



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

– **TELECOM** ESCUELA
TÉCNICA **VLC** SUPERIOR
DE INGENIERÍA DE
TELECOMUNICACIÓN

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería de
Telecomunicación

Diseño de un prototipo a escala reducida de una estructura
para el estudio de vibraciones

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería de Tecnologías y Servicios de
Telecomunicación

AUTOR/A: González Coutellec, José María

Tutor/a: Castiñeira Ibáñez, Sergio

Cotutor/a: Bravo Plana-Sala, José María

CURSO ACADÉMICO: 2023/2024



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

— **TELECOM** ESCUELA
TÉCNICA **VLC** SUPERIOR
DE INGENIERÍA DE
TELECOMUNICACIÓN



Resumen

El estudio de las vibraciones desempeña un papel importante en el diseño de edificios ya que determina si éstas provocarán problemas en la construcción de los mismos o en última instancia cuando estos se utilicen. Generalmente, las vibraciones que se localizan sobre las plantas de un edificio son causadas por cargas dinámicas producidas por los propios ocupantes de este o por las máquinas que pudieran existir en su interior, aunque también pueden existir vibraciones producidas por fuentes externas. En este trabajo se presenta un diseño de un prototipo a escala reducida de una estructura con diferentes alturas. Se estudia el efecto de la altura en relación con la componente predominante de vibración de la estructura cuando esta es sometida a vibraciones externas. Se proponen posibles soluciones para aislar la estructura mediante el uso de láminas elastómeras y con ello minimizar los daños que pueda recibir la misma. Para el análisis del prototipo, se estudiará el efecto del índice de vibración en las distintas plantas utilizando herramientas informáticas de libre acceso.

Resum

L'estudi de les vibracions exerceix un paper important en el disseny d'edificis ja que determina si aquestes provocaran problemes en la construcció dels mateixos o en última instància quan aquests s'utilitzen. Generalment, les vibracions que es localitzen sobre les plantes d'un edifici són causades per càrregues dinàmiques produïdes pels propis ocupants d'aquest o per les màquines que pogueren existir en el seu interior, encara que també poden existir vibracions produïdes per fonts externes. En aquest treball es presenta un disseny d'un prototip a escala reduïda d'una estructura amb diferents altures. S'estudia l'efecte de l'altura en relació amb la component predominant de vibració de l'estructura quan aquesta és sotmesa a vibracions externes. Es proposen possibles solucions per a aïllar l'estructura mitjançant l'ús de làmines elastómeres i amb això minimitzar els danys que puga rebre la mateixa. Per a l'anàlisi del prototip, s'estudiarà l'efecte de l'índex de vibració en les diferents plantes utilitzant eines informàtiques de lliure accés.

Abstract

The study of vibrations plays an important role in the design of buildings since it determines whether they will cause problems in their construction or ultimately when they are used. Generally, the vibrations that are located on the plants of a building are caused by dynamic loads produced by the occupants of this or by the machines that could exist inside, although there may also be vibrations produced by external sources. In this work there is a design of a prototype reduced scale of a structure with different heights. The height effect in relation to the predominant vibration component of the structure is studied when it is subject to external vibrations. Possible solutions are proposed to isolate the structure through the use of elastomere sheets and thereby minimize the damage that it can receive. For the analysis of the prototype, the effect of the vibration index on the different plants will be studied using free access tools.

ÍNDICE

Capítulo 1 INTRODUCCIÓN	4
1.1 Relación del proyecto con el ámbito profesional y con el grado de Ingeniería de Telecomunicaciones	4
1.2 Relación del proyecto con los ODS	5
Capítulo 2 OBJETIVOS Y PLAN DE TRABAJO	7
2.1 Objetivos	7
2.2 Plan de trabajo y cronograma	8
Capítulo 3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS	10
3.1 Oscilaciones libres. Movimiento Armónico Simple	10
3.1.1 Cinemática del MAS	11
3.1.2 Dinámica del MAS	13
3.1.3 Energía del MAS	14
3.2 Oscilaciones amortiguadas	15
3.3 Oscilaciones forzadas	17
3.3.1 Ecuación diferencial	17
3.3.2 Régimen permanente	18
3.3.3 Modos de vibración	19
3.4 Medición de vibraciones	20
3.4.1 Parámetros de estudio	22
3.4.2 Criterio de evaluación de las vibraciones	23
3.4.2.1 Vibraciones en sistema mano-brazo	23
3.4.2.2 Vibraciones transmitidas a todo el cuerpo	24
3.4.2.3 Vibraciones en edificación	25
Capítulo 4 EQUIPOS Y MATERIALES	27
4.1 Prototipo	27
4.2 Emisor de vibraciones	27
28	
4.3 Elementos elastómeros	28
4.4 Plataformas de medida	29
4.4.1 Phypfox	29
4.4.2 PULSE	30
Capítulo 5 ANÁLISIS DE RESULTADOS	32
5.1 Determinación del eje predominante	32
5.2 Efecto de la frecuencia de trabajo y la altura	33
5.3 Efecto del uso de elastómeros	39
5.3.1 Evaluación de la relevancia del emplazamiento del elastómero	39
5.3.2 Evaluación de la importancia del material del elastómero	44
Capítulo 6 CONCLUSIONES	49
Capítulo 7 BIBLIOGRAFÍA	51
Capítulo 8 ANEXO	53
8.1 Flujograma de la metodología de estudio	53
8.2 Herramienta Excel para tratar los Datos de Phypfox	54
8.3 Código Matlab para la visualización de los Datos	55
Capítulo 9 AGRADECIMIENTOS	56



Capítulo 1 INTRODUCCIÓN

El estudio de las vibraciones juega un papel fundamental en el diseño arquitectónico, ya que incide en la viabilidad y el rendimiento de las edificaciones, tanto durante su construcción como en su uso continuado. En muchas ocasiones, las vibraciones que afectan a los diferentes niveles de un edificio se originan a partir de fuerzas dinámicas generadas por sus habitantes o por la maquinaria presente en su interior. Sin embargo, no podemos descartar la influencia de vibraciones externas en este complejo escenario.

Por otro lado, los efectos de las vibraciones que pueden ocasionar en el organismo de una persona expuesta a éstas, pueden tener un impacto enorme en la vida cotidiana de una persona. Dependiendo de su frecuencia y dónde actúan, pueden llegar a causar desde mareos y vómitos, hasta síntomas neurológicos como dificultad de equilibrio.

En este contexto, el presente proyecto se sumerge en la apasionante investigación del comportamiento vibratorio de las estructuras edificadas. Nuestro enfoque recae en la creación de un modelo a escala reducida de una estructura con múltiples niveles. Se explorará el impacto de la altura en relación con la dirección principal de las vibraciones que afectan a la estructura cuando se somete a fuerzas vibratorias externas. Por otro lado, se buscará determinar la frecuencia crítica, frecuencia que provocará más daños estructurales y se presentarán propuestas de posibles soluciones para el aislamiento de la estructura, aprovechando láminas elastómeras de distintos materiales con el objetivo de minimizar cualquier daño potencial.

A medida que avancemos en esta travesía de investigación, descubriremos cómo las vibraciones influyen en el desarrollo de nuevas construcciones, forjando el vínculo entre el diseño y la funcionalidad en el mundo de la arquitectura.

1.1 Relación del proyecto con el ámbito profesional y con el grado de Ingeniería de Telecomunicaciones

El proyecto se ha realizado sobre el “estudio de vibraciones en un prototipo a escala reducida de una estructura”. Este proyecto puede estar relacionado con el ámbito profesional de las Telecomunicaciones. Algunas formas en que se puede relacionar el proyecto con el ámbito profesional de la Ingeniería de Telecomunicaciones serían:

1. **Monitoreo estructural de infraestructuras críticas:** En la Ingeniería de Telecomunicaciones, una aplicación importante es el monitoreo y la supervisión de infraestructuras críticas como puentes, edificios, torres de comunicación y líneas de transmisión eléctrica. El estudio de vibraciones en estructuras podría aplicarse al monitoreo en tiempo real de estas infraestructuras para detectar problemas de seguridad, desgaste y salud. Los ingenieros de Telecomunicaciones pueden diseñar sistemas de sensores y redes de comunicación para este propósito.
2. **Sistema de alerta temprana y respuesta rápida:** El proyecto está relacionado con el desarrollo de sistema de alerta temprana para eventos sísmicos o de vibración. Los ingenieros de Telecomunicaciones se encargan de diseñar sistemas de comunicación que permitan una respuesta rápida y eficiente en caso de que se detecten vibraciones anómalas.

3. **Comunicación y visualización de datos:** El proyecto implica la transmisión de y visualización de datos de vibración en tiempo real. Los ingenieros de Telecomunicaciones diseñan las redes y sistemas que permiten la transmisión de datos a través de diferentes medios de comunicación.

Por otro lado, este proyecto puede estar relacionado con el grado de Ingeniería de Telecomunicaciones de varias maneras, aunque no parezca tener conexión directa al principio. Algunas de las formas en las que podría estar relacionado son:

1. **Control y monitorización de estructuras:** En el proyecto se ha utilizado sensores, instrumentación y técnicas de adquisición de datos para estudiar las vibraciones en la estructura. Esto podría estar relacionado con sistemas de control y monitoreo.
2. **Transmisión y procesamiento de datos:** El proyecto involucra la transmisión de datos desde los sensores de vibración a un sistema central de procesamiento y análisis.
3. **Interconexión de sistemas:** En un proyecto de Ingeniería de Telecomunicaciones como éste se enfatiza la interconexión de sistemas y dispositivos para una comunicación y operación eficiente.

Por último, el proyecto está relacionado con algunas asignaturas del grado de Ingeniería de Telecomunicaciones de la Universidad Politécnica de Valencia como:

1. **Acústica ambiental:** trata sobre temas relacionados con la propagación de vibraciones en el entorno y técnicas para medir, mitigar y controlar el efecto de éstas.
2. **Acústica arquitectónica:** enfocada al acondicionamiento acústico de espacios, aislamiento acústico, diseño de salas acondicionadas al ruido y el análisis acústico.
3. **Tratamiento digital de imágenes:** se centra en la adquisición de imágenes, comprensión, reconocimientos de patrones en éstas, al igual que la programación de diversas técnicas y algoritmos relacionados con el procesamiento digital de imágenes a través de Matlab.

1.2 Relación del proyecto con los ODS

Los ODS son las siglas de Objetivos de Desarrollo Sostenible. Son un conjunto de 17 objetivos globales adoptados por los Estados miembros de las Naciones Unidas en Septiembre de 2015 como parte de la agenda de 2030 para el Desarrollo Sostenible [1].



Figura 1 – Los 17 distintos objetivos de desarrollo sostenible [25].

Los 17 ODS mostrados en la Figura 1 abordan una amplia gama de cuestiones interconectadas, que incluyen la erradicación de la pobreza, la igualdad de género, la educación de calidad, la acción climática, la paz y la justicia, la reducción de las desigualdades y la promoción de la prosperidad económica, entre otros. Cada objetivo se desglosa en unas metas específicas y se establecen indicadores para medir el progreso hacia su cumplimiento [1].

Este proyecto puede ser relacionado con varios de estos ODS como:

- **ODS 3 - Salud y Bienestar:** Las vibraciones pueden tener impactos en la salud y el bienestar de las personas de las personas, por lo que este proyecto podría contribuir a un ambiente más saludable y seguro
- **ODS 7 - Energía Asequible y No Contaminante:** Reducir las vibraciones puede ser importante en la generación y uso de energía, ya que las vibraciones pueden afectar la eficiencia y la durabilidad de los sistemas.
- **ODS 9 - Industria, Innovación e Infraestructura:** Este objetivo se relaciona con la promoción de la investigación y el desarrollo de tecnologías limpias y sostenibles, así como con la construcción de infraestructuras resilientes. Este proyecto contribuye a la innovación y mejora de las infraestructuras para reducir las vibraciones en diversas aplicaciones.
- **ODS 11 - Ciudades y Comunidades Sostenibles:** Este objetivo se refiere a la creación de ciudades y asentamientos humanos seguros y sostenibles. La reducción de vibraciones es relevante en entornos urbanos y en la planificación de infraestructuras para garantizar la calidad de vida de los ciudadanos.
- **ODS 13 – Acción por el Clima:** Las vibraciones también pueden estar relacionadas con la mitigación y la adaptación al cambio climático, ya que pueden afectar a la infraestructura y a la eficiencia energética.

Capítulo 2 OBJETIVOS Y PLAN DE TRABAJO

2.1 Objetivos

El presente Trabajo Fin de Grado consiste en el diseño de un prototipo a escala reducida de una estructura, que será sometida a la influencia de vibraciones. El objetivo es observar el comportamiento estas vibraciones en la estructura diseñada y su efecto en ésta. Durante el estudio se utilizará elementos elastómeros colocados estratégicamente en distintos puntos en el prototipo, para verificar que cuando en la transmisión de la señal se introduce un factor de atenuación los sistemas de medida de vibraciones propuestos, Phyphox y PULSE, siguen siendo fiables.

Para realizar el estudio se ha llevado a cabo los siguientes objetivos específicos:

1. Estado del arte: Documentación y búsqueda de fuentes bibliográficas para entender los fundamentos teóricos acerca de las vibraciones.
2. Diseño del prototipo: creación de una maqueta extrapolable a un edificio de 3 plantas de altura en el que se va a simular el efecto de una vibración forzada que actuará sobre éste. El prototipo ha sido diseñado con materiales de fácil acceso (plástico, tornillos y una tabla de madera) proporcionados por el Laboratorio de Física Aplicada de la UPV.
3. Evaluación del índice de vibración mediante la app Phyphox: Medida del índice de vibración mediante la plataforma móvil Phyphox. Para ello, la estructura diseñada será sometida a la influencia de vibraciones mediante el uso de un emisor de vibraciones.

Durante las medidas, se emplazarán en distintos lugares distintos elementos elastómeros y se evaluará la acción de éstos en el índice de vibración.

4. Evaluación del índice de vibración mediante el software PULSE: A continuación de realizar las medidas mediante la plataforma móvil Phyphox, se decidió repetir las mismas medidas, pero esta vez, mediante el uso de una plataforma profesional especializada en la medida de vibraciones, PULSE. Previamente se exploraron sus funcionalidades y capacidades para asegurar unas mediciones precisas y confiables.
5. Análisis de datos y comparación de fiabilidad: basado en la recopilación y evaluación de los datos medidos con Phyphox y PULSE para la posterior comparación de la fidelidad de ambos aparatos bajo la influencia de un sistema de vibraciones. Por otra parte, a raíz de los resultados extraídos será posible la extracción de conclusiones posteriormente.

2.2 Plan de trabajo y cronograma

Para la medición de vibraciones se empleará la plataforma móvil Phyphox y la profesional PULSE. El estudio pretende determinar la mejor combinación de materiales elastómeros y su emplazamiento óptimo para reducir el índice de vibración lo máximo posible. Para cumplir con el objetivo seguiremos el siguiente procedimiento:

METODOLOGÍA DE ESTUDIO



Figura 2 – Fases generales del proyecto.

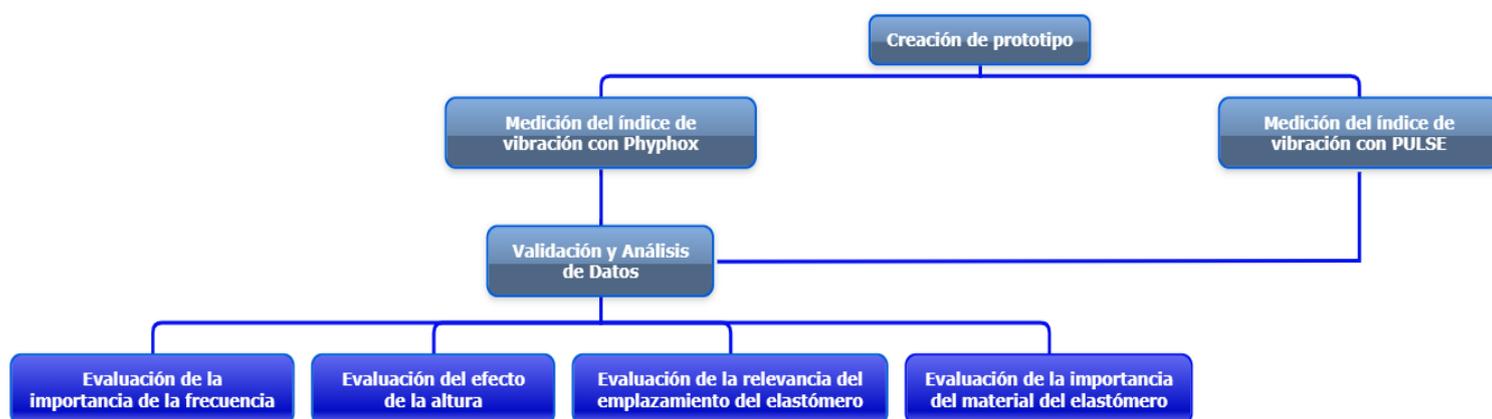


Figura 3 – Método de trabajo para validar los sistemas de medida.

El plan de trabajo se ha estructurado en una sucesión de tareas meticulosamente organizadas en un cronograma, donde la ubicación de las marcas “X” en las celdas de la tabla denota la semana del mes asignada para realizar cada tarea.

1. Planteamiento y selección del tema del Proyecto.
2. Documentación y búsqueda de fuentes bibliográficas.
3. Diseño de prototipo.
4. Aprendizaje del uso de aparatos de medida como Phyphox y PULSE.
5. Toma de medidas en el laboratorio de Física Aplicada de la UPV mediante el uso de plataformas de medidas de vibraciones mencionadas previamente.
6. Tratamiento de datos extraídos con ambas herramientas.
7. Análisis de datos y verificación de la fiabilidad de ambos aparatos de medida.
8. Extracción de conclusiones.

TAREA/MES	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE	FEBRERO
1	XX				
2	XX	XXX			
3		XX			
4			X		
5			XX		
6				XX	
7					XXX
8					X

Tabla 1 – Cronograma del plan de trabajo.

