las aguas residuales recogidas llegan a las Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales (EDAR) para su tratamiento. El CABB gestiona 32 plantas depuradoras; y trata en ellas cerca de 120 millones de metros cúbicos de aguas residuales al año. El objetivo principal es retirar las sustancias contaminantes y nocivas del agua, y devolver ésta al medio garantizando el sostenimiento de los ecosistemas en buenas condiciones y según las reglamentaciones en vigor para el cumplimiento de las normas de calidad de los efluentes.



Figura 1: Mapa de los municipios que integran el CABB.

En una EDAR, la mezcla es una de las partes más críticas del tratamiento de aguas residuales, siendo el sistema de mezcla utilizado complejo y cuyo diseño varía en función de variables asociadas al tamaño de las balsas y capacidad de depuración de la planta. En la Figura 2, se muestra una vista general de la planta de tratamiento de la EDAR de Galindo, de Sestao en Bizkaia.

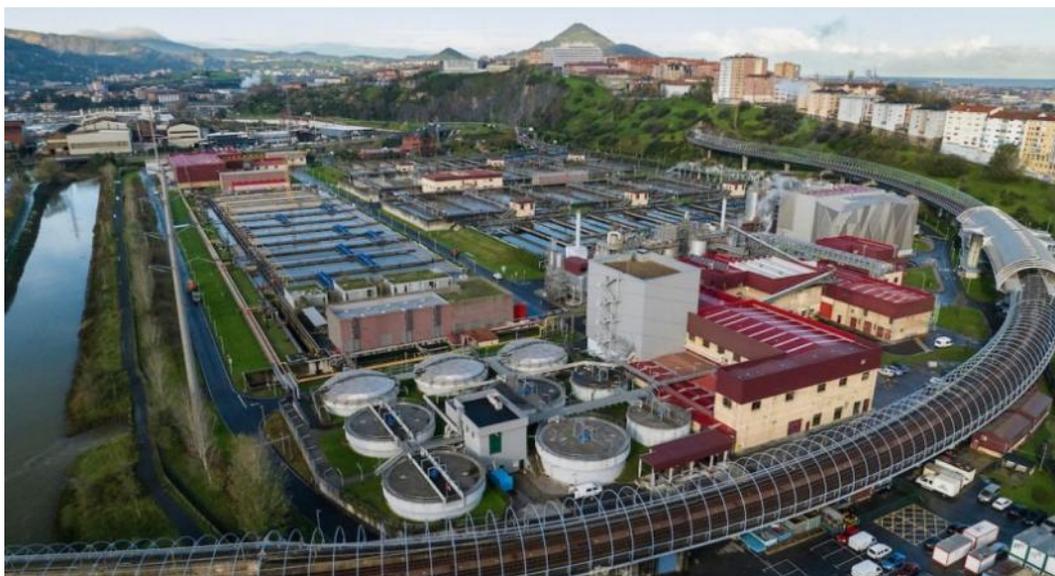


Figura 2: EDAR de Galindo.

La depuración biológica por fangos activos o lodos activados es un proceso convencional que consiste en el desarrollo de un cultivo bacteriano disperso en forma de flóculo en un depósito agitado, aireado y alimentado con el agua residual, que es capaz de metabolizar o digerir como nutrientes los contaminantes biológicos presentes en esa agua. En dicho proceso, la agitación evita sedimentos y homogeneiza la mezcla de los cuerpos bacterianos con el agua residual. Para conseguir esta circulación del fluido en las balsas se instalan agitadores sumergibles cuyo tamaño es proporcional al volumen desplazado. Dichos mecanismos suelen estar anclados en unas bases metálicas a la solera de la balsa y se izan al exterior mediante sistemas manuales, hidráulicos o eléctricos en las fases de vaciado, limpieza, mantenimiento de los tanques. Sin embargo, existe otro caso de desmontaje del agitador, cuando este se avería. En la Figura 3, se muestra una vista aérea de las balsas de la EDAR de Galindo.



Figura 3: Balsas de tratamiento biológico y detalle de una balsa vacía.

2. Contexto

Uno de los principales objetivos de la mezcla en una EDAR es mezclar las aguas residuales y evitar la sedimentación de sólidos. A medida que el agua residual circula por la planta de tratamiento, los mezcladores garantizan que el agua residual tenga una composición consistente y uniforme. La uniformidad de las aguas residuales aumenta la eficacia de los procesos de tratamiento, como la eliminación biológica de nutrientes y la floculación.

Las EDARs utilizan mezcladores para crear las condiciones óptimas para la eliminación de nutrientes, lo que implica el uso de bacterias para consumir nitrógeno y fósforo. Es importante eliminar estos nutrientes porque, si están presentes en el efluente de las aguas residuales, pueden afectar negativamente a la calidad del agua y a los ecosistemas. Sin mezcla, las bacterias se depositan en el tanque, limitando su capacidad de consumir nitrógeno y fósforo. La mezcla mantiene las bacterias y los nutrientes en movimiento para aumentar su interacción.

Habitualmente, las EDARs disponen de varios tipos de agitadores entre los que elegir, como agitadores de entrada superior y agitadores sumergibles, tal y como se muestra en la Figura 4. El tipo de agitador que se seleccione puede depender de la fase de tratamiento, del tipo de fluido que se vaya a mezclar y de los objetivos del proceso de mezcla. A la hora de seleccionar un agitador, es fundamental valorar la obtención de resultados óptimos junto a consumo mínimo de energía.



Figura 4: Agitadores vertical y sumergible.

Los mezcladores de entrada superior se introducen directamente en el depósito como un ventilador de techo invertido, dirigiendo la energía hacia el fondo del depósito y alrededor de sus laterales. Por otro lado, los agitadores sumergibles se montan en el lateral del depósito. Estos agitadores impulsan un flujo a granel en forma de bucle alrededor del depósito, que puede mantenerse con menos energía a medida que el flujo alcanza el círculo completo.

Los agitadores sumergibles pueden ofrecer resultados óptimos con menos consumo de energía que un agitador de entrada superior.

En el pasado, muchas EDARs seleccionaban mezcladores sobredimensionados para garantizar una mezcla óptima independientemente de las variaciones de caudal. Los mezcladores excesivamente grandes pueden provocar un consumo innecesario de energía durante los periodos de bajo caudal, ya que suelen estar configurados para funcionar a velocidad constante. Los mezcladores demasiado grandes también pueden provocar una mezcla superficial no deseada y tener efectos adversos en la estabilidad mecánica de los equipos instalados.

La posición y orientación de un mezclador en un tanque de tratamiento de aguas residuales son fundamentales para maximizar el rendimiento. La posición del mezclador debe basarse en las tareas de mezcla, la disposición del depósito, el empuje del mezclador y las propiedades del fluido. Un agitador sumergible, por ejemplo, debe colocarse de modo que su flujo se desvíe suavemente de las paredes para crear un patrón en forma de bucle. Si el agitador no se coloca correctamente, se crearán zonas tranquilas en el tanque donde no se producirá la mezcla.

Dado que las condiciones de las aguas residuales en las EDARs cambian constantemente, es necesario supervisar continuamente los mezcladores para garantizar un rendimiento óptimo. Los operarios deben controlar parámetros como la velocidad, el consumo de energía y el caudal de las mezcladoras, así como otros fenómenos que puedan perjudicar el correcto funcionamiento del dispositivo. Este proceso puede llevar mucho tiempo, por lo que las plantas de tratamiento de aguas residuales recurren cada vez más a sistemas automatizados de supervisión y control.

3. Descripción del problema

En el caso analizado de los agitadores sumergibles, la estructura tiene dos funciones principales:

- La primera es la de mantener el agitador en la posición y ángulo adecuados soportando las cargas en funcionamiento.
- La segunda es la de guiar al agitador hasta el fondo de la balsa durante el montaje.

