



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Metodología para la selección  
de un sistema de control en  
una estructura tipo puente**

**TESIS**

Que para obtener el título de

**Ingeniero Mecánico**

**P R E S E N T A**

Sergio Jesús García Valerio

**DIRECTOR DE TESIS**

M.I. Yahvé Abdul Ledezma Rubio



**Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2021**

Agradecimientos .....	4
Capítulo 1 Planteamiento del Problema .....	5
1.1 Problemática .....	5
1.2 Hipótesis.....	5
1.3 Objetivos .....	6
1.3.1 Objetivo general .....	6
1.3.1 Objetivos particulares .....	6
1.4 Antecedentes .....	7
1.5 Alcance y Resumen.....	8
1.5.1 Alcance .....	8
1.5.2 Resumen.....	9
Capítulo 2 Sistemas de Control de Vibraciones y Matrices de Decisión .....	10
2.1 Tipos de sistemas de control.....	10
2.1.1 Sistemas de control pasivos .....	10
2.1.2 Sistemas de control activos.....	11
2.1.3 Sistemas de control semiactivos .....	11
2.1.4 Sistemas de control híbridos .....	11
2.2 Casos específicos de sistemas de control.....	11
2.2.1 Masas sintonizadas y sus derivados .....	11
2.2.2 Amortiguadores viscosos .....	12
2.2.3 Amortiguadores por fricción seca .....	13
2.2.4 Amortiguadores por histéresis.....	14
2.2.5 Amortiguadores de fluido controlable.....	14
2.2.6 Amortiguadores con orificio variable.....	15
2.2.7 Rigidez variable .....	15
2.2.8 Cambio en la rigidez del sistema.....	15
2.3 Sistemas de aislamiento.....	15
2.3.1 Apoyo de goma laminada y sus variaciones.....	15
2.3.2 Sistemas de aislamiento de piso .....	17
2.4 Implementaciones.....	17
2.5 Selección de Método.....	18
Capítulo 3 Variables para la matriz de decisión .....	20
3.1 Variables a considerar .....	20

3.1.1 Costos .....	20
3.1.2 Tipos de excitaciones .....	21
3.1.3 Ergonomía .....	22
3.1.4 Antigüedad de la estructura.....	23
3.1.5 Tipos de terrenos .....	23
3.1.6 Carga debida al viento.....	24
3.1.7 Fuente de la tecnología .....	24
3.1.8 Etapa de diseño .....	25
3.2 Matriz de decisión .....	25
3.2.1 Matriz de Decisión.....	26
4 Casos de Estudio y Resultados .....	35
4.1 Puente <i>Millenium</i> en Londres, Inglaterra.....	35
4.2 Puente peatonal San Bartolo en Naucalpan de Juárez .....	38
4.3 Puente peatonal Insurgentes Sur.....	41
4.4 Matriz vs FEM.....	45
4.5 Cálculos de TMD.....	48
4.5.1 Amortiguador en medio del puente y sin parámetros optimizados .....	49
4.5.2 Amortiguador en el centro con PTR.....	54
4.5.3 Amortiguador a un cuarto del puente y con parámetros optimizados .....	56
4.6 Resultados .....	58
4.6.1 Amortiguador en medio del puente y sin parámetros optimizados .....	58
4.6.2 Amortiguador en el centro con PTR.....	61
4.6.3 Amortiguador a un cuarto del puente y con parámetros optimizados .....	63
5 Análisis de Resultados y Conclusiones .....	66
5.1 Resultados del trabajo.....	66
5.2 Trabajo a Futuro .....	68
5.3 Conclusiones.....	69
Bibliografía .....	70
Fuentes digitales de información.....	72
Anexos.....	73
A. Factor de Transmisibilidad .....	73
B. Factor de Amplificación.....	75

# Agradecimientos

A mis padres, Noemi y Sergio, por apoyarme, motivarme y siempre ser un ejemplo que seguir en la vida. Los quiero y un agradecimiento no alcanza a expresar todo lo que han hecho por mí.

A mi tía Vero y a mi abuela Queta porque siempre han estado para mí cuando lo necesito y me han apoyado sin dudarlo.

A Lety, Dano, Camey, Fer y Sid. Por ser los mejores amigos que uno puede tener. Porque siempre me motivan a ser mejor y están cuando más los necesito.

A Ale, mi hermana, por aconsejarme y apoyarme en todo lo que puede.

Al M.I. Yahvé Abdul Ledezma Rubio por haberme aceptado. Su apoyo y orientación a lo largo de la tesis fueron indispensables.

A todos los mencionados por nunca dejarme tirar la toalla, nunca se los podré agradecer lo suficiente.

A los sinodales: Dr. Fernando Velázquez Villegas, Dr. Vicente Borja Ramírez, Dr. Jesús Manuel Dorador González, Fis. Juan Velázquez Torres por el tiempo dedicado para la revisión de este trabajo.

A la Facultad de Ingeniería por haberme aceptado y permitirme realizar mis estudios.

A la Universidad nacional Autónoma de México por permitirme realizar mis estudios de licenciatura y haberme becado a través de los programas de manutención y de titulación extemporánea.

# Capítulo 1 Planteamiento del Problema

“En algún lugar, algo increíble está esperando ser conocido”. Carl Sagan

## 1.1 Problemática

En los puentes, un caso particular de estructura civil es menor el desarrollo de los sistemas de control de vibraciones por lo que no existe una guía de selección de métodos de control de movimiento. Generalmente, al usar uno de estos puentes, ya sea peatonal o vehicular, presentan problemas entre las excitaciones y la respuesta del sistema. Cuando la frecuencia de excitación se acerca a alguna de las frecuencias naturales del sistema se tienen movimientos no controlados, estos pueden llegar a afectar este tipo de estructuras.

Un ejemplo es el puente peatonal *Millenium* en Londres, el cual estéticamente hablando es muy atractivo. Sin embargo, este diseño es muy ligero y de poca rigidez, es decir, presentó menor masa respecto al diseño de un puente común y sus elementos proporcionaban una rigidez de la misma magnitud de la masa o cerca de ese valor; lo que ocasionó que sus frecuencias principales se encontraran en la frecuencia de la caminata humana. Esto provocó que comenzaran a haber oscilaciones laterales y a su vez estas causaban que las personas caminaran de forma sincronizada. Esta sincronización causaba oscilaciones más grandes, aún con menos personas presentes para las que se tenía diseñado este puente.

Un problema del día a día en la Ciudad de México son puentes peatonales (por ejemplo, los construidos a través del anillo periférico), los cuales, debido al propio paso del peatón y a la circulación de los carros a todas horas causan incomodidad en las personas que utilicen estos puentes y hasta inseguridad al no saber si el puente resistirá las cargas dinámicas a las que está expuesto. Un problema muy grave es que los puentes no se diseñan para el lugar donde estará, sino que se toma un modelo ya realizado y sin modificarle nada se implementa el puente en cualquier parte. Otra problemática es el mantenimiento y la vida útil del producto. Mientras que en otros países se sabe la carga útil, tiempo de construcción, periodos de mantenimiento y tiempo máximo de operación, en la ciudad muchas veces se nota la carencia de dichos programas.

Una posible solución es hacer un análisis dinámico del puente para poder encontrar sus frecuencias naturales y poder implementar un sistema de control para que las personas puedan cruzar con seguridad estos puentes. Esto evitará las cargas excesivas en el puente, tanto por la excitación externas (sismos, viento) como por las cargas vivas (persona, automóviles) reduciendo el riesgo de que la misma estructura pueda colapsar.

## 1.2 Hipótesis

¿Será posible definir una metodología de selección del sistema de control en función del diseño y uso de un puente (peatonal o vehicular) antes y después de su construcción?

El sistema de control de vibraciones pretende que los movimientos y los picos de aceleración de una estructura disminuyan, llegando a los puntos de confort y seguridad. Esto tendrá como consecuencia el evitar cargas excesivas que pudieran salir de la zona de operación segura de la estructura.

En algunos casos no será necesario el control, en otros casos posiblemente ya se construyó la estructura y hay que corregir las vibraciones que presentan, y en algunos otros, se podrá incidir antes de su construcción en proceso de diseño. En cada una de las etapas mencionadas presenta diferente dificultad, ya que las variables libres sobre las que se puede incidir van cambiando.

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo general**

Plantear un método de selección de sistema de control para sistemas de puentes peatonales y revisar su pertinencia.

Dentro de la investigación previa para este proyecto se encontró que los sistemas de control en construcciones civiles han sido estudiados y probados, sin embargo, en ningún trabajo que utilice un sistema de control se explica por qué se escogió este sistema de control. Este trabajo busca desarrollar una metodología para elegir el sistema de control apropiado para diferentes casos y observar si esto mejora el rendimiento del sistema comparándolo con otros arbitrariamente escogidos.

### **1.3.1 Objetivos particulares**

Para cumplir con el objetivo principal se plantean los siguientes objetivos particulares:

- Describir los sistemas de control de vibraciones actuales.  
  
Es importante describir los sistemas porque a partir de esto se podrá observar que variables intervienen en el sistema y de podrá definir qué variables son importantes para escoger un sistema en específico.
- Realizar una matriz de decisión para elegir el mejor sistema de control de vibraciones.  
  
En esta matriz se basará la metodología de elección de sistema, debido a que a partir de las variables de elección definidas podremos realizar una ponderación y dar una calificación a cada sistema respecto al caso de estudio y determinar el mejor sistema.
- Plantear un caso de estudio los sistemas de control seleccionado.  
  
Para poder probar este método de elección de sistema es necesario un caso de estudio en el cual probarlo y otro sistema elegido arbitrariamente para poder comparar sus rendimientos.
- Realizar simulaciones y pruebas del sistema con y sin control y comparar los resultados.

En este objetivo se realizarán las pruebas necesarias del caso de estudio y se determinará si la metodología de elección es pertinente o no a partir de la comparación con el otro sistema.

## 1.4 Antecedentes

En los últimos años ha habido un crecimiento importante en la población, lo que ha hecho que las edificaciones tengan que ser más altas y ligeras para que puedan utilizarlas más personas y tengan menores costos. Uno de los problemas que presentan estas edificaciones es que tienden a ser muy ligeras teniendo como consecuencias que su rigidez y su amortiguamiento estructural disminuyen. Esto ocasiona que las excitaciones dinámicas (como lo son el viento y los sismos) provoquen incomodidad en las personas que los ocupan, en especial en las plantas más altas y estructuras muy delgadas. (Montanaro, 2002) explica los diferentes sistemas de control que se pueden aplicar dentro de estas edificaciones y menciona algunos de los edificios donde se han utilizado. Por ejemplo, menciona a los sistemas pasivos y a los sistemas de aislamiento de vibraciones, describiendo a los sistemas pasivos únicamente.

(Spencer Jr. & Nagarajaiah, 2003) consideran a los sistemas semiactivos de control como los más adecuados, ya que toman en cuenta que son aquellos que pueden funcionar aun en caso de emergencias, como un corte de electricidad, entre otros. Tienen la robustez de los activos y la fiabilidad de los sistemas pasivos. Únicamente describen a los diferentes sistemas de control y presenta a los primeros sistemas semiactivos, comparándolos por medio del ahorro monetario logrado. Como ejemplos presenta el caso de Japón, en donde se tienen la mayor cantidad de edificios con sistemas de control instalados.

(Scruggs & Iwan, 2005) basan su modelo de análisis en un sistema semiactivo regenerativo aplicado a un edificio de gran altura. A partir de la idea de transformar la energía del movimiento a energía eléctrica hacen al sistema autosuficiente. Únicamente presentan el modelo por medio de las simulaciones, en pos de presentar un nuevo paradigma de diseño, ya que no se necesitaría energía externa al sistema.

(Seung-Yong, Dong-Seok, Kwan-Soon, & Hyun-Moo, 2007) y varios abundan en cómo manejar un sistema semiactivo de amortiguadores magnetoreológicos. Esto presenta un reto porque el comportamiento de los amortiguadores es altamente no lineal, por lo que controles clásicos como el PID no se desempeñan correctamente con estos dispositivos. Ellos proponen un algoritmo de lógica difusa, el cual debido a su robustez permite trabajar correctamente con sistemas no lineales. Concluyendo con su trabajo, exponen con resultados que, aunque el PID puede funcionar, el algoritmo con lógica difusa logra suprimir picos de aceleración y movimiento mejor al poder operar mejor la no linealidad del modelo.

(Nagarajaiah, ASCE, & Sonmez, 2007) plantean un sistema de amortiguadores de masa sintonizada, los cuales en este caso serán semiactivos para poder modificar la frecuencia a la cual están sintonizados los amortiguadores. En este trabajo buscan probar la efectividad de un sistema semiactivo contra un pasivo y concluyen que no solo tiene mejor desempeño el semiactivo, sino que también es más robusto que el pasivo.

(Ikago, Saito, & Inoue, 2012) proponen un sistema pasivo, donde lo que buscan es reducir la masa del amortiguador y con un amplificador de movimiento buscan obtener el mismo nivel de disipación que un amortiguador viscoso de masa normal. Dentro de sus resultados logran igualar la supresión de picos de otros sistemas con amortiguadores normales.

(Chung, Lai, Yang, Lien, & Wu, 2013) se dedican a buscar las condiciones en las que un sistema semiactivo de masa sintonizada realiza su mayor disipación de energía. En su hipótesis plantean que un amortiguador de masa sintonizada logra su mayor disipación cuando se encuentra su movimiento desfasado  $-90^\circ$  respecto al movimiento de la estructura. Por lo que en este trabajo su algoritmo se dedica a buscar ese desfase y aunque no llegan a este desfase (debido a que es más teórico que real este valor), logran demostrar con sus resultados que cuidar este desfase se vuelve crítico cuando quieres disipar la mayor energía de vibración y disminuir los picos de aceleración.

(Thenozhi & Yu, 2013) se dedican a realizar un trabajo donde exponen los avances hasta esa fecha en el modelado de los sistemas de control. En este trabajo discuten a un nuevo tipo de sistema de control, el control híbrido, el cual contiene a un sistema pasivo y a un sistema activo o a un semiactivo. Con este tipo de sistemas se busca tener mayor robustez ante los distintos tipos de excitaciones. Dentro de su investigación encuentran que en el control estructural se han preocupado mucho por los dispositivos y no tanto por las estrategias de control. Mencionan que los sistemas semiactivos e híbridos son los que más auge han tenido. Encuentran que en los sistemas de control no se ha dado la importancia adecuada a la estabilidad del sistema y al retraso de la señal, a pesar de ser estos cruciales para la operación del sistema. Por último, hablan de los acelerómetros, los cuales son los mejores sensores para obtener las lecturas durante eventos sísmicos, sin embargo, al momento de obtener la velocidad y posición numéricamente, estos datos se vuelven poco confiables por la cantidad de ruido en los datos.

Como conclusión, existen ya los sistemas, existe la clasificación, pero no existe una forma de determinar cuál es el mejor para cada caso. Cada uno de los autores se refiere a un caso específico, sin poder comparar entre ellos. Así mismo podemos ver que los más aceptados y probados son los pasivos, debido a su bajo costo de operación. Sin embargo, al tener poca robustez de operación, las investigaciones y los sistemas más modernos son predominantemente semiactivos e híbridos. Los sistemas activos han sido olvidados debido a su gran demanda energética y su nula actividad durante desastres que puedan cortar el suministro de electricidad. Los sistemas semiactivos han sido más utilizados por su baja demanda energética y posibilidad de operar durante fallas de la red eléctrica, además de que ofrecen la robustez y adaptabilidad de los activos. Los sistemas híbridos son bastante nuevos y se componen de un sistema pasivo y un sistema activo o uno semiactivo.

## **1.5 Alcance y Resumen**

### **1.5.1 Alcance**

El alcance de este trabajo es proporcionar una metodología que funcione como método de elección de un sistema de control. Primero se definirán los sistemas de control, desde lo más general hasta los casos particulares de cada tipo de sistema y sus implementaciones. A partir de esto, se definirán variables que puedan intervenir en el proceso de decisión y se podrá diseñar una matriz de

elección de sistema. Se definirán casos de estudio para poner a prueba la metodología. De los casos de estudio se definirán las variables pertinentes para cada uno y se utilizará la matriz para elegir un tipo de sistema que pueda dar solución a la problemática del puente. Una vez elegido el sistema para el caso de estudio, se realizarán simulaciones asistidas por computadora para verificar que el sistema elegido pueda cumplir su función de aminorar las excitaciones que vuelven a los puentes peatonales incómodos e inseguros.