Capítulo 3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

3.1 Oscilaciones libres. Movimiento Armónico Simple

La vibración es un movimiento oscilatorio de un objeto o sistema alrededor de un punto de equilibrio. Este movimiento se produce cuando el objeto se desplaza de su posición de equilibrio y luego vuelve a ella repetidamente. Las vibraciones se pueden clasificar en dos tipos: libres y forzadas [2].

Las libres ocurren cuando un objeto o sistema vibra de forma natural, sin la aplicación de una fuerza externa. Por ejemplo, cuando se golpea una campana, esta comienza a vibrar de forma natural, sin necesidad de aplicar una fuerza externa continua. Las forzadas, por otro lado, son aquellas que se producen cuando se aplica una fuerza externa al objeto o sistema, lo que provoca que vibre a una frecuencia determinada. Por ejemplo, cuando se toca una guitarra, las cuerdas vibran debido a una fuerza aplicada por los dedos del guitarrista [2].

Las vibraciones que encontramos en la naturaleza son de carácter complejo. Sin embargo, pueden ser descritas matemáticamente (Teorema de Fourier) como un sumatorio de vibraciones simples denominadas Movimiento Armónico Simple.

Un movimiento armónico simple (MAS) es un movimiento oscilatorio en el cual la posición de un objeto varía periódicamente en el tiempo, siguiendo una trayectoria sinusoidal o cosinusoidal. Este tipo de movimiento se caracteriza por tener una aceleración proporcional y opuesta a su desplazamiento con respecto a una posición de equilibrio [3].

La ecuación que describe el movimiento armónico simple es:

$$x(t) = A \cdot \text{Sen}(\omega t + \varphi) \quad (1)$$

Donde:

$x(t)$ es la posición del objeto en función del tiempo t .

A es la amplitud de la oscilación, que representa la máxima distancia que el objeto se desplaza de su posición de equilibrio.

ω es la frecuencia angular, que representa la rapidez con la que el objeto oscila. Su unidad es radianes por segundo.

φ es la fase inicial, que representa la posición del objeto en el momento en que se inició el movimiento.

La elongación se refiere a la distancia que el objeto se encuentra de su posición de equilibrio en un momento dado. En el caso del movimiento armónico simple, la elongación se puede calcular como:

$$x = x(t) - x_{eq} \quad (2)$$

Donde x_{eq} es la posición de equilibrio del objeto. Para describir la posición de un objeto sometido a un movimiento sometido a un movimiento armónico simple usaremos una función sinusoidal que describa el cambio de la elongación en el tiempo.

En un movimiento armónico simple como el de la Figura 4, la función seno se utiliza para describir la trayectoria del objeto en función del tiempo. La función seno oscila entre los valores de -1 y +1, por lo que la posición del objeto también oscila entre un valor máximo positivo +A y un valor máximo negativo -A. La amplitud de la oscilación, A, determina la distancia máxima que el objeto se desplaza de su posición de equilibrio, y se refleja en los valores máximos positivos y negativos de la función seno [4].

La longitud de tiempo que tarda en repetirse el movimiento completo se llama período, y se puede calcular como:

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \quad (3)$$

Donde T es el período en segundos y ω es la frecuencia angular en radianes por segundo. La frecuencia, f, se define como el número de oscilaciones completas que ocurren en un segundo, y se puede calcular como:

$$F = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi} \quad (4)$$

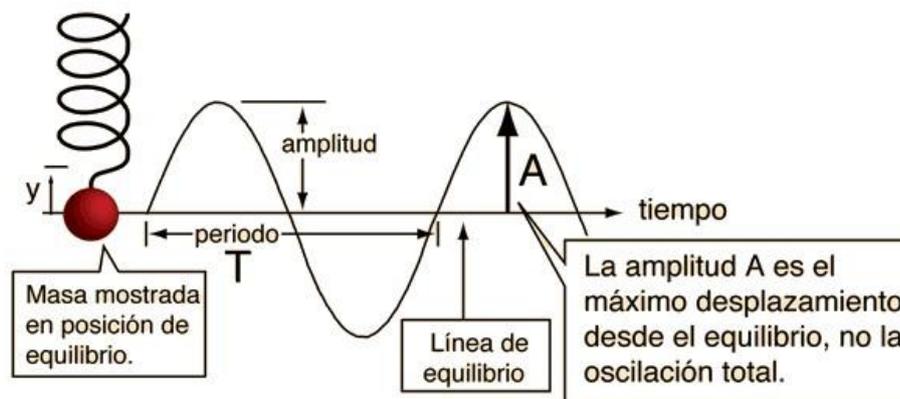


Figura 4 – Movimiento Armónico Simple: en ella se observa una masa que cuelga de un muelle y el movimiento armónico simple que se va a producir al oscilar éste [3].

3.1.1 Cinemática del MAS

La velocidad del objeto en cualquier punto de su trayectoria se puede obtener mediante la derivada de la función de posición con respecto al tiempo [3] [4]:

$$\frac{dx}{dt} = v(t) = A \cdot \omega \cdot \text{Cos}(\omega t + \varphi) \quad (5)$$

Donde $v(t)$ es la velocidad del objeto en función del tiempo t.

La aceleración del objeto se puede obtener mediante la derivada de la velocidad con respecto al tiempo:

$$\frac{d^2x}{dt^2} = a(t) = -A \cdot \omega^2 \cdot \text{Sen}(\omega t + \varphi) = -\omega^2 x \quad (6)$$

Donde $a(t)$ es la aceleración del objeto en función del tiempo t .

En un movimiento armónico simple (MAS), la amplitud de la velocidad, $v(t)$, y la amplitud de la aceleración, $a(t)$, dependen de la amplitud del desplazamiento, A , y la frecuencia angular, ω .

La amplitud de la velocidad se puede obtener al encontrar el valor máximo de la función $\text{Sen}(\omega t + \varphi)$, que se encuentra en $t = (n\pi - \varphi)/\omega$ donde n es cualquier número entero [3][4].

Por lo tanto, la amplitud de la velocidad en un MAS es $A \cdot \omega$, es decir, depende de la frecuencia de la oscilación.

La amplitud de la aceleración se puede obtener al encontrar el valor máximo de la función $\text{Cos}(\omega t + \varphi)$, que se encuentra en $t = ((n\pi/2) - \varphi)/\omega$. Por lo tanto, la amplitud de la aceleración en un MAS vuelve a depender de la frecuencia, en este caso, $A\omega^2$, es decir, la amplitud de la oscilación multiplicada por el cuadrado de la frecuencia angular.

Se dice que la velocidad y la elongación están en cuadratura ya que están desfasados en 90 grados sexagesimales. Esto significa que la función que describe la elongación como se indica en la Figura 5, que generalmente es una función sinusoidal, se adelanta en un cuarto de ciclo, es decir, $\pi/2$ respecto a la función que describe la velocidad, que generalmente es una función cosenoidal.

Por otro lado, como se puede apreciar en la Figura 5, la aceleración está desfasada π radianes, es decir, 180 grados sexagesimales con respecto a la elongación, lo que significa que cuando la elongación alcanza su máximo valor, la aceleración alcanza su mínimo valor, y viceversa. La aceleración y la elongación están en oposición de fase [4].

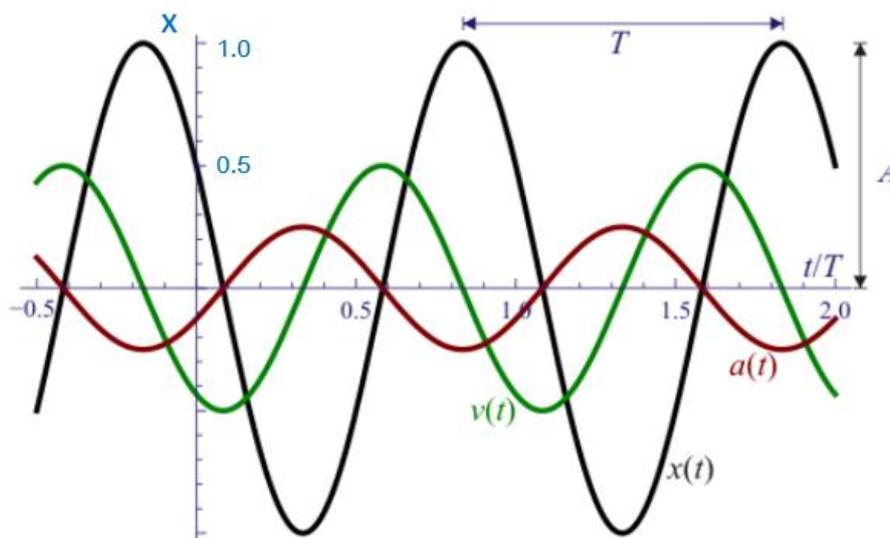


Figura 5 – Gráfica de la diferencia de fases entre las distintas magnitudes: en color negro se muestra la elongación, en color verde la velocidad y en color granate la aceleración [5].

3.1.2 Dinámica del MAS

En la dinámica del MAS, la fuerza que actúa sobre el objeto se conoce como fuerza de restauración, y su dirección es opuesta al desplazamiento del objeto desde su posición de equilibrio. La fuerza de restauración se puede expresar matemáticamente como [3][4]:

$$F = m \cdot \frac{d^2x}{dt^2} = -m\omega^2x = -Kx \quad (7)$$

Las fuerzas elásticas, por ejemplo, de un muelle son de este tipo. Por esta razón, las oscilaciones de la membrana de un altavoz cuando produce sonido, las de las partículas de aire al propagar ondas sonoras o las de una masa colgada de un muelle ya mencionado antes, siguen un MAS al separarse de su posición de equilibrio y volver a ella repetidamente.

Por tanto, la ecuación diferencial de la dinámica de un movimiento armónico simple es:

$$m \cdot \frac{d^2x}{dt^2} + m\omega^2x = 0 \quad (8)$$

o bien, dividiendo por m

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \omega^2x = 0 \quad (9)$$

donde

$$\omega^2 = \frac{K}{m} \quad (10)$$

Cuando se tiene una ecuación diferencial como la anterior, se puede utilizar una solución general de la forma:

$$x(t) = A \cdot \text{Sen}(\omega t + \varphi) \quad (11)$$

Donde A es la amplitud del movimiento y φ es la fase inicial del movimiento. El parámetro ω se puede calcular utilizando la relación $\omega^2 = K/m$, donde **K** es la constante del resorte del sistema.

Para encontrar los valores de **A** y φ , es necesario conocer las condiciones iniciales del movimiento, es decir, la posición inicial y la velocidad inicial del objeto. En $t=0$, la posición y la velocidad del objeto son:

$$x(t = 0) = A \cdot \text{Sen}(\varphi) \quad (12)$$

$$v(t = 0) = A \cdot \omega \cdot \text{Cos}(\varphi) \quad (13)$$

3.1.3 Energía del MAS

En el movimiento armónico simple (MAS), debido a cambios en la velocidad y la aceleración, hay una transferencia de energía entre la energía cinética y la energía potencial elástica del objeto [6].

La energía cinética del objeto se define como la energía asociada con el movimiento del objeto, y se puede expresar como:

$$E_c = m \cdot \frac{v^2}{2} \quad (14)$$

donde m es la masa del objeto y v es su velocidad.

La energía potencial elástica del objeto se define como la energía almacenada en un objeto debido a su deformación elástica, y se puede expresar como:

$$U = - \int F \cdot dx = \int K \cdot x \cdot dx = \frac{K \cdot x^2}{2} \quad (15)$$

donde k es la constante elástica del objeto y x es la elongación del resorte.

Durante el MAS, como puede ser observado en la Figura 6, el objeto se deforma y estira el resorte, almacenando energía potencial elástica en el proceso. Esta energía potencial y la velocidad alcanzan su valor máximo en los puntos extremos de la trayectoria del objeto, y es cero en la posición de equilibrio, ya que el objeto oscila de manera sinusoidal.

La energía total del objeto en movimiento, es la suma de su energía cinética y su energía potencial elástica y se puede representar como:

$$E_m = U + E_c = \frac{1}{2}Kx^2 + \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}KA^2\text{sen}^2(\omega t + \varphi) + \frac{1}{2}m\omega^2A^2 \quad (16)$$

En el MAS, la energía total del objeto es constante y se conserva, lo que significa que la energía total del objeto no cambia con el tiempo. Esto se debe a que la fuerza restauradora que actúa sobre el objeto es conservativa, lo que significa que el trabajo realizado por la fuerza en un ciclo completo es cero. En consecuencia, la energía del objeto se transfiere de la energía potencial elástica a la energía cinética y viceversa, pero la energía total del objeto permanece constante. teniendo en cuenta que $k = m\omega^2$, entonces:

$$E = \frac{1}{2}KA^2 = \frac{1}{2}m\omega^2A^2 \quad (17)$$

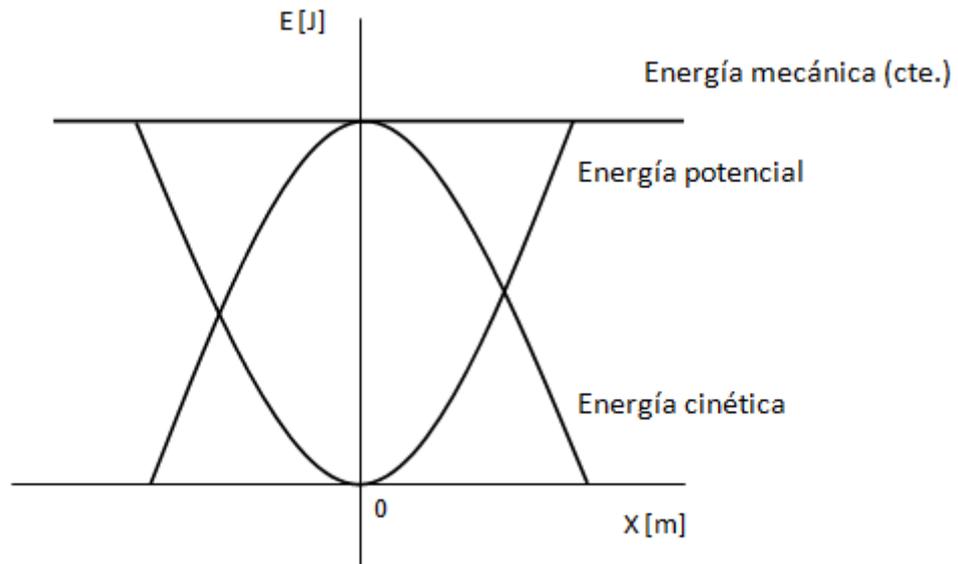


Figura 6 – Gráfica de conservación de la energía: en ella se observa la representación de las energías implicadas U , E_c y E_m en función de x , donde se aprecia como se conserva la energía [6].

3.2 Oscilaciones amortiguadas

El sistema de la Figura 7 está formado por un muelle de constante elástica k y una partícula de masa m que se mueve sobre el eje de las Y . Supongamos que en el instante inicial la partícula se encuentra en reposo en la posición de equilibrio del muelle.

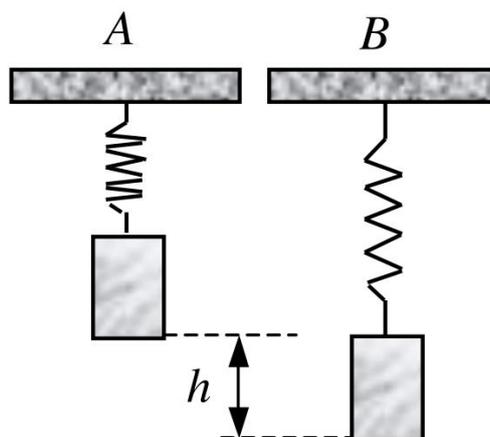


Figura 7 – Oscilaciones verticales de una masa colgada de un muelle [7].

Consideremos una situación más realista en la que haya algún tipo de fricción entre la partícula y su soporte, lo que hace que el sistema ya no sea conservativo. Si la fricción es pequeña, la partícula y su soporte, lo que hace que el sistema ya no sea conservativo. Si la fricción es pequeña, la partícula oscilará alrededor de su posición de equilibrio, pero perderá energía en cada ciclo debido a la fricción hasta detener su movimiento.

Este tipo de movimiento se conoce como oscilaciones amortiguadas y su análisis puede ser bastante complicado dependiendo del tipo de fricción que se considere. En el caso más simple, consideraremos la fricción viscosa del tipo $f = -cv$, donde c es el coeficiente de fricción viscosa y v es la velocidad. En este caso, la ecuación dinámica del movimiento es [7] [4]:

$$F + f = -Kx - c \frac{dx}{dt} = m \frac{dx^2}{dt^2} \quad (18)$$

Si agrupamos términos, obtenemos:

$$m \frac{dx^2}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} + Kx = 0 \quad (19)$$

Esta es la ecuación correspondiente a las oscilaciones amortiguadas. Si dividimos ambos lados de la ecuación por m y llamamos $\lambda = c/2m$, podemos escribir la ecuación como:

$$\frac{dx^2}{dt^2} + 2\lambda \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = 0 \quad (20)$$

A λ se le llama factor de amortiguamiento. Por otra parte ω_0 es la pulsación de las oscilaciones sin rozamiento, es decir:

$$\omega_0^2 = \frac{K}{m} \quad (21)$$

Como se indica en la Figura 8, si el factor de amortiguamiento es suficientemente pequeño para que $\lambda < \omega_0$, entonces la solución se denomina subamortiguada y se expresa de la siguiente manera:

$$x(t) = Ae^{-\lambda t} \text{sen}(\omega_1 t + \varphi) \quad (22)$$

Por otro lado, como se aprecia en la Figura 8, si el factor de amortiguamiento es suficientemente pequeño para que $\lambda > \omega_0$, entonces la solución se denomina sobreamortiguada y se expresa de la siguiente manera:

$$x(t) = A_1 e^{-\lambda_1 t} + A_2 e^{-\lambda_2 t} \quad (23)$$

Por último, se puede observar en la Figura 8 que si el factor de amortiguamiento es suficientemente pequeño para que $\lambda = \omega_0$, entonces la solución se denomina amortiguamiento crítico y se expresa de la siguiente manera:

$$x(t) = (A + Bt)e^{-\lambda t} \text{sen}(\omega_0 t + \varphi) \quad (24)$$

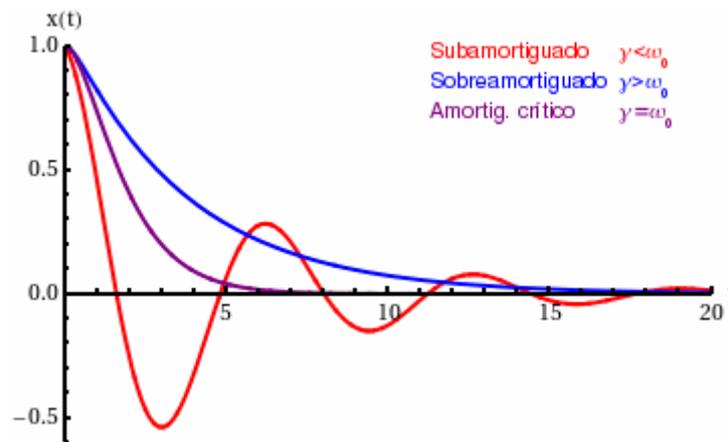


Figura 8 – Régimen transitorio: en rojo se observa un sistema oscilatorio subamortiguado, en azul se observa un sistema oscilatorio sobreamortiguado y en morado se observa un sistema oscilatorio con amortiguamiento crítico [10].