En nuestro caso de estudio, como se observa en la Figura 5, el agitador se sitúa a 1.9 m del suelo, 1.45 m de la pared y rotado sobre su eje vertical de manera que el eje de giro esté a 15° del plano de la pared. Toda la estructura está fabricada de acero inoxidable SS316, que tiene una tensión de fluencia de 200 MPa y de rotura de 520 MPa.

El elemento principal de la balsa es la columna o mástil de 10.9 m de sección cuadrada 100x100x5 (mm). La columna forma un trípode en la zona inferior y se ancla a una bancada en el suelo.

A lo largo de su altura existe una serie de tirantes que lo unen a la pared. En la parte superior tiene un último anclaje con la solera del borde de la balsa. Las dimensiones, cantidad y geometría de los elementos han ido variando a lo largo de los años. La evolución del diseño se debe a los cambios que ha ido introduciendo el equipo de mantenimiento con el objetivo de evitar fallos, como puede observarse en la Figura 6.

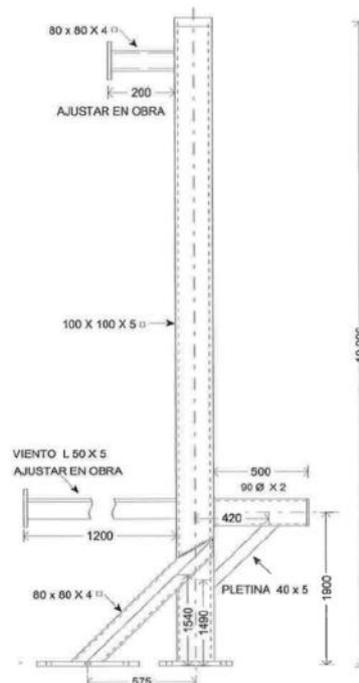


Figura 5: Plano de la estructura original del agitador

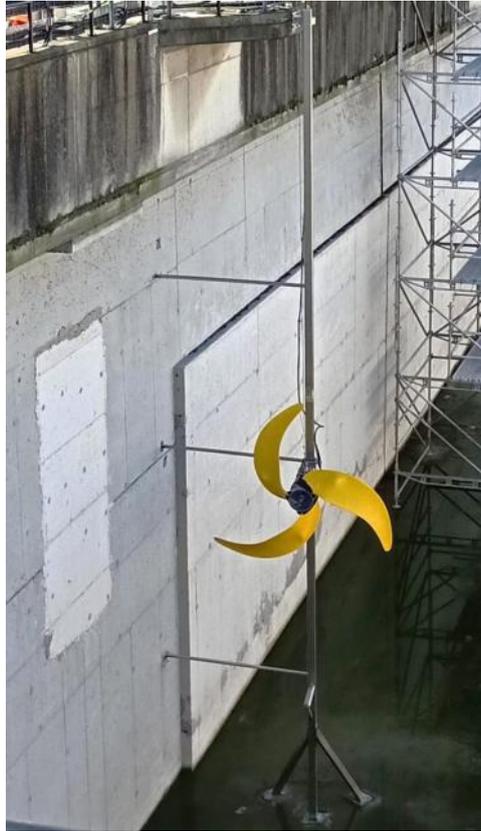


Figura 6: Estructura actual durante la instalación de un agitador

El agitador se une a la estructura mediante un soporte que hace las veces de carro en la instalación. Desde el extremo superior de la columna se descuelga con una grúa el subconjunto del agitador y su soporte. La columna queda encajada en un carril formado por tres paredes con una junta de plástico y las cuatro ruedas que se pueden ver en la Figura 7.



Figura 7: Detalle del posicionamiento del agitador

Por requisitos de mantenimiento el agitador debe poder subir y bajar con la piscina llena únicamente mediante el uso de la grúa, por lo que los tirantes de la columna solo pueden ocupar el espacio libre entre las dos ruedas.

Cuando el agitador está en el fondo, su peso se apoya sobre una viga cilíndrica perpendicular a la columna. Esta viga tiene una escuadra hasta la columna para rigidizarla. El empuje y la torsión de las palas se transmite con el soporte hasta la columna directamente.

No existe un registro de los fallos en la estructura, por lo que no se conoce la frecuencia de cada tipo. Sin embargo, los fallos observados son:

- Rotura de los tirantes cerca de su unión a la columna.
- Fallo de las uniones atornilladas a la pared.
- Rotura de la columna en su zona central.

La muy alta turbidez del agua implica que, si ocurre un fallo no catastrófico, el agitador seguirá funcionando con normalidad. Es posible que algunos de los fallos sean consecuencia de otros.

En trabajos previos [3] se ha descartado que la estructura falle por las cargas estáticas o que exista alguna excitación cercana a las frecuencias naturales de la estructura. No se han podido dimensionar cargas armónicas que indiquen un posible fallo a fatiga. Por ello el problema persiste, ya sea con la identificación de una nueva hipótesis de carga o un fenómeno que provoque el fallo.

4. Análisis y propuesta de alternativas

El objetivo principal de este trabajo es entender en profundidad el problema identificado y desarrollar una solución viable. Este trabajo se centra en resolver un problema que no tiene un enunciado claro o una causa obvia; por lo tanto, el primer paso es lograr comprender con detalle el fenómeno que está ocurriendo, con el fin de identificar las causas de los recurrentes fallos que se han observado. Para ello se examinarán las condiciones operativas actuales del agitador y su impacto en la estructura. Se utilizarán técnicas de análisis cualitativo y cuantitativo para identificar las causas, evaluando las fuerzas dinámicas generadas por el agitador y su posible amplificación en la estructura. Para mayor precisión de la información, se han llevado a cabo inspecciones visuales y mediciones in situ.

Con las conclusiones obtenidas del análisis se procederá a desarrollar un plan de rediseño que contemple soluciones aplicables y en la medida posible simples. La solución propuesta será evaluada en términos de viabilidad técnica y económica.

El alcance de este trabajo incluye la elaboración de una propuesta de solución lista para ser implementada. Sin embargo, la implementación física y ejecución final de las soluciones recomendadas sería labor del CABB. El estudio se centrará exclusivamente en la estructura que soporta el agitador de la zona anóxica de la EDAR de Galindo. Mientras que la metodología puede ser de utilidad genérica en casos similares, la solución será dirigida a este caso específico.

Con el fin de analizar el comportamiento dinámico del sistema, en la Tabla 1, se muestran el rango de frecuencias de funcionamiento de los distintos elementos giratorios del sistema.

Tabla 1: Frecuencias de giro de los distintos componentes del sistema.

	Frecuencia min. (Hz)	Frecuencia max. (Hz)
Hélice	0.5	0.68
Palas	1.36	1.5
Reductora	77.8	90
Motor	20.25	23.42

4.1. Análisis MEF

Las frecuencias naturales "en mojado" o "wet natural frequencies" se refieren a las frecuencias a las que una estructura tiende a vibrar mientras esta se encuentra sumergida en un fluido líquido, en este caso, agua. Este concepto es muy importante en sectores de la ingeniería marítima estructural, con aplicaciones como las hélices de un barco y estructuras en el mar (offshore) [6].

Partiendo de la base, las frecuencias naturales de una estructura son las frecuencias a las que esta es propensa a vibrar cuando es perturbada. En un entorno en vacío, estas frecuencias dependen únicamente de propiedades físicas de la estructura, concretamente su masa y rigidez.

