



Convención Científica Internacional 2021  
Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas  
Control y mitigación de vibraciones estructurales en puentes de ferrocarril usando  
amortiguadores de masa sintonizada.

## SIMPOSIO INTERNACIONAL DE CONSTRUCCIONES

### Control y mitigación de vibraciones estructurales en puentes de ferrocarril usando amortiguadores de masa sintonizada.

#### *Control and mitigation of structural vibrations on railway bridges using tuned mass dampers.*

Ing. Herismay Padrón Hernández<sup>1</sup>, Dr. Ing. Ernesto L. Chagoyén Méndez<sup>2</sup>

1. Empresa de Proyectos de Arquitectura e Ingeniería de Villa Clara (EMPROY VC). [herismayph@gmail.com](mailto:herismayph@gmail.com)
2. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas (UCLV). [chagoyen@uclv.edu.cu](mailto:chagoyen@uclv.edu.cu)

#### **Resumen:**

La reducción de vibraciones en estructuras, es un tema que constituye uno de los principales desafíos en la ingeniería estructural moderna, con edificaciones más esbeltas y puentes con luces mayores cada año, muchas veces las estructuras se ven comprometidas por movimientos oscilatorios provocadas por diversos factores (tránsito de personas y vehículos, vientos fuertes o sismos). Este artículo trata el tema de la implementación de amortiguadores de masa sintonizada, (TMD), en puentes de ferrocarril para contribuir a la mitigación de los efectos producidos por las vibraciones estructurales. Se presenta una metodología de diseño de los parámetros óptimos de los TMD y se crean dos modelos del puente de ferrocarril ramal Cifuentes km. 6,763 en el software profesional SAP 2000, uno con la presencia de los amortiguadores de masa sintonizada y otro sin dichos dispositivos, de esta forma se evalúa la respuesta de la estructura principal en diversos aspectos. A través del análisis modal, se comparan las variaciones de frecuencias y períodos; además se estudia la respuesta del puente en aceleraciones, velocidades y desplazamientos con el apoyo del análisis tiempo-historia, se realiza la observación del comportamiento del espectro de respuestas de frecuencias y por último se evalúan las variaciones en la aceleración espectral para distintas velocidades de circulación vehicular.

**Palabras Claves:** Reducción de vibraciones, amortiguadores de masa sintonizada, SAP 2000.

#### **Abstract:**

The reduction of vibrations in structures, is a subject that constitutes one of the main challenges in modern structural engineering, with more slender buildings and bridges with large dimensions each



**Convención Científica Internacional 2021**  
**Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas**  
**Control y mitigación de vibraciones estructurales en puentes de ferrocarril usando**  
**amortiguadores de masa sintonizada.**

year, many times the structures are affected by oscillatory movements caused by various factors (transit of people and vehicles, strong winds or earthquakes). This article deals with the issue of the implementation of tuned mass dampers, (TMD), in railway bridges to contribute to the mitigation of the effects produced by structural vibrations. A design methodology is presented with the optimal parameters of the TMDs, two models of the "Ramal Cifuentes Km 6,763" Railway Bridge are created in the SAP 2000 Professional software, one with the presence of tuned mass dampers, and other without devices, in this way the response of the main structure in various aspects is evaluated. Through the modal analysis, the variations of frequencies and periods are compared. In addition, the response of the bridge in accelerations, speeds and displacements with the support of the time-history analysis is studied, the observation of the behavior of the spectrum of frequency responses is completed and finally the variations in the spectral acceleration are evaluated for different vehicular circulation speeds.

**Key words:** Reduction of vibrations, tuned mass dampers, SAP 2000.



**Convención Científica Internacional 2021**  
**Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas**  
**Control y mitigación de vibraciones estructurales en puentes de ferrocarril usando**  
**amortiguadores de masa sintonizada.**

### **Introducción:**

Las vías de transportación terrestre tienen gran importancia en el desarrollo económico y social de cualquier lugar del mundo, por lo que la conservación de sus prestaciones constituye un punto clave en la ingeniería estructural actualmente. Formando parte de toda la infraestructura vial se encuentran los puentes, importantes obras ingenieras que ayudan a salvar accidentes en el terreno y permiten acortar distancias en el recorrido. Con el paso del tiempo y el desarrollo de la tecnología, este tipo de estructuras ha ido alcanzando un mayor protagonismo, con luces cada vez más largas y soportando cargas cada vez mayores, esto ha abierto nuevos campos de investigación enfocados principalmente en la mitigación de los efectos que provocan en ellos la acción de las cargas a las que están sometidos, que pueden ser resueltos, muchas veces, con el mantenimiento periódico o el reforzamiento estructural, pero cuando la obra necesita otro tipo de protección frente a cargas ambientales (mareas, sismos o vientos) o móviles (transeúntes, automóviles o trenes), que provocan en ella vibraciones estructurales; los amortiguadores de masa sintonizada pueden ser una alternativa viable y efectiva para su atenuación. Con el desarrollo de este trabajo se pretende elaborar un procedimiento para la modelación, análisis y diseño de

amortiguadores de masa sintonizada en un puente sometido a vibraciones y evaluar el efecto de estos dispositivos en la respuesta dinámica de dicha estructura, a través de la creación de un modelo de una estructura real en el software SAP 2000.

Un amortiguador de masa sintonizada (TMD) es un dispositivo que consiste en una masa, un resorte y un amortiguador que se adjunta a una estructura con el fin de reducir la respuesta dinámica de la estructura. La frecuencia del amortiguador está ajustada a una frecuencia estructural particular, de modo que cuando esa frecuencia se excita, el regulador resonará fuera de fase con el movimiento estructural. La energía se disipa por la fuerza de inercia del amortiguador que actúa sobre la estructura. El sistema TMD puede reducir efectivamente las respuestas dinámicas estructurales, y el dispositivo es de construcción simple y fácil de fabricar. El sistema tiene poco efecto sobre la función de la estructura principal y se usa ampliamente para reducir las respuestas estructurales inducidas por terremotos o vientos. Sin embargo, el efecto de control de vibración del sistema TMD se ve afectado principalmente por la frecuencia fundamental y los modos de la estructura. Cuando la excitación es de banda estrecha o la vibración está controlada por el



**Convención Científica Internacional 2021**  
**Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas**  
**Control y mitigación de vibraciones estructurales en puentes de ferrocarril usando**  
**amortiguadores de masa sintonizada.**

modo fundamental, el efecto de amortiguación es excelente; de lo contrario, el efecto de amortiguación es peor.

El caso de los puentes requiere un estudio por separado por los siguientes motivos:

✚ **Espacio limitado:** la geometría de los puentes, diseñada para minimizar el peso propio, hace que resulte poco práctico disponer una base amplia sobre la que pudieran moverse los TMD como en el caso de los amortiguadores traslacionales. Los péndulos también están desaconsejados debido a que la longitud necesaria los dejaría demasiado expuestos.

✚ **Diferencia en las solicitaciones:** los amortiguadores hasta ahora estudiados están diseñados principalmente para cargas de viento. En los puentes existe una carga tan importante o incluso mayor que la de viento, se trata de la carga de tráfico (vehículos, trenes o peatones). En ese caso, las solicitaciones transmitidas a la estructura son verticales. Por otra parte, las cargas horizontales longitudinales, principalmente originadas por los cambios de temperatura, son cargas no cíclicas transmitidas de manera cuasiestática, por lo que no tiene sentido considerar su amortiguamiento. Debido a ello, resulta inútil considerar péndulos, ya que trabajan únicamente para cargas horizontales.

Por tanto, las características de los puentes exigen que los amortiguadores tengan un tamaño lo más compacto posible y que sean capaces de resistir cargas horizontales transversales y cargas verticales (Hajji, 2016). Para explicar las dos tipologías utilizadas en puentes se hará uso de la información disponible de la empresa Maurer Söhne.

✚ **Amortiguadores Verticales.**

El TMD se coloca en la zona de la estructura con la mayor amplitud de vibración de la frecuencia natural vertical. La fijación del dispositivo a la estructura se realiza normalmente mediante tornillos o placas de fijación. El amortiguador está formado por una masa que puede moverse en la dirección vertical de forma guiada, y unida a una base por medio de dos resortes y un amortiguador.

Estos TMD están compuestos por un amortiguador, un sistema de guía de desplazamiento de la masa, la masa en sí, dos resortes verticales por dispositivo y una placa base sobre la que se fija todo el conjunto. Podemos ver estos elementos de forma clara en la Figura 1.1. El rango de frecuencias habitual que solicitan las estructuras en este caso es entre 0.3 y 5 Hz.(Hajji, 2016).



**Convención Científica Internacional 2021**  
**Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas**  
**Control y mitigación de vibraciones en puentes de ferrocarril usando**  
**amortiguadores de masa sintonizada.**

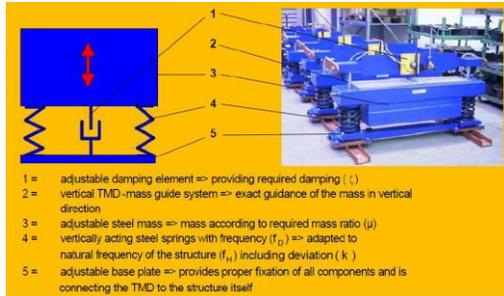


Fig.1.1. Descripción de los elementos de un TMD vertical.(Hajji, 2016)

**Amortiguadores Horizontales.**

Al igual que los amortiguadores verticales, estos se colocan en la zona de la estructura con mayor amplitud de vibración, en este caso, horizontal. La fijación al puente suele ser mediante uniones atornilladas o con placas de fijación. Aunque el principio de funcionamiento y los elementos que lo componen son los mismos, pues la diferencia principal es la consideración de la gravedad en el caso de los verticales, el dispositivo en sí tiene una configuración distinta.