### **1.5.2 Resumen**

Dentro del primer capítulo se observó la problemática por la cual este trabajo nace, la justificación, la hipótesis generada a partir de los elementos anteriores, los objetivos y antecedentes pertinentes.

En el segundo capítulo se explica brevemente los tipos de sistemas de control, sus casos particulares y sus implementaciones en el mundo. De la misma forma se explican las bases del método de selección.

El tercer capítulo presenta las variables que construyen a la matriz, mediante las cuales se busca hallar una posible solución a los problemas de vibración presentados en puentes peatonales. También se presenta la construcción de la matriz de selección de sistema y sus valores con los cuales se calificará al sistema de control para cada caso de estudio.

En el cuarto capítulo se introducen los casos de estudio y las problemáticas que presentan. Igualmente se exhiben los resultados de la matriz y los resultados de la simulación buscando las diferencias de la estructura actuando sola y actuando cuando el sistema de control elegido interactúa con la misma.

Para el último capítulo se analizan los resultados y se argumenta el cumplimiento de los objetivos, así como las oportunidades de mejora del método de elección.

# Capítulo 2 Sistemas de Control de Vibraciones y Matrices de Decisión

"La ciencia consiste en sustituir el saber que parecía seguro por una teoría, o sea, por algo problemático".

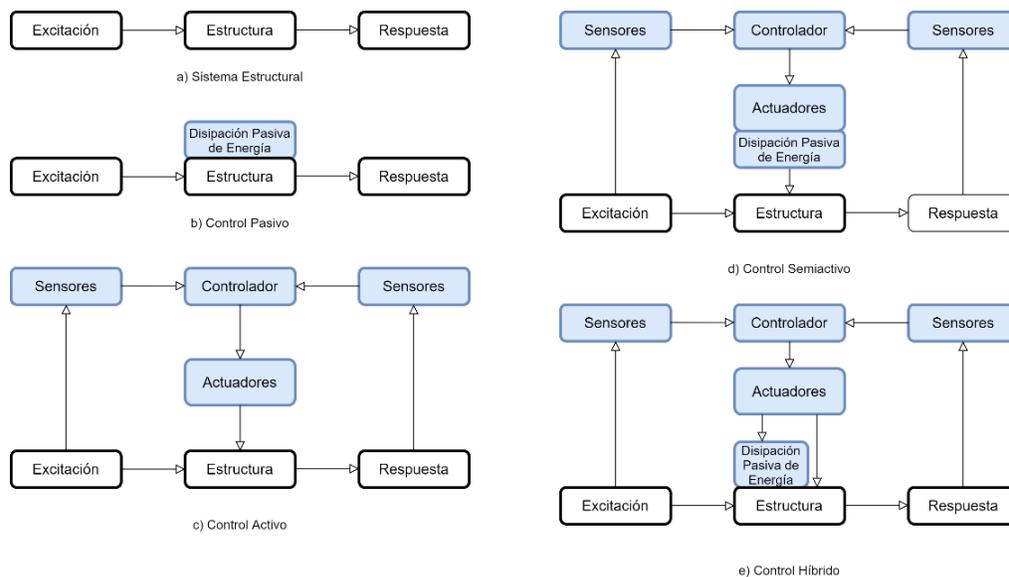
José Ortega y Gasset

## 2.1 Tipos de sistemas de control de vibraciones

Los sistemas de control de vibraciones son aquellos que buscan disminuir o eliminar el efecto de las vibraciones en un sistema, ya sea controlando los efectos o aislando al sistema de estas vibraciones; se dividen en 4 tipos de sistemas: pasivos, activos, semiactivos e híbridos.

Figura 1

*Tipos de sistemas de control*



Nota. Se muestran esquemas de cómo funciona una estructura sin control y como intervienen los distintos tipos de sistemas de control. Adaptada de (Thenozhi & Yu, 2013)

### 2.1.1 Sistemas de control pasivos

Los sistemas de control pasivos son aquellos que no necesitan energía externa para funcionar, por esta razón son altamente confiables y sólo requieren de mantenimiento periódico para que puedan funcionar correctamente. No necesitan de ninguna señal de entrada para trabajar, así mismo (Thenozhi & Yu, 2013) habla de los sistemas pasivos; una de sus características principales es que son los únicos que no utilizan retroalimentación para su operación.

Las desventajas de estos sistemas es que sólo pueden ser sintonizados a una frecuencia natural (de la estructura), por lo que deja desprotegido a la estructura ante excitaciones que actúen cerca o en otras de sus frecuencias naturales. Otra desventaja de esta sintonización única es que con el deterioro de los materiales y la falta de mantenimiento de la estructura puede causar que la frecuencia natural cambie, quedando desprotegidas contra excitaciones en estas regiones de frecuencia.

### **2.1.2 Sistemas de control activos**

Los sistemas activos son aquellos que disipan la energía de vibración con actuadores o amortiguadores que requieren de una alta demanda energética para poder actuar. Su ventaja frente a los pasivos es que mediante la lectura del sistema (utilizando sensores) y de la excitación se puede conocer la frecuencia de la excitación. A partir del conocimiento de estos valores se puede sintonizar el sistema a la frecuencia de excitación y lograr una mayor protección a un mayor número de frecuencias que el sistema pasivo. Su desventaja es su alta demanda energética, ya que necesitará estar siempre conectado a la red eléctrica del edificio y en caso de que alguna excitación quite el suministro, estos sistemas quedarán inutilizables.

(Thenozhi & Yu, 2013) menciona que en los sistemas semiactivos y activos el controlador genera una señal de salida que funciona como retroalimentación del sistema, generando una estructura de lazo. Esta salida es usada para operar a los dispositivos para que atenúen la vibración. En los sistemas híbridos ocurren los dos modos, debido a que combinan un dispositivo pasivo con uno activo o semiactivo.

### **2.1.3 Sistemas de control semiactivos**

(Spencer Jr. & Nagarajaiah, 2003) definen a los sistemas semiactivos como aquellos que no pueden aplicar energía mecánica en el sistema estructural controlado, pero que tiene propiedades que pueden ser controladas para reducir las respuestas del sistema. Combinan la adaptabilidad de los activos con la fiabilidad de un sistema pasivo y lo mejoran con una baja demanda energética en la operación.

### **2.1.4 Sistemas de control híbridos**

Los sistemas de control híbridos son definidos como la combinación de dos sistemas de los previamente vistos. Como base tienen a un sistema pasivo para tener un sistema que siempre se encuentre trabajando en una frecuencia. Para ampliar la adaptabilidad, al sistema se añade un sistema activo o semiactivo, el cual podrá sintonizarse a diferentes frecuencias naturales.

## **2.2 Casos específicos de sistemas de control de vibraciones**

### **2.2.1 Masas sintonizadas y sus derivados**

En este tipo de sistemas se añade una masa, que tiene la función de alterar el comportamiento de la estructura al agregarse un grado de libertad al sistema. Dentro de este tipo de amortiguadores se tienen: los amortiguadores de masa sintonizados (AMS) y los amortiguadores de líquido

sintonizados (ALS). También se llegan a considerar a sus derivados, los cuales consisten en un arreglo de varios amortiguadores ordenados (Montanaro, 2002).

Los AMS se componen en su mayoría de una masa, un resorte y un amortiguador viscoso. Estos son colocados en el sistema para atenuar la vibración no deseadas a una frecuencia determinada. La frecuencia natural del AMS se sintoniza con la frecuencia natural del sistema principal, haciendo que el AMS tienda a la resonancia y disipe la energía absorbida a través de sus mecanismos de amortiguamiento. Los parámetros de diseño más importante son: la relación de frecuencia entre amortiguador y la estructura, la relación de amortiguamiento y la relación de masa entre el AMS y la estructura. La desventaja del AMS es que solo se puede sintonizar a una frecuencia y para un sistema de  $n$  grados de libertad no es útil. Para sistemas de múltiples masas se crearon los MAMS (Múltiples Amortiguadores de Masa Sintonizada), los cuales consisten en un gran número de pequeños osciladores con frecuencias naturales distribuidas alrededor de las frecuencias naturales de los modos de vibración de la estructura.

Se definen a los ALS en su caso más general como un tanque de líquido (agua) que debe estar sintonizado mediante la altura del espejo de agua a la frecuencia de la excitación. En este caso el movimiento oscilante del líquido es el que absorbe la energía, mientras que la viscosidad del líquido y la fricción entre el líquido y el recipiente son las que la disipan. Un caso especial son los amortiguadores de columna de líquido sintonizados, estos son utilizados para disminuir las vibraciones producidas por el viento en estructura muy altas. La ventaja que presentan es un costo inicial bajo y un mantenimiento de coste bajo.

Los amortiguadores antes mencionados son pasivos, es decir que se sintonizan a una sola frecuencia de excitación y trabajarán cerca de esta. En la actualidad existen los sistemas de masa sintonizada activos, semiactivos e híbridos, los cuales logran tener la mejora de poder cambiar la frecuencia a la que disiparán energía dependiendo de los ajustes del resorte y del amortiguador. Esto hace a los AMS más robustos y en general tener un mejor funcionamiento al suprimir los efectos de las vibraciones en la estructura.

Para ejemplificar la eficacia de estos sistemas, (Nagarajaiah, ASCE, & Sonmez, 2007) compara el comportamiento de un sistema semiactivo de masas sintonizadas contra un sistema pasivo de masa sintonizada. En sus resultados encuentra que no solo puede atenuar más frecuencias el sistema semiactivo que el pasivo, sino que también logra tener una mejor supresión de picos de aceleración y movimiento.

### **2.2.2 Amortiguadores viscosos**

(Connor, 2003) define a los amortiguadores viscosos como aquellos en los que la disipación de energía sucede debido a la fuerza opuesta por un fluido viscoso al ser sometido a un desplazamiento. La fuerza opuesta por el fluido será directamente proporcional a la velocidad con la que está siendo excitado.

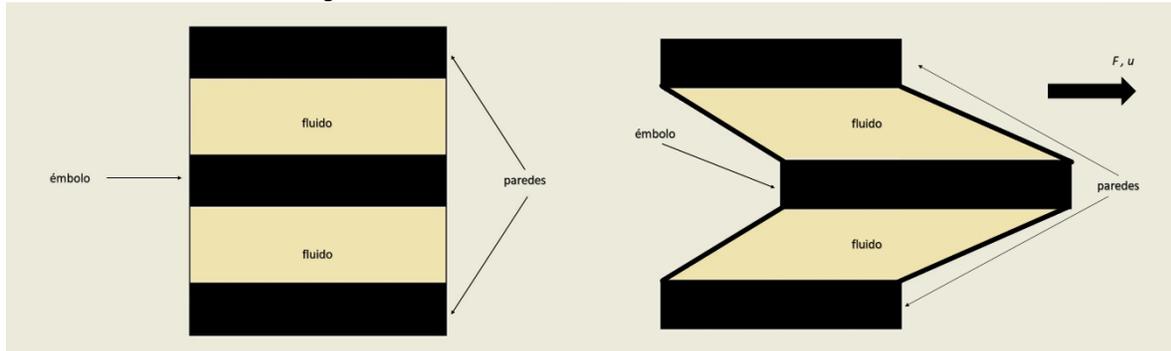
En teoría, a mayor frecuencia del movimiento, mayor energía disipa el amortiguador; sin embargo, en la realidad se ha encontrado que la energía disipada no varía con la frecuencia que se excite al

amortiguador. Sus parámetros de diseño reales son las medidas del amortiguador y la viscosidad del fluido escogido.

En los amortiguadores de aceite la disipación se produce cuando un pistón se desliza sobre el fluido, similar a los del automóvil.

**Figura 2**

*Funcionamiento de un amortiguador viscoso*



Nota. Adaptada de (Connor, 2003)

En la ilustración anterior se muestran los parámetros de diseño para un amortiguador viscoso, los cuales tienen que ver con las dimensiones del amortiguador, así como la distancia entre el émbolo y las paredes del amortiguador, el último parámetro es la viscosidad del fluido.

### 2.2.3 Amortiguadores por fricción seca

Un método que ocupan dentro del aislamiento es la fricción pura. Disipan la energía por medio de fricción seca, siendo ésta en la superficie entre la edificación y su cimentación. Esto lo logran añadiendo rodillos rugosos o capas de arena entre las superficies (Montanaro, 2002).

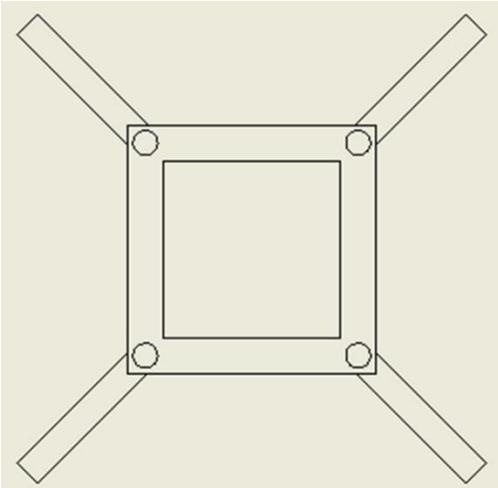
Otro modelo es el sistema de péndulo de fricción. Este consiste en un deslizador sobre una superficie esférica cóncava. El deslizador se moverá desfasado al edificio lo que hará que este disipe la energía por medio de la fricción entre las superficies. Este se puede ver utilizado en el Nuevo Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México.

Los sistemas elásticos-friccionales se componen de dos capas, una de acero y una de teflón vulcanizado con goma. Este sistema funciona como un apoyo de goma ante cargas de baja intensidad, mientras que ante cargas de alta intensidad disipa la energía por medio de la fuerza de fricción entre las superficies.

Los amortiguadores de fricción variable son aquellos que utilizan las fuerzas generadas por la fricción en la superficie de contacto para disipar la energía. Estos operan por medio de la variación de la fuerza normal en la superficie y su consecuente variación de la fuerza en la interfaz de fricción. Con ello permiten el deslizamiento en cantidades controladas (Spencer Jr. & Nagarajaiah, 2003).

**Figura 3**

*Amortiguador de fricción tipo abrazadera*



Nota. Adaptada de (Connor, 2003)

#### **2.2.4 Amortiguadores por histéresis**

Estos sistemas se basan en el amortiguamiento por histéresis de los materiales. La histéresis significa que alguna propiedad del material queda alterada, aún en ausencia de un estímulo externo, ocasionando que se disipe energía en cada ciclo, siendo esto de forma no lineal. En algunos casos la energía se pierde en forma de calor, como lo que ocurre en materiales metálicos (acero, plomo) o en otro tipo de sistemas (friccionales, viscoelásticos). (Montanaro, 2001)

Uno de los mecanismos más efectivos para disipar energía en una estructura metálica es la deformación plástica de sus componentes, con el defecto de quedar permanentemente deformados. Otro mecanismo menos efectivo es cuando a nivel microscópico se ocasiona esta deformación, siendo que el proceso reversible no sea completamente ideal. En cada ciclo se va perdiendo energía en deformaciones entre los planos cristalinos, teniendo como desventaja alteraciones en la estructura cristalina y una disipación de energía lenta.

#### **2.2.5 Amortiguadores de fluido controlable**

Los amortiguadores de fluido controlable son de dos tipos: electrorreológicos o magnetoreológicos. Ambos utilizan las propiedades del fluido que se modifican mediante la acción de un campo eléctrico o magnético respectivamente. Esto ocasiona que la viscosidad aparente del fluido cambie. Son más ocupados los sistemas magnetoreológicos que los electrorreológicos; esto es debido al comportamiento no lineal de estos últimos, en comparación con los primeros (Spencer Jr., 2003).

Los magnetoreológicos son los que han tenido mayor aplicación en ingeniería. Su principio de operación es cambiar entre un fluido de libre flujo y viscosidad lineal a un semisólido con una fuerza de cedencia controlable (viscosidad variable equivalente). Esto se logra al exponer al fluido a un campo magnético, ocasionando un cambio de comportamiento en cuestión de milisegundos. Su rango de operación está entre  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Los electrorreológicos operan bajo el mismo principio,

pero únicamente bajo la acción de un campo eléctrico con los problemas de no linealidad antes mencionados.

Los comportamientos de ambos tipos de sistema son altamente no lineales, por lo que para su correcta implementación se necesita un algoritmo de control que pueda trabajar a pesar de estas no linealidades. Dentro de esta idea (Seung-Yong, Dong-Seok, Kwan-Soon, & Hyun-Moo, 2007) buscan probar el funcionamiento de un algoritmo de lógica difusa y compararlo con un algoritmo altamente lineal como lo es el PID (Control Proporcional, Integral y Derivativo) y encuentran que la lógica difusa al poder atender mejor las no linealidades del sistema lleva a una mejor supresión de picos de aceleración del sistema y menor movimiento en general.