Sin embargo, cuando una estructura está sumergida en un fluido, las propiedades dinámicas cambian debido a la interacción entre la estructura y el fluido que la rodee. Cuando la estructura vibra estando en contacto con un fluido, el fluido ejerce fuerzas adicionales sobre la estructura. Mientras que las fuerzas que un fluido gaseoso como el aire pueda ejercer son despreciables, las de un fluido líquido como el agua no lo son. De esta manera es necesario hacer referencia a la masa efectiva, que tiene en cuenta la matriz de masa del sistema mecánico junto a la masa añadida, que contempla la masa del fluido desplazado.

Una vez modelizado el sistema, con el Software ANSYS ® se muestra los detalles del modelo en la Figura 8, junto a detalle en la zona del agitador y apoyo inferior.

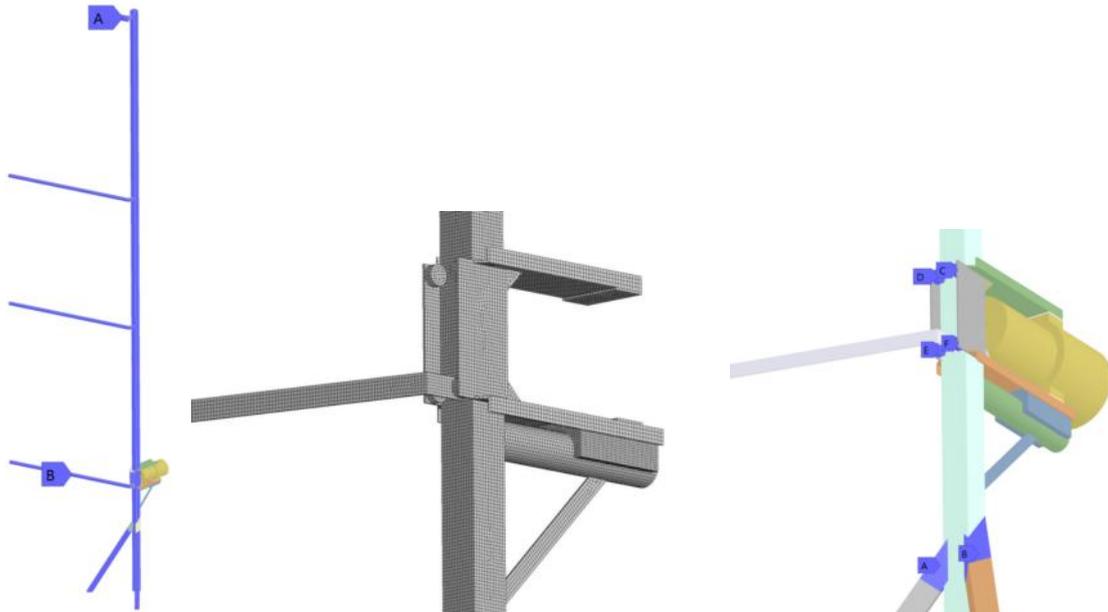


Figura 8: Modelo MEF del sistema estructura-agitador y detalle del soporte inferior: malla con 121266 elementos y 280991 nodos

En la Tabla 2, se indican las 7 primeras frecuencias naturales del modelo MEF anterior, junto a una descripción del tipo de deformada. En la Figura 9, se representan los cuatro primeros modos calculados por el MEF.

Tabla 2: Frecuencias naturales “en mojado” de la estructura original.

	frecuencia (Hz)	Descripción modo
Modo 1	3.55	Flexión simple
Modo 2	6.36	Torsión
Modo 3	7.33	Flexión doble
Modo 4	13.25	Local tirante
Modo 5	13.70	Local tirante
Modo 6	14.67	Local tirante
Modo 7	15.46	Local tirante

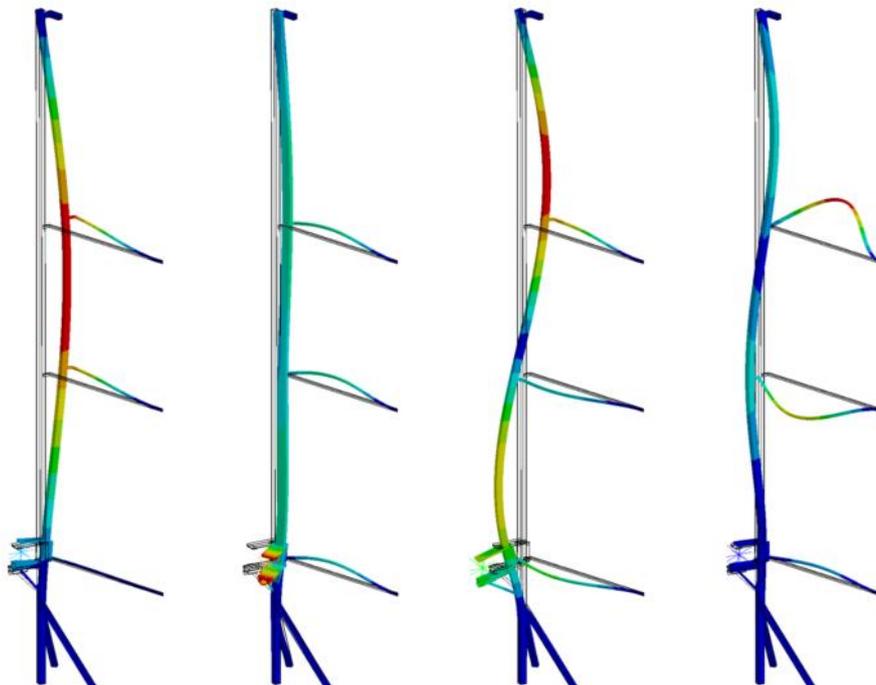


Figura 9: Modos 1, 2, 3 y 4 (de izquierda a derecha) de la estructura original

4.2. Análisis de la respuesta armónica

Para considerar la respuesta de todos los elementos de la estructura, se han tomado las tensiones en los ejes X, Y y Z en los tirantes y la columna para cada frecuencia de giro. Se muestra de ejemplo un diagrama de la máxima tensión en el eje Z en el tirante inferior frente a la frecuencia de rotación en la Figura 10. Cada serie de esas se ha normalizado frente a su valor máximo y se muestran en la Figura 11.