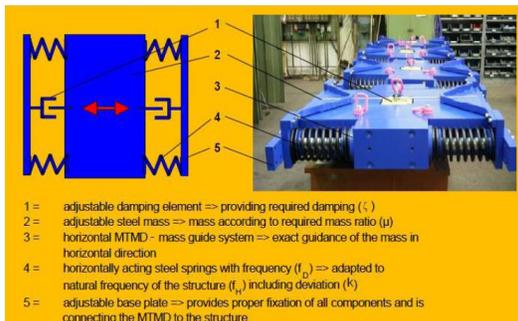


Fig.1.2. Descripción de los elementos de un TMD horizontal.(Hajji, 2016)

**2. Aplicaciones en estructuras de puentes:**

Algunas aplicaciones de TMD o MTMD, verticales y horizontales en estructuras de puentes a nivel mundial están presentes en:

**🚦 Puente London Millennium – “The Wobbly Bridge”.**

El Puente del Milenio es un puente colgante, peatonal y fabricado con acero que cruza el río Támesis, a su paso por Londres, en Inglaterra, uniendo la zona de Bankside con la Ciudad. Se localiza entre el Puente de Southwark y el Puente de Blackfriars. Para mitigar las vibraciones inducidas por la carga peatonal se le adosaron dos TMD uno vertical y uno horizontal como se muestra en la Figura 2.1.



Fig.2.1.TMD en el Puente London Millennium.UK(GERB, 2007)

**🚦 Puente de Forchheim (Alemania).**

Se trata de una pasarela construida en 2002 para peatones y ciclistas con una longitud de 117.5 m, 4.25 m de ancho y un peso de 120 t.



Convención Científica Internacional 2021  
Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas  
Control y mitigación de vibraciones en puentes de ferrocarril usando  
amortiguadores de masa sintonizada.

Para resolver el problema de vibraciones en este puente se disponen dos TMD. Podemos ver la localización de los amortiguadores en la Figura 2.2. (Hajji, 2016).

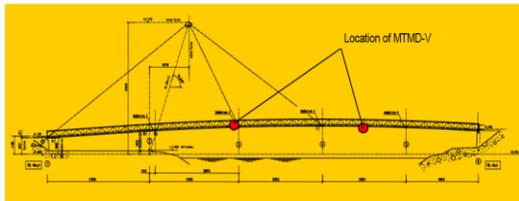


Fig. 2.2. MTMD en Puente de Forchheim, Alemania(Hajji, 2016).

🇬🇧 **Puente Port Tawe, Swansea (Reino Unido).**

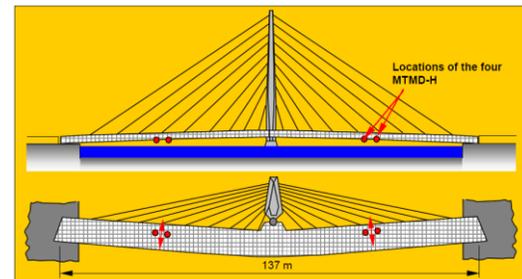


Fig. 2.3. Puente Port Tawe en Swansea, Reino Unido.

Se trata de un puente de tipología atirantada, con un mástil de 42 m de alto que soporta mediante cables un tablero curvo de 137 m de largo, como podemos ver en la Figura 2.3. Para disminuir las vibraciones se decidió disponer cuatro TMD horizontales idénticos, con masa de 1900 kg.(Hajji, 2016).



Convención Científica Internacional 2021  
Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas  
Control y mitigación de vibraciones estructurales en puentes de ferrocarril usando  
amortiguadores de masa sintonizada.

✚ Pasarela de Pedro Arrupe, Bilbao  
(España).



Fig. 2.4: Vista general de la pasarela de Pedro Arrupe, Bilbao.(Hajji, 2016)

Esta pasarela peatonal situada junto al museo Guggenheim fue inaugurada en 2004. La principal característica de la estructura es su geometría, en la que un vano central simple es unido al terreno por tres brazos por cada extremo, como muestra la Figura 2.4.

Para reducir las vibraciones se disponen tres TMD cuyas características son para el primero masa de 550 kg y frecuencia de 1.85 Hz; el segundo masa igual a 725 kg y frecuencia con valor de 2.32 Hz; y el tercero con masa de 1200 kg y frecuencia de 2.78 Hz. Su colocación final se puede observar en la Figura 2.5.(Hajji, 2016).

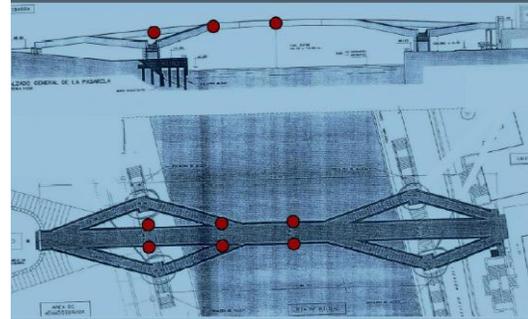


Fig. 2.5. Colocación de TMD en la pasarela de Pedro Arrupe, Bilbao.(Hajji, 2016)

### 3. Criterios clásicos de optimización de TMD.

A lo largo de la historia se han realizado un gran número de investigaciones con el fin de optimizar los parámetros del TMD, para de esta forma aumentar su viabilidad y eficiencia. Este proceso de optimización consiste en encontrar los valores adecuados de masa, rigidez y amortiguamiento para el funcionamiento y sintonización del dispositivo, para de esta forma asegurar la atenuación de las vibraciones estructurales.

Uno de los pioneros en esta línea de investigación es Jacob P. Den Hartog, investigador que en su libro Mechanical Vibrations(Den Hartog, 1947),expuso métodos para sistemas de uno, dos y varios grados de libertad, también otra gran cantidad de autores han expuesto variedad de criterios. Entre estos principios se distinguen dos que son muy utilizados y que tienen como objetivo común con el de Den Hartog, reducir el factor



**Convención Científica Internacional 2021**  
**Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas**  
**Control y mitigación de vibraciones estructurales en puentes de ferrocarril usando**  
**amortiguadores de masa sintonizada.**

de amplificación dinámica en desplazamientos y aceleraciones y mejorar la respuesta de la estructura, estos métodos son conocidos como los criterios de la norma  $H_\infty$  y  $H_2$ . Dependerá del proyectista el uso de uno u otro. A continuación, se abordan las diferencias entre los procedimientos, que permitan elegir uno para desarrollar el caso de estudio, que corresponde a este trabajo.

Los criterios clásicos, como puede ser el de Den Hartog, parten de hipótesis que simplifican mucho el problema: desprecio del amortiguamiento de la estructura, un único modo de vibración afectado, etc.; por ello, es fundamental conocer las pautas de partida en las que se basa cada método, con el objetivo de no incurrir en errores de diseño o comprobación (Calero Moraga, 2017).

### **3.1 Formulación de Den Hartog.**

El método de los puntos fijos de Den Hartog (Den Hartog, 1947) para calcular aproximaciones de los parámetros óptimos,  $q$  (relación de frecuencias) y  $\xi_s$  (razón de amortiguamiento); está basado en el análisis que plantea que para estructuras principales con amortiguamiento cercano a cero, existen al menos dos frecuencias  $\rho_1$  y  $\rho_2$ , donde  $G_p(\rho)$  se mantiene constante aunque varíe el coeficiente de amortiguamiento del TMD, lo que quiere decir que las aproximaciones de los

parámetros óptimos se obtienen maximizando  $G_p(\rho_1)$  y  $G_p(\rho_2)$ , con la condición  $G_p(\rho_1) = G_p(\rho_2)$ . El método de puntos fijos proporciona aproximaciones simples de los parámetros óptimos, que son precisos en un pequeño porcentaje dentro del rango de relaciones de masa que son típicas para aplicaciones de ingeniería civil de un TMD ( $0.01 \leq \mu \leq 0.1$ ). Desafortunadamente, el método de puntos fijos se limita a los sistemas primarios con amortiguación cercana a cero, debido a que la presencia de amortiguación estructural con valores mayores, invalida esta teoría.

$$\frac{\partial |G_p(\rho_1)|}{\partial \xi_s} = \frac{\partial |G_p(\rho_2)|}{\partial \xi_s} = 0 \quad (3.1)$$

Sin embargo, según la bibliografía consultada, se han obtenido buenos resultados en estructuras con amortiguamiento, aspecto a tener en cuenta a la hora de elegir un criterio de optimización u otro, ya que este es relativamente sencillo.

Las consideraciones, basadas en expresiones analíticas, obtenidas por Den Hartog son las siguientes:

Para la relación de masas  $\mu$ , nos plantea que su valor óptimo debe estar entre un 1% y 10% de la masa de la estructura principal, por tanto la masa óptima ( $m_{s\acute{o}pt}$ ) para el amortiguador estará dada por la relación:



**Convención Científica Internacional 2021**  
**Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas**  
**Control y mitigación de vibraciones estructurales en puentes de ferrocarril usando**  
**amortiguadores de masa sintonizada.**

$$m_{s\acute{o}pt} = m_p \cdot \mu \quad (3.2)$$

donde  $0.01 < \mu < 0.1$ .

Otro parámetro importante en la optimización del TMD es la frecuencia, la cual se sintoniza atendiendo a la frecuencia del modo de la estructura principal que se quiera amortiguar, según Den Hartog la frecuencia óptima ( $\omega_{s\acute{o}pt}$ ) a la que debe oscilar el TMD, es la siguiente:

$$\omega_{s\acute{o}pt} = \frac{\omega}{1+\mu} \quad (3.3)$$

La obtención del coeficiente de amortiguamiento ( $\xi_{s\acute{o}pt}$ ) recomendado para el funcionamiento óptimo del TMD, por Den Hartog, es logrado a través de la expresión:

$$\xi_{s\acute{o}pt} = \sqrt{\frac{3\mu}{8(1+\mu)^3}} \quad (3.4)$$

Por último, la rigidez del TMD, se debe hallar por la expresión:

$$k_{s\acute{o}pt} = \omega_{s\acute{o}pt}^2 \cdot m_{s\acute{o}pt} \quad (3.5)$$

### 3.2 Método de la norma $H_\infty$ .

El criterio de la norma de  $H_\infty$  es probablemente el criterio de optimización más conocido, y pretende la minimización de la amplitud máxima de la respuesta. Para un sistema de un grado de libertad, la optimización se realiza mediante la determinación de los parámetros óptimos del

TMD para los que los dos picos de la función de amplificación dinámica, tienen la misma altura, siendo esta la mínima posible (Weber, Feltrin and Huth, 2014).