3.3 Oscilaciones forzadas

3.3.1 Ecuación diferencial

La ecuación diferencial de la dinámica de las oscilaciones forzadas describe el comportamiento de un sistema oscilatorio cuando se le aplica una fuerza externa periódica. Su ecuación dinámica es una ecuación diferencial de segundo orden, que relaciona la posición del sistema, su velocidad y su aceleración con los parámetros del sistema y la fuerza externa [8].

La ecuación diferencial de la dinámica de las oscilaciones forzadas se puede escribir de la siguiente manera:

$$F(t) = m \frac{d^2 x}{dt^2} + b \frac{dx}{dt} + kx \quad (25)$$

Siendo **m** es la masa del sistema.

c es el coeficiente de amortiguamiento, que representa la cantidad de energía disipada por unidad de velocidad debido a la fricción y otras fuerzas de disipación.

k es la constante elástica del sistema, que representa la fuerza restauradora que se opone al movimiento.

x es la posición del sistema en el tiempo **t**.

F(t) es la fuerza externa periódica que se aplica al sistema en el tiempo.

La solución de esta ecuación depende de las propiedades específicas del sistema y de la naturaleza de la fuerza externa aplicada. Si la frecuencia de la fuerza externa o forzadora coincide

con la frecuencia natural del sistema, se produce un fenómeno importante denominado **resonancia**, que puede llegar a generar valores de amplitud muy elevados en ciertas condiciones [8].

3.3.2 Régimen permanente

El régimen permanente en las oscilaciones forzadas, como se representa en la Figura 9, se refiere al estado estable del sistema oscilatorio después de que se ha estabilizado en una solución periódica [8]. En este estado, la amplitud, la frecuencia y la fase de la oscilación se mantienen constantes y se repiten periódicamente en el tiempo. En el proyecto se han realizado las medidas en régimen permanente, despreciando la fase transitoria inicial [8].

$$x_p(t) = D \operatorname{sen}(\omega t + \varphi) \quad (26)$$

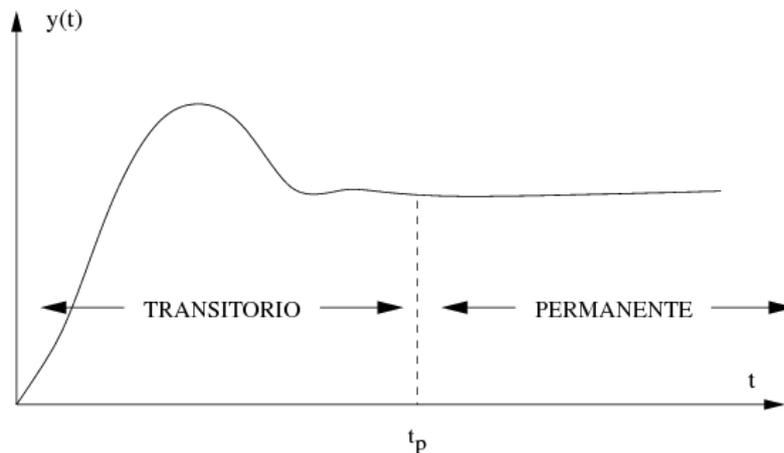


Figura 9 – Partes transitoria y permanente de la salida de un sistema [11].

La amplitud **D** depende tanto de la frecuencia de la fuerza aplicada como de su amplitud; también es diferente según las características del sistema oscilante. La relación entre **D** y las variables implicadas ($F_0, \omega, \omega_0, m, \lambda$) es la siguiente:

$$D = \frac{F_0}{m} = \frac{1}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\omega^2\lambda^2}} \quad (27)$$

En la ecuación (26) aparece un MAS con la pulsación de la fuerza aplicada y una amplitud que viene dada por (27). También aparece una fase inicial, φ , cuyo valor es:

$$\varphi = \operatorname{arc\,tg}\left(\frac{2\omega\lambda}{\omega_0^2 - \omega^2}\right) \quad (28)$$

3.3.3 Modos de vibración

Los edificios pueden vibrar de diferentes maneras debido a la acción de las fuerzas sísmicas u otras fuerzas externas, lo que se conoce como modos de vibración. Cada modo de vibración se caracteriza por una frecuencia natural y una forma particular de movimiento.

Cada edificio tiene sus propios modos de vibración naturales, que dependen de factores como la altura, la geometría y la rigidez de la estructura. A continuación, se describen brevemente los modos de vibración más comunes que puede sufrir un edificio.

1. **Modo de vibración fundamental:** Es el modo de vibración con la menor frecuencia natural de un edificio. En este modo, todo el edificio se mueve como una sola masa, desplazándose principalmente en la dirección vertical [12] [13].
2. **Modo de vibración torsional:** En este modo, el edificio gira alrededor de su eje vertical central, como si fuera una torsión. Este modo de vibración es común en edificios con una forma simétrica y una planta cuadrada o rectangular [12] [13].
3. **Modo de vibración de flexión lateral:** En este modo, el edificio se flexiona hacia un lado y hacia el otro, en un plano perpendicular a su eje longitudinal. Este modo es común en edificios altos y delgados, como torres [12] [13].
4. **Modo de vibración de torsión combinado con flexión lateral:** En este modo, el edificio combina la torsión alrededor de su eje vertical con la flexión lateral en un plano perpendicular a su eje longitudinal. Este modo es común en edificios con formas complejas o irregulares [12] [13].
5. **Modo de vibración de torsión combinado con flexión en diagonal:** En este modo, el edificio se somete a una torsión alrededor de su eje vertical combinada con una flexión en diagonal. Este modo es común en edificios con formas en “V” o en “L” [12] [13].
6. **Modo de vibración de torsión y flexión en diagonal combinados:** En este modo, el edificio se somete a una torsión alrededor de su eje vertical combinada con una flexión en diagonal, en un plano perpendicular a su eje longitudinal. Este modo es común en edificios con formas complejas y simétricas [12] [13].

Es importante tener en cuenta que los edificios pueden sufrir una combinación de modos de vibración simultáneamente, lo que puede afectar la estabilidad de la estructura y al confort de los usuarios.

Por esta razón, los ingenieros estructurales realizan análisis detallados de los modos de vibración de los edificios y toman medidas para mitigar los efectos de la vibración, como la instalación de amortiguadores y dispositivos de disipación de energía. En la Figura 10, se puede apreciar la manera en que actúan los tres principales modos de vibración.

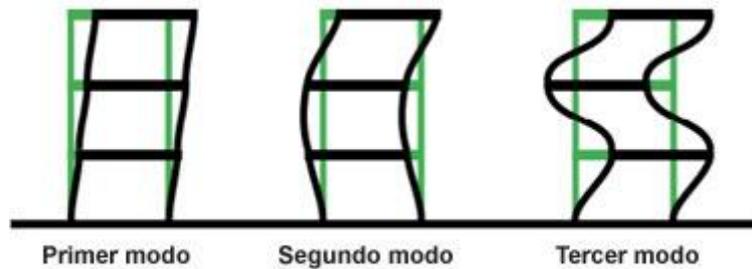


Figura 10 – Principales modos de vibración en edificación: el primer modo corresponde con el modo de vibración fundamental, el segundo modo corresponde con el modo de vibración torsional y el tercer modo corresponde con el modo de vibración de torsión combinado con flexión lateral [12].

3.4 Medición de vibraciones

La magnitud primaria para medir vibraciones es la aceleración. La aceleración instantánea se refiere al cambio de velocidad de un objeto a lo largo del tiempo y se expresa en (m/s²) en el sistema internacional de medida. Para medir la intensidad de la aceleración instantánea se definen una serie de parámetros [9]:

- **Valor eficaz o valor RMS:**

$$a_{ef} = \frac{1}{\sqrt{2}} a_{pico} \quad (29)$$

- **Aceleración continua equivalente**

$$a_{eq}(T) = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T a^2(t) dt} \quad (30)$$

- **Valor máximo de pico:** Es el valor más alto alcanzado por una señal en su ciclo completo de oscilación. En el contexto de las ondas o señales periódicas, como las señales eléctricas o las vibraciones, el valor de pico máximo representa la amplitud máxima de la señal, es decir, la distancia desde el punto cero hasta el punto más alto o más bajo de la oscilación.
- **Factor de cresta:** El factor de cresta es una relación que compara el valor de pico máximo de una señal con su valor eficaz. Se calcula dividiendo el valor de pico máximo por el valor eficaz de la señal. Es útil para comprender la forma de la señal y cuán puntiaguda es en comparación con su valor promedio.

En el estudio de vibraciones, la aceleración se analiza de tres formas distintas, dependiendo de si se trata de un sistema mano-brazo como en la Figura 11, un sistema de cuerpo completo como en la Figura 12 donde se aprecia un agricultor sometido a las vibraciones producidas por la maquinaria que conduce, o en una edificación como en la Figura 13.



Figura 11 – Vibraciones en sistema mano-brazo: albañil sometido a las vibraciones de un taladro [14].



Figura 12 – Vibraciones en cuerpo completo: agricultor sometido a las vibraciones producidas por la maquinaria que conduce [15].

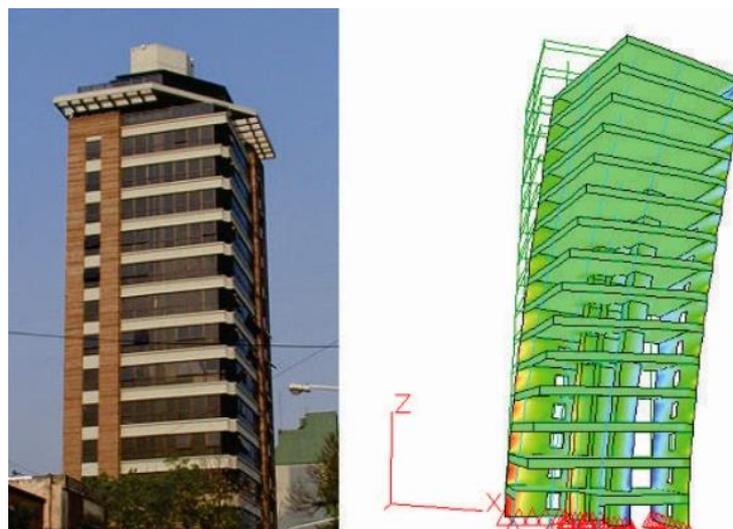


Figura 13 – Vibraciones en edificación [16].

3.4.1 Parámetros de estudio

Para el estudio de vibraciones es necesario tener en cuenta ciertos parámetros que permiten la evaluación más precisa de la influencia de las vibraciones en las personas y edificaciones. Estos parámetros de estudio son [9]:

- **La aceleración eficaz, ponderada**, utilizando los valores designados en la Tabla 2 como w_k para el eje Z, mientras tanto, la ajustamos con los valores de w_d para los ejes X, Y.

Frecuencia f Hz	w_k		w_d	
	factor $\times 1\ 000$	dB	factor $\times 1\ 000$	dB
0,02				
0,025				
0,031 5				
0,04				
0,05				
0,063				
0,08				
0,1	31,2	-30,11	62,4	-24,09
0,125	48,6	-26,26	97,3	-20,24
0,16	79,0	-22,05	158	-16,01
0,2	121	-18,33	243	-12,28
0,25	182	-14,81	365	-8,75
0,315	263	-11,60	530	-5,52
0,4	352	-9,07	713	-2,94
0,5	418	-7,57	853	-1,38
0,63	459	-6,77	944	-0,50
0,8	477	-6,43	992	-0,07
1	482	-6,33	1 011	0,10
1,25	484	-6,29	1 008	0,07
1,6	494	-6,12	968	-0,28
2	531	-5,49	890	-1,01
2,5	631	-4,01	776	-2,20
3,15	804	-1,90	642	-3,85
4	967	-0,29	512	-5,82
5	1 039	-0,33	409	-7,76
6,3	1 054	-0,46	323	-9,81
8	1 036	-0,31	253	-11,93
10	988	-0,10	212	-13,91
12,5	902	-0,89	161	-15,87
16	768	-2,28	125	-18,03
20	636	-3,93	100	-19,99
25	513	-5,80	80,0	-21,94
31,5	405	-7,86	63,2	-23,98
40	314	-10,05	49,4	-26,13
50	246	-12,19	38,8	-28,22
63	186	-14,61	29,5	-30,60
80	132	-17,56	21,1	-33,53
100	88,7	-21,04	14,1	-36,99
125	54,0	-25,35	8,63	-41,28
160	28,5	-30,91	4,55	-46,84
200	15,2	-36,38	2,43	-52,30
250	7,90	-42,04	1,26	-57,97
315	3,98	-48,00	0,64	-63,92
400	1,95	-54,20	0,31	-70,12

Tabla 2 – Tabla de factor ponderación (w_k, w_d) [9].

- **La aceleración eficaz ponderada total para cada eje, a_w** , calculada utilizando la siguiente ecuación:

$$a_w = \left[\sum_i (w_i a_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (31)$$

- a_w es la aceleración eficaz ponderada en m/s^2
 - w_i es el factor de ponderación para la banda i -ésima de un tercio de octava.
 a_i es la aceleración eficaz para la banda i -ésima de tercio de octava.
-
- El valor de aceleración eficaz global ponderado para vibraciones medidas en ejes ortogonales, a_v , calculada como:

$$a_v = (k_x^2 a_{wx}^2 + k_y^2 a_{wy}^2 + k_z^2 a_{wz}^2)^{\frac{1}{2}} \quad (32)$$

- a_{wx} , a_{wy} , a_{wz} son las aceleraciones globales ponderadas respecto a los ejes (X, Y, Z) respectivamente.
- k_x , k_y , k_z son factores de multiplicación.

3.4.2 Criterio de evaluación de las vibraciones

Según la Directiva 2002/44/CE del Parlamento Europeo e ISO2631-1, el criterio de evaluación de las vibraciones se basa en calcular la aceleración eficaz ponderada en frecuencia referida a 8 horas “**A(8)**” en cada uno de los tres ejes del sistema ortogonal (X, Y, Z), y luego comparar estos valores con umbrales de acción y límites preestablecidos [9].

El cálculo de la aceleración eficaz ponderada en frecuencia referida a 8 horas se adapta según si las vibraciones afectan al sistema mano-brazo, al cuerpo completo o a una edificación y también varía si se analiza una sola operación o múltiples operaciones a lo largo del tiempo [9]. Por otra parte, esta metodología personalizada asegura que los efectos de las vibraciones se evalúen de manera precisa y consideren la exposición real a lo largo de la jornada laboral.

3.4.2.1 Vibraciones en sistema mano-brazo

Para el cálculo de la aceleración eficaz ponderada en frecuencia referida a 8 horas “**A(8)**” en un sistema mano-brazo se tendrá en cuenta si se considera una sola operación o varias [9].

Si se considera una sola operación, se considerarán las bandas de tercio de octava cuya frecuencia central esté comprendida entre 6,3 Hz y 1250 Hz, y se utilizará la siguiente ecuación:

$$A(\mathbf{8}) = a_v \sqrt{\frac{T}{\mathbf{8}}} \quad (33)$$

Por otro lado, si se consideran varias operaciones, es decir, se realizan varias tareas, se considerarán las bandas de tercio de octava cuya frecuencia central esté comprendida entre 6,3 Hz y 1250 Hz, y se calculará el valor de $A(\mathbf{8})$ para cada tarea. Posteriormente se calculará el valor global mediante la siguiente ecuación:

$$A(\mathbf{8}) = \sqrt{\sum_{j=1}^n A_j(\mathbf{8})^2} \quad (34)$$

3.4.2.2 Vibraciones transmitidas a todo el cuerpo

Para el cálculo de la aceleración eficaz ponderada en frecuencia referida a 8 horas $A(\mathbf{8})$ en un sistema mano-brazo se tendrá en cuenta si se considera una sola operación o varias [9].

Si se considera una sola operación, se establece un rango de frecuencias comprendido entre 1Hz y 80 Hz. Para este tipo de oscilaciones, los efectos adversos no solo cambian de acuerdo con la frecuencia, sino que también, en una misma frecuencia, están condicionados por la orientación. Por tanto, se incorpora el coeficiente de ponderación k_i , que se relaciona con cada uno de los tres ejes (X, Y, Z).