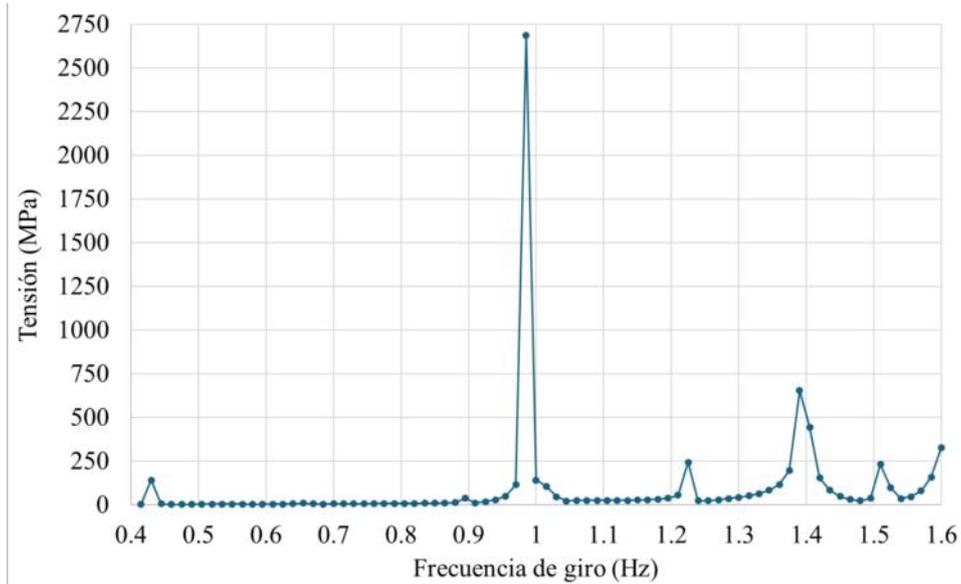


Figura 10: Máxima σ_z en el tirante inferior de la estructura original

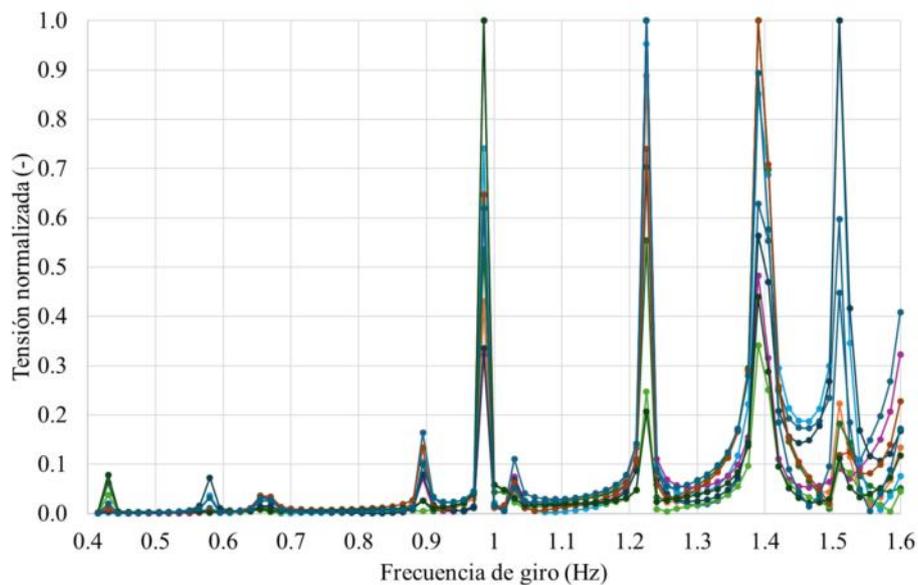


Figura 11: Tensión normalizada del análisis de respuesta armónica

Se dan múltiples frecuencias en las que se amplifica considerablemente la respuesta. Concretamente, en los 1.36 Hz se observa cierta amplificación y los 1.5 Hz se encuentran muy cerca de un pico. En la Figura 12 se muestra la deformada que se genera en este último caso.

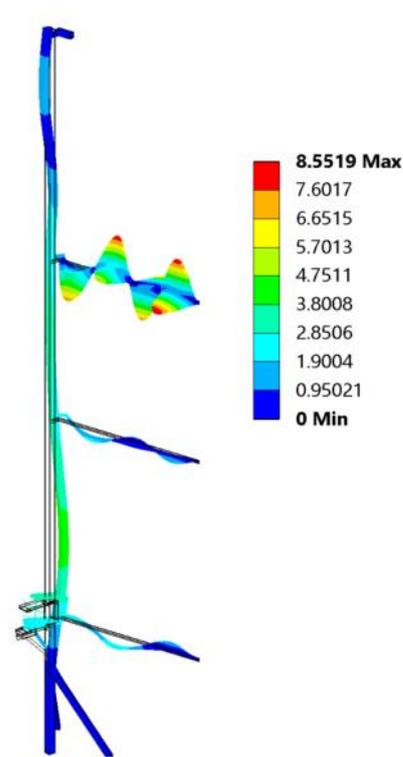


Figura 12: Deformada de la estructura ante la excitación de 1.5 Hz en mm

Para confirmar si el fenómeno detectado es local, se ha realizado el mismo cálculo con la estructura sin ninguno de los tres tirantes. Para agilizar el estudio, en esta configuración se han resuelto 25 casos entre 0.4 Hz y 2.25 Hz. Procediendo como en el anterior análisis, pero con los campos de tensiones de la columna, se obtiene el resultado de la Figura 13. En ella se siguen observando ampliificaciones, por lo que puede descartarse que sea un fenómeno originado exclusivamente de forma local en los tirantes.

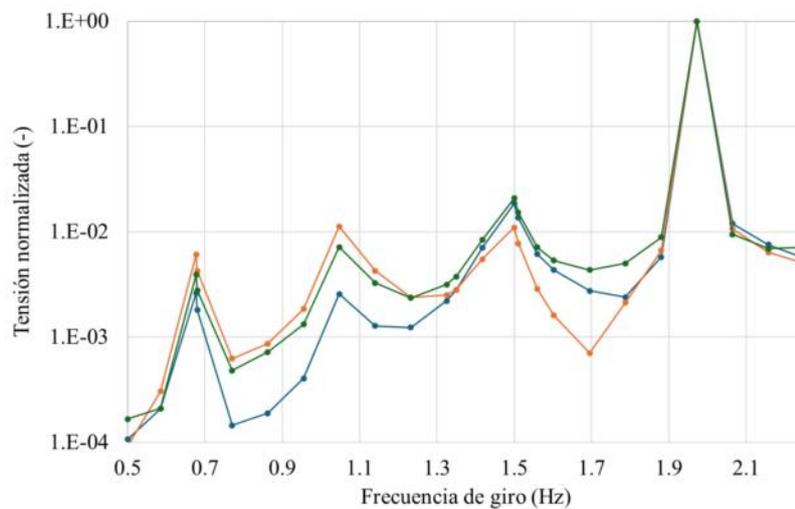


Figura 13: Resultados de la respuesta armónica en la estructura sin tirantes

Otra observación interesante es que, si se ignoran los valores amplificados, los resultados se ajustan muy bien a un polinomio de segundo orden. Esto es esperado, ya que en esos puntos el sistema responde de forma lineal y depende únicamente de la fuerza, que aumenta al cuadrado de la velocidad. Se muestra dicho polinomio de orden dos representado gráficamente en color naranja en la Figura 14.

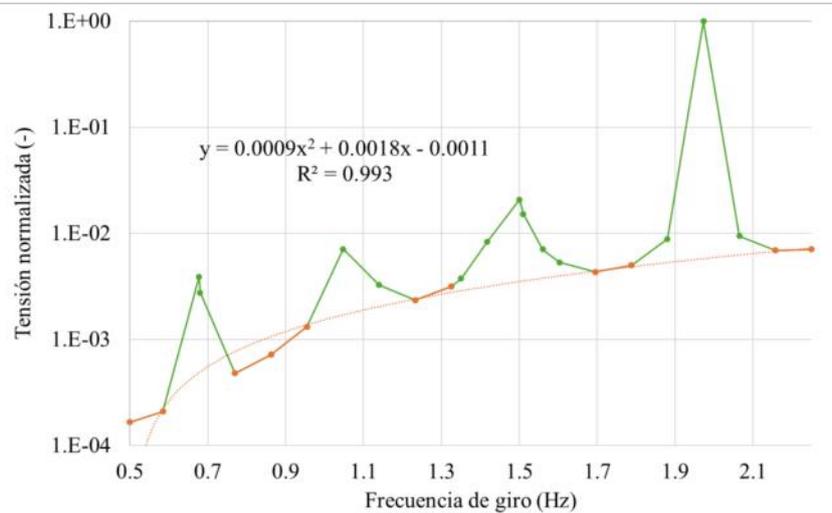


Figura 14: Ajuste de los resultados a una línea de tendencia

Como conclusión del análisis, se puede definir una hipótesis de fallo. Aunque el motivo exacto es desconocido, en el agitador se generan fuerzas dinámicas. El efecto se ve amplificado en la estructura y, a pesar de la amortiguación que el agua aporte, desencadena un fallo del sistema.