Matemáticamente, la norma de  $H_\infty$  se expresa (Weber, Feltrin and Huth, 2014):

$$\|H\|_\infty = \|G_p(\rho)\|_\infty = \text{Max}(\rho) |G_p(\rho)| \quad (3.6)$$

La norma de  $H_\infty$  representa la amplitud máxima del valor absoluto de la función de amplificación dinámica. El objetivo del criterio expuesto es encontrar la relación de frecuencias,  $q$ , y el factor de amortiguamiento del TMD,  $\xi_s$ , que minimizan  $\|G_p(\rho)\|_\infty$ , es decir:

$$\text{Min}(q, \xi_s) \|G_p(\rho)\|_\infty = \text{Min}(q, \xi_s) \text{Max}(\rho) |G_p(\rho)| \quad (3.7)$$

El mínimo de  $\|G_p(\rho)\|_\infty$ , existe sólo si hay dos máximos locales y ambos poseen el mismo valor. El método de los puntos fijos de Den Hartog (Den Hartog, 1947), tratado en el epígrafe anterior muchas veces es utilizado para calcular aproximaciones de los parámetros óptimos de esta norma.

Otro método que proporciona soluciones exactas de forma cerrada del problema de optimización de la norma  $H_\infty$  fue propuesto recientemente por (Asami *et al.*, 2002). Su método se basa en la observación de que la



**Convención Científica Internacional 2021**  
**Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas**  
**Control y mitigación de vibraciones en puentes de ferrocarril usando**  
**amortiguadores de masa sintonizada.**

función  $H(\rho) = h - G(\rho)$ , donde  $h$  es una constante real arbitraria; tiene exactamente dos raíces reales positivas  $\rho_1$  y  $\rho_2$  de multiplicidad dos, si y solo si:

$h = h_\infty = \text{mín} \|G(\rho)\|$ , las expresiones algebraicas de las soluciones exactas de forma cerrada son más complicadas que las obtenidas por el método de puntos fijos.

(Weber, Feltrin and Huth, 2014) enumeran soluciones aproximadas del problema de optimización de la norma  $H_\infty$  para una estructura principal con amortiguación cercana a cero. Las fórmulas se obtienen simplificando las soluciones exactas utilizando una técnica de aproximación de funciones racionales. El error de las fórmulas con respecto a las soluciones exactas es menor que 1% para  $\mu \leq 0.1$ . Las expresiones, en función de la relación de masas, son las siguientes:

$$q_{s\acute{o}pt} = \frac{1}{1+\mu} \quad (3.8)$$

$$\xi_{s\acute{o}pt} = \sqrt{\frac{3\mu}{8(1+\mu)}} \sqrt{1 + \frac{3}{32}\mu} \quad (3.9)$$

### 3.3 Método de la norma $H_2$ .

El criterio de la norma de  $H_2$  tiene como finalidad minimizar la energía de vibración total del sistema. Si el sistema está sometido a una excitación aleatoria de ruido blanco, la norma de  $H_2$  de  $G_p(\rho)$  está directamente

relacionada con la variación del resultado de la función de amplificación dinámica.

Matemáticamente, la norma de  $H_2$  se expresa (Weber, Feltrin and Huth, 2014):

$$\|H\|_2 = \|G_p(\rho)\|_2 = \sqrt{\int_{t=-\infty}^{t=\infty} (G_p(t))^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\rho=-\infty}^{\rho=\infty} |G_p(\rho)|^2 d\rho} \quad (3.10)$$

Esta expresión representa una medida del área comprendida entre el cuadrado del valor absoluto de la función de amplificación dinámica,  $|G_p(\rho)|^2$ , y entre el eje horizontal,  $\rho$ . Se debe notar que, por esta definición, sólo existe un único máximo y no dos como en el caso de la norma de  $H_\infty$ .

El objetivo del criterio expuesto es encontrar la relación de frecuencias,  $q$ , y el factor de amortiguamiento del TMD,  $\xi_s$ , que minimizan  $\|G_p(\rho)\|^2$ , es decir:

$$\text{Min}(q, \xi_s) \|G_p(\rho)\|_2 = \text{Min}(q, \xi_s) \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\rho=-\infty}^{\rho=\infty} |G_p(\rho)|^2 d\rho} \quad (3.11)$$

En general, expresiones de forma cerrada de  $\|G_p(\rho)\|^2$  pueden obtenerse evaluando la integral en la ecuación (3.3) (Crandall y Mark (1963)) o calculando el Gramian de observabilidad del sistema lineal descrito por



**Convención Científica Internacional 2021**  
**Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas**  
**Control y mitigación de vibraciones en puentes de ferrocarril usando**  
**amortiguadores de masa sintonizada.**

la función de transferencia  $G(z)$  (Weber, Feltrin and Huth, 2014). La minimización de  $\|G_p(\rho)\|_2^2$  se logra si:

$$\frac{\partial \|G_p(\rho)\|_2}{\partial \xi_s} = 0 \quad (3.12)$$

$$\frac{\partial \|G_p(\rho)\|_2}{\partial q} = 0 \quad (3.13)$$

Apoyándose en estos procedimientos es que los autores logran llegar a las siguientes expresiones que definen los parámetros óptimos:

$$q_{opt} = \frac{\sqrt{1 + \frac{\mu}{2}}}{1 + \mu} \quad (3.14)$$

$$\xi_{sopt} = \sqrt{\frac{\mu}{4(1+\mu)}} \sqrt{\frac{1 + \frac{3\mu}{4}}{1 + \frac{\mu}{2}}} \quad (3.15)$$

#### 4. Metodología de diseño de los parámetros óptimos.

Es importante acotar que todo el proceso de diseño de un TMD, tiene como paso previo la realización de pruebas de campo a la estructura en cuestión, ya sea esta, existente o de nueva construcción, todo con el objetivo de obtener parámetros más reales; que a través de modelos computacionales no suelen ser tan exactos. Se realizan mediciones de frecuencias y amplitudes de vibración, estos valores son comparados con las normativas vigentes, en función del tipo de obra; y de su inadmisibilidad o falta de confort, para el uso

que haya sido proyectada (tránsito o estancia de personas o vehículos, colocación de maquinarias, etc.) dependerá la implementación del TMD o de los TMDs, que como se mostró anteriormente, no constituyen la única alternativa viable para el control de vibraciones, por lo tanto el proyectista elegirá el método que crea conveniente; teniendo en cuenta variables, como el impacto en el costo y tiempo de la obra y las ventajas y desventajas de una técnica sobre otra.

Entonces, si la obra presenta vibraciones con parámetros más allá de los límites permisibles y se ha tomado la decisión de utilizar un TMD o múltiples TMDs, como método para controlar y atenuar las mismas, se debe seguir una metodología de diseño, procedimiento que se muestra a continuación en la Tabla 4.1, basado en la teoría desarrollada en los epígrafes anteriores:

**Tabla 4.1 Metodología de diseño de los parámetros óptimos de los TMD.**

Procedimiento a seguir.	Comentarios.
<b>1. Tomar la decisión sobre la norma, por la que se deben optimizar los parámetros del dispositivo (<math>\mu</math>, <math>\xi</math>, y <math>q</math>).</b>	Una optimización con respecto a la norma $H_\infty$ o el criterio de Den Hartog, se recomienda para estructuras que están excitadas por cargas que exhiben



**Convención Científica Internacional 2021**  
**Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas**  
**Control y mitigación de vibraciones estructurales en puentes de ferrocarril usando**  
**amortiguadores de masa sintonizada.**

	<p>componentes de tiempo principalmente periódicos (por ejemplo, cargas generadas por actividades humanas como caminar, correr, saltar, bailar, etc. o máquinas).</p> <p>✚ Para cargas que tienen principalmente un carácter estocástico de banda ancha (por ejemplo, cargas de viento, cargas de terremoto), una optimización con respecto a la norma H2 es más apropiada.</p>		<p>unida el TMD a la estructura primaria; tiene que ser elegida igual a la unidad en la dirección de acción del dispositivo.</p> <p>✚ La rigidez modal, se estima utilizando la masa modal y la frecuencia natural del modo de vibración.</p> <p>✚ La frecuencia natural debe determinarse con pruebas de campo porque las frecuencias naturales que se calculan a partir de modelos analíticos o numéricos son poco confiables para ser utilizados con fines de diseño.</p>
<p><b>2. Identificar el modo o los modos de vibración de la estructura, que serán amortiguados.</b></p>	<p>✚ Usando la forma de este modo, se genera un modelo equivalente de un solo grado de libertad de la estructura calculando la masa modal asociada y la rigidez.</p> <p>✚ Para obtener una escala de la masa modal que sea compatible con las ecuaciones de movimiento, la amplitud de la forma modal, en la posición donde está</p>		<p>✚ A pesar de que es mucho menos crítica en el cálculo, que la frecuencia natural, la amortiguación modal estructural también debe determinarse mediante pruebas de campo o estimarse conservadoramente en base a la experiencia.</p>



**Convención Científica Internacional 2021**  
**Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas**  
**Control y mitigación de vibraciones estructurales en puentes de ferrocarril usando**  
**amortiguadores de masa sintonizada.**

**3. Determinación de la masa óptima del TMD ( $\mu_{\text{ópt}}$ )**

✚ La relación de masas  $\mu$  determina los parámetros óptimos  $q_{\text{ópt}}$  y  $\xi_{\text{sópt}}$ , así como la respuesta de la estructura.

✚ La relación de masas, tiene una expresión para cada criterio de optimización y se calcula para satisfacer el nivel máximo de respuesta, que sea admisible para la estructura, esto siempre puede ser alcanzado ya que la respuesta de la estructura primaria disminuye con el aumento de la relación de masas, el nivel de respuesta máximo aceptable puede ser dado por normas, códigos, pautas, disposiciones o reglas generalmente aceptadas.

**4. Determinación de la razón de amortiguamiento óptima ( $\xi_{\text{sópt}}$ ) y de la relación de**

✚ Estos parámetros tienen expresiones, que varían según el criterio de optimización y son también importantes

**frecuencias óptima( $q_{\text{ópt}}$ ).**

en la respuesta dinámica de la estructura.