Para la evaluación es necesario calcular el valor de $A(\mathbf{8})$ en cada uno de los ejes (X, Y, Z) y seleccionar el valor más alto entre éstos, haciendo uso de la siguiente ecuación:

$$A(\mathbf{8}) = k_i a_{w,T} \sqrt{\frac{T}{\mathbf{8}}} \quad (35)$$

$$A(\mathbf{8}) = \max[A_x(\mathbf{8}), A_y(\mathbf{8}), A_z(\mathbf{8})] \quad (36)$$

Por otro lado, si se consideran varias operaciones, es decir, se realizan varias tareas, se calculará el valor de $A(\mathbf{8})$ en cada uno de los ejes (X, Y, Z) para cada tarea y se calcula el valor global en cada eje. Seguidamente, se selecciona el valor más alto entre éstos:

$$A_i = \sqrt{\sum_{j=1}^n A_{ij}(\mathbf{8})^2} \quad (37)$$

3.4.2.3 Vibraciones en edificación

Cuando se trata de vibraciones en una edificación como sucede en nuestro estudio, el parámetro utilizado para la evaluación es el índice de vibración, conocido también como L_{aw} . Este índice está asociado a los efectos negativos producidos por las vibraciones. Su utilidad radica en la evaluación de los niveles máximos de vibración durante el período de evaluación en el interior de la edificación [9].

Existen dos valores de referencia que resultan esenciales, siendo 72 dBW como máximo en centros educativos y hospitales, y 75 dBW en entornos residenciales.

Para calcular el valor de L_{aw} se utiliza la siguiente ecuación:

$$L_{aw} = 20 \log \left(\frac{a_w}{a_0} \right) \quad (38)$$

- a_w es el valor máximo de la aceleración eficaz ponderada.
- a_0 es el valor de referencia 10^{-6} (m/s²).

El factor de ponderación w se aplica a las frecuencias centrales de las bandas de tercio de octava, tal y como se indica en la Tabla 3.

x	Frecuencia, Hz		W_{dB} Factor	W_{dB} dB
	Nominal	Verdadera		
-7	0,2	0,1995	0,0629	-24,02
-6	0,25	0,2512	0,0994	-20,05
-5	0,315	0,3162	0,156	-16,12
-4	0,4	0,3981	0,243	-12,29
-3	0,5	0,5012	0,368	-8,67
-2	0,63	0,6310	0,530	-5,51
-1	0,8	0,7943	0,700	-3,09
0	1	1,000	0,833	-1,59
1	1,25	1,259	0,907	-0,85
2	1,6	1,585	0,934	-0,59
3	2	1,995	0,932	-0,61
4	2,5	2,512	0,910	-0,82
5	3,15	3,162	0,872	-1,19
6	4	3,981	0,818	-1,74
7	5	5,012	0,750	-2,50
8	6,3	6,310	0,669	-3,49
9	8	7,943	0,582	-4,70
10	10	10,00	0,494	-6,12
11	12,5	12,59	0,411	-7,71
12	16	15,85	0,337	-9,44
13	20	19,95	0,274	-11,25
14	25	25,12	0,220	-13,14
15	31,5	31,62	0,176	-15,09
16	40	39,81	0,140	-17,10
17	50	50,12	0,109	-19,23
18	63	63,10	0,0834	-21,58
19	80	79,43	0,0604	-24,38
20	100	100,0	0,0401	-27,93
21	125	125,9	0,0241	-32,37
22	160	158,5	0,0133	-37,55
23	200	199,5	0,00694	-43,18
24	250	251,2	0,00354	-49,02
25	315	316,2	0,00179	-54,95
26	400	398,1	0,000899	-60,92

NOTA x es el número de la banda de frecuencias, de acuerdo con la Norma IEC 61260:1995.

Tabla 3 – Tabla de factor de ponderación W [9].

Capítulo 4 EQUIPOS Y MATERIALES

Durante el desarrollo de esta investigación, hemos hecho uso de una amplia gama de equipos y materiales cuidadosamente seleccionados. Estos elementos desempeñaron un papel crucial en la recopilación de datos, el análisis y la obtención de resultados significativos. Además, se destacará los aspectos técnicos que hacen que estos equipos sean adecuados para el tipo de estudio que se lleva a cabo, subrayando la importancia de la precisión y la consistencia en nuestros métodos.

4.1 Prototipo

Por una parte, se llevó a cabo la construcción de un prototipo a escala reducida de una estructura de 2 plantas de altura, en el que se va a simular el efecto de una vibración forzada que actuará sobre ésta.



Figura 14 - Prototipo empleado en el estudio.

Como se puede observar en la Figura 14, se ha utilizado una placa de PVC de color negro como forjado base de la construcción prototipo. Paralelamente, como pilares de la construcción, se ha utilizado varillas metálicas roscadas, para poder colocar los siguientes forjados a la distancia escala apropiada. En cuanto a los siguientes forjados, se ha utilizado placas de metacrilato transparente, para poder visualizar a través de los forjados con detalle lo que se pueda producir.

4.2 Emisor de vibraciones

Por otro lado, se ha ubicado estratégicamente un emisor de vibraciones en el prototipo a escala reducida. Como se observa en la Figura 15, este emisor está conectado a un generador de frecuencias, que sirve como fue de excitación controlada.

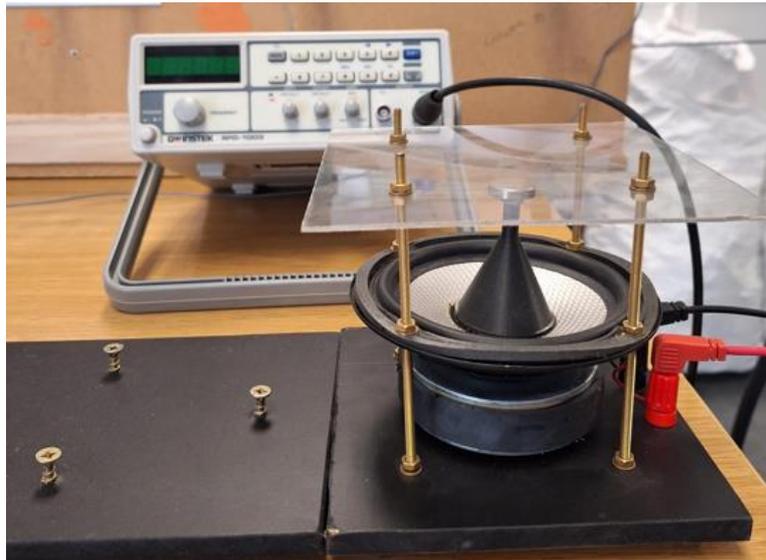


Figura 15 – Emisor de vibraciones conectado a generador de frecuencias.

La conexión directa entre el emisor y el generador de frecuencias proporciona una plataforma controlada para la aplicación de vibraciones a diferentes frecuencias y niveles de amplitud. Este enfoque sistemático permite estudiar de manera precisa cómo el prototipo responde a diferentes estímulos vibratorios, proporcionando información valiosa sobre la dinámica estructural.

4.3 Elementos elastómeros

Otro elemento a tener en cuenta es la utilización de elementos elastómeros. La Figura 16 captura de manera visual los elementos elastómeros, específicamente la goma de etilvinilacetato (EVA) y la espuma, que posteriormente serán estratégicamente emplazados en el prototipo a escala reducida durante el estudio. Estos elastómeros desempeñan un papel crucial como atenuadores de vibraciones, destinados a modular la respuesta dinámica del sistema frente a las excitaciones vibratorias generadas por el emisor de vibraciones previamente mencionado.



Figura 16 – Elementos elastómeros (goma EVA y espuma).

En la Figura 16, se distinguen claramente los elementos elastómeros empleados en la investigación para mitigar el efecto de las vibraciones. A la izquierda, se exhiben los elastómeros de goma EVA, mientras que a la derecha se presentan los elastómeros de espuma de polietileno.

4.4 Plataformas de medida

Por último, para el estudio se han medido las vibraciones de dos maneras. Primeramente, a partir de la aplicación para móvil Phyphox y posteriormente, utilizando el software PULSE, que nos ayudará a tomar medidas precisas. De esta forma, se podrá contrastar ambos resultados y hacer un análisis más preciso.

4.4.1 Phyphox



Figura 17 – Logo de la aplicación Phyphox.



Figura 18 – Captura de pantalla de la aplicación Phyphox en uso.

Como se puede observar en la Figura 17, Phypfox es una aplicación para móvil que permite realizar mediciones que se pueden realizar en tiempo real, utilizando los sensores integrados en el dispositivo, como el acelerómetro. De esta manera se es capaz de obtener datos sin procesar del llamado acelerómetro lineal, que proporciona la aceleración real sin la aceleración gravitacional como se puede observar en la Figura 18. Esta plataforma tiene la capacidad de realizar cambios de aceleración en los tres ejes (X, Y, Z) con gran fiabilidad. Los valores que se obtendrán relacionados con la aplicación, son valores de aceleración en serie temporal, es decir, cómo va evolucionando la aceleración durante un periodo de tiempo. Se debe trasladar estos datos a un espectro de frecuencia ya que la normativa marca la ponderación relacionada con los valores de frecuencia medidos. Para ello, se ha aplicado la transformada de Fourier a los datos exportados de la aplicación, permitiendo así, análisis de los resultados mediante las herramientas Excel desarrolladas para ello.

4.4.2 PULSE

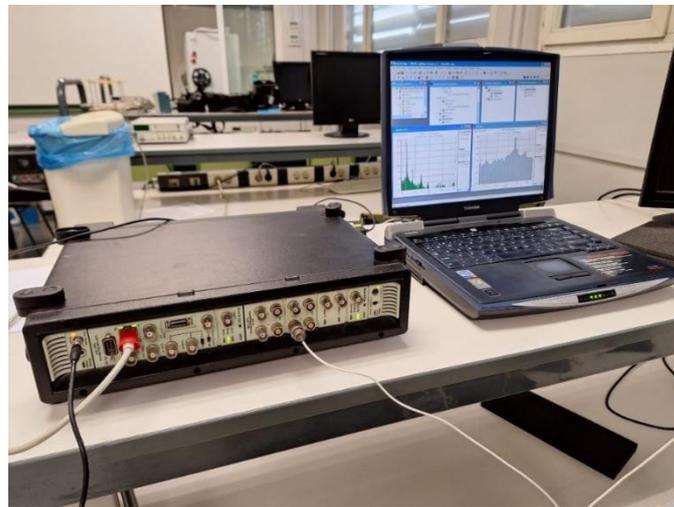


Figura 19 – Software PULSE y amplificador.

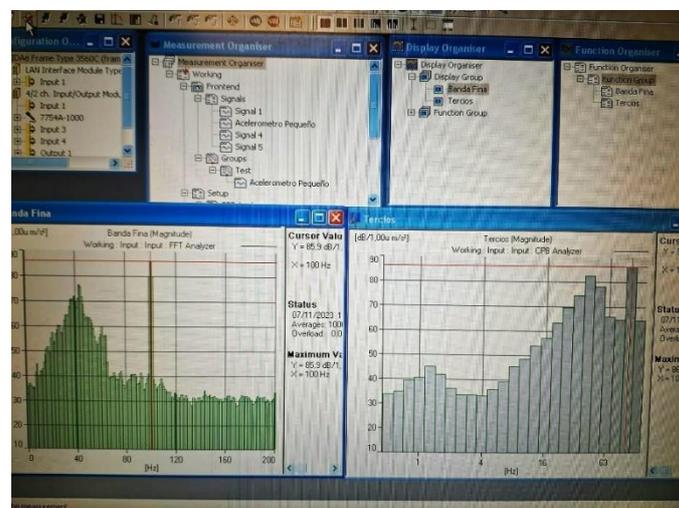


Figura 20 – Captura de medición con PULSE.

En la Figura 19 se aprecian nuevos elementos para la realización de mediciones más precisas y de gran fiabilidad. Se puede observar en la parte derecha el software PULSE en el PC, que permite conectar diferentes sensores y dispositivos de medición, como acelerómetros piezoeléctricos, a través de interfaces de hardware. Estos sensores capturan las señales de vibración y sonido en el entorno que se desea analizar y los representa en bandas de tercios de octava o banda fina según la elección requerida como se observa en las gráficas en la Figura 20. Por otro lado, a la izquierda del PULSE, se puede ver el amplificador utilizado para amplificar la señal captada por el acelerómetro piezoeléctrico. Posteriormente a haber capturado los datos necesarios mediante PULSE, se ha exportado los datos al programa Matlab, a través del cual representaremos los datos en gráficas para poder analizar los resultados.



Figura 21 – Acelerómetro piezoeléctrico.

Un acelerómetro piezoeléctrico, como el que se indica en la Figura 21, es un tipo de sensor que se ha utilizado para medir aceleraciones o vibraciones durante el estudio. Su funcionamiento se basa en el principio piezoeléctrico, que es la propiedad de ciertos materiales de generar una carga eléctrica en respuesta a una fuerza mecánica aplicada.

Capítulo 5 ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este apartado se irá exponiendo los distintos resultados obtenidos mediante ambas herramientas, Phyphox, una plataforma móvil y por otro lado, PULSE, una plataforma profesional de precisión. En esta evaluación se determinará el eje predominante desde el cual se realizará un análisis exhaustivo de las medidas, se evaluará el efecto de la altura, la relevancia del emplazamiento del elemento elastómero y la importancia del material del cual está hecho el elemento elastómero.

5.1 Determinación del eje predominante

Determinar el eje crítico o predominante en una estructura es un proceso que implica identificar la dirección o el eje en el cual las vibraciones tienen mayor amplitud. Es importante porque proporciona información clave para el diseño y control efectivo de vibraciones.

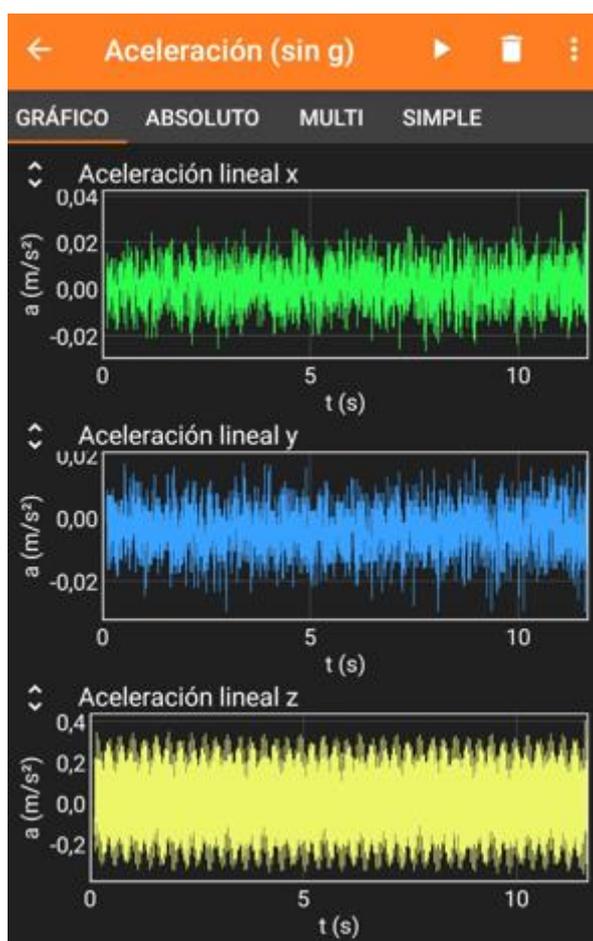


Figura 22 – Captura de pantalla de la aplicación Phyphox que muestra el eje predominante.

La Figura 22 corresponde con una captura de pantalla de la aplicación Phyphox después de haber tomado una medida en planta baja a una frecuencia de 40Hz. Se puede apreciar que el eje Z es el eje crítico o predominante ya que su amplitud medida en m/s^2 es mayor que en el resto de ejes. Para el control de vibraciones será útil esta información, ya que, a partir del conocimiento

de dicho eje, se implementarán los dispositivos de amortiguación para reducir las vibraciones indeseadas y se evaluará el índice de vibración de las medidas realizadas con Phyphox en base a este eje y de esta manera poder simplificar el estudio.

Por otro lado, para las medidas tomadas con PULSE no ha sido necesario averiguar cuál es eje predominante ya que es un aparato de medida monoaxial, es decir, cuantifica las oscilaciones a lo largo de una única dirección. Es interesante tratar con este sistema de medida cuando se trata de medir en un plano específico. Además, estos dispositivos están diseñados para proporcionar datos de alta fiabilidad y alta precisión.

5.2 Efecto de la frecuencia de trabajo y la altura

Por un lado, cuando una estructura es sometida a diferentes frecuencias de vibraciones, el índice de vibración puede ir variando debido a las características de la estructura y su comportamiento dinámico. El valor del índice de vibración dependerá de valores como el factor de amortiguamiento, la respuesta a frecuencias cercanas, el modo de vibración predominante que tenga el material o las condiciones de excitación.

Por otro lado, como se ha visto en la introducción teórica, el efecto de la altitud en un edificio influye en el comportamiento de las vibraciones que experimenta la estructura. Para comprender por qué el índice de vibración es más alto en las plantas más altas, es necesario considerar factores como la resonancia, la rigidez o la flexibilidad de la estructura.

Para este estudio, se ha tomado medidas con ambas plataformas de medición de vibraciones en cada una de las plantas con ambas herramientas, sometiendo la estructura a distintas frecuencias [40, 70, 100] Hz.

Para facilitar la visualización y el entendimiento de los resultados, se ha focalizado las medidas en un rango de frecuencias que va desde 20 Hz por debajo y 20 Hz por encima de la frecuencia origen.