5. Propuesta de alternativas

5.1. Variación de la velocidad de giro

Los análisis de respuesta armónica dejan en evidencia una respuesta amplificada ante excitaciones a frecuencias diferentes a las naturales. Aunque no se pueda predecir exactamente la magnitud ni procedencia de la excitación, se puede afirmar que se genera en función de la velocidad de giro y el número de palas.

Esta opción plantea evitar la creación de excitaciones a frecuencias críticas con la medida más directa posible, variando la frecuencia de excitación. A los agitadores SR4320 se les puede ajustar la velocidad, haciendo que la excitación se ubique en uno de los valles observados en la respuesta del modelo.

Observando las respuestas, a modo de predimensionamiento para evaluar la viabilidad, no hacen falta cambios mayores de 0.05 Hz en la excitación. Eso se traduce a variaciones de 1 rpm en la velocidad de giro de las palas. Es un cambio asumible en el sistema que está sobredimensionado pudiendo funcionar con 2 de 3 agitadores por balsa.

5.2. Rediseño de los tirantes

En los diferentes análisis realizados, el punto crítico de la estructura siempre se sitúa en los tirantes. Se correlaciona con las medidas experimentales, ya que es uno de los fallos más comunes. Modificar dichos tirantes permitiría reducir los esfuerzos que soportan y alterar el comportamiento de la columna en diferentes zonas.

En lo referido a realizar cambios en la estructura, ello supone el menor coste. Se podrían retirar los tirantes actuales y añadir unos nuevos in situ durante el periodo de mantenimiento de las balsas.

5.3. Aumento de la amortiguación

Otra opción es la de aumentar la amortiguación del sistema. Para ello se podrían añadir placas de algún elastómero en los anclajes de los tirantes, entre el tirante y la pared. Esto no funcionaría bien con el diseño empotrado actual, pero podría realizarse junto a la segunda alternativa. Sería de especial interés si el rediseño de los tirantes no pudiera mejorar la respuesta dinámica y no se pudiera evitar trabajar con cierta amplificación.

5.4. Rediseño de la unión entre la estructura y los tirantes

También se ha estudiado el ángulo formado entre los tirantes. Se probaron 15°, 20° y 30° y se obtenían mejores resultados cuanto mayor fuera el ángulo. Se limitó a 30° por riesgo de contacto entre el soporte del agitador y el tirante si se seguía aumentando el ángulo. El resultado se muestra en la Figura 15.

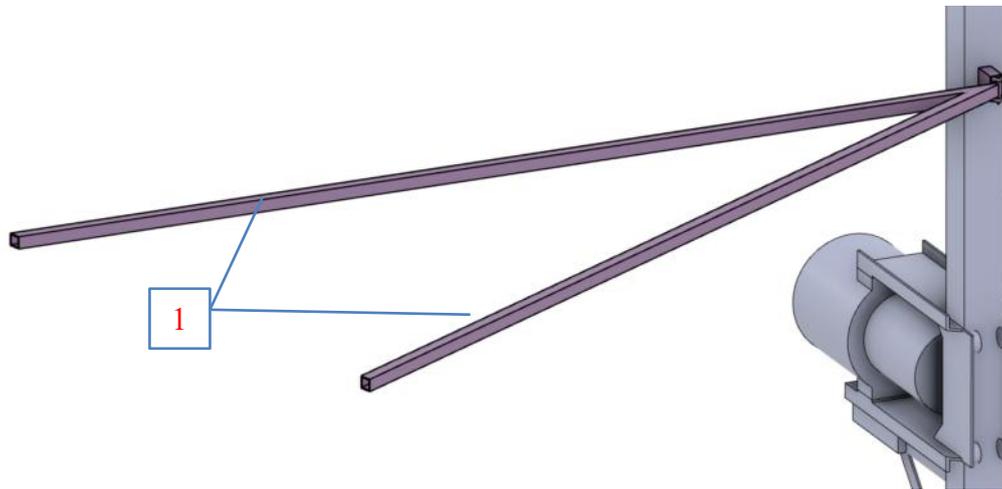


Figura 15: Modelo CAD del tirante rediseñado

Cada tirante se compone de cinco elementos que se muestran en la Figura 15 (el elemento 1) y la Figura 16 (los otros 4 elementos).

El elemento 1 es el propio tirante. Se obtiene de dos perfiles cuadrados de sección 30x30x3 mm y 2500 mm de longitud. Se deben cortar los dos extremos para que coincida con la pared y con el otro perfil. En el extremo de la pared se le debe soldar una placa agujereada para ser atornillado a la pared y en el otro se sueldan los dos perfiles juntos.

El elemento 2 es la parte de la bisagra que se suelda en la punta del elemento 1. Es un cilindro de diámetro exterior 10 mm, espesor de 2,5 mm y longitud 40 mm.

El elemento 3 aleja la bisagra de la columna para permitir el paso del carro. Es un corto perfil 60x30x6 mm de 65 mm de longitud con dos chapas soldadas de 30x11x5 mm.

Los elementos 4 son la parte de la bisagra que se suelda a las chapas del elemento 3. Son cilindros de diámetro exterior 12 mm, espesor de 3,5 mm y longitud 10 mm

El elemento 5 es el eje de la bisagra. Es de sección cilíndrica de diámetro 5 mm y 70 mm de longitud. Se coloca dentro de los elementos 2 y 4 in situ. Una vez colocado se suelda a uno de los elementos 4 y se puede atornillar completamente el elemento 1.

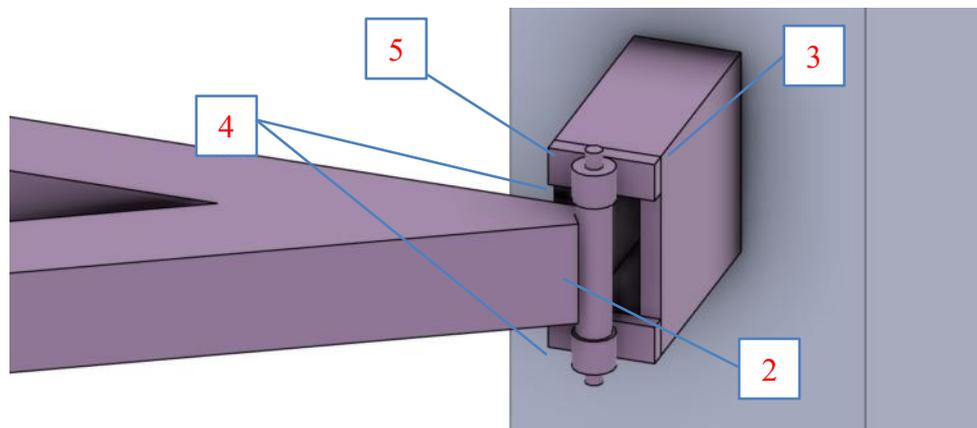


Figura 16: Detalle de la unión bisagra del tirante

Establecida la geometría del tirante, se estudió su posicionamiento y cantidad. Para minimizar las deformaciones, se fueron añadiendo tirantes en el punto de mayor desplazamiento. Comenzando con ningún tirante, se añadió el primero a 5315 mm de altura medidos desde el suelo. Con sucesivos cálculos, se añadió un segundo a 2918 mm y un tercero a 8225 mm. La diferencia entre dos o tres tirantes es mínima, y se ha comprobado en el análisis modal un modo de flexión en el vano superior a 7 Hz. Esto es preocupante ya que, durante la instalación del agitador, al ser bajado por la columna, en ocasiones se queda bloqueado y se han observado grandes vibraciones en esa zona. Es por ello por lo que se decide tener 3 tirantes. Comparado con el original, están posicionados más altos, concretamente el inferior está a 898 mm del original, el del medio a 315 mm y el superior a 825 mm. El nuevo posicionamiento de los tres tirantes en la estructura se muestra en la Figura 17.