✚ Con el valor de  $q_{\text{ópt}}$ , se calcula la frecuencia a la que debe oscilar el TMD,  $\omega_{\text{sópt}} = \omega_p * q_{\text{ópt}}$ .

✚ Aplicando ecuaciones utilizadas en la dinámica de las estructuras, se pueden obtener los valores de amortiguamiento óptimo del TMD ( $c_{\text{sópt}}$ ) y la rigidez óptima del dispositivo ( $k_{\text{sópt}}$ ).

**4.1 Procedimiento de implementación, pruebas y validaciones.**

Una vez, calculados los parámetros óptimos del TMD o de los TMDs, en caso de que sean varios, los dispositivos pasan por procedimientos, para su puesta en funcionamiento, estos procesos, a grandes rasgos, son los siguientes:

- ✚ Construcción del TMD.
- ✚ Realización de pruebas experimentales del TMD solo, para comprobar sus parámetros dinámicos: frecuencia, amplitud de las oscilaciones, amortiguamiento, aceleraciones, etc.



**Convención Científica Internacional 2021**  
**Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas**  
**Control y mitigación de vibraciones estructurales en puentes de ferrocarril usando**  
**amortiguadores de masa sintonizada.**

- ✚ Instalación del TMD en la estructura.
- ✚ Realización de pruebas experimentales del TMD ya instalado en la estructura, para determinar y validar los parámetros dinámicos del conjunto: amplitud de la oscilación, factor de amortiguamiento, frecuencias, aceleraciones, etc.

Estos dispositivos también son sometidos a pruebas y validaciones, antes y después de su implementación, para de esta forma asegurar su correcto funcionamiento. Para determinar de manera confiable los parámetros del TMD, las frecuencias naturales y las relaciones de amortiguamiento de los modos relevantes de la estructura deben establecerse experimentalmente. Esto se puede lograr mediante pruebas de vibración ambiental o forzada. Una fiable estimación de las relaciones de amortiguamiento generalmente solo se puede establecer mediante pruebas de vibración forzada.

Se debe sintonizar un TMD en el laboratorio antes de proceder a su instalación en una estructura. La frecuencia natural y la relación de amortiguamiento de un TMD se establecen por pruebas de vibración libre. Se debe tener en cuenta que los amortiguadores pueden contribuir a la rigidez del TMD y por lo tanto afectar su frecuencia natural. Esto debe ser considerado durante la sintonización de un

TMD debido a su alta sensibilidad con respecto a la sintonización de frecuencia.

La sintonización final de la frecuencia natural de TMD se realiza después de la instalación. El método más fácil para lograr la sintonización de la frecuencia es aumentar o reducir la masa del TMD para que este se ajuste a la frecuencia natural deseada. Para estructuras ligeras, la validación se puede realizar por pruebas de impacto (por ejemplo, dejando caer una bolsa de arena). La fuerza impulsiva cubre una banda de frecuencia amplia, de modo que la respuesta de la estructura mostrará una curva de amplificación dinámica que responde a estas características. Las estructuras con un TMD sintonizado óptimamente muestran una curva de amplificación, con dos picos de igual altura. Otra prueba útil es comparar la respuesta de la estructura con TMD bloqueado y desbloqueado. La efectividad del TMD se puede obtener calculando la relación de la respuesta máxima con el TMD bloqueado y desbloqueado. Obviamente, una estimación confiable requiere una prueba con fuerzas de excitación controladas. (Weber, Feltrin and Huth, 2014).

### **5. Características del puente en estudio.**

La obra de fábrica objeto de investigación se encuentra ubicada en el Km. 6,763 del



**Convención Científica Internacional 2021**  
**Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas**  
**Control y mitigación de vibraciones en puentes de ferrocarril usando**  
**amortiguadores de masa sintonizada.**

ramal Cifuentes en el poblado de Vega Alta, municipio Camajuaní, provincia de Villa Clara, Cuba. De acuerdo a datos reflejados su construcción se concluyó en 1917 por lo que recién cumple un siglo de explotación. La estructura salva una distancia de más de 61m sobre el cauce del río Sagua la Chica, a través de dos armaduras y un entramado de vigas transversales y longitudinales, todos estos elementos constituidos por acero.

La superestructura del puente está conformada por dos armaduras de elementos metálicos que logran salvar una longitud de 61.2m y cuya altura máxima es de 10,67 m en el panel central. Posee además un entramado de vigas longitudinales (VL) y transversales (VT) conformadas con acero como material constituyente. Cada una de las armaduras está constituida por cordón superior (CS), cordón inferior (CI), montantes (M) y diagonales (D) cuya sección es conformada. La distancia entre ejes de las armaduras es de 4.934m. La conformación geométrica de las armaduras resulta en la subdivisión de las mismas en 9 paneles de 6.8m cada uno.

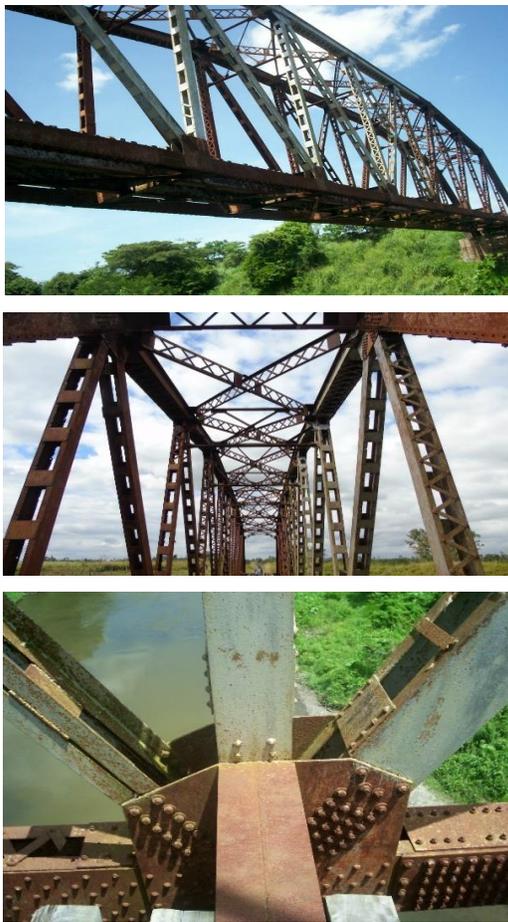


Fig. 5.1. Estructura metálica del puente objeto de estudio.

**Tabla 5.1 Resumen de las características del puente.**

<b>Tipo de puente</b>	Puente de armadura, tablero inferior
<b>Localización</b>	Ramal Cifuentes km. 6,763, Vega Alta, Camajuaní, Villa Clara.
<b>Edad aproximada</b>	104 años
<b>Estribos</b>	Ladrillos
<b>Longitud total</b>	61.2 m
<b>Luces</b>	1
<b>Tipo de traviesas</b>	Traviesas de madera 0.2x0.2x3m
<b>Tipo de carril</b>	P-50
<b>Tipo de guardacarril</b>	80 lb/yd (estadounidense)
<b>Guarderas</b>	80 lb/yd



**Convención Científica Internacional 2021**  
**Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas**  
**Control y mitigación de vibraciones estructurales en puentes de ferrocarril usando**  
**amortiguadores de masa sintonizada.**

<b>Distancia entre ejes de armaduras</b>	4.934 m
<b>Obstáculo que salva</b>	Río Sagua la Chica

### 5.1. Modelación de la estructura en SAP 2000.

El puente consta de una sola luz equivalente a 61.20 m y las condiciones de apoyo se modelaron como un sistema empotramiento-articulación. Se modelaron todas las cargas correspondientes a la estructura, vigas, montantes, diagonales y arriostres con su peso propio, además las cargas móviles pertenecientes al tren.

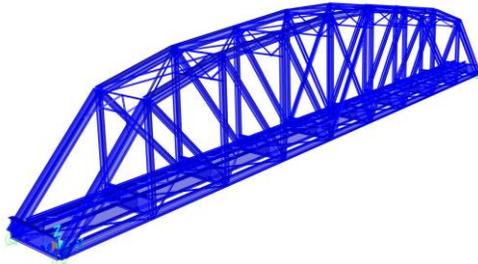


Fig. 5.2. Puente modelado en SAP 2000.

Se creó el patrón de carga Dead, para modelar las cargas permanentes, se incluye aquí el peso propio de todos los elementos y se modelan las cargas de la cama como carga linealmente distribuida de aproximadamente 3.5 kN sobre los rieles P-50 en el patrón de carga Super Dead. La simulación del tránsito ferroviario se ha llevado a cabo mediante un modelo de cargas móviles, según el cual, cada eje de la composición trasmite una fuerza puntual de

valor constante que viaja a la velocidad del tren, despreciando los efectos de interacción vehículo-estructura, todo modelado en el programa SAP 2000 v.21. El primer paso es definir las sendas, a través del comando Moving Loads→Path (Ver Figura 5.3), de esta forma se agregan los elementos que conforman los carriles para la circulación además de la excentricidad de las cargas, si existe.

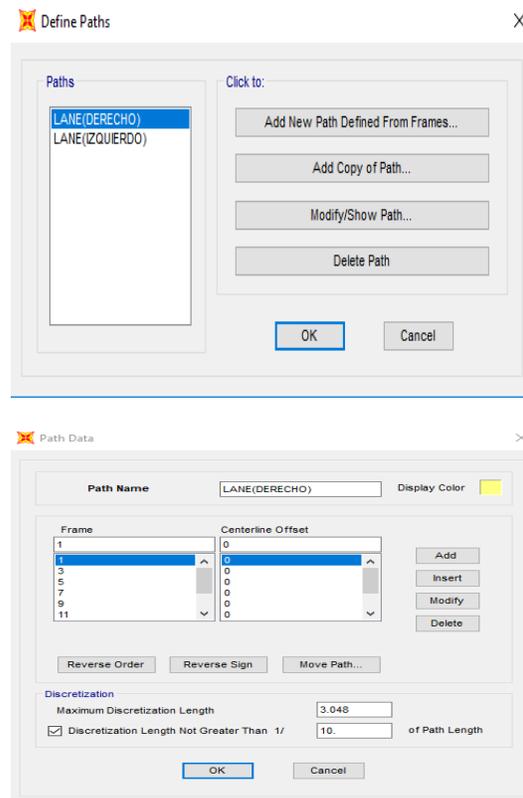


Fig. 5.3. Definición de los carriles de circulación.