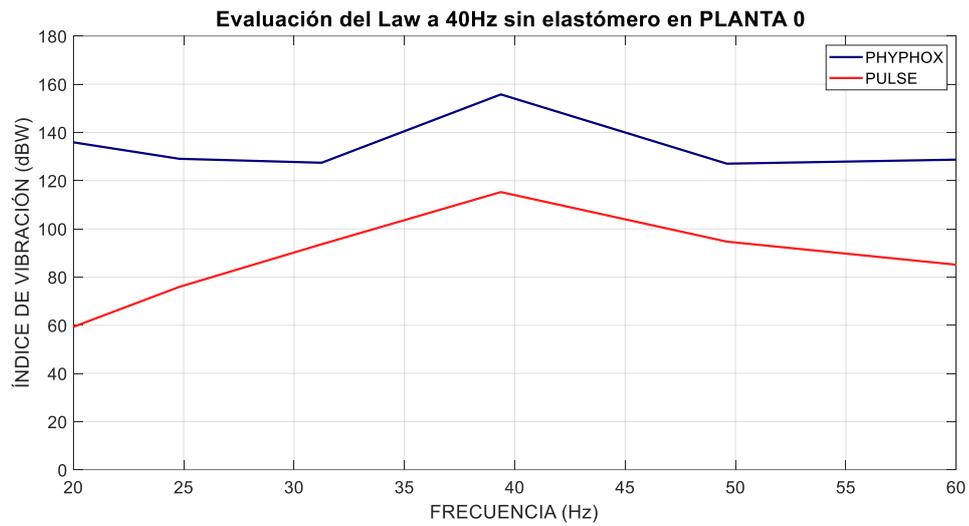


Figura 23 – Evaluación del Law a 40Hz sin elastómero en PLANTA 0.

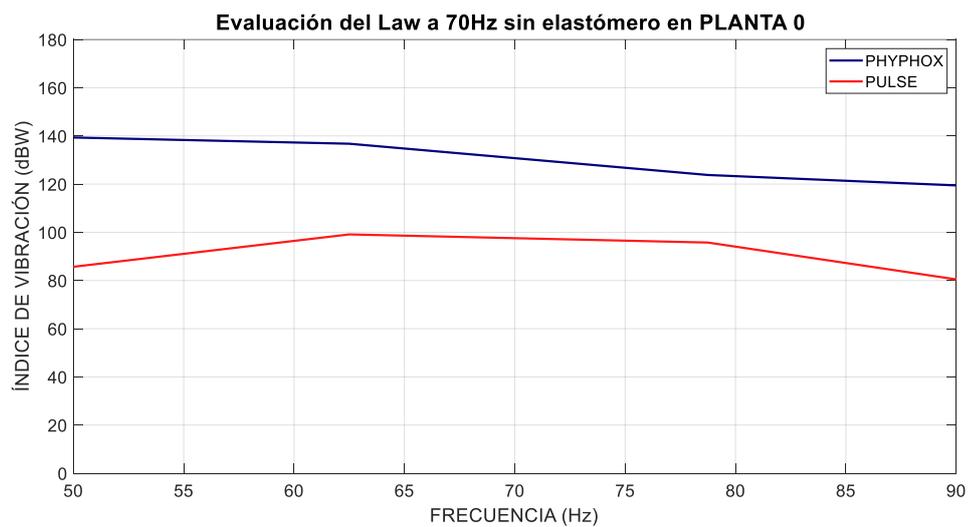


Figura 24 – Evaluación del Law a 70Hz sin elastómero en PLANTA 0.

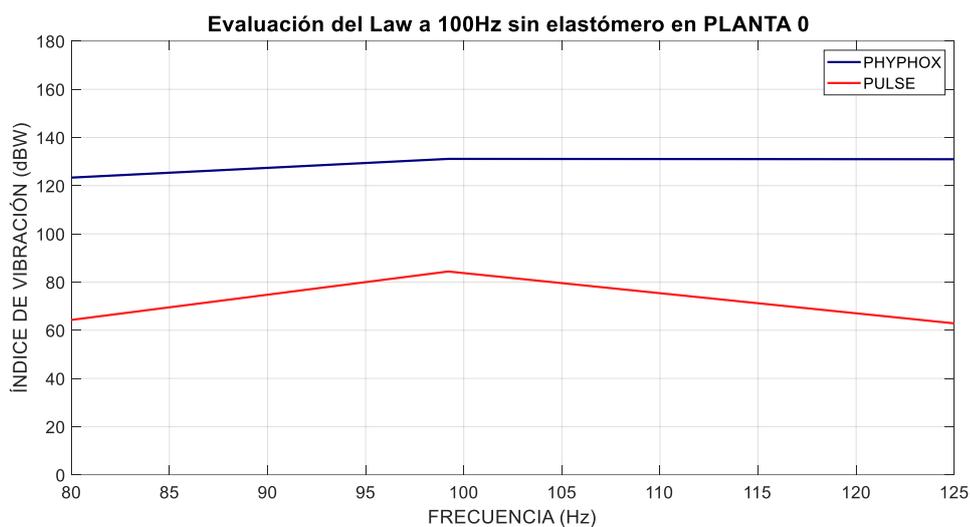


Figura 25 – Evaluación del Law a 100Hz sin elastómero en PLANTA 0.

EFFECTO DE LA FRECUENCIA	PULSE	PHYPHOX	ERROR PRECISIÓN	%
Law 40Hz PLANTA 0 (dBW)	115,3	157,8	42,5	26,9
Law 70Hz PLANTA 0 (dBW)	99,1	142,2	43,1	30,3
Law 100Hz PLANTA 0 (dBW)	84,4	148,3	63,9	43,1

Tabla 6 – Evaluación del efecto de la frecuencia.

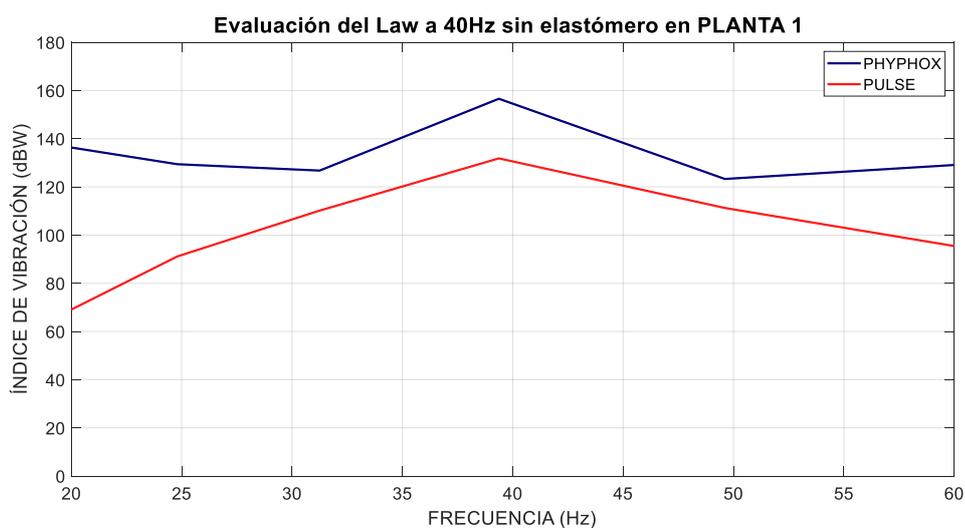


Figura 26 – Evaluación del Law a 40Hz sin elastómero en PLANTA 1.

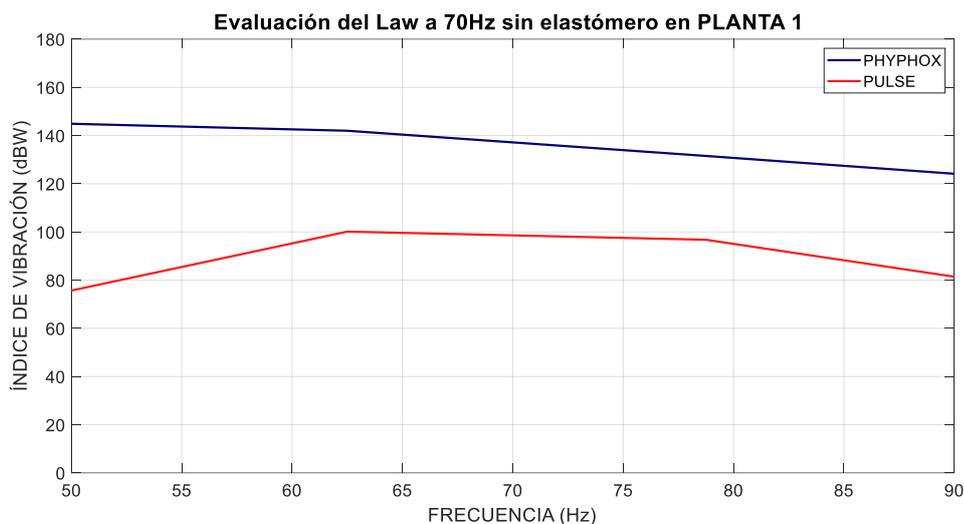


Figura 27 – Evaluación del Law a 70Hz sin elastómero en PLANTA 1.

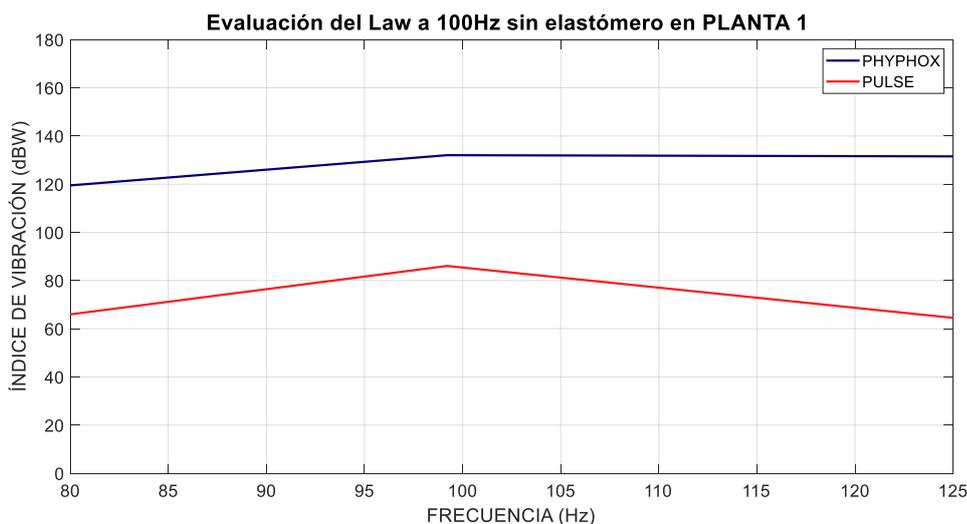


Figura 28 – Evaluación del Law a 100Hz sin elastómero en PLANTA 1.

EFEECTO DE LA FRECUENCIA	PULSE	PHYPHOX	ERROR PRECISIÓN	%
Law 40Hz PLANTA 1 (dBW)	131,8	157,9	26,1	16,5
Law 70Hz PLANTA 1 (dBW)	100,1	147,4	47,3	32,1
Law 100Hz PLANTA 1 (dBW)	86,1	148,4	62,3	42,0

Tabla 5 – Evaluación del efecto de la frecuencia.

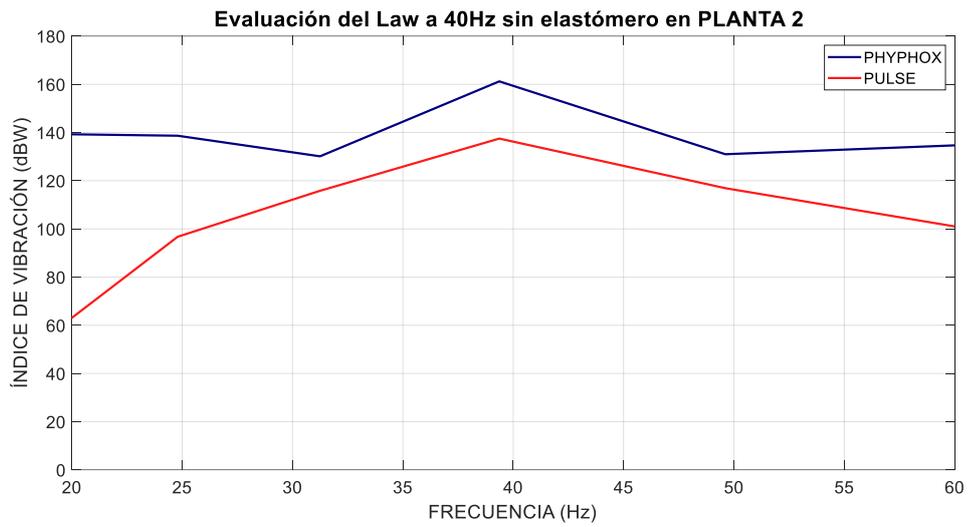


Figura 29 – Evaluación del Law a 40Hz sin elastómero en PLANTA 2.

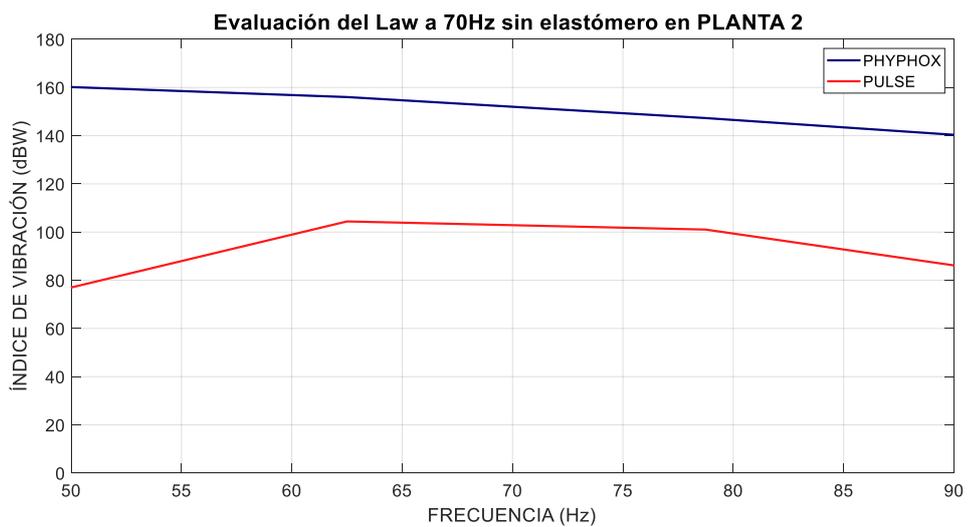


Figura 30 – Evaluación del Law a 70Hz sin elastómero en PLANTA 2.

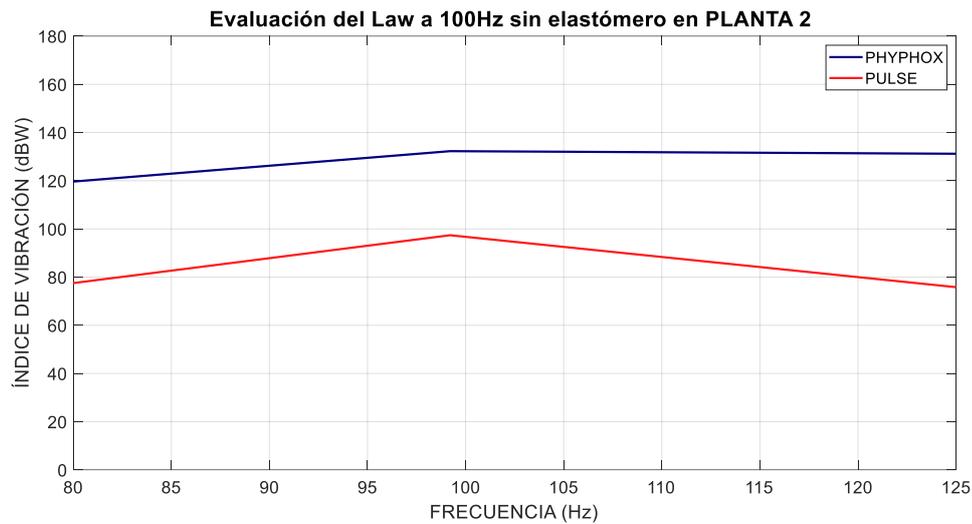


Figura 31 – Evaluación del Law a 100Hz sin elastómero en PLANTA 2.

EFECTO DE LA FRECUENCIA	PULSE	PHYPHOX	ERROR PRECISIÓN	%
L _{aw} 40Hz PLANTA 2 (dBW)	137,5	162,6	25,1	15,4
L _{aw} 70Hz PLANTA 2 (dBW)	104,4	162,4	58,0	35,7
L _{aw} 100Hz PLANTA 2 (dBW)	97,4	148,9	51,5	34,5

Tabla 4 – Evaluación del efecto de la frecuencia.

En base a los resultados medidos con Phyphox y PULSE, indicados en la Tabla 4, la Tabla 5 y la Tabla 6, el modo de vibración predominante ocurre a 40Hz, ya que se ha registrado un valor de índice de vibración mayor que en el resto de frecuencias. Aunque [40Hz<70Hz<100Hz], puede haber características específicas en la estructura que la hagan más sensible o receptiva a 40Hz. Del mismo modo, se observa que el porcentaje de error de precisión entre las medidas tomadas desde ambas plataformas es mucho menor en 40Hz, es decir, los sistemas de medidas funcionan con menor discrepancia donde la resonancia es más potente.

Por otro lado, en base a los resultados medidos con Phyphox y PULSE, se observa que la planta crítica es la PLANTA 2, es decir, se cumple que conforme se ha subido de planta, el índice de vibración se ha elevado más que en las plantas inferiores debido a que factores como la resonancia o la flexibilidad son mayores cuanto más altitud. De la misma forma, destaca la planta crítica por tener un porcentaje de error de precisión entre ambos sistemas de medida más bajo que en el resto de plantas.

Teniendo en cuenta que ya se ha averiguado el eje predominante, la frecuencia predominante y la planta crítica, de ahora en adelante, los resultados se focalizarán en las medidas tomadas a una frecuencia de 40Hz en la planta 2 en el eje Z.

5.3 Efecto del uso de elastómeros

A continuación, se va a evaluar la relevancia del emplazamiento del elastómero en la estructura y el material de éste utilizando ambas herramientas de medición de vibraciones. Para ello, se ha colocado el elemento elastómero en lugares estratégicos para conseguir reducir el índice de vibración lo máximo posible. Los materiales utilizados como atenuadores durante el estudio han sido planchas de espuma y de goma EVA. Para facilitar la visualización y el entendimiento de los resultados, se ha focalizado las medidas en el rango de frecuencias [20, 60] Hz.