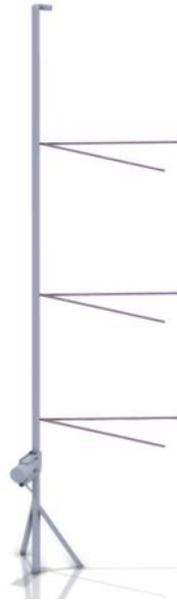


Figura 17: Estructura rediseñada

Primeramente se analizaron las frecuencias naturales de la estructura rediseñada. Estas se muestran en la Tabla 3. como Frecuencias naturales “en mojado” de la estructura rediseñada.

	frecuencia (Hz)	Descripción modo
Modo 1	6.14	Torsión
Modo 2	12.85	Local tirante y flexión abajo
Modos 3-4-5	14.13-15.35	Local tirante
Modo 6	16.96	Flexión arriba
Modos 7-8-9	17.61-17.95	Local tirante

Comparado con los modos de la estructura original, las flexiones a 3.55 Hz y 7.33 Hz han desaparecido. Como se esperaba, el modo de torsión ha bajado a 0.22 Hz. En la Figura 18 se muestran los principales modos de la nueva estructura.

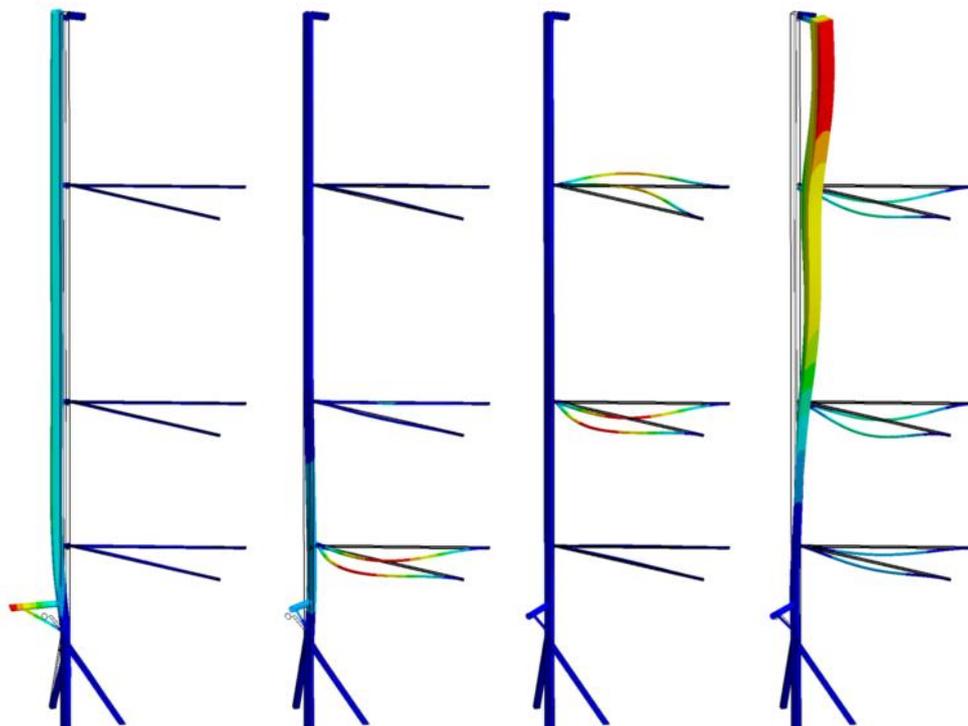


Figura 18: Modos 1, 2, 3 y 6 (de izquierda a derecha) de la estructura rediseñada

En lo referido a la hipótesis de carga estática, en la Figura 19 se muestran las tensiones de Von Mises del tirante inferior, el más crítico. El pico de tensión máxima en el tirante ha bajado de 45 MPa a 31 MPa.

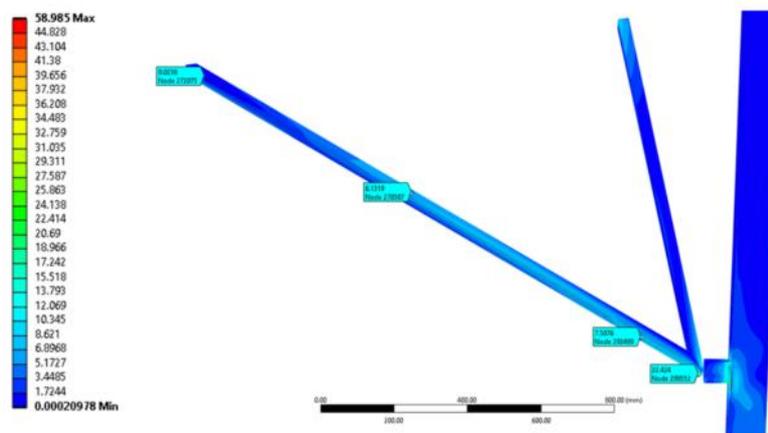


Figura 19: Tensiones de Von Mises en el tirante rediseñado

Además de haberse reducido las tensiones, también se han reducido las deformaciones.

En la Figura 20 se muestran las deformadas ante la hipótesis de carga estática de la estructura original y la rediseñada. Para que se puedan comparar visualmente, ambas están escaladas por 600. La deformación en la columna es aproximadamente 5 veces menor que en la estructura original. Por lo tanto, para la forma de trabajo de la estructura, se puede afirmar que ahora es más rígida sin haber aumentado las tensiones.

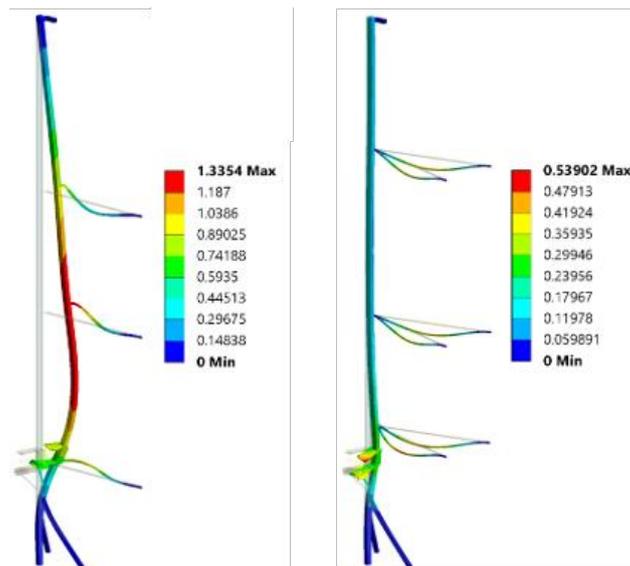


Figura 20: Deformada de la estructura original (izquierda) y rediseñada (derecha)

Con el mismo procedimiento que en los anteriores análisis, se ha obtenido la respuesta dinámica de la estructura rediseñada que se muestra en la Figura 21. Algunas series tienen un comportamiento comparable a la estructura, mientras que otras se ven excitadas en menos frecuencias. Por lo tanto, se observa una mejoría en función de la serie estudiada. Para poder realizar una comparativa de los dos diseños, se ha realizado la media entre todas las series de cada frecuencia, véase la Figura 22 y la Figura 23. Concretamente solo ocurre a 1.18 Hz que coincide una amplificación en todas las mediciones de la estructura rediseñada. Sin embargo, se observan 4 picos predominantes en la estructura original. La conclusión es que la estructura rediseñada tiene menos puntos problemáticos en cada elemento, pero al no coincidir entre los elementos sigue siendo necesario estudiar la velocidad de trabajo.