Luego de precisar todo lo referente a los carriles, el siguiente paso es especificar las



**Convención Científica Internacional 2021**  
**Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas**  
**Control y mitigación de vibraciones estructurales en puentes de ferrocarril usando**  
**amortiguadores de masa sintonizada.**

cargas, para ello se debe puntualizar la Locomotora y sus vagones, para este caso particular y atendiendo a los trenes que más circulan en nuestro país y pueden circular sobre este puente, se decidió modelar la combinación de Locomotora DF7G-China y los vagones Hopper, a continuación, se enumeran las locomotoras (Tabla 5.2) y los vagones (Tabla 5.3), que existen en Cuba, con sus respectivas cargas:

**Tabla 5.2 Características de las locomotoras.**

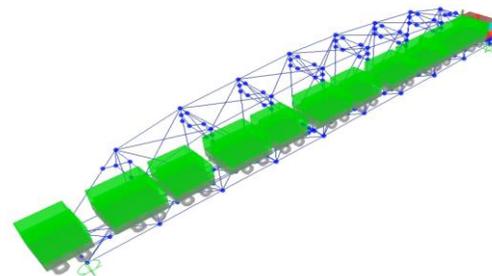
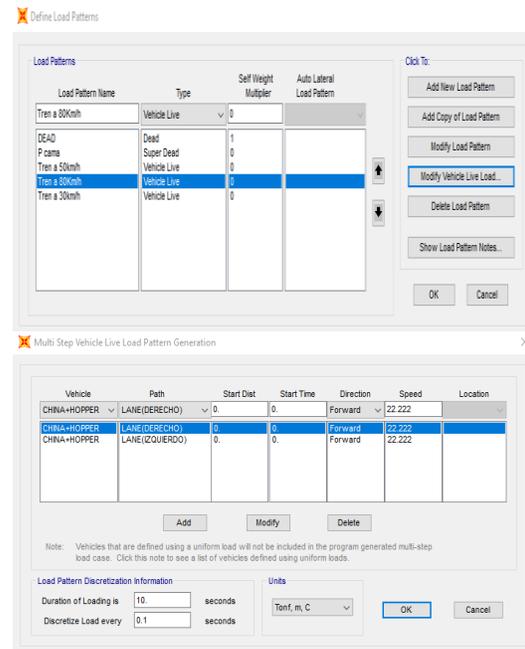
Descripción	Cantidad ejes	Peso x eje (ton)
<b>TEM-4</b>	6	20.40
<b>MLW-Canadá</b>	6	18.70
<b>DF7G-China</b>	6	20.50
<b>TE-114-K</b>	6	20.88
<b>TM-2TK</b>	6	20.00
<b>TGM-4</b>	4	17.00
<b>TGM-8K</b>	4	20.00
<b>ALCO</b>	6	18.20
<b>C – 30 -7</b>	6	24.00

**Tabla 5.3 Características de los Vagones.**

Descripción	Cantidad ejes	Peso por eje (ton)
<b>Tanque</b>	4	19.05
<b>Hopper</b>	4	20.70
<b>Cisterna de cemento</b>	4	21.30
<b>Góndola rumana</b>	4	20.50
<b>Volqueta</b>	4	20.00

Con los datos obtenidos de la tabla para la locomotora y los vagones, se conforma en el programa el tren de cargas a través del

comando Moving Loads→Vehicles y para definir el factor de escala se ejecuta Vehicles Classes. Como próximo paso se establece el patrón de cargas en el que se detallan las características de circulación de los trenes, se trabaja con tres velocidades 30 km/h, 50 km/h y 80 km/h, los datos se introducen en el programa en m/s y también se define la dirección del movimiento:



**Fig.5.4. Definición del patrón de cargas móviles para los trenes en SAP 2000.**



**Convención Científica Internacional 2021**  
**Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas**  
**Control y mitigación de vibraciones estructurales en puentes de ferrocarril usando**  
**amortiguadores de masa sintonizada.**

Definir la fuente de masas es un punto muy importante en este modelo, debido a que la masa de la estructura constituye un paso fundamental para el cálculo de los parámetros óptimos de los TMDs a modelar, es por ello que se tuvo especial cuidado en agregar a la fuente de masas, que por defecto tiene en cuenta el peso propio de los elementos, el peso de la cama del ferrocarril y las traviesas, que se introdujo como un estado de cargas aplicado sobre los carriles, para ello se utiliza el comando Mass Source ( Ver Figura 5.5):

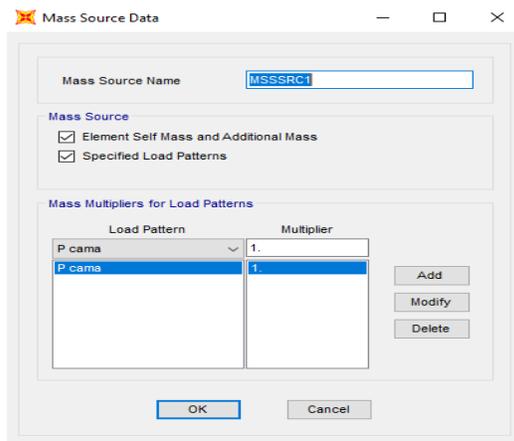


Fig. 5.5. Fuente de masas de la estructura.

## 6. Aplicación de la metodología de diseño de los parámetros óptimos de los TMDs para el caso de estudio.

**Paso 1. Tomar la decisión sobre la norma, por la que se deben optimizar los parámetros del dispositivo ( $\mu$ ,  $\xi_s$  y  $q$ ).**

Como se ha planteado anteriormente en este trabajo, para estructuras de puentes, donde

las cargas tienen generalmente un carácter periódico, una optimización basada en los criterios de Den Hartog o la norma  $H_\infty$ , es lo más adecuado, en este caso específico se seleccionó el criterio de la norma  $H_\infty$ , porque este criterio ofrece resultados confiables en un rango más amplio, cuando la estructura está amortiguada, y se obtienen buenos resultados con razones de amortiguamiento ( $\xi_p$ ) inferiores al 10%, mientras que para el criterio de Den Hartog el límite de fiabilidad se encuentra aproximadamente en el 2%, esta decisión se toma teniendo en cuenta que en las obras de ingeniería civil, la razón de amortiguamiento suele estar entre un 2% y 7%, para el desarrollo de este modelo se asume un 5%.

**Paso 2. Identificar el modo o los modos de vibración de la estructura, que serán amortiguados.**

Luego de analizar los factores de participación modal en la dirección vertical (UZ), se decide; para este caso de estudio, atenuar las vibraciones del modo 4, que, en el modelo desarrollado, es el primer modo vertical y el que cuenta con el factor de participación de la masa modal más significativo en la dirección UZ, en la Tabla 6.1 se muestran estos valores, así como la frecuencia y el período del modo de vibración



**Convención Científica Internacional 2021**  
**Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas**  
**Control y mitigación de vibraciones estructurales en puentes de ferrocarril usando**  
**amortiguadores de masa sintonizada.**

en cuestión. El modo 4 presenta un valor de desplazamiento modal máximo de 0.32m aproximadamente en los nodos centrales (Joint 81, Joint 82 y Joint 83), es por ello que se decide en este trabajo colocar un TMD en cada uno de estos puntos, donde las amplitudes del movimiento son mayores (Ver Figura 6.1).

**Tabla 3.6 Información Modal (Modo 4)**

Modo	Período (s).	Frecuencia (s <sup>-1</sup> ).	Factor de participación de la masa modal(%).
4	0.202	4.9458	71.2

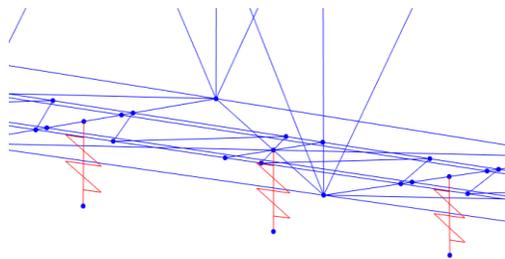


Fig. 6.1. Posición definitiva de los TMD en el modelo.

**Paso 3. Determinación de la masa óptima del TMD ( $\mu_{\text{ópt}}$ ).**

La masa óptima de los TMD, debe estar entre un 1% y 10% de la masa de la estructura. Utilizando el software SAP 2000 se obtuvo la masa de la estructura que es 179.12 ton, es importante en este paso definir que la masa de los TMD sea lo más pequeña posible; con el fin de evitar un reforzamiento adicional de la obra. Es por ello que, en este trabajo, teniendo

en cuenta los estándares globales, se definió como masa de los TMD un valor de aproximadamente el 1% de la masa de la estructura principal, dicho valor se decidió que fuera 1800 kg para cada uno de los tres TMDs colocados.

**Paso 4. Determinación de la razón de amortiguamiento óptima ( $\xi_{\text{sópt}}$ ) y de la relación de frecuencias óptima ( $q_{\text{ópt}}$ ).**

Se calcula la razón de amortiguamiento ( $\xi_{\text{sópt}}$ ) y la relación de frecuencias óptima ( $q_{\text{ópt}}$ ), para ello se utilizan las expresiones que se muestran a continuación  $\mu$ :

$$q_{\text{sópt}} = \frac{1}{1+\mu}$$

$$\xi_{\text{sópt}} = \sqrt{\frac{3\mu}{8(1+\mu)}} \sqrt{1 + \frac{3}{32}\mu}$$

Realizando los cálculos correspondientes, utilizando una relación de masas ( $\mu$ ) definida en el paso 3, se alcanzaron los siguientes resultados  $q_{\text{sópt}} = 0.9901$  y  $\xi_{\text{sópt}} = 0.061$ , con el valor de  $q_{\text{sópt}}$ , se calcula la frecuencia óptima de los TMDs ( $\omega_{\text{sópt}}$ ), que para este caso en particular es 4.8968 s<sup>-1</sup> y despejando en la siguiente ecuación:

$$\omega_{\text{sópt}}^2 = \frac{k_{\text{sópt}}}{m_{\text{sópt}}}$$



**Convención Científica Internacional 2021**  
**Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas**  
**Control y mitigación de vibraciones estructurales en puentes de ferrocarril usando**  
**amortiguadores de masa sintonizada.**

se determina el valor de rigidez ( $k_{s\acute{o}pt}$ ) del TMD, necesaria para introducir en el modelo en SAP 2000, para este caso su valor fue 43.1621 kN/m.