### **2.2.6 Amortiguadores con orificio variable**

Un sistema es de amortiguadores con orificio variables. Funcionan con una válvula electromecánica la cual decide cuando abrir o cerrar para determinar el accionamiento del amortiguador en ese momento (Spencer Jr. & Nagarajaiah, 2003).

El problema que presentan los amortiguadores con orificio variable es que sólo operan en abierto o cerrado, contando con dos estados de operación.

### **2.2.7 Rigidez variable**

A raíz de esto surgen los dispositivos con rigidez variable con los cuales se puede tener un control más exacto de cómo funcionará el dispositivo gracias a que no sólo tiene dos estados de operación.

### **2.2.8 Cambio en la rigidez del sistema**

Este tipo de control trata de intervenir al sistema para poder variar su rigidez. Esto se logra mediante el cambio de la sección transversal de los elementos, al adherir elementos como vigas entre las esquinas de un marco o costillas en los lados de las vigas. Es un tipo de control efectivo al variar las frecuencias principales del sistema. Entre sus desventajas se encuentra: un costo elevado de instalación y la necesidad de cerrar la estructura al paso debido a lo invasiva que es la instalación de estos.

## **2.3 Sistemas de aislamiento de vibraciones**

Para (Montanaro, 2002) los sistemas de aislamiento separan la estructura del suelo disminuyendo la excitación sísmica que llega directamente a la edificación. Los sistemas de aislamiento se dividen en dos grupos: Aislamiento de base y aislamiento de piso.

### **2.3.1 Apoyo de goma laminada y sus variaciones**

(Montanaro, 2002) define el apoyo de goma laminada con capas de acero, el cual permite transmitir las cargas a lo largo de su eje axial, mientras que las cargas perpendiculares al mismo son disipadas en la goma (sísmicas). El acero es quien controla el movimiento perpendicular al eje del apoyo, manteniendo contenida a la goma.

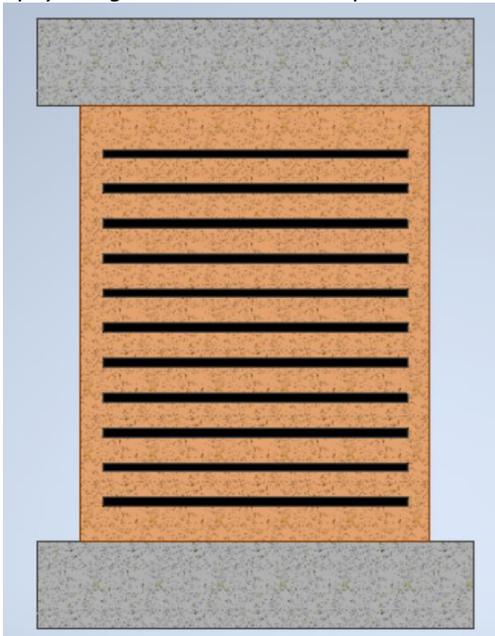
Otro sistema son los amortiguadores compuestos. Estos están hechos por un amortiguador viscosos y un apoyo de goma laminada en conjunto. Son ocupados en edificios cercanos a vías de comunicación terrestres, pues evitan las excitaciones verticales del paso de vehículos en las mismas.

Una variación del primero es el apoyo de goma laminada con núcleo de plomo. El núcleo de plomo incrementa el amortiguamiento de tipo estructural, a través de la fluencia bajo deformación lateral del núcleo. Una ventaja de este tipo de apoyos es que ante cargas de servicio pequeñas (vehículos, viento) incrementa la rigidez, mientras que ante cargas mayores (sismos) disipa por fluencia.

Un caso más son los apoyos de goma: únicamente tienen este material dentro de su composición ya que quitan las capas de acero. Los componentes de la goma y su tratamiento aumentan la amortiguación de este sin tener la necesidad de añadir acero. Estos son ocupados en tuberías colgantes y en conexiones entre las mismas.

**Figura 4**

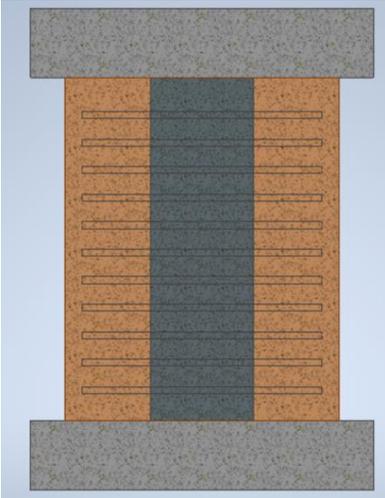
*Apoyo de goma laminada con capa de acero*



Nota. Se muestra como está constituido un apoyo de goma laminada. Adaptada de (Montanaro, 2002)

**Figura 5**

*Apoyo de goma laminada con capa de acero con núcleo de plomo*



Nota. Adaptada de (Montanaro, 2002)

### **2.3.2 Sistemas de aislamiento de piso**

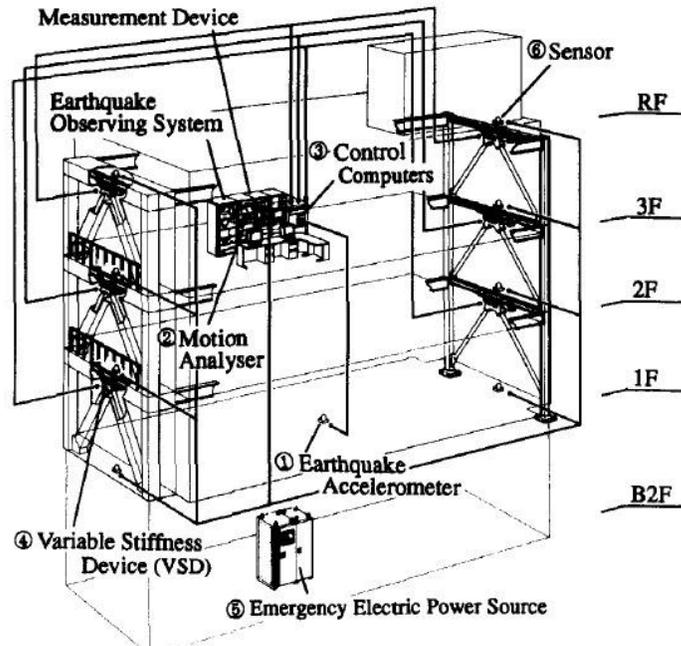
(Montanaro, 2002) habla de los sistemas de pisos aislantes se utilizan cuando se desea aislar solo una habitación del edificio. Por lo general donde hay instrumental de precisión o máquinas costosas. Este sistema puede ser bidimensional o tridimensional y consisten en aisladores de goma laminada con capas de acero para los movimientos horizontales, resortes especiales para el movimiento vertical y amortiguadores de aceite para reducir los desplazamientos. Es de notar que todos los sistemas antes mencionados se tratan de sistemas pasivos únicamente.

## **2.4 Implementaciones**

En el instituto de investigaciones técnicas de Kajima podemos encontrar un amortiguador de rigidez variable como se ve en la siguiente imagen:

Figura 6

Sistema semiactivo del instituto de investigaciones técnicas de Kajima



Nota. Fue el primer sistema semiactivo implementado en la historia y se basa en amortiguadores de rigidez variable. Tomada de (Kobori, Takahashi, Nasu, & Niwa, 1993)

El sistema consta de un dispositivo hidráulico con una válvula de paso que sirve para variar el estado del sistema entre encendido y apagado. Esto ocasiona que el sistema cambie su rigidez al momento de estar diferentes estructuras en contacto. En la posición de apagado cuenta con una rigidez baja, mientras que en encendido conecta otros elementos mecánicos para lograr mayor rigidez (Spencer Jr. & Nagarajaiah, 2003).

Otro edificio con amortiguamiento inteligente es el edificio Kajima Shizouka en Japón. Este tiene amortiguadores hidráulicos semiactivos, los cuales contienen una válvula de control de flujo, una válvula antirretorno y un acumulador. El sistema puede desarrollar una fuerza de amortiguamiento máximo de 1000 kN.

En 2001 se implementó el primer amortiguador magnetoreológico en Japón; el museo de ciencia emergente en Japón utiliza dos amortiguadores magnetoreológicos de 30 toneladas y estos se encuentran instalados en el tercer y quinto piso.

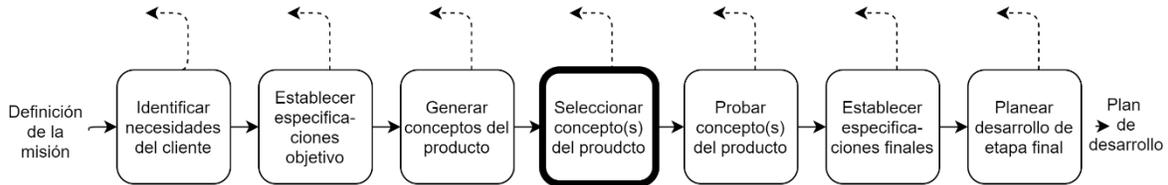
## 2.5 Selección de Método

Para la matriz de decisión sobre cuál es el sistema de control más apropiado, ésta se basará en lo expuesto por (Ulrich & Eppinger, 2013) en su libro de "Diseño y desarrollo de productos". Dentro del proceso de desarrollo de productos que ellos proponen, la decisión se basará en el capítulo de "Selección de producto". Dentro del proceso de diseño se identifican las necesidades del cliente (puente) y se genera una variedad de soluciones a estas necesidades (sistemas de control).

Se define a la “selección del concepto” como el proceso para evaluar conceptos con respecto a las necesidades del cliente y otros criterios, comparando los puntos relativamente fuertes y débiles de los conceptos, y seleccionando uno o más de éstos para su posterior investigación, prueba o desarrollo.

**Figura 7**

*Proceso de Diseño del Producto*



Nota. Adaptada de (Ulrich & Eppinger, 2013)

En la imagen de arriba se presentan todas las etapas del diseño de un producto.

Dentro de la selección de concepto se definen criterios de selección basados en la necesidad del cliente. A cada uno se le da una ponderación de entre 0 y 1, dependiendo de la importancia que considere el cliente (por ejemplo 0.2, refiriéndose al 20%). El siguiente paso dentro de esta etapa es calificar a los distintos tipos de soluciones respecto a los criterios de selección siendo 0 que no satisface el criterio y 10 que lo satisface completamente, tomando para esta calificación únicamente los números enteros (0, 1, 2, ..., 10). A continuación, se multiplica la calificación que obtuvo la solución por la ponderación del criterio. Se suman todas las multiplicaciones y esa suma es la calificación que obtiene en total la solución. El mejor calificado o los dos mejores calificados siguen a la etapa de probar el concepto del producto.

En el caso de este trabajo, las necesidades a atender son las del caso de estudio, los criterios de selección son las variables que se tratarán de definir para seleccionar el sistema apropiado y la mejor solución será el sistema de control a ser probado contra otros sistemas arbitrariamente elegidos.

# Capítulo 3 Variables para la matriz de decisión

“La ciencia se compone de errores, que a su vez son los pasos hacia la verdad”. Jules Verne

Dentro de este capítulo se definirá la forma de realizar la selección del sistema de control. Este procedimiento incluye el definir las variables que intervienen en la toma de decisiones y con ellas formar un algoritmo. Este algoritmo dará la ponderación a cada uno de los factores y llevará a decidir cuál de los sistemas de control es el adecuado para cada situación.

## 3.1 Variables a considerar

### 3.1.1 Costos

El costo de un sistema de control puede ser clave en la decisión de instalarlo o no. En un inicio se consideró que los sistemas de control solamente incrementarían el costo total de la obra, y por lo tanto no eran viables. Sin embargo, con distintos análisis de costos como los de (Kilar, Petrovčic, Koren, & Šilih, 2013) se demuestra lo contrario. Comparando el costo de un sistema de control y su mantenimiento preventivo contra el costo de reparar la estructura debido a sismos, incluyendo los costos relativos a rentar otro espacio y de mercancía dañada, en muchas ocasiones es más rentable el sistema de control que otras soluciones. Así mismo, al tener un sistema que protege de movimientos que ocasionen daños a la estructura se puede ahorrar dinero al usar un material menos rígido sin tener que comprometer la seguridad de la estructura.

Se encontró que, en general, un sistema de control llega a costar entre 2% y 3% del costo total de la obra. Dentro de este costo, también se encontró que el mantenimiento preventivo del sistema no llega a superar el 10% del costo total del propio sistema.

El costo resulta importante al poder ser el factor determinante entre darle más vida a una estructura o debido al alto costo de mantenerla, se haga desde cero la estructura.

Como ejemplo en los que el costo de cerrar operaciones de una estructura es privativo se encuentra:

El refuerzo del edificio H de la UAM-Azcapotzalco (Ramírez Centeno & Caamaño Cortes, 2002). Dentro de varios factores a evaluar, no se podía cerrar el edificio mientras se reforzaba sísmicamente. Esto implicaba el paro de las actividades ofrecidas dentro del edificio y la necesidad de conseguir otras instalaciones, lo cual no sería costeable por la universidad. Por lo que se optó por un reforzamiento que no necesitara cerrar la escuela.

Como ejemplos en los sistemas de control donde no dependen directamente del costo:

En el Taipéi 101 se implementó un amortiguador de masa sintonizada activo, el más grande del mundo. El costo dentro de esta construcción no fue privativo (se gastó más de \$1000 MUSD), la

razón del amortiguador fue mitigar todas las excitaciones externas que afectan a la estructura. Primero, debido a la zona en la que se construyó el Taipéi 101, esta es altamente sísmica. Segundo, debido a sus características (un edificio de 508 m de altura) es altamente susceptible a daños por viento, y donde los ciclones son frecuentes.

Dentro de México podemos encontrar trabajos como la torre Latinoamericana, la cual, para la época en la que fue construida, fue muy innovadora. Su costo, en 1956, fue de \$MXN 64 millones. La intención de su protección fue protegerla ante la alta tasa de sismos presentes en la zona de la cuenca del valle de México. Su protección se realiza de dos etapas, ambas pasivas. La primera fue hacer una cimentación profunda que llegaran a la capa firme del subsuelo. Posterior a esta primera cimentación se encuentra una cimentación de cajón al nivel del subsuelo lodoso, ocasionando un cambio en el comportamiento del suelo. De esta forma la cimentación profunda recibe el mayor movimiento del sismo, pero el edificio no. Fue una forma innovadora de implementar una rigidización del subsuelo y un cambio de frecuencias con los dos sistemas de cimentación, aislando al edificio de las frecuencias principales del suelo.

### **3.1.2 Tipos de excitaciones**

En el trabajo de los puentes peatonales, existen 3 excitaciones externas que pueden provocar interrupción en el uso de estos: excitación sísmica, excitación por viento y excitación por el paso peatonal. Dependiendo del puente y de sus características será la excitación que más preocupe y pueda afectar su funcionamiento. Pueden llegar a ocurrir que los 3 tipos de excitaciones simultáneamente, siendo que una solución que únicamente funcione para una de las excitaciones no sea útil para las otras. Por ello se necesitará un sistema que trabaje en diversas frecuencias, siendo aquí donde valoraremos qué sistemas tienen esa adaptabilidad.

Históricamente los sistemas de aislamiento de vibraciones han sido utilizados como protección contra sismos y los sistemas de control como protección contra vientos y peatones; aunque los sistemas de control también se le han encontrado beneficios al ser usados como protección contra sismos, debido a su adaptabilidad de poder sintonizados a varias frecuencias. Otra elección podría ser usar una combinación de ambos sistemas.

Por ejemplo, el sistema utilizado en el ya mencionado Taipei 101. El amortiguador de masa sintonizada de esta estructura fue diseñado para disipar los movimientos causados por fuertes cargas de viento (debido a la gran altura del edificio) y a la zona de tormentas donde también se encuentra, así mismo, combinado con otros AMS (Amortiguadores de Masa Sintonizada) pueden disipar la energía que un movimiento sísmico introduce en el edificio.