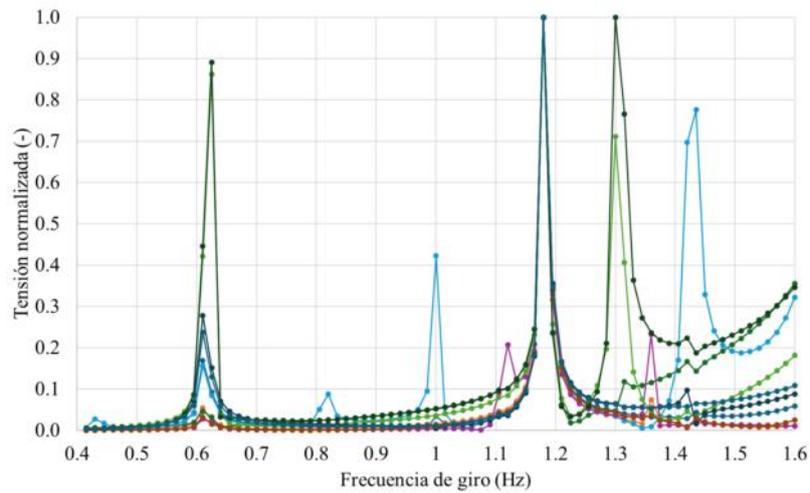


Figura 21: Resultados normalizados de la respuesta armónica tras el rediseño

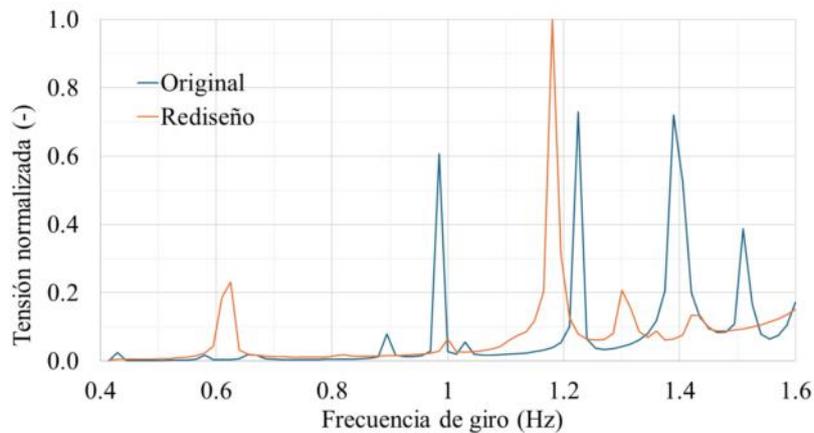


Figura 22: Media de las respuestas armónicas de cada diseño

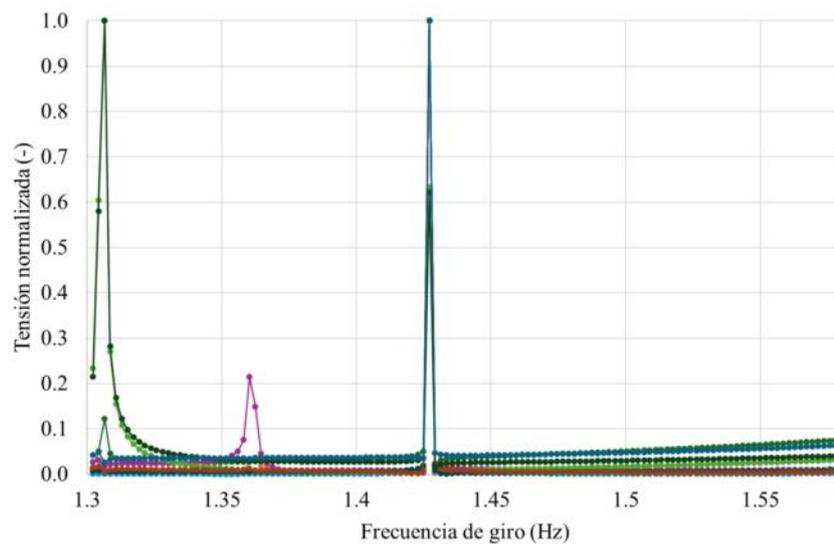


Figura 23: Detalle de la respuesta armónica tras el rediseño

6. Experimentación

El objetivo de este ensayo es la obtención experimental de las frecuencias que el agitador excita y la respuesta de la estructura ante ellas. El ensayo se realiza en condiciones reales de operación, es decir con el agitador en funcionamiento y la estructura completamente sumergida en la balsa.

6.1. Disposición de los sensores

Para ello, aprovechando el vaciado de la balsa por mantenimiento, se instalaron una serie de acelerómetros en la estructura, como se muestran en la Figura 24, se llenó la balsa y se tomaron las primeras lecturas mientras el agitador gira a velocidad nominal para el proceso.

El sensor inferior “S1” es un acelerómetro triaxial ubicado en el propio agitador, tal y como se ve en la Figura 25. Con este se podrán medir los movimientos que surgen en el agitador y que luego se transmiten mediante el soporte a la estructura. En el vano superior de la columna se ha ubicado el segundo sensor “S2” que es un acelerómetro uniaxial y se muestra en la Figura 26. El eje medido es el paralelo al eje del agitador.

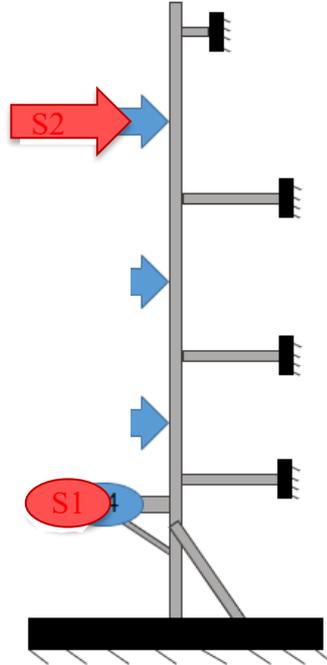


Figura 24: Ubicación de los sensores para el ensayo de validación



Figura 25: Acelerómetro triaxial en el agitador antes del ensayo

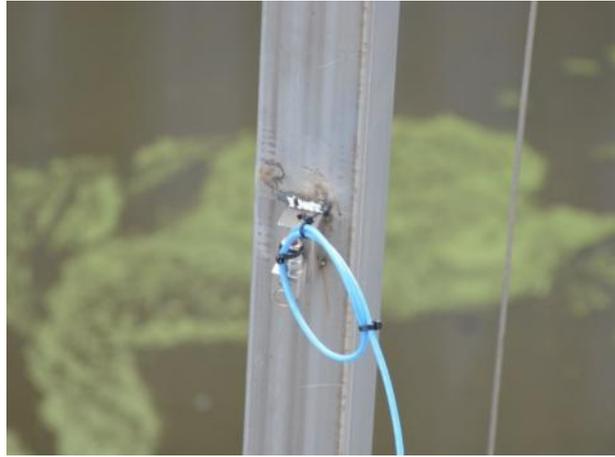


Figura 26: Acelerómetro uniaxial en la columna antes del ensayo

Para la realización de estos ensayos se ha contratado a una empresa externa especializada en mantenimiento industrial y con una experiencia en análisis vibratorios de máquinas rotativas. Tras transmitirles las necesidades de medición, la empresa se ha encargado de seleccionar e instalar los sensores y mediante un sistema de monitorizado se toman las mediciones y obtenemos los datos semiprocesados.

6.2. Resultados experimentales

A continuación, se van a mostrar los resultados obtenidos de las lecturas realizadas durante una mañana completa, aproximadamente una semana después del llenado de la balsa. En la Figura 27 se muestra el resultado obtenido en el propio agitador. Se puede observar una vibración de 1.5 Hz con una amplitud destacable, pero sin ser la máxima ni ser muy superior a otras vibraciones. Cabe destacar que el segundo y tercer pico que se observa se dan a 3 Hz y 4.5 Hz, valores múltiplos de 1.5.