5.3.1 Evaluación de la relevancia del emplazamiento del elastómero

En la búsqueda continua por mejorar la eficiencia y la seguridad de diversas estructuras, el control de vibraciones se ha convertido en un aspecto crucial en el campo de la ingeniería. Por esta razón, en esta investigación se explora la importancia del emplazamiento de los elementos elastómeros para atenuar de forma óptima el índice de vibración sometiendo la estructura a vibraciones, generando una frecuencia de 40Hz. Para las medidas de este estudio, se utilizarán únicamente planchas de espuma.

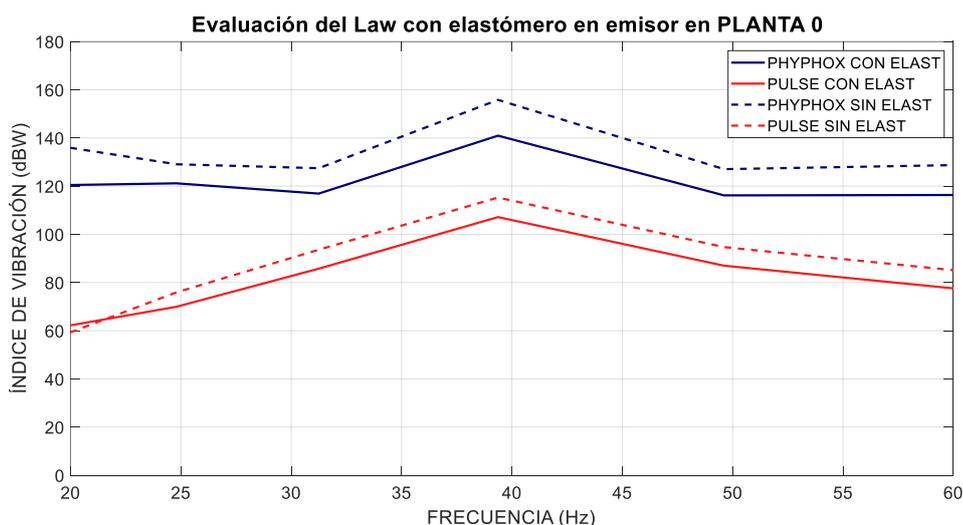


Figura 32 – Evaluación del Law con elastómero en emisor en PLANTA 0.

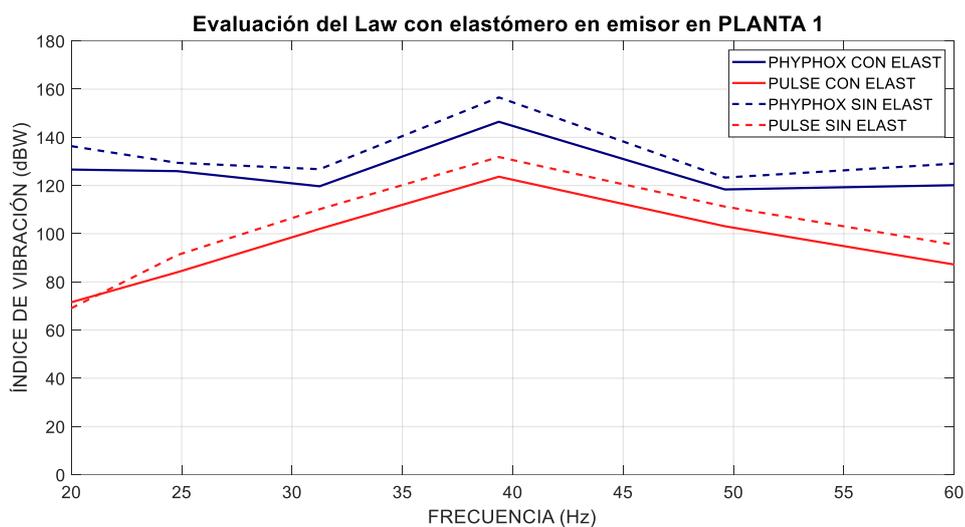


Figura 33 – Evaluación del Law con elastómero en emisor en PLANTA 1.

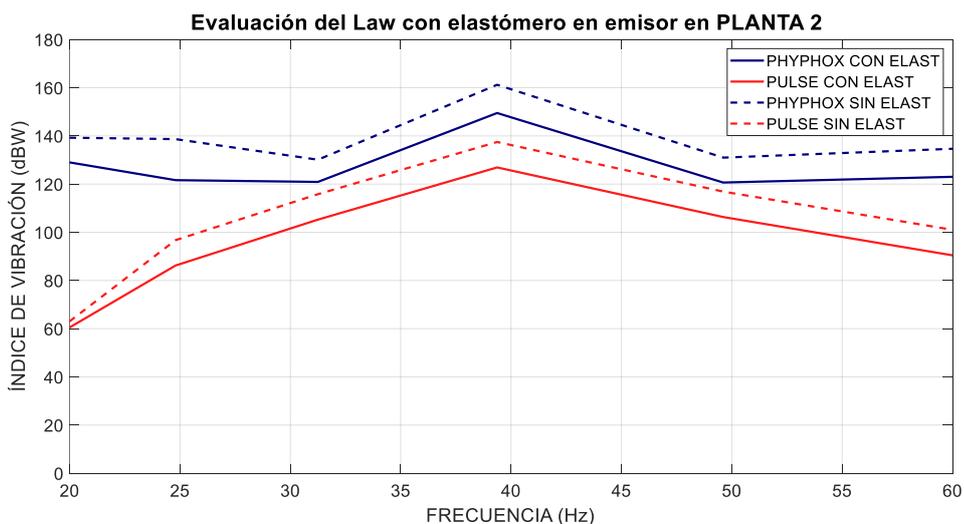


Figura 34 – Evaluación del Law con elastómero en emisor en PLANTA 2.

EMISOR	PULSE	PHYPHOX	Δ Law PULSE	Δ Law Phyphox	ERROR PRECISIÓN	%
Law PLANTA 0 (dBW)	107,1	142,6	8,2	15,2	35,5	24,9
Law PLANTA 1 (dBW)	123,7	147,5	8,1	10,4	23,8	16,1
Law PLANTA 2 (dBW)	126,9	150,4	10,6	12,2	23,5	15,6

Tabla 7 – Evaluación de la relevancia del emplazamiento del elastómero en emisor.

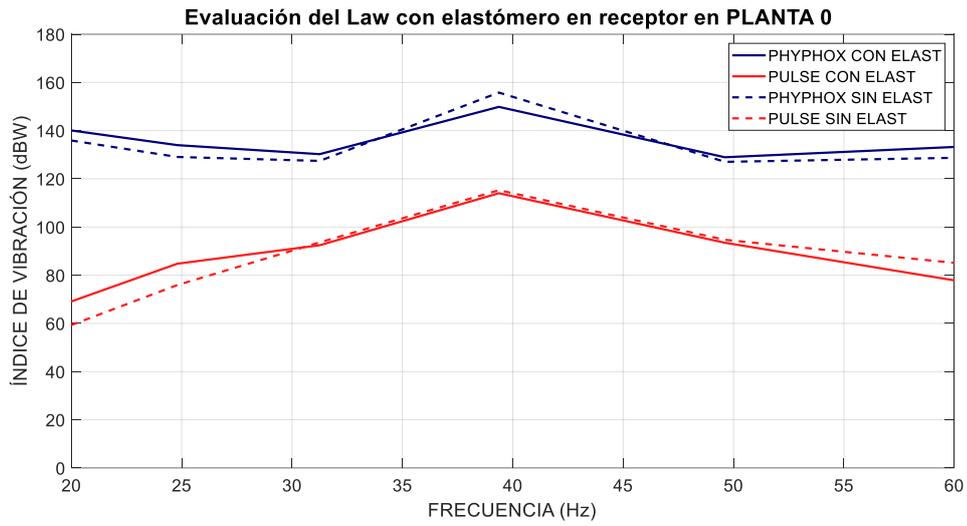


Figura 35 – Evaluación del Law con elastómero en receptor en PLANTA 0.

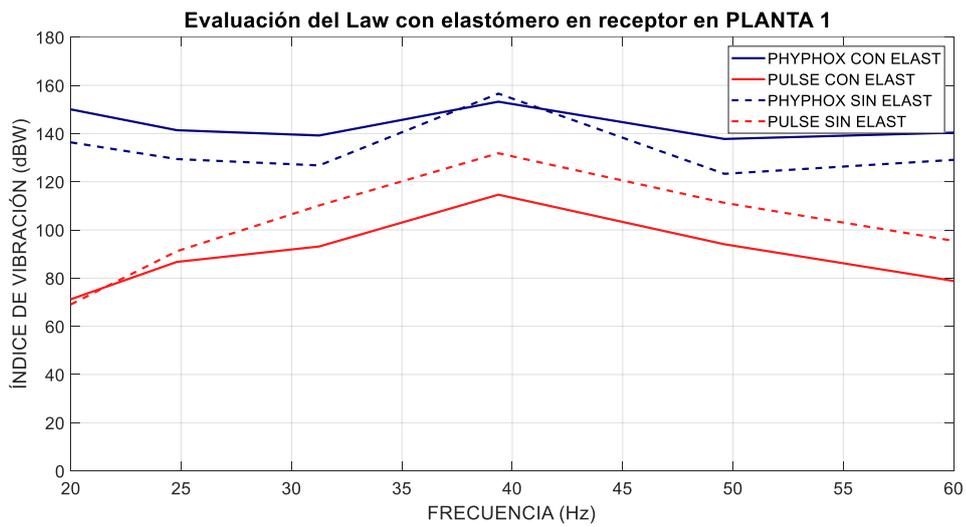


Figura 36 – Evaluación del Law con elastómero en receptor en PLANTA 1.

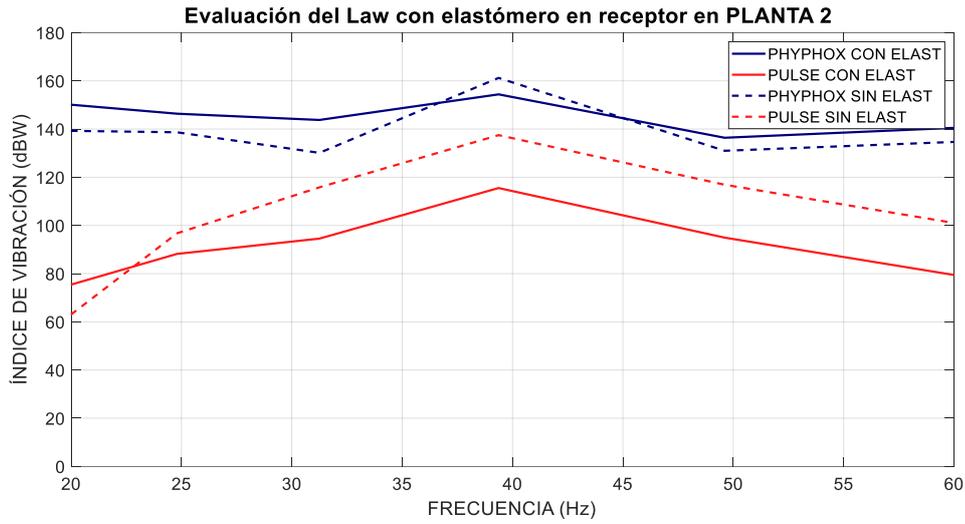


Figura 37 – Evaluación del Law con elastómero en receptor en PLANTA 2.

RECEPTOR	PULSE	PHYPHOX	Δ Law PULSE	Δ Law Phyphox	ERROR PRECISIÓN	%
Law PLANTA 0 (dBW)	114	152,8	1,3	5	38,8	25,4
Law PLANTA 1 (dBW)	114,6	158,4	17,2	-0.5	43,8	27,6
Law PLANTA 2 (dBW)	115,3	160,2	22,2	2,4	44,9	28,0

Tabla 8 – Evaluación de la relevancia del emplazamiento del elastómero en receptor.

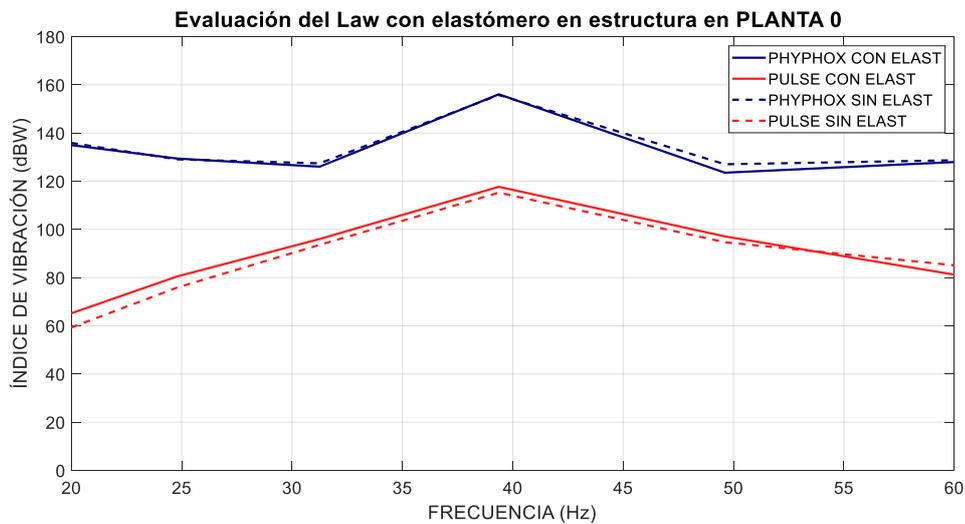


Figura 38 – Evaluación del Law con elastómero en estructura en PLANTA 0.

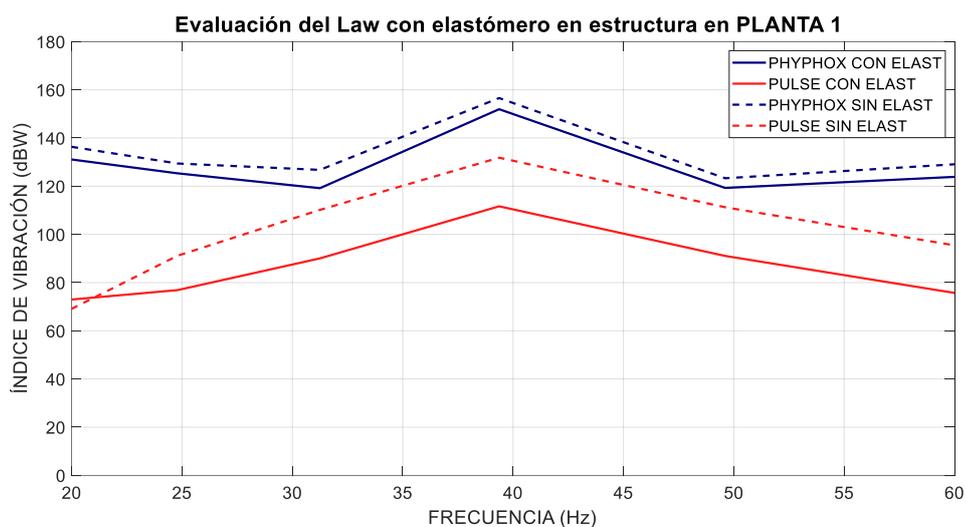


Figura 39 – Evaluación del Law con elastómero en estructura en PLANTA 1.

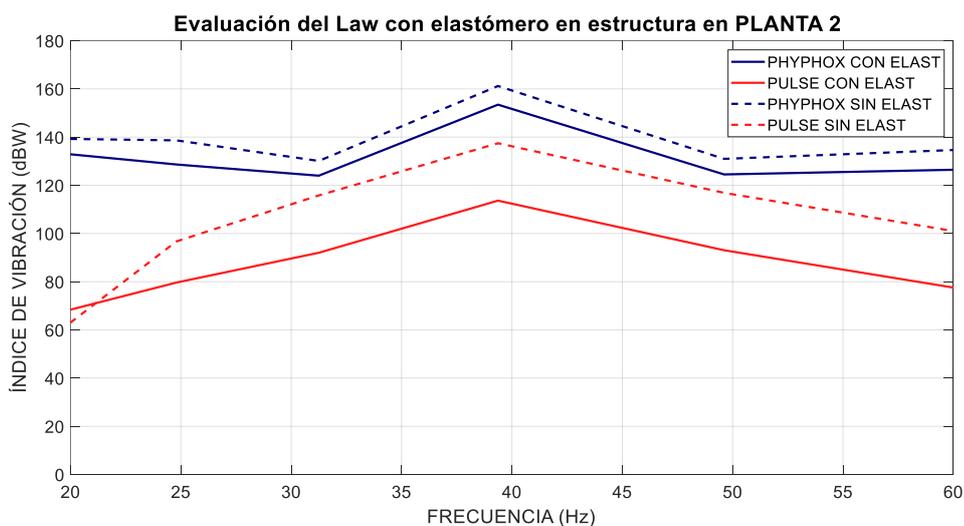


Figura 40 – Evaluación del Law con elastómero en estructura en PLANTA 2.

ESTRUCTURA	PULSE	PHYPHOX	Δ Law PULSE	Δ Law Phyphox	ERROR PRECISIÓN	%
Law PLANTA 0 (dBW)	117,7	157,0	-2,4	0,8	39,3	25,0
Law PLANTA 1 (dBW)	111,6	152,9	20,2	5,0	41,3	27,0
Law PLANTA 2 (dBW)	113,7	154,4	23,8	8,2	40,7	26,3

Tabla 9 – Evaluación de la relevancia del emplazamiento del elastómero en estructura.