En caso de que las estructuras estén expuestas a un solo modo de excitación, se llega a considerar que un sistema pasivo puede cumplir bien con las necesidades de control de vibraciones. Por ejemplo, la Torre Mayor en la Ciudad de México. El principal excitador del edificio son los sismos altamente frecuentes en la zona de la cuenca del Valle de México. Dentro de su diseño se instaló un sistema de 98 amortiguadores viscosos, estos van dirigidos a la columna principal del edificio para que se disminuyeran los daños estructurales debidos a los movimientos en la frecuencia más recurrente en su zona de construcción. Además, debido a la altura del edificio, el sistema de control ayuda a promover la seguridad y el confort de las personas, gracias a la disipación de energía proveniente de excitaciones menores del viento y de las personas en movimiento.

### 3.1.3 Ergonomía

Las vibraciones mecánicas no sólo pueden causar afectaciones a las estructuras, también causan malestar en las personas, siendo estas más allá del estrés de encontrarse en un edificio y sentir los movimientos de este debido a las excitaciones externas. Se encontró que exposiciones prolongadas a vibraciones (maquinaria pesada) sobre el cuerpo humano (cuerpo completo) no sólo causa incomodidad en las personas, también puede ocasionar trastornos vasculares, óseos o neurológicos, entre otros.

La norma ISO 2631-2:2003 establece un umbral de perceptibilidad de la vibración. Dependiendo de su aceleración, éstas se encuentran en frecuencias entre 1 y 80 Hz (son las perceptibles para los humanos). La norma VDI 2057 Blatt1 menciona un umbral que abarca desde el valor en el que las vibraciones no son perceptibles para el ser humano, hasta el punto en el que comienzan a causar incomodidad. En ocasiones esta incomodidad implica que se cese en la actividad que se encuentre realizando, en estos valores de vibración no está en peligro la vida, sin embargo, se habla más del confort de la persona y que pueda realizar sus actividades sin problema.

Figura 8

*Valores de perceptibilidad a la vibración*

Aceleración promediada r.m.s. (m/s <sup>2</sup> )	Percepción
< 0.01	No perceptible
0.015	Espectro de percepción
0.02	Apenas perceptible
0.08	Fácilmente perceptible
0.315	Fuertemente perceptible
>0.315	Extremadamente perceptible

Nota. Adaptada de (VDI 2057 Blatt 1, 2017)

En diversas normas internacionales sobre vibraciones (Japón, Nueva Zelanda, Reino Unido y Estados Unidos) establecen niveles aceptables de vibración dependiendo del uso que se le dé a la estructura (hospitales, escuelas, etc.) y dependiendo de la hora del día establecen diferentes valores máximos de velocidad o aceleración del movimiento.

En lo que corresponde a aceleraciones, recordando que la aceleración multiplica a la amplitud original de la vibración por el cuadrado de la frecuencia natural, a bajas frecuencias esta aceleración reduce los efectos de amplificación, pero a frecuencias superiores a 1 Hz las amplifica.

#### **RMS (Root Mean Square)**

La raíz de la media cuadrática (valor eficaz) es una medida estadística la cual nos sirve para conocer la media de una función variable o discreta, donde también están involucrados valores negativos. Justamente se eleva al cuadrado cada valor dentro de una colección de valores para eliminar el signo y tener un valor más acertado de la media. Posteriormente se obtiene la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de la colección de valores y se divide entre la raíz cuadrada del número de valores de la colección. Siendo su fórmula la siguiente:

$$x_{rms} = \sqrt{\frac{x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2}{n}}$$

Dónde:

$x_n$  es el valor enésimo de la colección.

$x_{rms}$  es la raíz de la media cuadrática.

$n$  es el número de valores de la colección.

Es utilizado dentro del estudio de las vibraciones porque está directamente relacionado con la energía de vibración y por lo tanto con su poder destructivo.

### 3.1.4 Antigüedad de la estructura

Dependiendo de la estructura, su historia y su significado, se puede considerar más urgente o prioritario la protección de esta, es decir, el dinero no es problema. Véase el caso de la Catedral Metropolitana, símbolo del neoclásico en la vida colonial mexicana. A esta estructura se le añadió cimentación para ayudar con la rigidez de esta y se atendió el caso del hundimiento diferencial. En este caso el dinero no fue tanto problema al ser patrimonio de la humanidad, los recursos llegaron de diferentes fuentes y se habla de un costo de 660 millones de pesos hasta la fecha.

Sin embargo, si la estructura es demasiado vieja, un sistema de control que añada masa a la misma no sería viable por su peso añadido. Otro caso sería poner un sistema de aislamiento en la cimentación pero que el terreno no fuera lo suficientemente estable para soportar el anclaje del sistema.

Para poder evaluar qué sistema de soporte se utiliza en estructuras antiguas, esto dependerá del estado de la estructura, su capacidad para recibir modificaciones en la misma, el estado del terreno de cimentación y la urgencia para colocar un soporte a la misma.

### 3.1.5 Tipos de terrenos

Dependiendo de la zona donde se planea o ya se encuentre edificada la estructura, será el tipo de protección sísmica que necesite. La Ciudad de México se caracteriza por tres tipos de zona: zona de lago, zona de transición y zona de loma.

La zona de loma es la menos afectada en lo general por los sismos o por lo menos lo fue hasta el sismo de 2017. En ella se tiene un terreno rocoso, principalmente formado por roca basáltica proveniente de las erupciones propias del sistema Neovolcánico transversal. Esto permite que la cimentación tenga una rigidez elevada, lo cual hace que las frecuencias propias de estos terrenos sean altas.

Por otro lado, en la zona de lago (como lo es el centro o el aeropuerto) históricamente los sismos se perciben con mayores efectos. Esto es debido a la amplificación que reciben por parte del terreno arcilloso existente en el subsuelo. Al cambiar la rigidez del terreno, las frecuencias cambian, siendo más bajas. Esto ha causada mayor cantidad de daños en las estructuras que se encuentran en zona de lago.

Por último, se tiene la zona de transición. Es esta, el cambio en las frecuencias se debe al pasar de un tipo de terreno a otro. Esto tiene como consecuencia el cambio de la rigidez del suelo y su consecuente cambio en la impedancia del terreno. Las frecuencias principales que se tienen en este tipo de terreno van variando de un lugar a otro significativamente. Esto hace necesario tener un sistema adaptativo, debido a las diferentes frecuencias naturales que el sismo o el viento puedan tener.

También en los últimos años ha habido una mayor cantidad de sismos con epicentros en el valle de México. Estos tienen mayor influencia en la zona de transición, esto debido a la amplia variedad de frecuencias que se generan en el sismo. Junto con la zona de lomas, presentan una amplificación importante de movimiento en estas bajas frecuencias.

### **3.1.6 Carga debida al viento**

Así mismo, el viento no es el mismo en toda la Ciudad de México dependiendo del terreno y de la cantidad de edificios aledaños, es la atención necesaria que se le debe hacer al viento para realizar un diseño correcto. En las estructuras de puentes peatonales se presenta una baja altura, con lo que los efectos del viento son menores, al tener velocidades bajas, en comparación con estructuras altas. Por otro lado, los puentes se encuentran generalmente sobre superficies libres, como lo es una carretera o una vía rápida. Al no tener obstáculos, el desarrollo del perfil de velocidad puede ser total, siendo necesario tomar en cuenta dichos factores.

Otros puentes que pueden estar expuestos a una mayor carga dinámica por efectos eólicos son aquellos que se construyen en las zonas estrechas donde hay un gran flujo de aire. En estos estrechos, siguiendo el principio de Bernoulli, la velocidad del viento aumenta por la reducción del área equivalente. En estos casos se hace preponderante las cargas dinámicas debidas a los efectos del viento.

### **3.1.7 Fuente de la tecnología**

En lo que corresponde a la fuente de la tecnología se tienen que considerar de dónde se obtendrá la maquinaria de montaje, el equipo de control, la programación y todo aquello relacionado con el control de vibraciones. En ocasiones se puede desarrollar una solución nueva de propia tecnología, pero en ocasiones se tiene que obtener de otros lados.

Origen de la tecnología: Muchas de las tecnologías existentes para el control de vibraciones ya han sido desarrolladas en otras naciones, ya sea por empresas privadas o por universidades. Dentro de ellas destacan países como Japón, que alentado por los eventos sísmicos que padece por su ubicación geográfica, se han dedicado a desarrollar tecnología que los permita protegerse contra estos eventos. Así mismo, por su posición geográfica, también padecen de tsunamis, aunado a que el cambio climático cada vez genera ciclones de mayor severidad. Por estas razones se han involucrado mucho en el estudio de la amortiguación y aislación de estructuras, tanto por la acción de sismos como por excitaciones debidas al viento.

Para evaluar este punto es necesario saber si la tecnología a la que se quiere acceder está protegida por patentes (es necesario comprarla con la empresa o persona que tenga los derechos de la

patente) o si es de libre acceso. Dependiendo de los requerimientos del caso se pueda manufacturar a la medida el sistema que se requiera si es de propio diseño.

Dentro de México no se encontraron patentes relacionadas con los amortiguadores de los sistemas de control o con los fundamentos de los sistemas de aislamiento, por lo que de ser necesario hacer a la medida el sistema, es posible.

Dentro de México se han implementado muchos sistemas de aislamiento sísmico por lo que se es familiar con la tecnología. Se es familiar con el uso de amortiguadores viscosos o tecnología menos moderna y esta estará disponible dentro del país. Sin embargo, tecnología más reciente como amortiguadores magnetoreológicos será necesario importarlos en caso de que fueran requeridos.

### **3.1.8 Etapa de diseño**

Dentro de un proceso de diseño, ya sea de una pieza a manufacturar o de un puente, existen diversas etapas dentro de las cuales se valoran todas las opciones se tendrán para resolver un problema. Dentro de ellas se valoran los costos de cada una de las soluciones, lo necesario para implementarlas, etc. Para encontrar un sistema de control o aislamiento apropiado es necesario saber si, por ejemplo, el puente que se desea intervenir está ya erguido o si se encuentra en etapa de planeación.

Si se encuentra en etapa de planeación, será más fácil integrar el sistema de control a toda la estructura, ya que desde un principio se podrá contemplar el mismo. Esto será una ventaja al poder ahorrar dinero en las modificaciones que se le tuvieran que hacer a la estructura cuando ya esté erguida para poder implementar el sistema. Estas modificaciones se realizarán desde la etapa de diseño.

Por el contrario, si la estructura ya está erguida se volverá más caro el proceso, no solamente por estar en uso, sino también por no conocer cuál será la afectación con la solución propuesta. Así mismo, disminuye las opciones de sistemas que se puedan implementar porque necesita adaptarse a lo ya edificado. Otra desventaja será el costo de pérdida si se necesita que la estructura no sea utilizada.

## **3.2 Matriz de decisión**

Después de conocer los diferentes parámetros a evaluar dentro de una estructura y su relación con los sistemas de control de vibraciones, ahora es necesario ver cómo tomar en cuenta a cada uno de ellos para poder tomar la mejor decisión acerca de dichos sistemas.

Dentro de la matriz o tabla de decisión existen distintas partes que serán definidas:

- Entradas: Estos serán los sistemas de control que serán calificados mediante esta matriz.
- Reglas: En estos casos serán las variables que han sido descritas anteriormente y se juzgará si un sistema cumple o no con esta regla.
- Salida: Serán las calificaciones que obtienen los sistemas al ser calificados.

Dependiendo de cómo se valoren las salidas será como se determine cuál será el sistema más apropiado. Por ejemplo, dentro de la teoría de Modelos de Decisión y Notación (DMN en inglés) se

podrá elegir al sistema que reúna las mejores calificaciones globales, así mismo éstas se verán afectadas por el porcentaje de importancia que se le dé a cada regla. Otra forma de juzgar cuál es el sistema más apropiado es ver qué sistema cumple con la regla que se determine como preponderante. Dentro del caso de estudio esta forma ayudará a determinar un desempate en el caso de que dos o varios sistemas tengan una calificación global igual.

Ya definidas las variables con las cuales se califica a los sistemas de control, se procede a definir una matriz de decisión. Esta ayuda a clasificar cuál es el sistema mejor calificado para intervenir nuestro caso de estudio.

### 3.2.1 Matriz de Decisión

Dentro de la matriz se encuentran 17 variables con las cuales se calificarán en primera instancia al tipo de sistema de control y posteriormente se evaluará el caso específico de sistema de control.

Para evaluar a los sistemas se tendrán 4 posibles calificaciones por cada variable, de las cuales la suma total de las 4 evaluaciones sin ponderación será de 100. 40 será la mejor calificación mientras que 10 será la peor. Las calificaciones fueron asignadas según la investigación previa. Se podrá observar que en 2 variables no se ha determinado qué sistema es el mejor, por lo que se otorgará la misma calificación a cada tipo de sistema.

En el primer renglón, costo privativo, mediante la investigación previa, se supo que los sistemas pasivos son los de menor costo. Esto es debido a sus bajos costos: inicial y de mantenimiento. Si el costo es una prioridad para el caso, estos recibirán una mejor calificación. Los siguientes en ser calificados son los sistemas semiactivos, que resultan una mejor opción que los sistemas activos, debido a que son sistemas que requieren menos mantenimiento y no requieren energía externa considerable para su operación. Los sistemas activos, por su alto costo de mantenimiento, de instalación y alta demanda energética resultan la tercer mejor opción. Los sistemas híbridos al ser una combinación dos sistemas terminan teniendo un costo más elevado que los anteriores y por eso son la opción con menor calificación de los cuatro. En la siguiente imagen se observan las calificaciones:

**Figura 9**

*Calificación de costo privativo*

Variable para calificar	Ponderación	Activo	Pasivo	Semi-Activo	Híbrido
Costo privativo	5.88%	20	40	30	10

El siguiente renglón es lo opuesto del primero, costo no privativo. Si no hay restricción de costos, los sistemas híbridos se ven altamente beneficiados. En cambio, los pasivos se ven perjudicados. Esto no significa que los sistemas pasivos sean malos, sin embargo, pierden en algunas otras características frente a los otros sistemas que se verán reflejadas en otros renglones.

**Figura 10**

*Calificación de costo no privativo*

Variable para calificar	Ponderación	Activo	Pasivo	Semi-Activo	Híbrido
Costo no privativo	5.88%	30	10	20	40

En el tercer renglón se valora la efectividad del sistema de control frente a un solo tipo de excitación, es decir, contra una sola frecuencia. Todos los sistemas son efectivos contra una sola excitación, no obstante, los sistemas pasivos son fácilmente producidos y su sintonización no requiere la tecnología de un sistema activo. Sería subutilizar una solución que no necesita tal complejidad. Por esa razón el sistema pasivo sale como el mejor calificado en este renglón. Siguiendo la misma idea el segundo mejor calificado sería el semiactivo, el tercero el activo y el peor calificado el híbrido.

**Figura 11**

*Calificación contra un solo tipo de excitación*

Variable para calificar	Ponderación	Activo	Pasivo	Semi-Activo	Híbrido
Un tipo de excitación	5.88%	20	40	30	10

Para el cuarto renglón se evalúa la capacidad del sistema de adaptarse a distintos tipos de excitaciones (peatonales, sísmicas, de viento, etc.). Por esta razón el sistema híbrido es el mejor calificado. Si bien el modelado del sistema físico (puente) permite atenuar excitaciones previstas, un sistema de control híbrido puede responder ante otras excitaciones imprevistas, lo que lo hace el mejor calificado. El segundo mejor calificado es el sistema activo por ser el que brinda mayor robustez después del híbrido, pero requiere una fuente de mayor energía sin interrupciones. Posteriormente viene el semiactivo el cuál es un activo con menor demanda energética, pero que también tiene robustez. El peor calificado resulta el sistema pasivo al sólo poder ser sintonizado a una sola frecuencia, su capacidad de atenuar múltiples frecuencias resulta nula.

**Figura 12**

*Calificación contra varios tipos de excitación*

Variable para calificar	Ponderación	Activo	Pasivo	Semi-Activo	Híbrido
Varios tipos de excitación	5.88%	30	10	20	40

El quinto renglón califica qué tan efectivo es un sistema de control para atenuar excitaciones que puedan afectar a la ergonomía en los puentes. Esto se refiere a caídas, mareos debido a aceleraciones y otras características físicas o psicológicas del usuario. Por lo general se diseñan sistemas de control con la idea de que las estructuras no sean dañadas debido a alguna excitación externa. Sin embargo, la excitación en una estructura no se elimina al 100%, ciertos efectos pueden llegar a usuarios. Si los usuarios tampoco siguen los protocolos de protección civil o no se han implementado, pueden llegar a haber lesiones. En este renglón se califica la robustez del sistema y

su adaptabilidad ante los usuarios. En este caso los sistemas híbridos al ser los más robustos tiene mayor oportunidad de disminuir estas afectaciones. Los siguientes serán los activos que resultan un poco menos robustos. Los penúltimos serán los semiactivos y los peores calificados serán los pasivos.