### 7. Procedimiento para la modelación de los TMDs en la estructura de puente en el software SAP 2000.

En este epígrafe se explica el procedimiento a seguir para modelar un TMD en SAP 2000, se ilustran los comandos del programa a utilizar y como introducir los valores de los parámetros óptimos calculados anteriormente.

#### 7.1 Metodología general para insertar un TMD en una estructura en SAP 2000.

Cualquier sistema de resorte-masa puede representar el péndulo oscilante en 2D. Aquí, la constante de resorte se da como  $Mg / L$ , donde  $M$  es la masa,  $L$  es la longitud del péndulo y  $g$  es la gravedad. Es un poco más desafiante modelar un péndulo, que se puede mover libremente en 3D. En este caso, se crea un enlace (Link) lineal para representar el péndulo. Se debe seleccionar Define > Section Properties > Link/Support Properties (Computers and Structures., 2019). (Ver Figura 7.1)

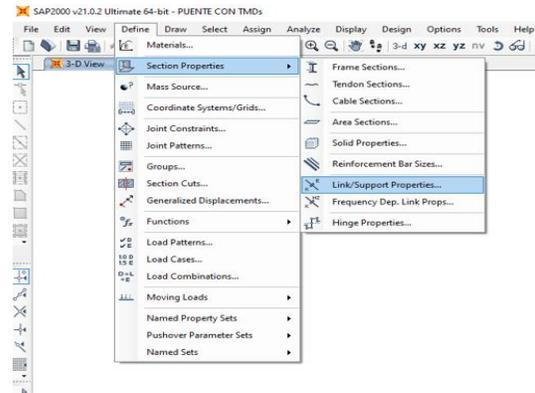


Fig. 7.1. Definición del elemento "Link", para modelar los TMD.

Luego se definen las rigideces traslacionales a lo largo de U1, U2 y U3. La rigidez lineal a lo largo de U1 representa las propiedades axiales del amortiguador y debe basarse en el valor de rigidez de los resortes, valor calculado en el paso 4 de la metodología de diseño ( $k_{s\acute{o}pt}$ ). Las propiedades de rigidez lineal de U2 y U3 se definen y calculan, como  $Mg / L$ . (Computers and Structures., 2019) En el modelo desarrollado, los amortiguadores se sitúan en el tramo central de la luz. La longitud del enlace se define como  $L = 1\text{m}$  y la masa de cada uno de los TMDs es 1800 kg, calculada en el paso 3.



Convención Científica Internacional 2021  
Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas  
Control y mitigación de vibraciones estructurales en puentes de ferrocarril usando  
amortiguadores de masa sintonizada.

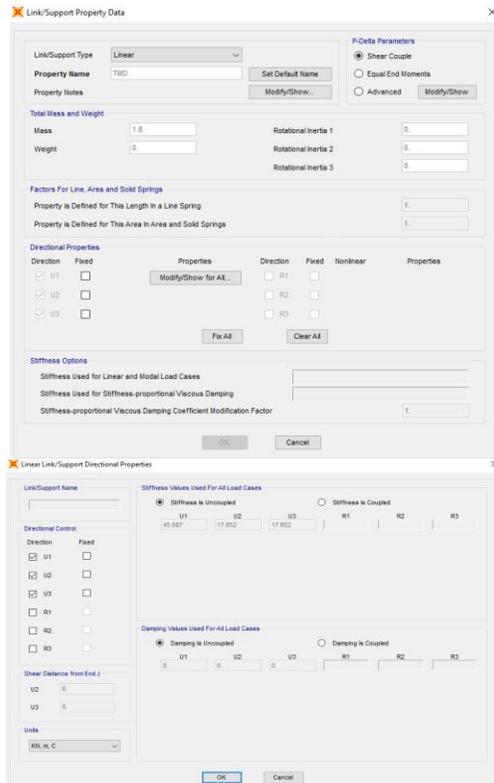


Fig. 7.2. Asignación de Propiedades al TMD.

**Longitud:** La longitud del péndulo afecta directamente el período del TMD. Esto se tiene en cuenta en las propiedades de masa y resorte utilizadas. Sin embargo, la longitud dibujada del objeto de enlace es arbitraria y puede elegirse por conveniencia; incluso puede ser cero. Se recomienda dibujar el enlace de manera que el extremo en I (primera unión) se adhiera a la estructura y el extremo en J (segunda unión) quede libre (Computers and Structures., 2019).

**Masa:** La masa afecta fuertemente la forma en que el TMD influye en la respuesta, es por ello que los cambios en esta magnitud

deben tenerse en cuenta, la masa del TMD debe ser modelada en tres fases (Computers and Structures., 2019):

1. La masa ( $M$ ) debe asignarse al nodo libre (extremo J del enlace), utilizando los comandos Assign>Joint> Masses, en este caso la masa asignada fue 1800 kg.

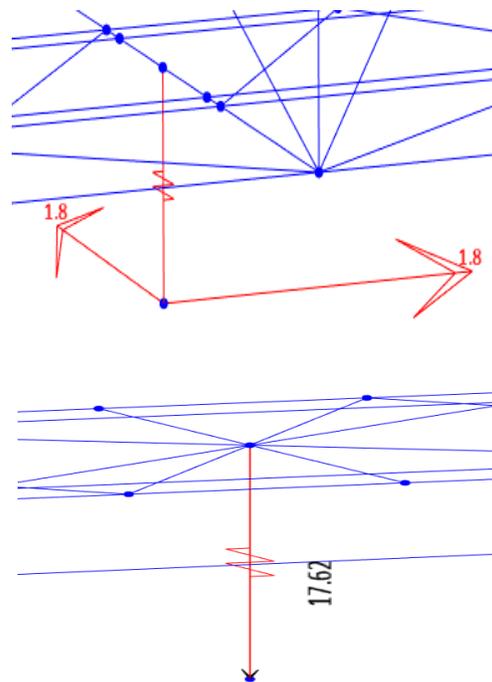
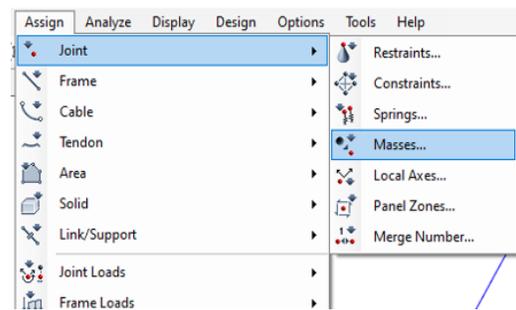


Fig.7.3. Asignación de masas y peso en el nodo libre.

2. El peso ( $W = Mg$ ) debe asignarse al nodo libre (extremo en J del enlace), como una carga



**Convención Científica Internacional 2021**  
**Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas**  
**Control y mitigación de vibraciones estructurales en puentes de ferrocarril usando**  
**amortiguadores de masa sintonizada.**

puntual en la dirección de la gravedad en cualquier patrón de carga de peso propio, se selecciona el punto y utilizando Assign>Joint Loads, se sitúa el peso en forma de carga, para este caso de estudio en particular el peso colocado fue de 17.62 kN (Ver Figura 3.16).

3. Se asigna la rigidez efectiva ( $Mg / L$ ) en las propiedades del enlace, U2 y U3, las rigideces asignadas en U2 y U3 fueron 17.62 kN/m (Ver Figura 7.3).

### **8. Obtención y Análisis de resultados.**

Se realiza un análisis de los resultados obtenidos, al comparar la respuesta de la estructura sin los TMD y su comportamiento con la presencia de estos, teniendo en cuenta que el modelo arroja una cantidad considerable de resultados, se decidió enfocar el estudio en lo sucedido en el nodo central (Joint 81), que presenta en el modelo sin amortiguadores las mayores amplitudes de respuesta en aceleraciones y desplazamientos, todos estos resultados se trabajan con tres velocidades de movimiento, de la combinación de locomotora y vagones seleccionada anteriormente, 30km/h, 50 km/h y 80 km/h .

#### **8.1 Análisis modal.**

Utilizando las bondades que brinda el software SAP 2000, en cuanto al análisis modal, se extrajo de los modelos realizados,

una gran cantidad de datos referente a este tipo de análisis y los estudios se centran el Modo 4, que es el que principal modo vertical y el que presenta el mayor factor de participación modal en la dirección UZ. Particularmente, se realiza una comparación del comportamiento de la estructura modelada, con y sin TMD; para de esta forma evaluar la efectividad de los amortiguadores en la mitigación de las vibraciones.

#### **8.1.1 Análisis de los Períodos de las oscilaciones.**

Una de las magnitudes que mejor caracteriza el movimiento vibratorio es el período de las oscilaciones, la Tabla 8.1 muestra los períodos obtenidos del análisis modal con la presencia de los TMD y sin el efecto de los mismos, como se puede apreciar, los períodos de las oscilaciones son mucho mayores en el modelo en que se tuvo en cuenta los amortiguadores, lo que hace comprender de que a la estructura le toma más tiempo hacer una oscilación completa y como consecuencia se reducen considerablemente las vibraciones, como se observa en la tabla, los modos 3, 4, 5 y 6 presentan diferencias superiores al 90% y en los demás modos los porcentajes de diferencia nunca son menores del 50 %; la respuesta del modo 4 (primer modo vertical), demuestra la efectividad del criterio de



**Convención Científica Internacional 2021**  
**Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas**  
**Control y mitigación de vibraciones en puentes de ferrocarril usando**  
**amortiguadores de masa sintonizada.**

optimización utilizado y de los amortiguadores modelados en general, ya que este es el modo que en un principio se quería amortiguar y del que se tomó la frecuencia de vibración, empleada como base de cálculo de los parámetros óptimos.