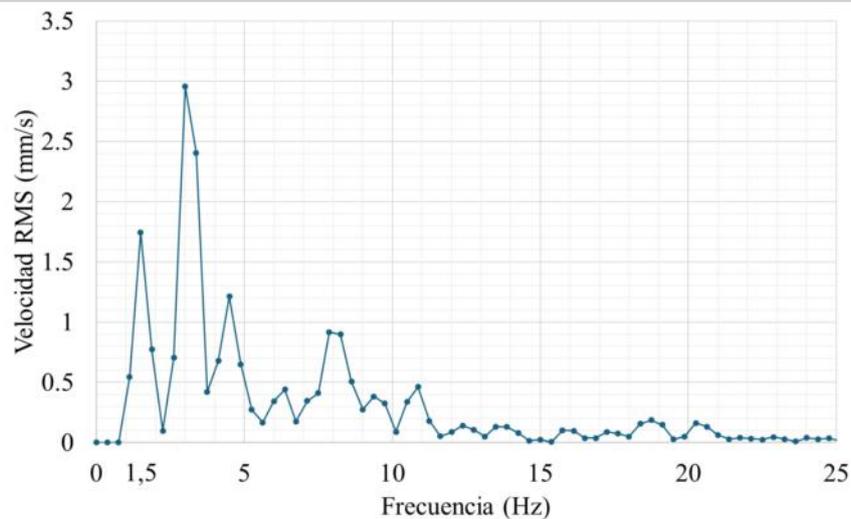


Figura 27: FFT de las lecturas en el agitador

A la vista de los resultados se confirma la existencia de la excitación a la frecuencia de la velocidad de giro por el número de palas.

Durante el mismo periodo de tiempo se obtuvo, con el sensor en la columna, el resultado que se muestra en la Figura 28. En ella se puede observar como la estructura responde de diferente manera a cada excitación, siendo ahora la vibración registrada en 1.5 Hz la clara predominante.

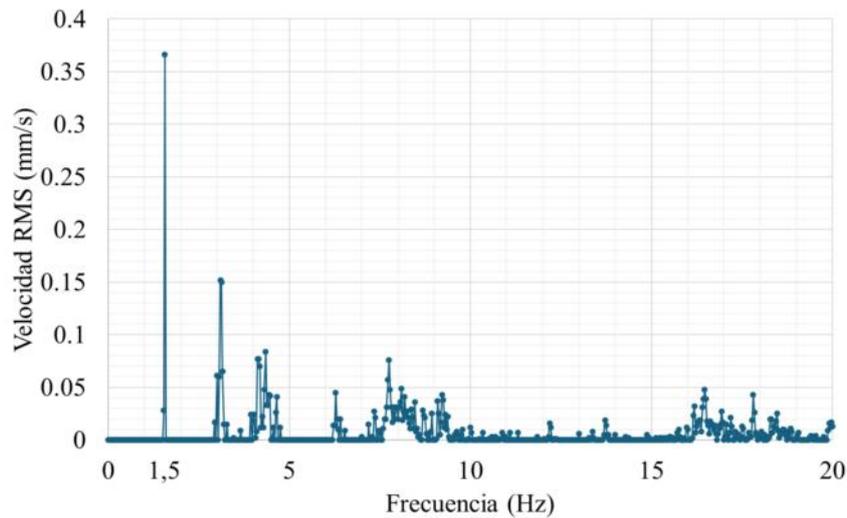


Figura 28: FFT de las lecturas en la columna

Por lo tanto, los resultados del ensayo concuerdan con el comportamiento esperado, reforzando la hipótesis sobre la que se ha realizado la resolución del problema.

7. Conclusiones

La caracterización dinámica de la estructura del agitador de la EDAR de Galindo ha proporcionado una información relevante sobre los modos de vibración de la estructura, encontrando frecuencias críticas aparte de las identificadas en las frecuencias naturales “en mojado”. Los fallos recurrentes en la estructura del agitador se deben a un fenómeno dinámico, no uno estático.

A pesar de que el estudio de las frecuencias naturales “en mojado” no haya solucionado el problema, se ha observado que tienen un efecto muy significativo. En las EDARs es habitual encontrar sumergidas estructuras esbeltas de acero. Siempre que se estudien las frecuencias naturales de estas se debería, como mínimo, aplicar el factor corrector planteado en este trabajo. Si el material o la geometría no se asemejara, sería necesaria la reestimación de la corrección o valorar la realización de análisis más complejos.

Debido a la añadida dificultad de los análisis dinámicos, es razonable no realizarlos en el dimensionamiento original de una estructura que se considere suficientemente rígida. Sin embargo, debería ser una de las primeras comprobaciones si se dan fallos aparentemente de fatiga, a pesar de no existir una hipótesis que lo apoye. Como se ha mostrado en el trabajo, la solución al problema podría ser tan trivial como un pequeño ajuste de velocidad en ciertos casos.

En el análisis se detectó la necesidad de realizar modificaciones en la estructura para mejorar su comportamiento y reducir la probabilidad de fallo. Aplicar la solución propuesta mejoraría la integridad estructural del sistema agitador y aumentaría la fiabilidad de todo el proceso. Además de la fabricación e instalación de los nuevos tirantes, el trabajo futuro podría continuar la validación experimental de los modelos usados y de la solución propuesta. De ser así, se podría afirmar que el método de elementos finitos es suficiente y adecuado para la resolución de problemas como el presentado.

8. Agradecimientos

Los autores agradecen la colaboración del Consorcio de Aguas Bilbao Bizkaia / Bilbao Bizkaia Ur Partzuergoa así como del Aula del Agua "CABB"/"BBUP" Uraren Gela de la Escuela de Ingeniería de Bilbao y la financiación del proyecto STABLE PID2023-150982OB-I00 financiado por MCIU /AEI /10.13039/501100011033 / FEDER, UE.

9. Referencias

- [1] Worraker, W. J., “Grazing flow effects on the impedance of cavity liners”, *Institute of Sound and Vibration Research, Memorandum No. 114*, Ann Arbor (1998)
- [2] Consorcio de Aguas Bilbao Bizkaia / Bilbao Bizkaia Ur Partzuergoa CABB/BBUP 2024: www.consorciod eaguas.eus.

- [3] Aula del Agua "CABB"/"BBUP" Uraren Gela, Libro de Resúmenes de los Trabajos realizados en el Aula del Agua "CABB", Bilbao: Escuela de Ingeniería de Bilbao, 2023-2024.
- [4] Xylem, "Flygt 4430 - Xylem España," 2024. [Online]. www.xylem.com/es-es/products--services/mixing-mixing-equipment/single-speed-mixers/4430-low-speed-mixer/.
- [5] Xylem, "Flygt 4320 Geared Adaptive Mixers - Xylem España," 2024. [Online]. www.xylem.com/es-es/products--services/mixing-mixing-equipment/adaptive-mixers/4320-low-speed-mixer/.
- [6] S. K. Chakrabarti, Hydrodynamics of offshore structures, Southampton: WIT Press, 1994.
- [7] I. Stenius, L. Fagerberg and A. Säther, "Predicting the natural frequency of submerged structures using coupled solid-acoustic finite element simulations," Ocean engineering, vol. 159, pp. 37-46, 2018.
- [8] M. Bossio, "Análisis de la respuesta dinámica en agitadores industriales," Universitat Politècnica de Catalunya, 2021.
- [9] R. D. Blevins, Formulas for natural frequency and mode shape, New-York: Van Nostrand Reinhold Co , 1979.