**Figura 13**

*Calificación para prevenir afectaciones a la persona*

Variable para calificar	Ponderación	Activo	Pasivo	Semi-Activo	Híbrido
Prevenir afectaciones a la persona	5.88%	30	10	20	40

En el sexto renglón se evalúa la efectividad de cada uno de los sistemas de control para atenuar sus frecuencias críticas. Debido a que todos cumplen con su propósito, reciben la misma calificación. Dada la investigación presente se requiere conocer más a detalle la operación real, la implementación en el campo real de cada uno de los sistemas para poder dar una calificación más adecuada. A diferencia del quinto renglón se trata de ver las acciones y consecuencias sobre el puente.

**Figura 14**

*Calificación para prevenir afectaciones a la estructura*

Variable para calificar	Ponderación	Activo	Pasivo	Semi-Activo	Híbrido
Prevenir afectaciones a la estructura	5.88%	25	25	25	25

En el séptimo renglón se valora la posibilidad de instalar un sistema de control en una estructura cuando no hay restricciones en el peso. Aquí se consideran soluciones para el mismo caso, yendo de mayor peso a menor peso. Si no hay problema para que un sistema de control muy grande y pesado sea instalado en la estructura entonces el mejor será el híbrido ya que, técnicamente, son dos sistemas en uno. El siguiente sistema será el activo debido al tamaño de los actuadores y requerimientos energéticos. Los semiactivos toman lo bueno del activo y lo escalan en tamaño y demanda energética, por eso son los penúltimos. Por último, tenemos a los pasivos que son los que menos masa adhieren a la estructura.

**Figura 15**

*Calificación de posibilidad de añadir masa a la estructura*

Variable para calificar	Ponderación	Activo	Pasivo	Semi-Activo	Híbrido
Es posible añadir masa a la estructura	5.88%	30	10	20	40

En el octavo renglón tenemos lo contrario, es decir, la cantidad de masa que se puede añadir a la estructura es poca o nula. Esto iría de los de menor masa a los de mayor masa para la misma situación. Esto se puede deber a la edad de la estructura, la zona donde se encuentra construida o al diseño original. Por ejemplo, a la catedral metropolitana por la edad se consideró que añadirle masa no era posible. Dentro de esta categoría los mejores calificados son los sistemas pasivos al ser los menos pesados. Los segundos serán los sistemas semiactivos que representan menor masa que los activos. Los terceros serán los sistemas activos y los peores calificados serán los sistemas híbridos al ser sistemas dos sistemas en uno representan una cantidad significativa de masa.

**Figura 16**

*Calificación de no posibilidad de añadir masa a la estructura*

Variable para calificar	Ponderación	Activo	Pasivo	Semi-Activo	Híbrido
No es posible añadir masa a la estructura	5.88%	20	40	30	10

Los siguientes 3 renglones tienen que ver con la zona de la ciudad en dónde se encuentre erguida la estructura. Dependiendo del tipo de zona (lago, loma o transición) será el tipo de estructura que se pueda erigir, qué tipo de excitaciones sísmicas afectan a la estructura y cómo la afectan.

En el noveno renglón se valoran a los sistemas respecto a la zona del lago de la ciudad. Debido a las características del suelo se tienen frecuencias muy bien definidas y problemas de hundimiento por la extracción de líquido del subsuelo y la falta de recarga del manto acuífero. Por ello resultan mejor calificados aquellos de menor peso y que puedan responder mejor a estas excitaciones definidas, teniendo cuidado con las amplitudes de los movimientos esperados. Al ser frecuencias definidas no se necesita gran robustez. Esto lleva a que los sistemas pasivos sean los mejores calificados en esta categoría. Posteriormente los segundos mejores serán los semiactivos. Los activos debido a la masa agregada resultan los terceros. Los sistemas híbridos resultan los cuartos por sus características.

**Figura 17**

*Calificación respecto a la zona del lago*

Variable para calificar	Ponderación	Activo	Pasivo	Semi-Activo	Híbrido
Zona del lago	5.88%	20	40	30	10

La siguiente variable para calificar será la zona de transición en el décimo renglón. Esta zona es muy especial debido al choque de zona de loma y zona de lago, ya que se presenta una impedancia alta entre las dos regiones. Las excitaciones que afectan a esta zona son de frecuencia variable a diferencia de la zona de loma y de la zona de lago. Por lo tanto, necesitamos un sistema muy robusto, pero también que no agregue mucha masa al sistema. Esto nos conduce a los sistemas semiactivos que presentan robustez al poder actuar en diferentes frecuencias y no ser tan masivo como un sistema activo. Los siguientes serán los activos por su robustez y menor tamaño que los híbridos. Los terceros serán los híbridos por su robustez. Por último, se tendrán a los pasivos por su poca adaptabilidad.

**Figura 18**

*Calificación respecto a la zona de transición*

Variable para calificar	Ponderación	Activo	Pasivo	Semi-Activo	Híbrido
Zona de transición	5.88%	30	10	40	20

En el renglón 11 se evalúa la última región de la ciudad que es la zona de Loma. En esta zona se presenta un suelo de roca volcánica. Aunque se trata de la misma excitación sísmica las amplitudes son menores por la resistencia que tiene el terreno. En este caso se tienen amplitudes menores con frecuencias conocidas. Por ello los sistemas pasivos resultan mejores para estos casos. En esta calificación quedaría el sistema semiactivo encima del sistema activo por su mejor menor consumo energético, quedando en último lugar el sistema híbrido.

**Figura 19**

*Calificación respecto a la zona de loma*

Variable para calificar	Ponderación	Activo	Pasivo	Semi-Activo	Híbrido
Zona de Loma	5.88%	20	40	30	10

En el doceavo renglón se evalúa cómo actúa el tipo de sistema frente a carga por el viento. Mientras más altura tenga un puente, será el nivel de afectación que pueda tener la estructura por el viento. Dependiendo de que tanto se desarrolle el viento será necesario modificar la excitación a atenuarse. Debido a esta necesidad de poder adaptarse a excitaciones imprevistas, los sistemas híbridos son los mejores calificados al poder adaptarse a la excitación que se encuentra afectando al puente. Por consiguiente, menos adaptables que los sistemas híbridos son los sistemas activos y posteriormente

los sistemas semiactivos. Por último, quedan los pasivos que como se ha dicho anteriormente sufren de muy poca adaptabilidad.

**Figura 20**

*Calificación si hay carga debida al viento*

Variable para calificar	Ponderación	Activo	Pasivo	Semi-Activo	Híbrido
Hay carga debida al viento	5.88%	30	10	20	40

El treceavo renglón califica la ausencia de carga debida al viento. Al no tener este tipo de carga que pueda variar, no es necesario que el sistema tenga robustez. Por lo tanto, los sistemas pasivos al ser los menos robustos tienen la mejor calificación. El segundo lugar lo ocupa el sistema semiactivo que presenta mayor robustez que el pasivo, aunque menor que los sistemas activos que resultan terceros. El peor calificado será el híbrido al estar sobre capacitado en este sentido y para esta evaluación en específico.

**Figura 21**

*Calificación si no hay carga debida al viento*

Variable para calificar	Ponderación	Activo	Pasivo	Semi-Activo	Híbrido
No hay carga debida al viento	5.88%	20	40	30	10

En los renglones 14 y 15 se valora la disponibilidad de conseguir la tecnología. Aunque cierta parte de la investigación demuestra que los sistemas pasivos son los que mayor aplicación han tenido en el país, de los otros sistemas no se cuenta con la información suficiente para poder valorarlos. Por lo que se plantea más adelante como trabajo a futuro el poder determinar si se puede conseguir valoración para esta variable.

**Figura 22***Calificación de disponibilidad de tecnología en el país*

Variable para calificar	Ponderación	Activo	Pasivo	Semi-Activo	Híbrido
Tecnología existente en el país.	5.88%	25	25	25	25

**Figura 23***Calificación de necesidad de importar tecnología*

Variable para calificar	Ponderación	Activo	Pasivo	Semi-Activo	Híbrido
Tecnología por importar.	5.88%	25	25	25	25

En el renglón 16 se valora la etapa del proyecto en la que se encuentra el caso de estudio. Los sistemas que son más difíciles de implantar son los de aislamiento al necesitar intervenir la estructura desde su cimiento y hacer que el edificio no reciba la excitación del suelo. Sin embargo, los otros sistemas pasivos podrían no necesitar tal intervención y por lo tanto tener la peor calificación los pasivos no sería lo correcto. En primera instancia los demás sistemas tampoco necesitan mayor intervención, sin embargo, ya implementarlos puedan presentar complicaciones que en la investigación no se ha encontrado. Por esa razón y como trabajo a futuro sería poder valorar la dificultad de la implementación de cada tipo de sistema para poder dar una valoración apropiada.

**Figura 24***Calificación sobre si el sistema se encuentra en planeación*

Variable para calificar	Ponderación	Activo	Pasivo	Semi-Activo	Híbrido
Se encuentra en las etapas de planeación del diseño	5.88%	25	25	25	25

Al calificar el mismo aspecto, pero en diferente etapa la calificación será la misma, sin embargo, también queda como trabajo a futuro.

**Figura 25**

*Calificación sobre si el sistema se encuentra en planeación*

Variable para calificar	Ponderación	Activo	Pasivo	Semi-Activo	Híbrido
Se encuentra erguida la estructura.	5.88%	25	25	25	25

En esta primera matriz se consideraron igual de importantes todas las variables, por lo que se le asigna una ponderación igual a todas de  $\frac{1}{17}$ . Posteriormente, dependiendo de las características del caso de estudio, se podrá decidir cuales recibirán mayor peso que otras y cuánto peso tendrán.

El sistema más indicado para tratar el caso será el que tenga la suma total de calificaciones mayor.

La siguiente imagen es la primera matriz. Se puede ver cómo cada tipo de sistema es calificado respecto a la variable adjunta. Así mismo, para que siempre se otorguen la misma cantidad de puntos se pone la suma de las calificaciones al lado. La ponderación se encuentra a la izquierda, como se menciona anteriormente, es la misma para todos. En cuanto se tenga un caso en particular que sepan sus criterios, se podrá cambiar la ponderación y obtener un resultado diferente.

Para obtener un resultado global lo que se hace es que cada calificación se multiplica por la ponderación de la variable y se multiplica por 10. Así se obtiene la calificación ponderada de cada sistema. Después de obtener todas las calificaciones ponderadas se suman y esa es la suma total que aparece en la tabla presentada. De esta primera iteración dando una ponderación igual a todas las variables se puede ver que la elección que mejor satisface en global es un sistema semiactivo por presentar robustez y costo reducido para operar y ser mantenido.

En la segunda matriz hay una diferencia, se añadió la variable de excitación peatonal. Esta resulta ser la de mayor impacto en el puente. Debido a la poca rigidez y masa con las que se construyen los mismos tienen una frecuencia natural baja. Coincidiendo con las excitaciones del peatón. Esto conduce a fenómenos de pulsación y resonancia.

**Figura 26**

*Matriz de elección inicial*

Variable a calificar	Ponderación	Activo	Pasivo	Semi-Activo	Híbrido
Costo privativo	5.88%	20	40	30	10
Costo no privativo	5.88%	30	10	20	40
Un tipo de excitación	5.88%	20	40	30	10
Varios tipos de excitación	5.88%	30	10	20	40
Prevenir afectaciones a la persona	5.88%	30	10	20	40
Prevenir afectaciones a la estructura	5.88%	25	25	25	25
Es posible añadir masa a la estructura	5.88%	30	10	20	40
No es posible añadir masa a la estructura	5.88%	20	40	30	10
Zona del lago	5.88%	20	40	30	10
Zona de transición	5.88%	30	10	40	20
Zona de Loma	5.88%	20	40	30	10
Hay carga debida al viento	5.88%	30	10	20	40
No hay carga debida al viento	5.88%	20	40	30	10
Tecnología existente en el país.	5.88%	25	25	25	25
Tecnología por importar.	5.88%	25	25	25	25
Se encuentra en las etapas de planeación del diseño	5.88%	25	25	25	25
Se encuentra erguida la estructura.	5.88%	25	25	25	25
Suma de cada sistema		250	250	261.764706	238.235294

# Capítulo 4 Casos de Estudio y Resultados

“Es preferible obtener una respuesta razonablemente aproximada pero rápida que le indique si el diseño funciona o no, que invertir más tiempo y obtener el mismo resultado sólo que con más decimales”. Robert L Norton

Una vez bien definida la metodología de elección, será necesario aplicarla. Se definirán distintos casos de puentes peatonales con problemas de vibraciones. Algunos con soluciones ya aplicadas y otras soluciones sugeridas. Se cambiará ponderaciones dentro de las matrices dentro de los casos para dentro de esta metodología determinar la solución apropiada. Se compararán los resultados de sistema contra el del caso estudiado.

## 4.1 Puente *Millenium* en Londres, Inglaterra

El puente *Millenium* fue un caso muy particular. A los 3 días de ser inaugurado fue cerrado a la circulación, ya que presentó oscilaciones laterales y estas hacían que los peatones estuvieran en peligro de caerse.

El problema se produjo por un alto tráfico de peatones que al caminar en baja frecuencia (alrededor de 1 Hz) se sintonizó con la frecuencia del puente. El puente *Millenium* en su diseño presenta masa y rigidez bajas, por lo que lleva a sus frecuencias naturales a ser bajas también. Se habla de que en la parte central del puente hubo movimientos con amplitud de 70 mm.

La solución presentada fue poner un sistema pasivo de amortiguadores viscosos. Esto para aumentar el factor de amortiguamiento y disminuir la amplificación de las frecuencias críticas. Se tomó como punto crítico de diseño poder operar con 30% más personas caminando que en el momento en el que ocurrieron los eventos que llevaron al cierre.

En este caso se le dará mucho peso a prevenir afectaciones ocasionadas por el peatón y que repercutan en él mismo. El costo no parece importante, al ser una obra tan grande y en la que a pesar de que ya se le había invertido una gran cantidad de dinero, se tuvo que invertir más.

Dentro de la matriz de decisión que se plantea, se decidió que las variables que tendrán mayor peso serán:

- Un solo tipo de excitación. Al solamente tener problemas ante la excitación peatonal lateral.
- Costo no privativo. Se trata de una obra de inversión importante y resultaría contradictorio escatimar en prevenir las afecciones imprevistas.
- Prevenir afectaciones a las personas. La estructura nunca estuvo en peligro, sin embargo, la gente corría el riesgo de lesionarse al caerse del puente.
- Hay posibilidad de añadir masa. La problemática nunca vino de si el puente aguantase a la cantidad de gente que hizo que se cerrara, más bien del movimiento lento que generó la gente al estar tan aglomerada.

Se observa en la Figura 27 como estas variables seleccionadas son las únicas con peso en la matriz al elegir el sistema y cada una al ser considerada igualmente importante obtuvo la misma ponderación.

**Figura 27**

*Matriz de decisión del puente Millenium*

Variable a calificar	Ponderación	Activo	Pasivo	Semi-Activo	Híbrido
Costo privativo	0.00%	20	40	30	10
Costo no privativo	25.00%	30	10	20	40
Un tipo de excitación	25.00%	20	40	30	10
Varios tipos de excitación	0.00%	30	10	20	40
Prevenir afectaciones a la persona	25.00%	30	10	20	40
Prevenir afectaciones a la estructura	0.00%	25	25	25	25
Es posible añadir masa a la estructura	25.00%	30	10	20	40
No es posible añadir masa a la estructura	0.00%	20	40	30	10
Zona del lago	0.00%	20	40	30	10
Zona de transición	0.00%	30	10	40	20
Zona de Loma	0.00%	20	40	30	10
Hay carga debida al viento	0.00%	30	10	20	40
No hay carga debida al viento	0.00%	20	40	30	10
Tecnología existente en el país.	0.00%	25	25	25	25
Tecnología por importar.	0.00%	25	25	25	25
Se encuentra en las etapas de planeación del diseño	0.00%	25	25	25	25
Se encuentra erguida la estructura.	0.00%	25	25	25	25
Suma de cada sistema		275	175	225	325

Al poner las ponderaciones solo a estas variables resulta un sistema híbrido como el mejor sistema posible para este caso específico.

## 4.2 Puente peatonal San Bartolo en Naucalpan de Juárez

Este caso se manejó en la Tesis de (Huerdo Ríos, 2016). Es un puente peatonal que sufre de excitación por el mismo peatón, en este caso se dedicó a atenuar las vibraciones verticales.