En base a los resultados de haber medido con Phyphox, como bien se indica en la Tabla 7, la Tabla 8 y la Tabla 9, al colocar el elastómero en el receptor, se puede apreciar una leve disminución del índice de vibración si se toma de referencia el valor del índice de vibración calculado sin hacer uso de atenuadores. Por otra parte, al colocar el elastómero en el emisor se consigue reducir de forma óptima el índice de vibración en cada una de las plantas, observándose una mejora considerable respecto a cuando se colocó el elastómero en el receptor, disminuyendo 12,2 dBW si se toma de referencia la planta crítica.

Por otro lado, se puede apreciar discrepancias en las medidas tomadas con PULSE respecto a las medidas tomadas con Phyphox, ya comentadas anteriormente. Se puede observar que colocando el elastómero en el emisor como se ha realizado en las medidas con Phyphox, se consigue reducir de manera óptima el índice de vibración si se toma de referencia la planta 0, a diferencia de la planta crítica, la planta 2, donde se reduce el índice de vibración considerablemente pero no de forma óptima. Por otra parte, al colocar el elastómero en el receptor, se aprecia una leve disminución en el índice de vibración en la planta 0, pero apenas apreciable. Sumado a esto, podemos afirmar que la colocación del elastómero en el receptor es el emplazamiento óptimo para reducir el índice de vibración si tomamos de referencia la planta crítica, donde se ha reducido de gran manera, llegando a disminuir más de 20 dBW éste.

Sumado a esto, hay que destacar un aspecto importante acerca del índice de vibración medido cuando se ha emplazado los elementos de disipación en la estructura. Tanto en las mediciones

realizadas con Phyphox como en aquellas obtenidas mediante PULSE, se evidencia que el efecto de la altura no sigue la tendencia esperada. Es decir, no se observa la relación convencional de que a mayor altura corresponde un índice de vibración más elevado ($L_{aw} P1 < L_{aw} P2 < L_{aw} P0$). Asimismo, se contempla que ha habido una mejora del índice de vibración en las plantas superiores, a diferencia de la planta baja, donde no se ha observado el efecto atenuante esperado al colocar el elemento elastómero.

Por último, pero no menos importante, en relación al error de precisión, si se observa en las medidas tomadas emplazando el elemento elastómero en el receptor y la estructura, el porcentaje de error de precisión entre ambos aparatos de medición ha sido relativamente el mismo en las 3 plantas correspondientes a cada una de ellas, es decir, se mantiene constante. Por otro lado, si se observan las medidas habiendo colocado el elemento elastómero en el emisor, las plantas superiores tienen un porcentaje de error más bajo que el resto de casos, por lo que se puede decir que son más fiables las medidas con Phyphox en el emisor.

5.3.2 Evaluación de la importancia del material del elastómero

El uso de elastómeros como elementos amortiguadores ha demostrado ser una estrategia efectiva para reducir el índice de vibración. Sin embargo, la elección del material del elastómero adecuado es un factor determinante para lograr una atenuación óptima. En este proyecto, se ha explorado la importancia del material del elastómero utilizado para reducir el índice de vibración lo máximo posible, analizando sus propiedades mecánicas, coeficiente de amortiguación, densidad, resiliencia y otros factores que influyen en su rendimiento como elementos atenuadores. Para ello, se ha colocado varios tipos de elementos elastómeros en el emisor, sometiendo la estructura a unas vibraciones, generando una frecuencia de 40Hz y se ha tomado medidas con ambas herramientas de medición, de la misma forma que se ha hecho hasta ahora.

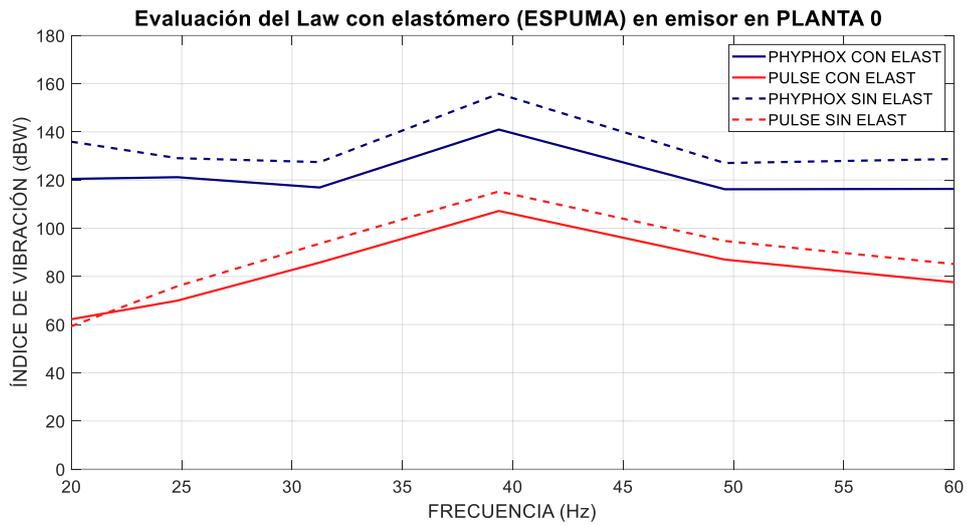


Figura 41 – Evaluación del Law con elastómero (ESPUMA) en emisor en PLANTA 0.

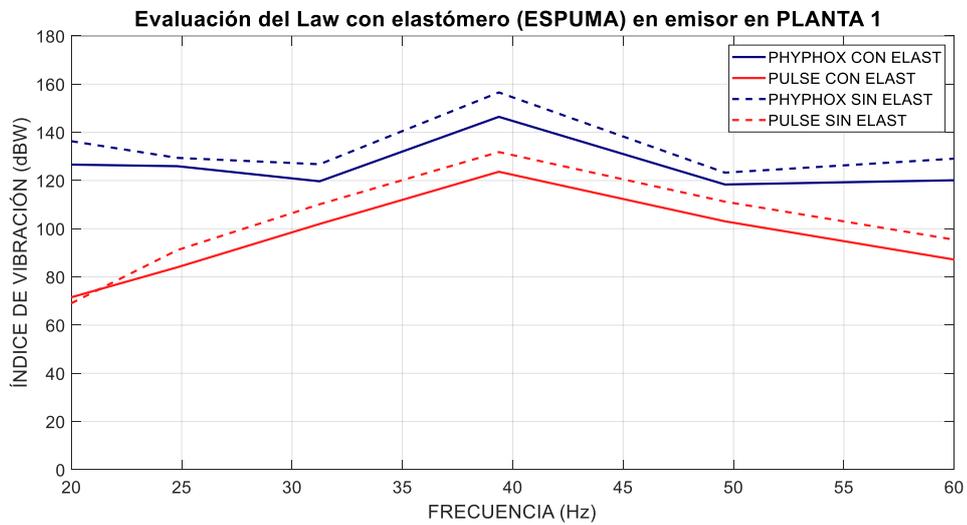


Figura 42 – Evaluación del Law con elastómero (ESPUMA) en emisor en PLANTA 1.

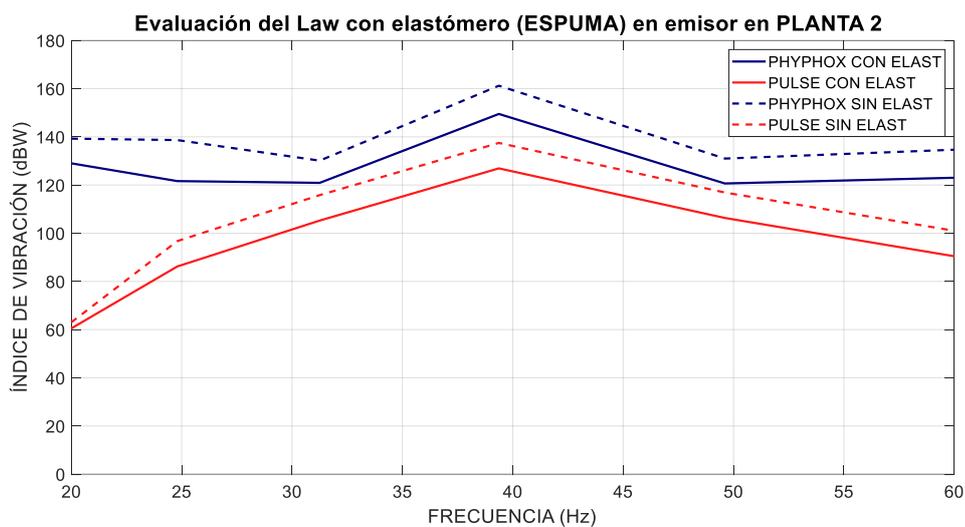


Figura 43 – Evaluación del Law con elastómero (ESPUMA) en emisor en PLANTA 2.

EMISOR ESPUMA	PULSE	PHYPHOX	Δ Law PULSE	Δ Law Phyphox	ERROR PRECISIÓN	%
Law PLANTA 0 (dBW)	107,1	142,6	8,2	15,2	35,5	24,9
Law PLANTA 1 (dBW)	123,7	147,5	8,1	10,4	23,8	16,1
Law PLANTA 2 (dBW)	126,9	150,4	10,6	12,2	23,5	15,6

Tabla 10 – Evaluación de la importancia del material del elastómero (ESPUMA).

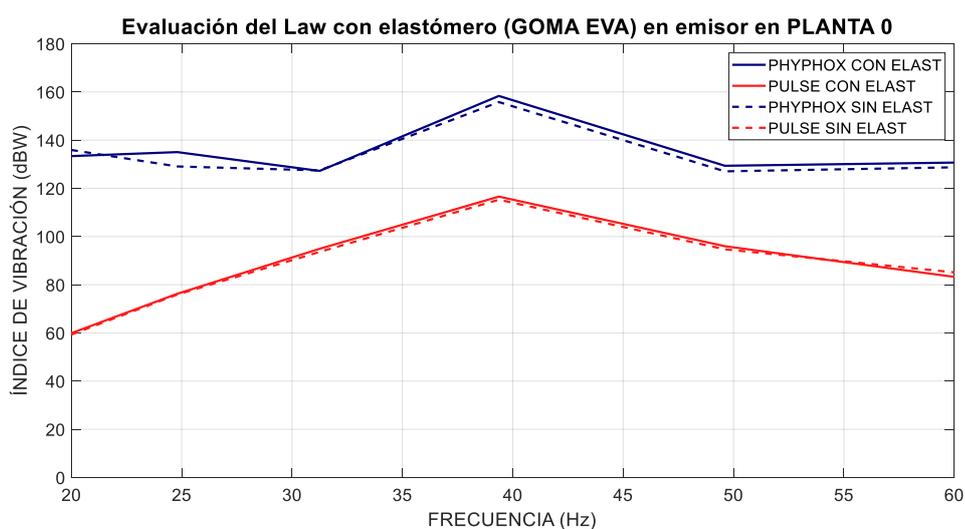


Figura 44 – Evaluación del Law con elastómero (GOMA EVA) en emisor en PLANTA 0.

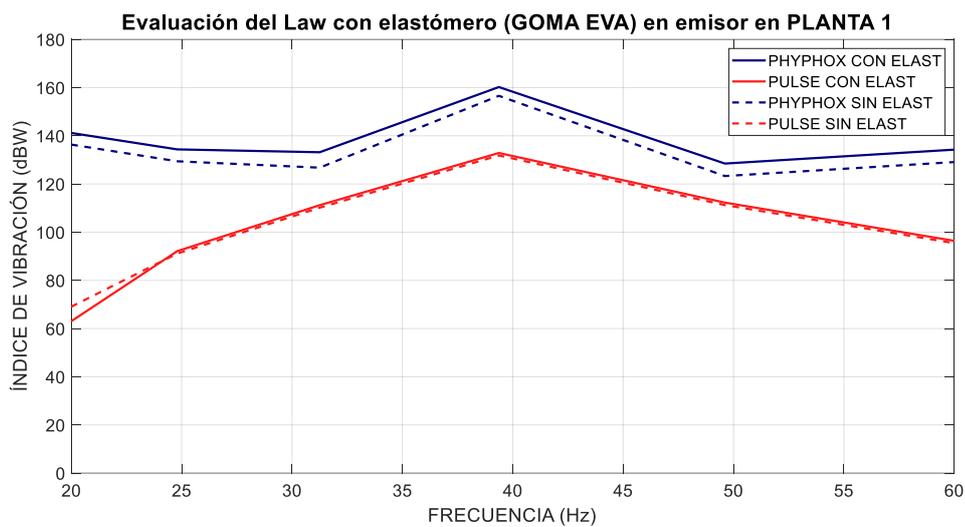


Figura 45 – Evaluación del Law con elastómero (GOMA EVA) en emisor en PLANTA 1.

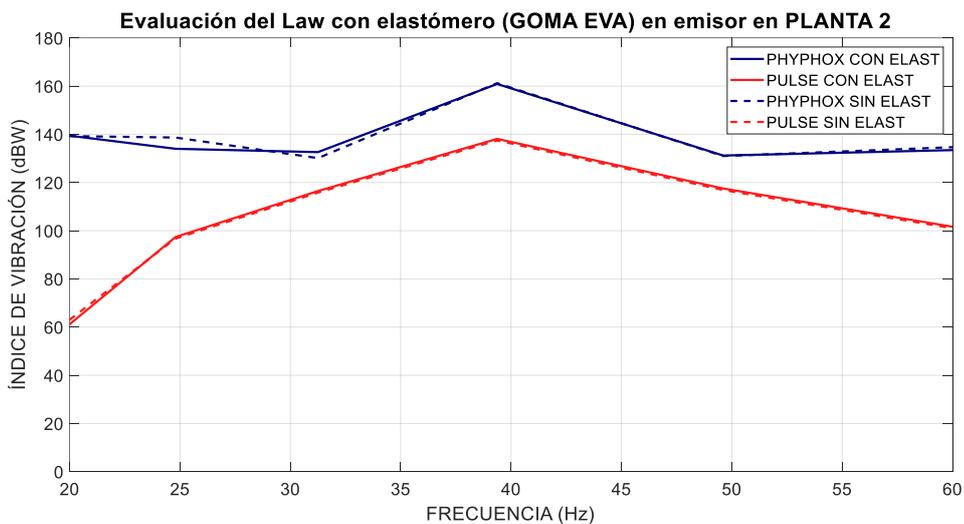


Figura 46 – Evaluación del Law con elastómero (GOMA EVA) en emisor en PLANTA 2.

EMISOR ESPUMA	PULSE	PHYPHOX	Δ Law PULSE	Δ Law Phyphox	ERROR PRECISIÓN	%
Law PLANTA 0 (dBW)	116,6	159,3	-1,3	-1,5	42,7	26,8
Law PLANTA 1 (dBW)	132,8	161,6	-1,0	-3,7	28,8	18,3
Law PLANTA 2 (dBW)	138,1	161,8	-0,6	0,8	23,7	14,6

Tabla 11 – Evaluación de la importancia del material del elastómero (GOMA EVA).



En base a los resultados medidos con Phyphox y PULSE, indicados en la Tabla 10 y la Tabla 11 respectivamente, se observa una diferencia en el índice de vibración cuando se usa goma EVA a cuando se usa de espuma. Esta diferencia se debe a las propiedades mecánicas y el comportamiento de cada material.

La disminución en el índice de vibración al utilizar espuma respecto a la medida tomada sin hacer uso de elementos de atenuación, y el aumento de éste al utilizar goma EVA como elemento elastómero puede atribuirse a varias razones:

- La espuma suele tener propiedades de amortiguación superiores en comparación con la goma EVA. Esto significa que la espuma tiene una capacidad mejorada para absorber y disipar la energía de las vibraciones, mientras que la goma EVA es más rígida y produce el efecto contrario, es decir, en vez de atenuarse el índice de vibración, ha aumentado.
- La espuma puede tener una densidad y estructura celular que le permite absorber mejor las vibraciones en comparación con la goma EVA.
- La espuma responde mejor a ciertas frecuencias como 40Hz, mientras que la goma EVA no ha respondido de manera positiva.
- En cuanto a la composición química de la espuma, ésta contiene polímeros viscoelásticos que le confieren flexibilidad y capacidad de deformación. Además, contiene partículas sílice como agente de relleno, lo que permite una mejor respuesta frente a vibraciones.

Sumado a esto, si hablamos de términos de fiabilidad, se constata de nuevo que las medidas tomadas en la PLANTA 2 son más fiables que en el resto de plantas, debido a su menor porcentaje de error en entre ambas medidas.

Capítulo 6 CONCLUSIONES

Las conclusiones extraídas del presente estudio, enfocado en la mitigación de vibraciones no deseadas en un prototipo a escala reducida a través de la implementación estratégica de elementos elastómeros, han arrojado valiosas perspectivas que contribuyen al campo de ingeniería de control de vibraciones.

Al abordar los tres objetivos establecidos para el presente proyecto, se ha logrado una comprensión más profunda de los efectos y soluciones relacionados con las vibraciones en sistemas estructurales.

En primer lugar, tras llevar a cabo un exhaustivo análisis de las vibraciones en el prototipo a escala reducida, se identificó el eje predominante como el eje Z. Esta conclusión resulta fundamental, ya que permite simplificar significativamente el estudio al enfocarse exclusivamente en dicho eje. El reconocimiento del eje Z como el principal proporciona un marco más preciso y eficiente para comprender y abordar las vibraciones en el prototipo diseñado.

En segundo lugar, al examinar la emisión de distintas frecuencias en una misma planta, se pudo identificar con precisión el modo de vibración predominante (40Hz), el cual desencadena un índice de vibración superior. Esta identificación es esencial para dirigir los esfuerzos de mitigación de manera más eficaz.

Por otra parte, el estudio sobre el efecto de la altura en las vibraciones ha corroborado una relación significativa entre la altura y el índice de vibración, es decir, a medida que la altura en el prototipo aumenta, también lo hace el índice de vibración. Este hallazgo resalta la importancia de considerar cuidadosamente la ubicación y disposición de sistemas elastómeros en diferentes niveles de la estructura, a fin de maximizar su eficacia en la atenuación de vibraciones.