**Tabla 8.1 Períodos de las oscilaciones.**

		Sin TMD	Con TMD	% Dif.
<b>Modo</b>	1	0.425	2.506	<b>83.03</b>
<b>Modo</b>	2	0.260	2.503	<b>89.61</b>
<b>Modo</b>	3	0.203	2.459	<b>91.77</b>
<b>Modo</b>	4	0.202	2.458	<b>91.77</b>
<b>Modo</b>	5	0.137	0.880	<b>94.43</b>
<b>Modo</b>	6	0.124	0.879	<b>94.95</b>
<b>Modo</b>	7	0.101	0.427	<b>88.92</b>
<b>Modo</b>	8	0.099	0.262	<b>89.09</b>
<b>Modo</b>	9	0.099	0.204	<b>89.10</b>
<b>Modo</b>	10	0.097	0.203566	<b>77.46</b>
<b>Modo</b>	11	0.094	0.137	<b>64.14</b>
<b>Modo</b>	12	0.094	0.127	<b>53.98</b>

**8.1.2 Análisis de los desplazamientos modales.**

En esta sección se abordarán los resultados obtenidos para el principal modo de oscilación en el eje vertical. Tomando como referencia los nodos 81, 82 y 83 que se encuentran en el centro de la luz se obtienen los desplazamientos modales correspondientes al modo 4, el primer modo vertical, se realizan comparaciones de la respuesta con TMD y sin ellos.

**Tabla 8.2 Modo 4.**

<b>Nodo</b>	<b>Desplazamientos.</b>	
	<b>Sin TMD(m)</b>	<b>Con TMD(m)</b>
<b>81</b>	0.323366	0.000056
<b>82</b>	0.314301	0.000051
<b>83</b>	0.317174	0.000057

Al analizar, en la Tabla 8.2, el comportamiento de los desplazamientos en estos puntos, se puede observar claramente que se reducen a cero prácticamente los valores de dicha magnitud bajo el efecto de los TMD.

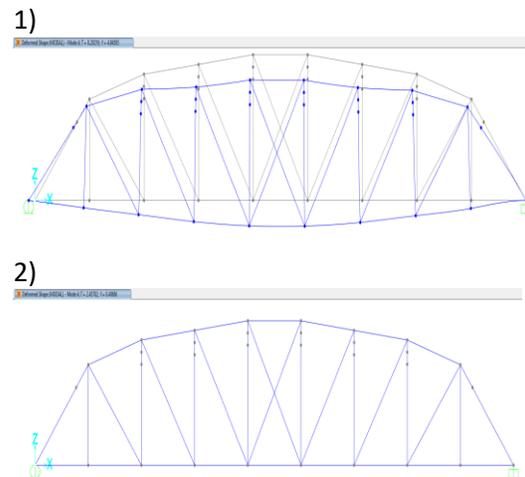


Fig. 8.1 Deformadas del puente sin TMD (1) y con TMD (2).Modo 4.

En la Figura 8.1 se muestran las deformadas del puente para el modo de vibración 4, imágenes que nos permiten constatar la efectividad de los TMD en la mitigación de las vibraciones en este modo, ya que la amplitud del movimiento disminuye considerablemente.



**Convención Científica Internacional 2021**  
**Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas**  
**Control y mitigación de vibraciones estructurales en puentes de ferrocarril usando**  
**amortiguadores de masa sintonizada.**

### 8.2 Análisis Tiempo- Historia.

Aprovechando los datos brindados por el programa, se grafican, superpuestas, las funciones Tiempo-Historia de ambos modelos en aceleraciones, velocidades y desplazamientos. Se realizan los estudios para tres velocidades del tren, 30 km/h, 50 km/h y 80 km/h, la elección de estas velocidades está basada en la NC 249(Oficina Nacional de Normalización (NC), 2003) y la clasificación de las vías férreas que brinda dicha norma. Para graficar las funciones se toma el nodo 81, ubicado en el centro de la luz. Mediante estas comparaciones se pretende demostrar la influencia de los TMD en la reducción de vibraciones, para ello se realiza un análisis no lineal, basado en la solución modal y los estados de cargas creados de la locomotora con sus vagones, explicadas anteriormente.

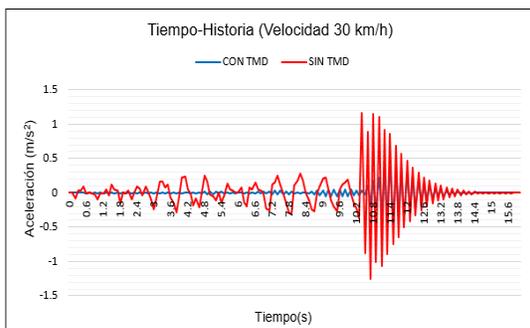


Fig. 8.2. Tiempo – Historia de aceleración.  
Velocidad del tren 30km/h.

Al comparar la respuesta del puente en cuanto a aceleraciones (Figura 8.2), con la velocidad del tren a 30 km/h, se observa la

incidencia de los TMD en el comportamiento de la estructura, ya que los picos son mayores en el modelo que no cuenta con los amortiguadores.

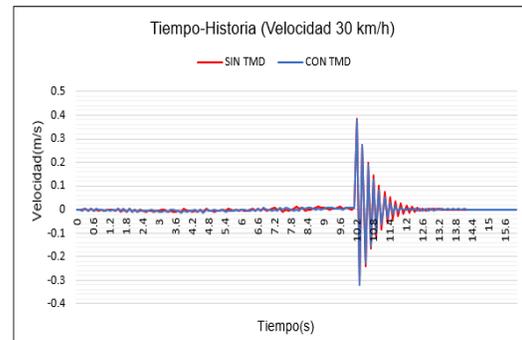


Fig. 8.3. Tiempo – Historia de velocidad.  
Velocidad del tren 30km/h.

La Figura 8.3 muestra el comportamiento de la velocidad en un período de tiempo, para un tren que se mueve a 30 km/h, aunque la incidencia de los TMD, no es tan marcada como en el caso anterior, si se observa una pequeña disminución de los valores máximos en los modelos que presentan los dispositivos.

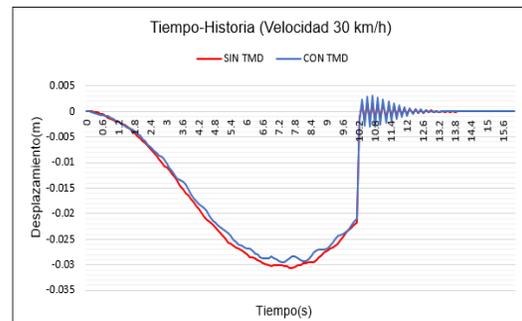


Fig. 8.4. Tiempo – Historia de desplazamiento.  
Velocidad del tren 30km/h.



**Convención Científica Internacional 2021**  
**Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas**  
**Control y mitigación de vibraciones estructurales en puentes de ferrocarril usando**  
**amortiguadores de masa sintonizada.**

En el caso de los desplazamientos, los amortiguadores no tienen una gran influencia, son incorporados a la estructura con el fin de disminuir las vibraciones, aun así, en el modelo con TMDs, la deformación máxima es ligeramente inferior a la que se obtiene en la estructura sin los mecanismos de amortiguamiento.

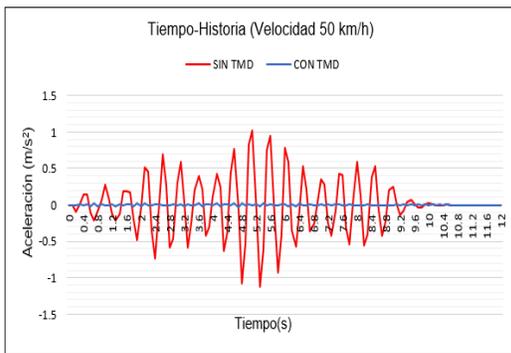


Fig. 8.5. Tiempo – Historia de aceleración.  
Velocidad del tren 50km/h.

Haciendo un análisis de la figura mostrada, en el que se grafican las aceleraciones en el puente para un tren que circula a 50km/h, se puede observar con claridad la marcada influencia de los TMD en la respuesta de la estructura, ya que los valores se reducen considerablemente cuando se comparan con el modelo sin TMD.

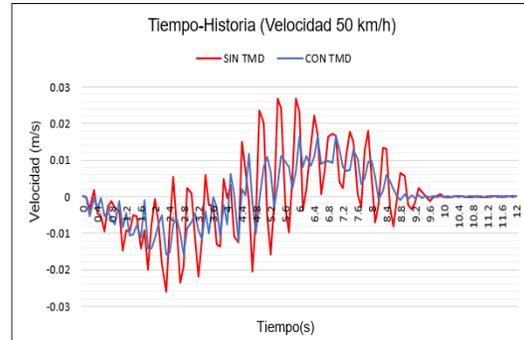


Fig. 8.6. Tiempo – Historia de velocidad.  
Velocidad del tren 50km/h.

Al estudiar las velocidades, encontramos una respuesta parecida de la estructura, la presencia de los TMD en el modelo del puente hace que se reduzcan los picos de velocidad, comportamiento que se puede contemplar en la Figura 8.6.

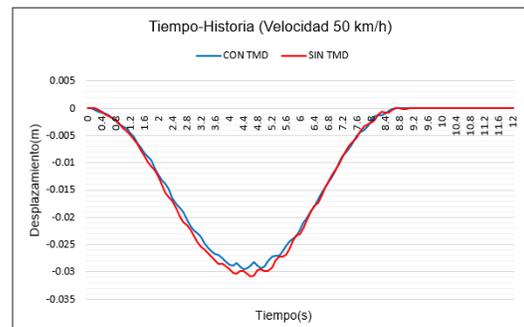


Fig. 8.7. Tiempo – Historia de desplazamiento.  
Velocidad del tren 50km/h.