El mismo diseño del puente es el que lleva a tener problemas ya que en México no se diseña cada puente en específico, sino que se toman puentes que han servido y se las hace las modificaciones (si son necesarias) para poder ser construido. Así mismo, debido a que no se prevén los problemas de vibraciones, muchos puentes peatonales en el país los presentan. En este caso también las frecuencias naturales se ven afectadas por un espectacular montado al puente lo cual agrega masa al sistema.

La solución planteada por Huerto Ríos en 2016 fue un amortiguador de masa sintonizada pasivo al ser económico y ampliamente utilizado en este tipo de problemas.

Dentro de la matriz de decisión que se plantea, se decidió que las variables que tendrán mayor peso serán:

- Un solo tipo de excitación. Al solo tener problemas de excitación peatonal vertical.
- Costo privativo. Resulta ser una obra pública y no se cuenta con un presupuesto muy grande para adecuaciones.
- Prevenir afectaciones a las personas. Se vuelve incomodo el uso del puente, haciendo que las personas prefieran cruzar por una vía confinada a nivel.
- Añadir o quitar masa. Aunque ya se le ha añadido masa en forma de un espectacular, dada la información presentada no es posible determinar si es posible o no añadir aún más masa. Se necesitaría una asesoría especializada en el tema.
- Zona de Loma. Debido a la sismicidad de la zona del valle de México, un punto preponderante es donde se encuentra el puente.

Una vez dividido el 100% de la ponderación entre estas 4 variables y al dejar las demás variables sin ponderación, la matriz arroja a un sistema pasivo como la mejor opción para estas características del caso como se puede observar en la Figura 28.

Las mismas variables son ocupadas para la segunda matriz y la misma ponderación, resulta la mejor opción un sistema de masa sintonizada, un resultado igual al trabajo señalado anteriormente como se observa en la Figura 29.

**Figura 28**

*Matriz de decisión de puente San Bartolo*

Variable a calificar	Ponderación	Activo	Pasivo	Semi-Activo	Híbrido
Costo privativo	25.00%	20	40	30	10
Costo no privativo	0.00%	30	10	20	40
Un tipo de excitación	25.00%	20	40	30	10
Varios tipos de excitación	0.00%	30	10	20	40
Prevenir afectaciones a la persona	25.00%	30	10	20	40
Prevenir afectaciones a la estructura	0.00%	25	25	25	25
Es posible añadir masa a la estructura	0.00%	30	10	20	40
No es posible añadir masa a la estructura	0.00%	20	40	30	10
Zona del lago	0.00%	20	40	30	10
Zona de transición	0.00%	30	10	40	20
Zona de Loma	25.00%	20	40	30	10
Hay carga debida al viento	0.00%	30	10	20	40
No hay carga debida al viento	0.00%	20	40	30	10
Tecnología existente en el país.	0.00%	25	25	25	25
Tecnología por importar.	0.00%	25	25	25	25
Se encuentra en las etapas de planeación del diseño	0.00%	25	25	25	25
Se encuentra erguida la estructura.	0.00%	25	25	25	25
Suma de cada sistema		225	325	275	175

**Figura 29**

*Matriz segunda de decisión de puente San Bartolo*

Variable	Ponderación	Masa Sintonizada	Amortiguadores Viscosoelásticos	Aislamiento de Piso	Amortiguadores por histéresis	Cambio de rigidez
Costo privativo	25.00%	25	30	15	20	10
Costo no privativo	0.00%	15	10	25	20	30
Excitación peatonal	25.00%	30	25	10	15	20
Excitación externa al puente	0.00%	10	15	30	25	20
Varios tipos de excitación	0.00%	15	25	10	30	20
Prevenir afectaciones a la persona	25.00%	30	20	15	10	25
Prevenir afectaciones a la estructura	0.00%	10	20	25	30	15
Es posible añadir masa a la estructura	0.00%	20	20	20	20	20
No es posible añadir masa a la estructura	0.00%	20	20	20	20	20
Zona del lago	0.00%	20	25	30	15	10
Zona de transición	0.00%	10	30	15	25	20
Zona de Loma	25.00%	15	10	30	25	20
Hay carga debida al viento	0.00%	25	30	10	20	15
No hay carga debida al viento	0.00%	15	10	30	20	25
Tecnología existente en el país.	0.00%	20	20	20	20	20
Tecnología a importar.	0.00%	20	20	20	20	20
Se encuentra en las etapas de planeación del diseño	0.00%	20	20	20	20	20
Se encuentra erguida la estructura.	0.00%	20	20	20	20	20
Suma de cada sistema		250	212.5	175	175	187.5

## 4.3 Puente peatonal Insurgentes Sur

Figura 30

*Vista lateral superior del puente*



Nota. Tomada de (Google Maps, 2020)

Figura 31

*Vista derecha inferior del puente*



Nota. Tomada de (Google Maps, 2020)

Este puente peatonal se encuentra anexo a Insurgentes Sur dirección Sur-Norte en su cruce con Eje 10 Sur. Sirve como conexión para peatones que van de la Facultad de Psicología o Rectoría hacia el Metrobús Dr. Gálvez. Se trata de un puente de vigas apoyado en los dos extremos y en la mitad del claro.

Este puente fue escogido debido a la incomodidad que causa al peatón al cruzarlo. Cuando un usuario lo cruza, se pueden sentir las oscilaciones verticales correspondientes con el paso del peatón. También, al ser un puente de poca rigidez, existe deformación por el mismo paso del peatón. Se propone como caso de análisis al ser un puente que no se le ha estudiado previamente, por lo que se puede plantear una solución por medio de la matriz de decisión.

Dentro de la matriz de decisión que se plantea, se decidió que las variables que tendrán mayor peso serán:

- Costo privativo. Resulta ser una obra pública y no se cuenta con un presupuesto muy grande para adecuaciones.
- Un solo tipo de excitación. Al solo tener problemas de excitación peatonal vertical.
- Prevenir afectaciones a las personas. Se vuelve incomodo el uso del puente, haciendo que las personas prefieran cruzar por una vía confinada a nivel.
- Zona de Loma. Debido a la sismicidad de la zona del valle de México, un punto preponderante es donde se encuentra el puente.

Una vez dividido el 100% de la ponderación entre estas variables y al dejar las demás variables sin peso, la matriz arroja a un sistema pasivo como la mejor opción para estas características del caso.

Las mismas variables son ocupadas para la segunda matriz y resulta la mejor opción un sistema de masa sintonizada y sus derivados, en este sentido no hay solución expresa para este puente lo cual nos arroja este resultado que puede resultar útil para su problema.

En las Figuras 32 y 33 se muestran como a partir de la determinación de las variables importantes para el caso se construyen las matrices de elección de sistema; primero una para seleccionar un tipo y una vez escogido el tipo, una que seleccione el sistema.

Se observa como igualmente todas las variables seleccionadas fueron consideradas importantes por igual, es decir, la misma ponderación.

**Figura 32**

*Matriz inicial del puente Eje 10 Sur*

Variable a calificar	Ponderación	Activo	Pasivo	Semi-Activo	Híbrido
Costo privativo	25.00%	20	40	30	10
Costo no privativo	0.00%	30	10	20	40
Un tipo de excitación	25.00%	20	40	30	10
Varios tipos de excitación	0.00%	30	10	20	40
Prevenir afectaciones a la persona	25.00%	30	10	20	40
Prevenir afectaciones a la estructura	0.00%	25	25	25	25
Es posible añadir masa a la estructura	0.00%	30	10	20	40
No es posible añadir masa a la estructura	0.00%	20	40	30	10
Zona del lago	0.00%	20	40	30	10
Zona de transición	0.00%	30	10	40	20
Zona de Loma	25.00%	20	40	30	10
Hay carga debida al viento	0.00%	30	10	20	40
No hay carga debida al viento	0.00%	20	40	30	10
Tecnología existente en el país.	0.00%	25	25	25	25
Tecnología por importar.	0.00%	25	25	25	25
Se encuentra en las etapas de planeación del diseño	0.00%	25	25	25	25
Se encuentra erguida la estructura.	0.00%	25	25	25	25
Suma de cada sistema		225	325	275	175

**Figura 33**

*Matriz segunda del puente Eje 10 Sur*

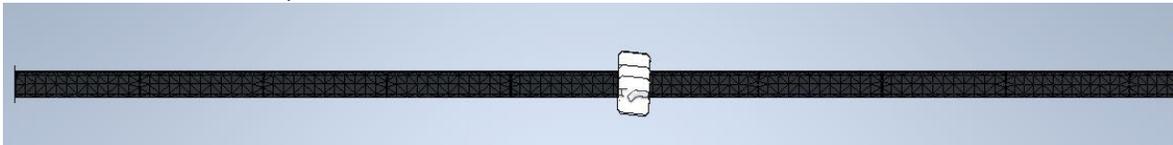
Variable	Ponderación	Masa Sintonizada	Amortiguadores Viscosoelásticos	Aislamiento de Piso	Amortiguadores por histéresis	Cambio de rigidez
Costo privativo	25.00%	25	30	15	20	10
Costo no privativo	0.00%	15	10	25	20	30
Excitación peatonal	25.00%	30	25	10	15	20
Excitación externa al puente	0.00%	10	15	30	25	20
Varios tipos de excitación	0.00%	15	25	10	30	20
Prevenir afectaciones a la persona	25.00%	30	20	15	10	25
Prevenir afectaciones a la estructura	0.00%	10	20	25	30	15
Es posible añadir masa a la estructura	0.00%	20	20	20	20	20
No es posible añadir masa a la estructura	0.00%	20	20	20	20	20
Zona del lago	0.00%	20	25	30	15	10
Zona de transición	0.00%	10	30	15	25	20
Zona de Loma	25.00%	15	10	30	25	20
Hay carga debida al viento	0.00%	25	30	10	20	15
No hay carga debida al viento	0.00%	15	10	30	20	25
Tecnología existente en el país.	0.00%	20	20	20	20	20
Tecnología a importar.	0.00%	20	20	20	20	20
Se encuentra en las etapas de planeación del diseño	0.00%	20	20	20	20	20
Se encuentra erguida la estructura.	0.00%	20	20	20	20	20
Suma de cada sistema		250	212.5	175	175	187.5

## 4.4 Matriz vs FEM

Para el análisis del puente se realizó el dibujo CAD de este y se realizó un análisis modal. Se consideró como no movable el centro del puente al estar apoyado ahí y también las caras extremas de las vigas para así describir el cómo se encuentra apoyado el puente en los muros. Las siguientes imágenes muestran las restricciones impuestas. Se añadió el propio peso del puente como una fuerza que actúa en el puente.

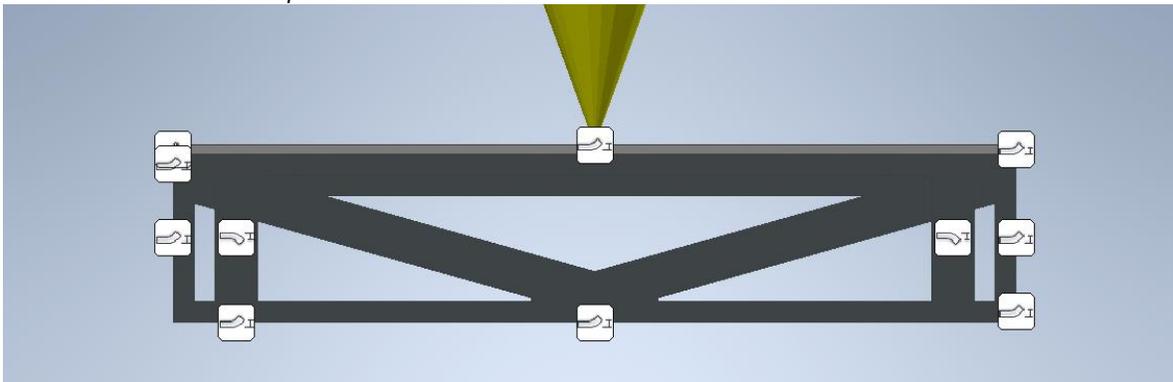
**Figura 34**

*Condiciones de restricción para el análisis modal 1*



**Figura 35**

*Condiciones de restricción para el análisis modal 2*

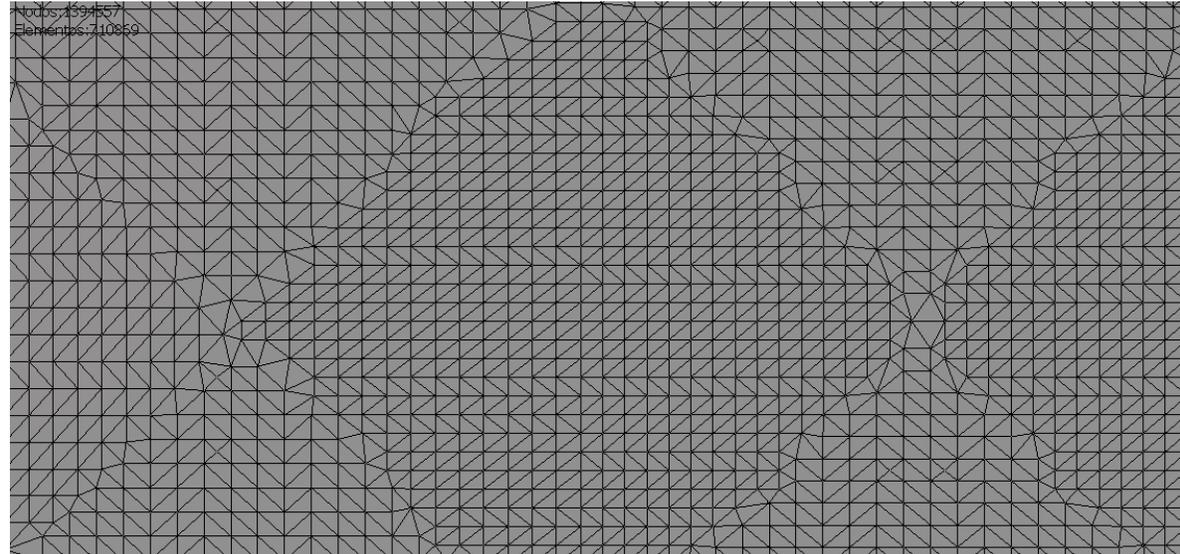


En la siguiente figura se presenta la malla utilizada para el análisis y los parámetros utilizados en el software.

Los elementos son los únicos que ofrece el software, se modificó en distintas mallas el tamaño y el ángulo máximo de giro de los elementos. La malla con mayor número de elementos y ángulo menor tuvo una duración de 16 horas y contó con 3390744 elementos. La malla que se utilizó para mostrar los resultados presenta una duración de 40 minutos de resolución, 730612 elementos y una desviación respecto a la malla de mayor tiempo de 0.45%. Por esta razón de eficacia respecto al tiempo y al resultado se escogió esa malla para este y los siguientes análisis.