Sumado a esto, la verificación de la eficacia de las soluciones elastómeras ha resultado particularmente esclarecedora. La colocación de capas elastómeras ha demostrado ser un enfoque viable y prometedor para mejorar las condiciones de atenuación en la recepción de vibraciones. Se ha llegado a la conclusión que el mejor emplazamiento para colocar los elementos atenuadores es en el emisor, ya que, entre otras razones, la reducción de las vibraciones en la fuente emisora, limita la cantidad de energía transmitida al resto del sistema. Además, se ha constatado que la elección del material de los elastómeros tiene un impacto substancial en la reducción del índice de vibración. Por ejemplo, el uso de materiales como la espuma ha mostrado tener un efecto positivo y superior a otros materiales, debido a sus propiedades mecánicas y su comportamiento.

Por último, en base a los resultados, se ha podido corroborar la fiabilidad de ambos aparatos de medición. PULSE, al ser una plataforma profesional diseñada específicamente para mediciones de vibración, demostró un rendimiento notablemente superior en términos de precisión. Sus capacidades de medición de alta precisión y su diseño robusto permitieron una adquisición de datos razonables de forma fiable y precisa en diversas condiciones.

En contraste, Phyphox, aunque es accesible y sencillo de utilizar, mostró limitaciones en su capacidad para proporcionar mediciones precisas del índice de vibración. La variabilidad de los resultados obtenidos y el porcentaje de error respecto a las medidas tomadas con PULSE, plantea cuestionamientos sobre su idoneidad para aplicaciones que requieren una alta precisión en la medición de vibraciones, ya que suele acertar en el aspecto teórico de forma general, pero en términos de valores no es muy fiable, debido a que siempre hay discrepancias entre las medidas tomadas desde la plataforma móvil Phyphox y la plataforma profesional PULSE.



En consecuencia, la elección entre Phyphox y PULSE dependerá de los requisitos específicos de cada aplicación. Para estudios que requieran mediciones de vibración altamente precisas y fiables, recomendaría el uso de plataformas profesionales como PULSE. Sin embargo, para aplicaciones con fines académicos, Phyphox sigue siendo una opción viable teniendo en cuenta su accesibilidad y facilidad de uso, aunque con la advertencia de sus limitaciones en términos de precisión, ya que solo nos servirá para sacar resultados aproximados, pero no exactos.

Capítulo 7 BIBLIOGRAFÍA

- [1] Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (2024). “Los ODS en acción”. ¿Qué son los Objetivos de Desarrollo Sostenible?. [https://www.undp.org/es/sustainable-development-goals#:~:text=de%20Desarrollo%20Sostenible%3F-,Los%20Objetivos%20de%20Desarrollo%20Sostenible%20\(ODS\)%2C%20tambi%C3%A9n%20conocidos%20como,disfruten%20de%20paz%20y%20prosperidad.](https://www.undp.org/es/sustainable-development-goals#:~:text=de%20Desarrollo%20Sostenible%3F-,Los%20Objetivos%20de%20Desarrollo%20Sostenible%20(ODS)%2C%20tambi%C3%A9n%20conocidos%20como,disfruten%20de%20paz%20y%20prosperidad.) (Acceso: de 20 Septiembre de 2023).
- [2] Felipe M. R. (3 de diciembre de 2010). “Movimientos vibratorios. Movimiento armónico simple”. Escritos científicos. https://www.uv.es/jmarques/_private/MAS%20y%20ondas.pdf (Acceso: 20 de Septiembre de 2023).
- [3] Patricia M. (22 de septiembre de 2017). “Teoría Movimiento Armónico Simple”. Física y química online. <http://fisicayquimicaonline.blogspot.com/2017/09/teoria-movimiento-armonico-simple.html> (Acceso: 20 de Septiembre de 2023).
- [4] Departamento de Física Aplicada de la UPV (Septiembre de 2022). “Física II Oscilaciones Amortiguadas”. Apuntes de Acústica Ambiental. (Acceso: 20 de Septiembre de 2023).
- [5] Orlando Benito E. T. “Movimiento Ármónico Simple”. Geogebra. <https://www.geogebra.org/m/ncGtUxze> (Acceso: 20 de Septiembre de 2023).
- [6] Jiménez Carballo, C. A. (2017). “MOVIMIENTO ARMÓNICO SIMPLE (MAS)”. Presentación interna, Escuela de Física, Instituto Tecnológico de Costa Rica. (Acceso: 20 de Septiembre de 2023).
- [7] Javier J. (Septiembre de 2017). “Dinámica y MAS”. Universidad de Cantabria. https://personales.unican.es/junquera/javierjunquera_files/fisica-1/dinamica_y_mas.pdf (Acceso: de 27 Septiembre de 2023).
- [8] Departamento de Física Aplicada de la UPV (Septiembre de 2022). “Física II Oscilaciones Forzadas”. Apuntes de Acústica Ambiental. (Acceso: 27 de Septiembre de 2023).
- [9] Departamento de Física Aplicada de la UPV (Septiembre de 2021). “Vibraciones”. Apuntes de Acústica Ambiental. (Acceso: 27 de Septiembre de 2023).



- [10] Departamento de Física Aplicada III de la Universidad de Sevilla (10 de marzo de 2010). “Movimiento oscilatorio”. Tesla.us.
http://tesla.us.es/wiki/index.php/Movimiento_oscilatorio (Acceso: 27 de Septiembre de 2023).
- [11] N.A (2008). “Régimen transitorio y permanente”. Proyecto Open Course Ware.
https://ocw.ehu.eus/file.php/83/cap6_html/capitulo-6.html (Acceso: 27 de Septiembre de 2023).
- [12] Fernando Arancibia (24 de agosto de 2013). “Modos de vibración”. Ingeniería sísmica y la construcción civil.
<http://ingenieriasismicaylaconstruccioncivil.blogspot.com/2013/08/modos-de-vibracion-de-un-edificio.html> (Acceso: 3 de Octubre de 2023).
- [13] José Cándido G. L. Modos de vibración. (8 de noviembre de 2017). (Acceso: 3 de Octubre de 2023). [Vídeo en línea]. Disponible en:
<https://www.youtube.com/watch?v=1qp2R5jVZvc>
- [14] Eurolab (N.D). “Titresim maruziyeti el kol ve tum vucut olcumu. Laboratuvar.
<https://www.laboratuvar.com/es/isg-analizleri/kisisel-maruziyet-olcumleri/titresim-maruziyeti-el-kol-ve-tum-vucut-olcumu> (Acceso: 10 de Octubre de 2023).
- [15] Germán Enrique N. T. (15 de febrero de 2022). “Kubota, potencia y eficiencia al servicio del campo colombiano”. Mytool. <https://www.mytool.com.co/kubota-potencia-y-eficiencia/> (Acceso: 10 de Octubre de 2023).
- [16] N.A (2015). “Introducción a sistemas vibratorios”. Dinámica de maquinaria.
<http://dinamicademaquinariaesimecu.blogspot.com/2015/04/introduccion-sistemas-vibratorios.html> (Acceso: 10 de Octubre de 2023).

Capítulo 8 ANEXO

8.1 Flujograma de la metodología de estudio

A continuación de muestra el flujograma de la metodología de estudio seguida con cada una de las plataformas de medida de vibraciones durante el estudio. Por una parte, a la izquierda se encuentra el flujograma de las medidas tomadas con Phypfox. Por otra parte, a la derecha se encuentra el flujograma de las medidas con PULSE.

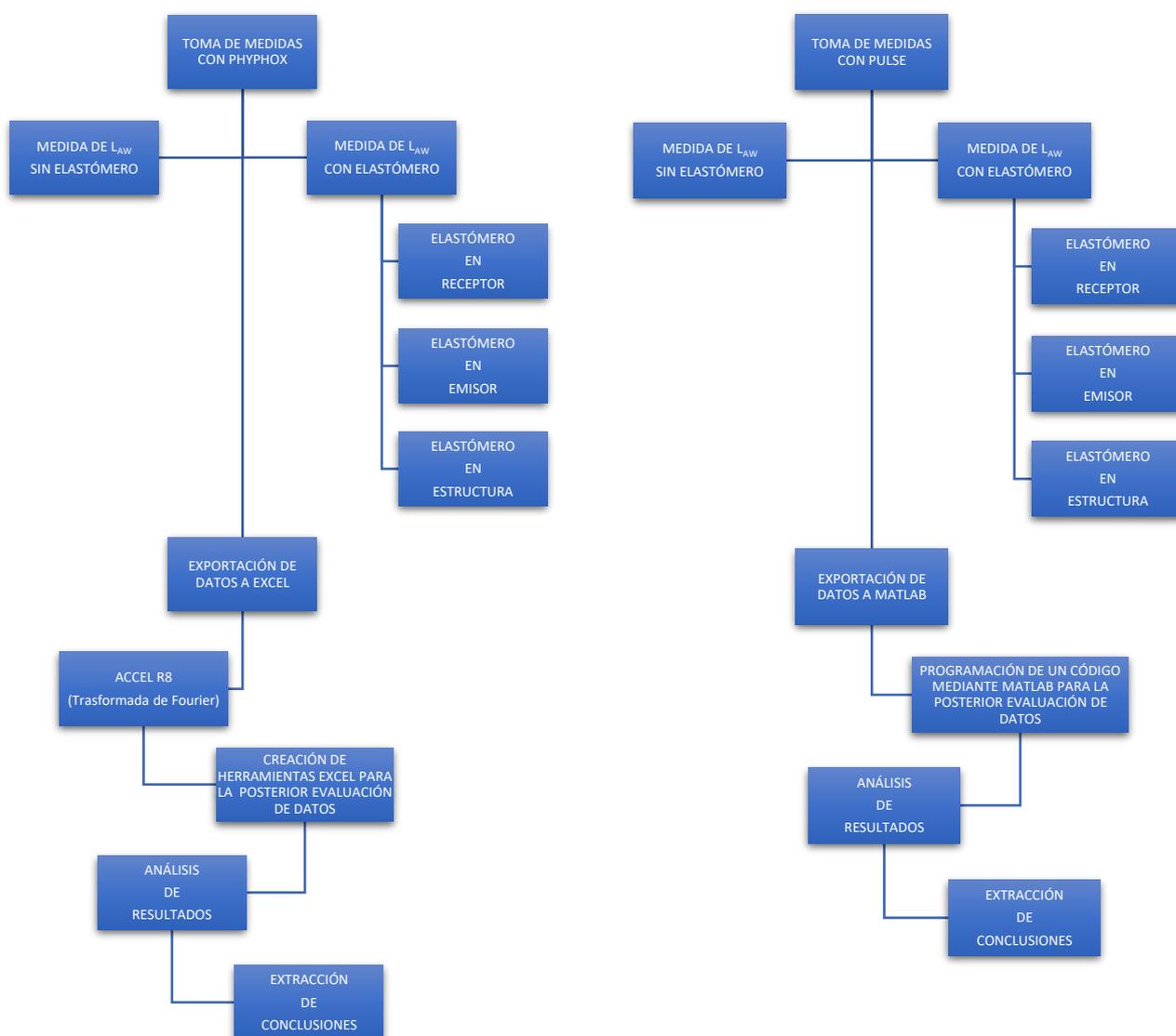


Figura 44 – Flujograma de mediciones.

8.2 Herramienta Excel para tratar los Datos de Phyphox

Por otro lado, se muestra la herramienta Excel diseñada para el tratamiento de los datos recopilados mediante Phyphox. Esta herramienta nos ha permitido el cálculo del índice de vibración para el posterior análisis de resultados.

1	ACELERACIONES EN EJE				ACELERACIONES PONDERADAS EN EJE			NIVEL DE ACCELERACIÓN PONDERADA		
2	aRMS,x(m/s2)	aRMS,y(m/s2)	aRMS,z(m/s2)	W	a ² _{w,x} (m/s2)	a ² _{w,y} (m/s2)	a ² _{w,z} (m/s2)	L _{aw,x}	L _{aw,y}	L _{aw,z}
3	0,85490909	0,53635431	2,30219714	0,833	0,5071423	0,1996152	3,6776892	117,1	113,0	125,7
4	0,88800003	0,98327113	4,21894703	0,907	0,648695	0,7953552	14,642752	118,1	119,0	131,7
5	2,49508383	2,81415274	7,54236833	0,934	5,4308028	6,9085847	49,625995	127,3	128,4	137,0
6	2,6275207	3,02771608	8,6407214	0,932	5,9968629	7,9627323	64,853263	127,8	129,0	138,1
7	1,49689369	1,9685961	6,41094567	0,91	1,855516	3,2091944	34,035096	122,7	125,1	135,3
8	1,22304748	1,58924948	4,81286802	0,872	1,1374167	1,9205124	17,613306	120,6	122,8	132,5
9	1,81576679	1,96392225	4,84082306	0,818	2,2061079	2,580805	15,679963	123,4	124,1	132,0
10	1,78087554	1,86507809	5,56235709	0,75	1,7839787	1,9566654	17,403647	122,5	122,9	132,4
11	1,82680792	1,97911859	6,43212514	0,669	1,4936127	1,7530563	18,516598	121,7	122,4	132,7
12	2,29932734	2,55932006	7,09474621	0,582	1,790802	2,2186826	17,049816	122,5	123,5	132,3
13	2,47024634	2,75473599	8,25232656	0,494	1,4891362	1,8518844	16,61907	121,7	122,7	132,2
14	2,98399086	3,11823025	8,23249458	0,411	1,5041066	1,6424797	11,448446	121,8	122,2	130,6
15	2,82064091	3,22739091	8,08156051	0,337	0,9035567	1,1829406	7,4173754	119,6	120,7	128,7
16	4,19101571	3,86869231	16,8112911	0,274	1,3186809	1,123646	21,217942	121,2	120,5	133,3
17	4,81817797	6,19202579	25,6509597	0,22	1,1235982	1,8557133	31,845832	120,5	122,7	135,0
18	4,12405455	4,55552147	13,0517037	0,176	0,5268344	0,642838	5,2766678	117,2	118,1	127,2
19	29,7255336	43,2087894	590,234213	0,14	17,318704	36,59319	6828,1779	132,4	135,6	158,3
20	5,47960302	5,7608979	26,9570602	0,109	0,3567395	0,394306	8,6337219	115,5	116,0	129,4
21	6,379374	8,06011132	42,5487123	0,0834	0,2830663	0,4518707	12,592297	114,5	116,6	131,0
22	30,0903337	43,5151097	590,525075	0,0604	3,3031469	6,9080273	1272,1859	125,2	128,4	151,0
23	8,59401267	9,54269491	34,8378479	0,0401	0,1187629	0,1464303	1,9516026	110,7	111,7	122,9
24	6,35882202	7,20519557	20,9407695	0,241	2,348483	3,015266	25,469438	123,7	124,8	134,1
25										
26				aw(m/s2)	50,978507	82,152099	8468,5133	137,1	139,1	159,3
27										
28	0.000001			aw	7.1399234	9.0637795	92.024525		La w dBW	159.3

Figura 46 – Herramienta Excel para el tratamiento de Datos de Phyphox.

8.3 Código Matlab para la visualización de los Datos

Por otra parte, se muestra el código Matlab diseñado para el tratamiento y visualización de datos que ha hecho posible el análisis de los datos recopilados con ambas plataformas de medida.

```
%% Procesado
clear all
% Cargamos todos los archivos .mat de la carpeta de datos:
mat = dir('*.mat');
for q=1:length(mat)
    load(mat(q).name);
end

plot(f, emisorespuma_100Hz_0P_FFT, 'Color', [0, 0, 0.5], 'LineWidth', 2) % PHYPHOX
hold on
plot(f, emisorespuma100hz2p(4:end,2), 'Color', [1, 0.1, 0.1], 'LineWidth', 2) % PULSE
plot(f, sinelastomero_40Hz_0P_FFT, 'Color', [0, 0, 0.5], 'LineWidth', 2, 'LineStyle', '--') % PHYPHOX SIN ELAST
plot(f, sinelastomero40hz0p(4:end,2), 'Color', [1.0, 0.1, 0.1], 'LineWidth', 2, 'LineStyle', '--') %PULSE SIN ELAST
% Configuración
xlabel('FRECUENCIA (Hz)')
ylabel('ÍNDICE DE VIBRACIÓN (dBW)')
grid on
xlim([80 120])
ylim([0 180])
set(gca, 'FontSize', 16);
title('Evaluación del Law a 70Hz sin elastómero en PLANTA 0 ', 'FontSize', 20)
legend('PHYPHOX', 'PULSE', 'PHYPHOX SIN ELAST', 'PULSE SIN ELAST' )
```

Figura 45 – Código Matlab para el tratamiento de Datos de PULSE.



Capítulo 9 AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi mayor agradecimiento a mi familia, que me ha apoyado incondicionalmente desde que empecé esta carrera, y me han enseñado a no desistir ni rendirme en ningún momento.

Por otro lado, quiero hacer mención especial a mis dos tutores del TFG, Sergio Castiñeira Ibáñez y José María Bravo Plana-Sala y al estudiante de Doctorado Lucas Onrubia Fontangordo, por haberme proporcionado toda la ayuda y material necesario para poder llevar a cabo este trabajo y de los que he aprendido durante mi etapa universitaria y me han hecho inclinarme por este tema.

Quiero expresar mi gratitud a amigos que me han ayudado a seguir adelante con la carrera y no desmotivarme, como Lola Lozano, Benigno González, Óscar Valls, Sergio Micó, ganador de 1er Premio “FUTURO DE LAS TELECOMUNICACIONES”, y en especial a Alejandro Chirivella, 4 veces ganador del “Premio Extraordinario al estudiante con mejor nota” y que me ha ayudado semana a semana dándome apoyo en muchas asignaturas.

Por último, pero no menos importante, quiero agradecer al equipo docente de la Universidad Politécnica de Valencia por brindarme todos los conocimientos que hoy tengo. Algunos de los profesores que me han marcado y he aprendido de ellos han sido: Francisco Belmar, Antonio José Guirao, Antonio Arnau, Héctor Esteban, Luis Vergara, José Vicente Morro, Óscar Romero, Fulgencio Montilla, José Manuel Mossi, Valery Naranjo, Carlos Hernández y otros más.