Como ocurrió para el caso en que la velocidad del tren era 30 km/h, la influencia de los TMDs en la deformación para velocidad de circulación de 50 km/h, no es definitiva, ya que su función está más enfocada en mitigar las vibraciones, de todas formas, se reducen



**Convención Científica Internacional 2021**  
**Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas**  
**Control y mitigación de vibraciones en puentes de ferrocarril usando**  
**amortiguadores de masa sintonizada.**

tímidamente, los desplazamientos cuando se modelan los amortiguadores.

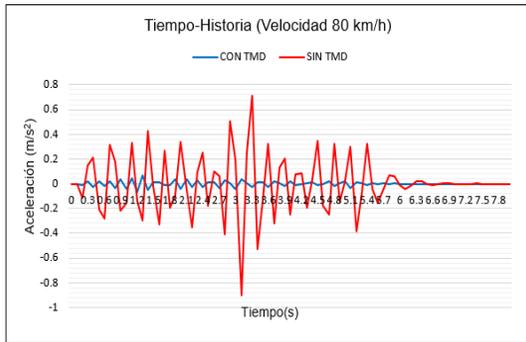


Fig. 8.8. Tiempo – Historia de aceleración.  
Velocidad del tren 80km/h.

Al superponer los gráficos de aceleraciones de los modelos con y sin TMD, para una velocidad del tren de 80 km/h; podemos constatar la eficacia de los dispositivos modelados en la atenuación de las vibraciones, ya que los valores de aceleración disminuyen considerablemente con la presencia de los amortiguadores.

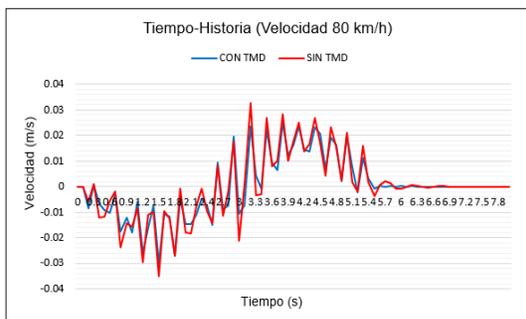


Fig. 8.9. Tiempo – Historia de velocidad.  
Velocidad del tren 80km/h.

El comportamiento de las velocidades, con y sin TMD, demuestran que la modelación de los dispositivos agregados a la estructura,

influye en su comportamiento y modifica satisfactoriamente la respuesta del puente sometido a las cargas del tren en el tiempo.

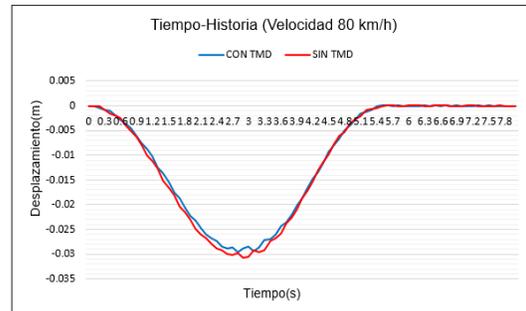


Fig. 8.10. Tiempo – Historia de desplazamiento.  
Velocidad del tren 80km/h.

Como ocurrió para las velocidades anteriores, se demuestra que los TMD no influyen considerablemente en las deformaciones, aunque si tienen una pequeña incidencia en su disminución.

### 8.3 Análisis de la aceleración espectral en función de la velocidad de circulación.

Se realiza en este epígrafe el estudio del comportamiento del puente, bajo las distintas velocidades de circulación 30 km/h, 50 km/h y 80 km/h, para de esta forma tener una valoración más precisa de la influencia de la velocidad de aplicación de la carga y definir cuál velocidad de circulación puede provocar mayores efectos en la estructura.



**Convención Científica Internacional 2021**  
**Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas**  
**Control y mitigación de vibraciones estructurales en puentes de ferrocarril usando**  
**amortiguadores de masa sintonizada.**

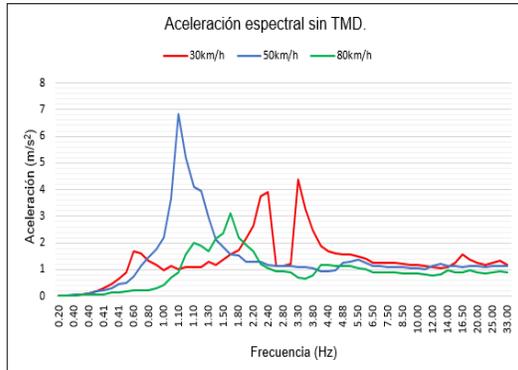


Fig. 8.11. Aceleración espectral vs Frecuencia sin TMD.

El gráfico de la Figura 8.11, se muestran, superpuestos, los espectros de frecuencias en aceleraciones para las tres velocidades de circulación estudiadas en esta investigación, como se observa, el puente sin TMD sufre las mayores aceleraciones en su movimiento, cuando el tren circula a una velocidad de 50 km/h, con aceleraciones 1.5 veces mayores, que cuando este circula a 30 km/h y 2 veces mayores que si lo hace a 80 km/h; valores que nos demuestran que en el comportamiento dinámico de este tipo de estructura, hay que tener en cuenta muchas variables y una mayor velocidad no siempre implica una mayor vibración.

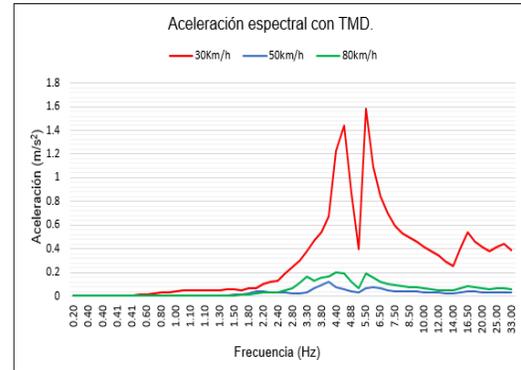


Fig. 8.12 Aceleración espectral vs Frecuencia con TMD.

Al analizar, la influencia de las velocidades de circulación en el puente con TMDs modelados, se puede llegar a varias conclusiones, lo primero que se puede comprobar es la disminución de las aceleraciones cuando el modelo cuenta con los amortiguadores de masa sintonizada, si lo comparamos con los valores presentes en la Figura 3.34, se puede apreciar que son menores que en el modelo sin TMDs, luego evaluando solo para el modelo con TMDs, podemos ver que cuando el tren circula a 30km/h, se presentan los mayores valores de aceleraciones, pero son valores bastante bajos que no son considerados peligrosos, ni dañinos, para este tipo de estructuras.

## 9. Conclusiones.

Los criterios de Den Hartog y la Norma  $H_{\infty}$  se ajustan mejor a estructuras sometidas a cargas periódicas (cargas



**Convención Científica Internacional 2021**  
**Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas**  
**Control y mitigación de vibraciones estructurales en puentes de ferrocarril usando**  
**amortiguadores de masa sintonizada.**

generadas por actividad humana, vehículos, caminar, bailar, saltar, etc.) mientras que para cargas de carácter estocástico (cargas debido a sismos, eventos naturales con fuertes vientos asociados), es apropiado utilizar una optimización basada en la Norma H<sub>2</sub>.

✚ Se pudo corroborar, la validez de la metodología de diseño de los parámetros óptimos de los TMD colocados en el modelo, al evaluar su influencia sobre el movimiento vibratorio de la estructura y comprobar que los dispositivos tienen un efecto positivo en la reducción de la respuesta.

✚ A través del análisis modal, y observando la respuesta del modo 4 (primer modo vertical), se demuestra la efectividad del criterio de optimización utilizado y de los TMD modelados, ya que este es el modo que en un principio se quería amortiguar y del que se tomó la frecuencia de vibración, empleada como base de cálculo de los parámetros óptimos, también se obtienen buenos resultados en los modos 3, 5 y 6, los cuales presentan valores de frecuencia parecidos al del modo objetivo.

✚ Al comparar la respuesta del puente en cuanto a aceleraciones, velocidades y desplazamientos, mediante el análisis Tiempo-Historia con diferentes velocidades del tren a 30 km/h, 50 km/h y 80 km/h, se observa la incidencia positiva de los TMD en

el comportamiento de la estructura, ya que los picos de estas magnitudes siempre son mayores en el modelo que no cuenta con los amortiguadores.

✚ Realizando un estudio del espectro de frecuencias en aceleraciones y velocidades, se pudo observar claramente como los TMDs tienen gran influencia en el comportamiento del puente modelado, y se hace notar la disminución que experimentan ambas, bajo el efecto del amortiguamiento provocado por los dispositivos modelados, también se pudo comprobar que la velocidad de circulación crítica está en el entorno de los 50 km/h.

#### **Referencias bibliográficas.**

1. Asami, T. *et al.* (2002) 'Closed-form exact solution to H<sub>2</sub> optimization of dynamic vibration absorbers attached to damped linear systems', 4.
2. Calero Moraga, M. (2017) 'Diseño óptimo de Múltiples Amortiguadores de Masa Sintonizada sobre pasarelas peatonales'.
3. Computers and Structures. (2019) *Tuned mass damper - Tutorials - Computers and Structures, Inc.* Available at: <http://wiki.csiamerica.com/display/tutorials/Tuned-mass+damper>.
4. GERB (2007) 'Vibration Protection for Structures , Buildings , Machinery and other Equipment with Tuned Mass Dampers



**Convención Científica Internacional 2021  
Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas  
Control y mitigación de vibraciones estructurales en puentes de ferrocarril usando  
amortiguadores de masa sintonizada.**

Vibration Protection for Structures , Buildings  
, Machinery and other Equipment with GERB  
Tuned Mass Dampers’.

5. Hajji, F. E. A. (2016) ‘Trabajo Fin de Grado Ingeniería Civil Análisis y simulación numérica para el diseño de un sistema amortiguador de vibraciones’.
6. Den Hartog, J. P. (1947) *Mechanical Vibrations*. 5th Editio. Dover publications, INC.
7. Oficina Nacional de Normalización (NC) (2003) *Norma cubana 249: 2003*.
8. Weber, F., Feltrin, G. and Huth, O. (2014) ‘Guidelines for Structural Control by’, (November).