**Figura 36**

*Malla utilizada*

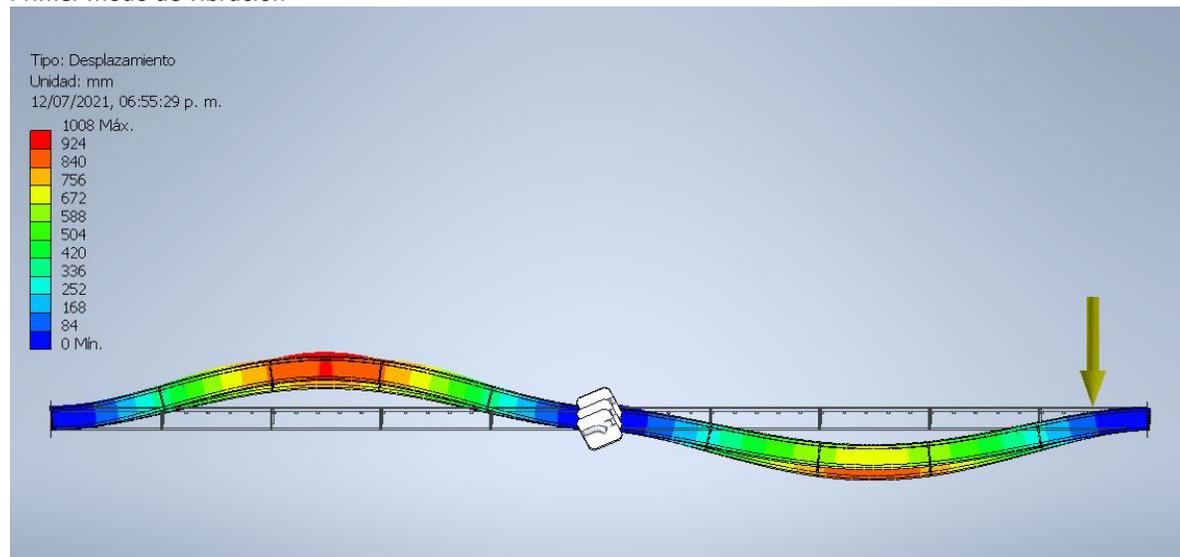


En las siguientes imágenes se observan los resultados el análisis modal realizado al puente Eje 10 Sur. Para esto se utilizó el software “Autodesk Inventor Professional (2021)”<sup>®</sup>

De este análisis se encontraron las siguientes frecuencias principales:

**Figura 37**

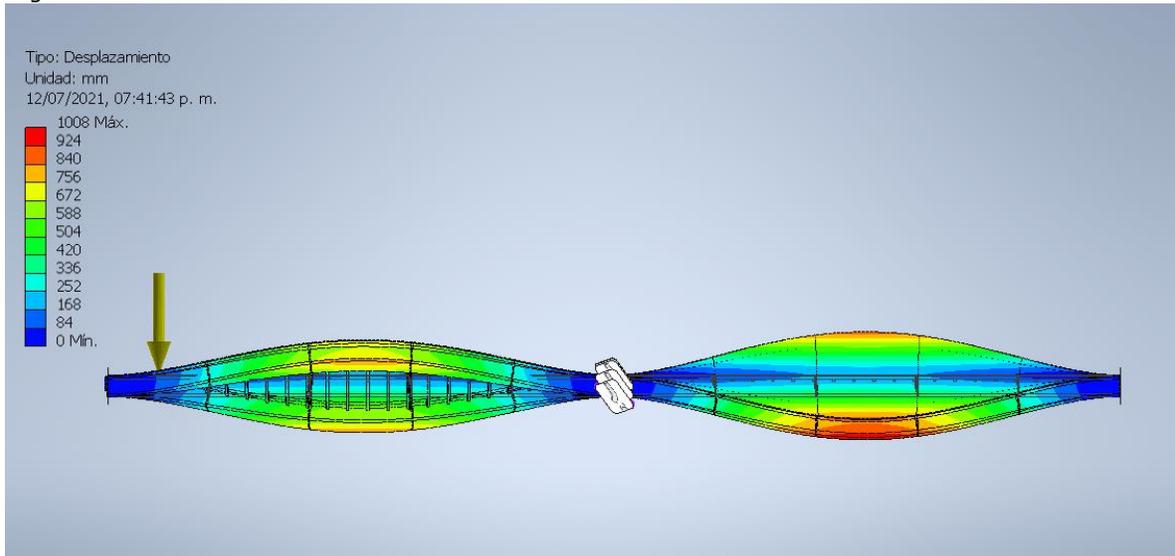
*Primer modo de vibración*



Nota. Frecuencia de modo = 22.21[Hz]

**Figura 38**

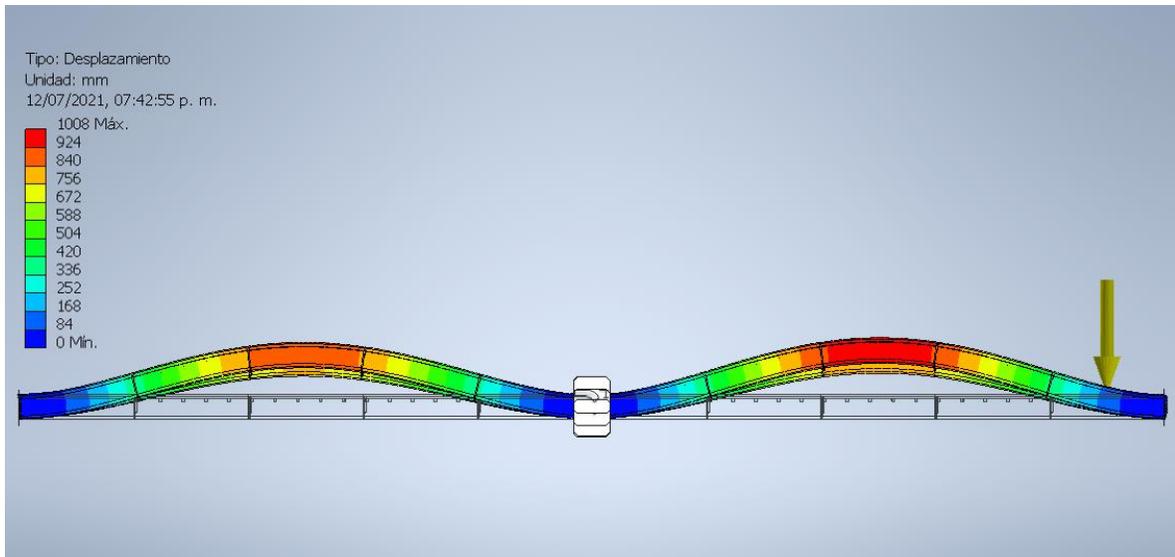
*Segundo modo de vibración*



Nota. Frecuencia de modo = 22.62[Hz]

**Figura 39**

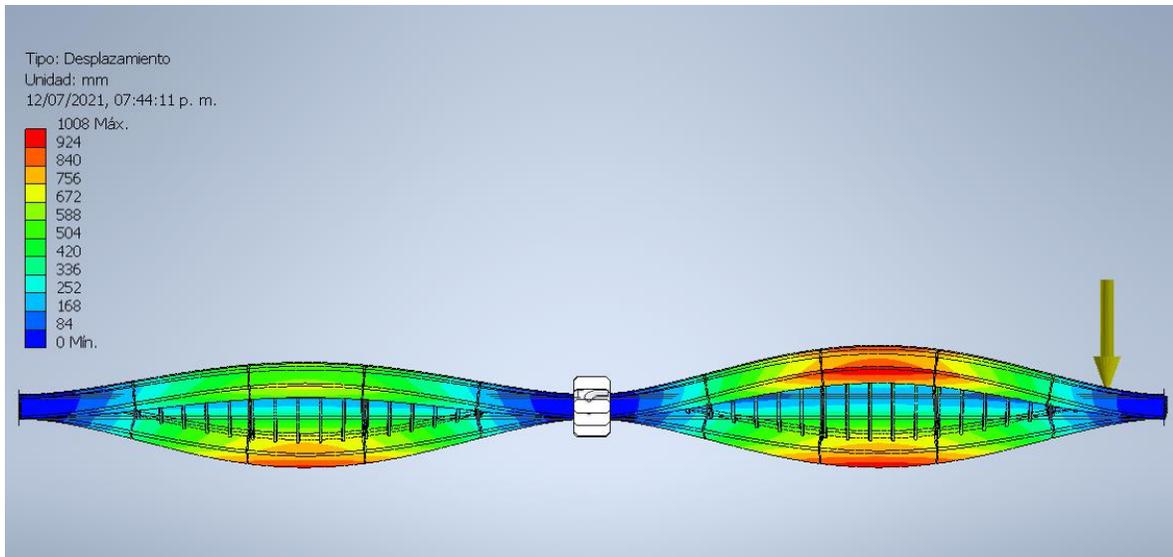
*Tercer modo de vibración*



Nota. Frecuencia de modo = 22.72[Hz]

**Figura 40**

*Cuarto modo de vibración*



Nota. Frecuencia de modo = 23.10[Hz]

El análisis se realizó para obtener los primeros 8 modos de vibración. Existen “n” modos de vibración, sin embargo, muchos de ellos serán disipados mediante la amortiguación por histéresis del mismo puente. Esto aplica por lo general para las frecuencias muy altas. Los modos mostrados son los más notorios por tener frecuencias cercanas a la frecuencia de excitación de la caminata humana y dónde la amortiguación propia del puente no disipa su energía.

## 4.5 Cálculos de TMD

A partir de este análisis, se observa que la frecuencia de excitación de la caminata humana se encuentra alrededor de 1 Hz. Esto no coincide con las frecuencias naturales del puente, siendo que la frecuencia a atenuar es la frecuencia de excitación. Conociendo las frecuencias naturales y la frecuencia de excitación que se desea atenuar se sintonizará el amortiguador de masa sintonizada.

Para el modelado del puente y del amortiguador de masa sintonizada se requieren los datos de módulo de Young y masa total del puente. Estos datos fueron obtenidos al seleccionar el acero a utilizar en la simulación de Inventor y las dimensiones propuestas del puente.

Para la selección del amortiguador se utilizaron como base los trabajos de (Huergo Ríos, 2016) y (Peña Ocampo, Moreno, & Thomson, 2010), el primero de ellos aplicados sobre un puente y el segundo a un graderío. Dentro del trabajo de Huergo Ríos se habla de valores óptimos entre 2 % y 7% de masa del puente para la masa del amortiguador. En el caso de Peña Ocampo se usa un valor de 6%. Sin embargo, en el trabajo de Huergo Ríos se experimentó con valores de entre 1% y 10% del peso. En la literatura se habla del 10% como el máximo de la masa en un amortiguador. En este caso se usó el 10% de la masa del puente como un primer acercamiento. Se realizaron tres diseños del amortiguador, uno con el amortiguador en el centro del puente y otro en el punto de mayor movimiento del puente que es a un cuarto de este.

### 4.5.1 Amortiguador en medio del puente y sin parámetros optimizados

A partir del análisis modal se sabe la frecuencia a la cual el amortiguador estará sintonizado, por lo tanto, los cálculos del primer sistema quedan de la siguiente forma:

Sabemos que:  $\omega_n = 22.21[\text{Hz}]$ ,  $M_p = 24.049 * 10^3[\text{kg}]$ ,  $\rho_a = 7850 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$ ,  $Ma = 0.1M_p$  y  $r = \frac{M_a}{M_p}$

Dónde:

$\omega_n \triangleq$  Frecuencia natural no amortiguada

$M_a \triangleq$  Masa del amortiguador

$M_p \triangleq$  Masa del puente

$\rho_a \triangleq$  Densidad del acero

$r \triangleq$  Relación de masas

Para la masa, se usó el mismo acero que el puente. Por lo tanto, a partir del cálculo de la masa y de la densidad se obtuvo un volumen mínimo de la siguiente forma:

$$Ma = 0.1 * 24.049 * 10^3[\text{kg}]$$

$$Ma = 2404.9[\text{kg}]$$

De la ecuación de densidad:

$$\rho = \frac{M}{V}$$

Se despeja el volumen:

$$V = \frac{M}{\rho}$$

Y se sustituyen los valores:

$$V = \frac{2404.9[\text{kg}]}{7850 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]}$$

$$V = 0.306[\text{m}^3]$$

Si se supone una altura de  $0.5[\text{m}]$  y suponemos ambos lados iguales de la base:

$l \triangleq$  base de la masa

$h \triangleq$  altura de la masa

$$l = \sqrt{\frac{V}{h}}$$

$$l = \sqrt{\frac{0.306[m^3]}{0.5[m]}}$$

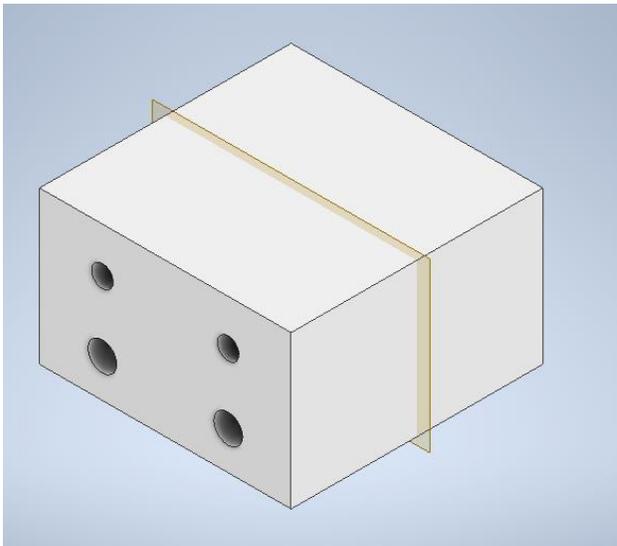
$$l = 0.782[m]$$

Dadas estas medidas aproximadas, la masa cambio a 2400.2317[kg].

Con estas medidas se diseñó un bloque de masa con la masa necesaria:

**Figura 41**

*Masa Sintonizada*



Ahora, para definir el elemento que dará la rigidez, se basaron los cálculos en la fórmula de la frecuencia natural de un sistema:

Dónde:

$\omega_a \triangleq$  Frecuencia del amortiguador

$M_a \triangleq$  Masa del amortiguador

$k_a \triangleq$  Rigidez del amortiguador

$$\omega_a = \sqrt{\frac{k_a}{M_a}}$$

En este caso ya se conoce la frecuencia y la masa por lo que se despeja la rigidez:

$$k_a = \omega_n^2 * M_a$$

Sustituyendo en la ecuación queda:

$$k_a = (22.21[Hz])^2 * (2400.2317[kg])$$

$$k_a = 1.184 * 10^6 \left[ \frac{N}{m} \right]$$

A partir de aquí se hicieron dos amortiguadores con distintos elementos de rigidez cada uno. Para el primero se diseñó con 8 elementos de rigidez, los cuales aportarán la misma rigidez cada uno. Existen dos elementos base, debido a que uno tiene una longitud mayor y es recto; el otro elemento estará inclinado a 10° para poder tener una sujeción al puente, este tendrá una longitud menor. También se diseñó una placa que se ensamblará al puente mediante la cual estos elementos inclinados quedarán unidos al puente.

Los cálculos fueron los siguientes:

Una vez obtenida la rigidez necesaria para sintonizar el amortiguador a la frecuencia del primer modo, se divide entre 8:

$$k_b = \frac{1}{8} k_a = \frac{1}{8} * (1.184 * 10^6 \left[ \frac{N}{m} \right])$$

$$k_b = 148 * 10^3 \left[ \frac{N}{m} \right]$$

Dónde:

$$k_b \triangleq \text{Rigidez de la barra}$$

Posteriormente se utilizó la fórmula de la rigidez equivalente de una viga doblemente empotrada que se obtuvo del libro (Rao, 2012) de Vibraciones Mecánicas.

La fórmula es la siguiente:

$$k = \frac{192 * E * I}{l^3}$$

Dónde:

$$E \triangleq \text{Módulo de Young}$$

$$I \triangleq \text{Inercia del elemento}$$

$$l \triangleq \text{Longitud del elemento}$$

El siguiente paso fue despejar la inercia:

$$I = \frac{k_b * l^3}{192 * E}$$

Se sustituyen los valores correspondientes a la barra inclinada:

$$l_H = 6.7[m], k_b = 148 * 10^3 \left[ \frac{N}{m} \right], E = 190.3[GPa]$$

$$I_{bi} = \frac{148 * 10^3 \left[ \frac{N}{m} \right] * (6.7[m])^3}{192 * 190.3 * 10^9 [Pa]}$$

$$I_{bi} = 1.218 * 10^{-6} [m^4]$$

Esa es la Inercia que necesita proporcionar cada barra inclinada, para conocer las dimensiones planares se basó en las fórmulas de inercia de geometrías comunes en el plano, presentadas en el libro (Beer, Johnston Jr., & Cornwell, 2010). En este primer caso para simplificar los cálculos se utilizó la forma circular por tener la misma inercia en ambos ejes. La fórmula de la inercia del círculo es la siguiente:

$$I = \frac{r^4 * \pi}{4}$$

Dónde:

$$r \triangleq \text{Radio del círculo}$$

Primero se despejó el radio, que es la medida necesaria:

$$r_{bi} = \sqrt[4]{\frac{4 * I_{bi}}{\pi}}$$

Sustituyendo la Inercia de la barra obtenida se pudo obtener el radio de la barra circular:

$$r_{bi} = \sqrt[4]{\frac{4 * (1.218 * 10^{-6} [m^4])}{\pi}}$$

$$r_{bi} = 0.0353[m] = 3.53[cm]$$

El procedimiento para la barra horizontal es el mismo y se retoma desde el cálculo de la Inercia, debido a que cambia la longitud de la barra:

$$l_H = 9.8[m], k_b = 148 * 10^3 \left[ \frac{N}{m} \right], E = 190.3 [GPa]$$

Se sustituyen los valores en la fórmula despejada de la inercia:

$$I_{bh} = \frac{148 * 10^3 \left[ \frac{N}{m} \right] * (9.8[m])^3}{192 * 190.3 * 10^9 [Pa]}$$

$$I_{bh} = 3.81 * 10^{-6} [m^4]$$

El valor obtenido se despeja en la fórmula del radio:

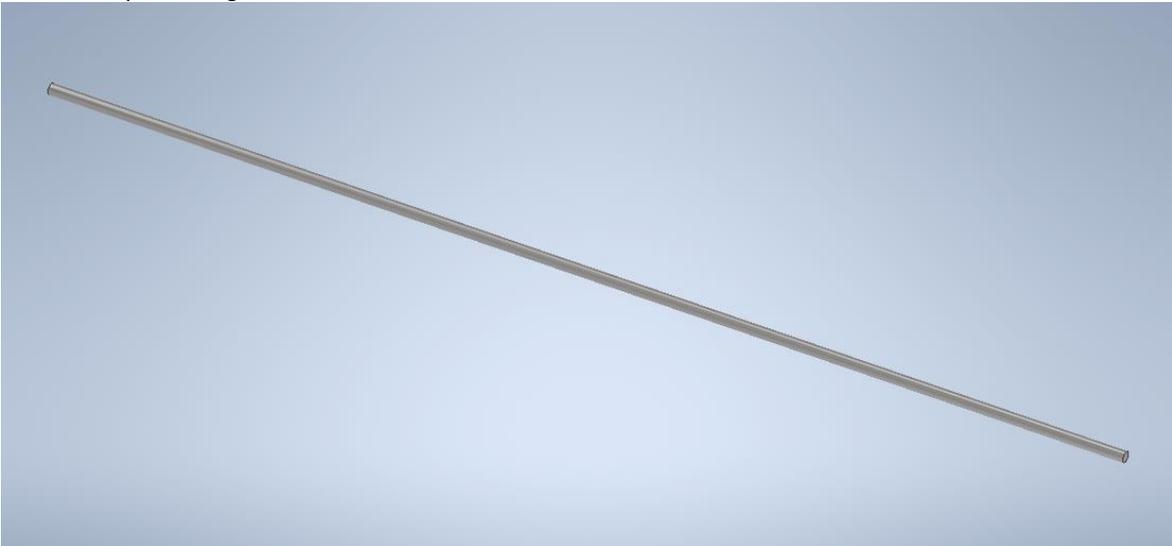
$$r_{bh} = \sqrt[4]{\frac{4 * (3.81 * 10^{-6} [m^4])}{\pi}}$$

$$r_{bh} = 0.0469[m] = 4.69[cm]$$

Estas barras quedan en el CAD de la siguiente forma:

**Figura 42**

*Elementos que dan rigidez*

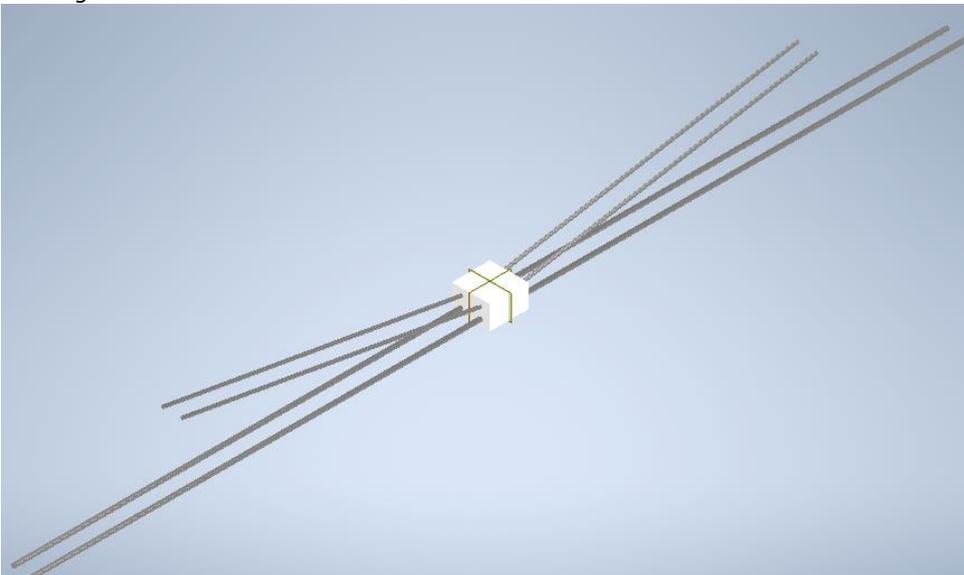


Nota. Barras circulares

Y ensamblados los 9 elementos quedan:

**Figura 43**

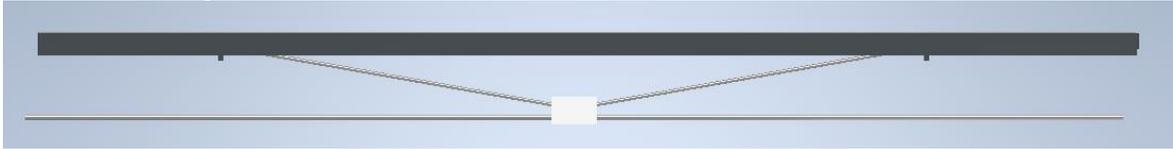
*Amortiguador de Masa Sintonizada*



Ensamblado con el puente queda:

Figura 44

Puente con Amortiguador Ensamblado



Para el análisis con elemento finito se usaron las mismas restricciones y malla que para el análisis del puente sin amortiguador, solo se añadió una restricción a los elementos que dan rigidez que es bloquear el movimiento de la cara externa de estos para simular la empotración.

#### 4.5.2 Amortiguador en el centro con PTR

En este amortiguador el cálculo fue un poco menos directo, ya que se trabajó con medidas estándares de perfiles PTR. Primero se calcularon las barras inclinadas, se consideraron 4 (2 de cada lado) y se obtuvo su rigidez equivalente de la suma de las cuatro. Estas fueron de un PTR de 4[in]x2[in], un calibre 7 y de un acero de bajo carbono con  $E = 200 * 10^9 [GPa]$

Para obtener la rigidez equivalente de las 4 barras primero se calculó la Inercia del perfil, la ecuación de la inercia respecto a X de un rectángulo vacío es la siguiente:

$$I = \frac{1}{12} [(b_e) * (h_e)^3 - (b_i) * (h_i)^3]$$

Dónde:

$b_e \triangleq$  Base exterior

$h_e \triangleq$  Altura exterior

$b_i \triangleq$  Base interior

$h_i \triangleq$  Altura interior

$e \triangleq$  Espesor

Y:

$$b_i = b_e - 2 * e$$

$$h_i = h_e - 2 * e$$

Las características del PTR son:  $h_e = 101.6 [mm]$ ,  $b_e = 50.8 [mm]$  y  $e = 4.55 [mm]$

$$\therefore h_i = 101.6 [mm] - 2 * (4.55 [mm]) = 92.5 [mm]$$

$$b_i = 50.8 [mm] - 2 * (4.55 [mm]) = 41.7 [mm]$$

Sustituyendo en la fórmula se obtuvo I:

$$I = \frac{1}{12} [(50.8 [mm]) * (101.6 [mm])^3 - (41.7 [mm]) * (92.5 [mm])^3]$$

$$I_{b_iPTR} = 1.6895 * 10^{-6} [m^4]$$

Se sustituye en la ecuación de rigidez equivalente:

$$k_{PTR} = \frac{192 * (200 * 10^9 [Pa]) * (1.6895 * 10^{-6} [m^4])}{(6.7 [m])^3}$$

$$k_{PTR} = 215.71 * 10^3 \left[ \frac{N}{m} \right]$$

La rigidez equivalente de las 4 barras es:

$$k_{eq} = 4 * k_{PTR} = 4 * \left( 215.71 * 10^3 \left[ \frac{N}{m} \right] \right) = 862.83 * 10^3 \left[ \frac{N}{m} \right]$$

Ahora para obtener la rigidez por las barras rectas se resta la rigidez necesaria para la frecuencia y la equivalente de las 4 barras inclinadas:

$$k_{HPTR} = k_a - k_{eq} = 1184 * 10^3 \left[ \frac{N}{m} \right] - 862.83 * 10^3 \left[ \frac{N}{m} \right]$$

$$k_{HPTR} = 321.17 * 10^3 \left[ \frac{N}{m} \right]$$

Debido a que resultan iterativos los cálculos, fue necesario realizar una tabla en Excel para agilizar el proceso. La tabla es la siguiente:

**Figura 45**

*Tabla de Inercias y Rigideces*

E	L	Meds (in)	Calibre	Espesor	Medidas	Ixx	Kxx	Cantidad	Ktot	
2.00E+11	9.7	4" * 2"	7	4.55E-03	1.016E-01	5.080E-02	1.6895E-06	7.1084E+04	4	2.8434E+05
2.00E+11	9.7		3/16	4.76E-03	1.016E-01	5.080E-02	1.7541E-06	7.3803E+04	4	2.9521E+05
2.00E+11	9.7		1/4	6.35E-03	1.016E-01	5.080E-02	2.2091E-06	9.2945E+04	4	3.7178E+05
2.00E+11	9.7		8	4.18E-03	1.016E-01	5.080E-02	1.5730E-06	6.6182E+04	5	3.3091E+05
2.00E+11	9.7		9	3.80E-03	1.016E-01	5.080E-02	1.4497E-06	6.0995E+04	6	3.6597E+05

**Figura 46**

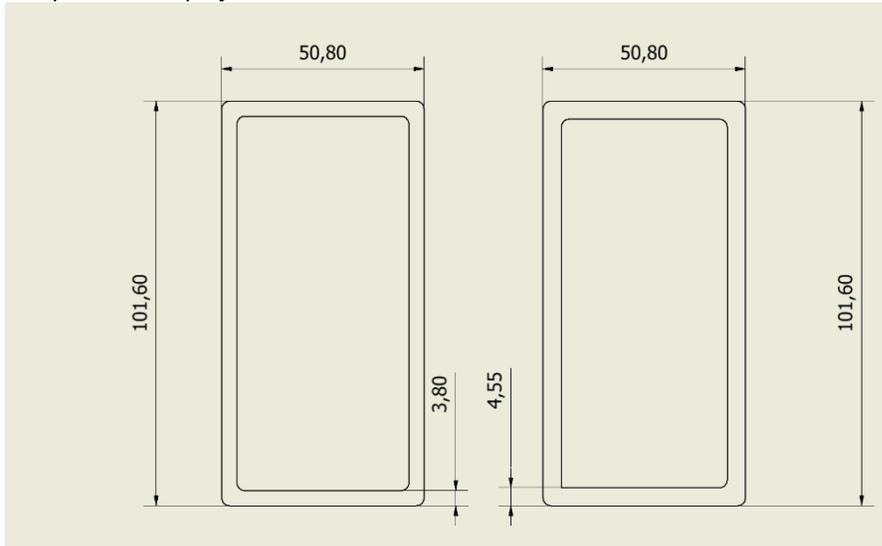
*Frecuencia calculada vs. Frecuencia obtenida*

	Error	
22.2795398	-0.313%	22.21
22.6043517	-1.776%	22.21

El último PTR es el seleccionado, porque proporciona un valor cercano a la rigidez necesario y resulta un número par de perfiles. Haciendo el cálculo el cambio de rigidez se produce un 1.7% de error de la frecuencia sintonizada. La masa que se utilizará es la misma, pero los orificios de sujeción se modifican a la forma del perfil PTR. Una vez realizado cálculo anterior, se dibujaron en CAD los perfiles PTR de 4[in]x2[in].

**Figura 47**

*Comparación de perfiles PTR*



### 4.5.3 Amortiguador a un cuarto del puente y con parámetros optimizados

Los cálculos efectuados anteriormente para la masa siguen siendo vigentes, lo que cambiará será la rigidez debido a la utilización de la fórmula utilizada por (Huelgo Ríos, 2016) que cambia la frecuencia a la cual se sintoniza el amortiguador. La fórmula es la siguiente:

$$\omega_o = \frac{\omega_n}{1 + r}$$

Dónde:

$\omega_o \triangleq$  Frecuencia optimizada

Sustituyendo:

$$\omega_o = \frac{22.21[Hz]}{1 + 0.1}$$

$$\omega_o = 20.19[Hz]$$

$$M_a = 2400.2317[kg]$$

Ahora siguiendo la relación entre masa, rigidez y frecuencia podemos obtener la nueva rigidez:

$$k_o = \omega_o^2 * M_a$$

$$k_o = (20.19[Hz])^2 * (2400.2317[kg])$$

$$k_o = 978.509 * 10^3 \left[ \frac{N}{m} \right]$$

Posteriormente se realizó una tabla semejante a la anterior:

**Figura 48**

*Tabla de rigideces e Inercias*

E	L	Calibre	Espesor	Medidas		Ixx	Kxx	Cantidad	Ktot
2.00E+11	4.8	14	1.90E-03	1.016E-01	5.080E-02	7.7599E-07	2.6944E+05	1	2.6944E+05
2.00E+11	14.8	7	4.55E-03	1.016E-01	5.080E-02	1.6895E-06	2.0013E+04	2	4.0025E+04
2.00E+11	4.4	14	1.90E-03	1.016E-01	5.080E-02	7.7599E-07	3.4981E+05	1	3.4981E+05
2.00E+11	4.4	14	1.90E-03	1.016E-01	5.080E-02	7.7599E-07	3.4981E+05	1	3.4981E+05
$\Sigma$									1.0091E+06

Con la rigidez equivalente de las barras se hizo un cálculo de diferencia de frecuencias:

**Figura 49**

*Tabla Rigidez y Frecuencia Obtenida*

Ko	Error
9.79E+05	-3.124%
20.4839927	-1.456%
20.19	

Dónde se puede ver que con una rigidez mayor por 3% se traduce en un error de frecuencia de 1.5%.

Posteriormente se cambió el espesor de los PTR utilizados anteriormente, ya que son de la misma medida de 4[in]x2[in].

Ensamblado queda de la siguiente forma el amortiguador:

**Figura 50**

*Amortiguador con parámetros óptimos*



Ensamblado al puente:

**Figura 51**

*Puente con amortiguador ensamblado*



## **4.6 Resultados**

### **4.6.1 Amortiguador en medio del puente y sin parámetros optimizados**

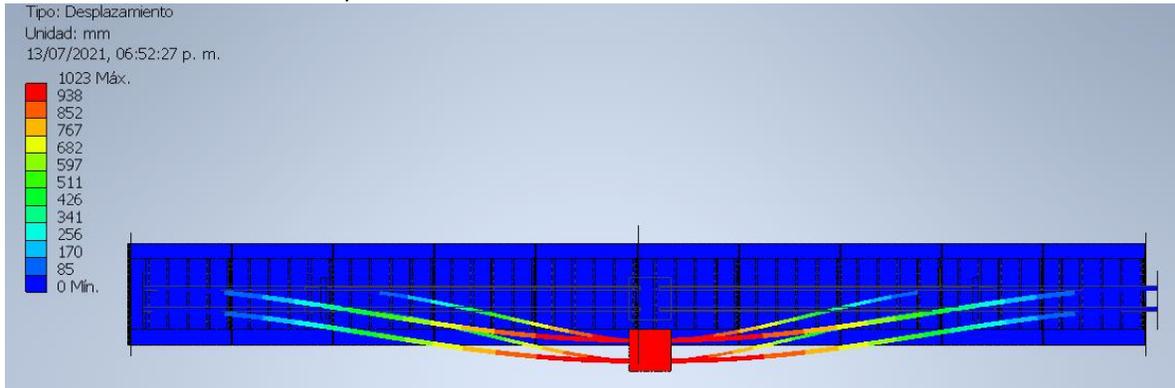
En las siguientes imágenes se muestran los modos de vibración del puente con los distintos amortiguadores diseñados anteriormente:

En los primeros 4 modos se puede observar que todos los modos de vibrar cambiaron en su frecuencia. Así mismo, todo el movimiento del puente se transfirió al amortiguador. El primer modo de vibración pasó de ser vertical a un movimiento lateral. Se puede observar que la frecuencia del primer modo bajo hasta 0.81 Hz. Esto es un buen resultado, ya que no solo será accionado el amortiguador mientras la gente pasa, sino que también la mayoría del movimiento del puente se transmitirá a la masa sintonizada. Se puede observar que todo el amortiguador entra en movimiento en esta frecuencia, esto quiere decir que la disipación de energía se realiza en el amortiguador.

Dado el desplazamiento visto en el ensayo, sería pertinente en el futuro hacer un estudio estático del amortiguador, así como un estudio de fatiga y de ciclo de vida.

**Figura 52**

*Primer modo de vibración de la primera solución*

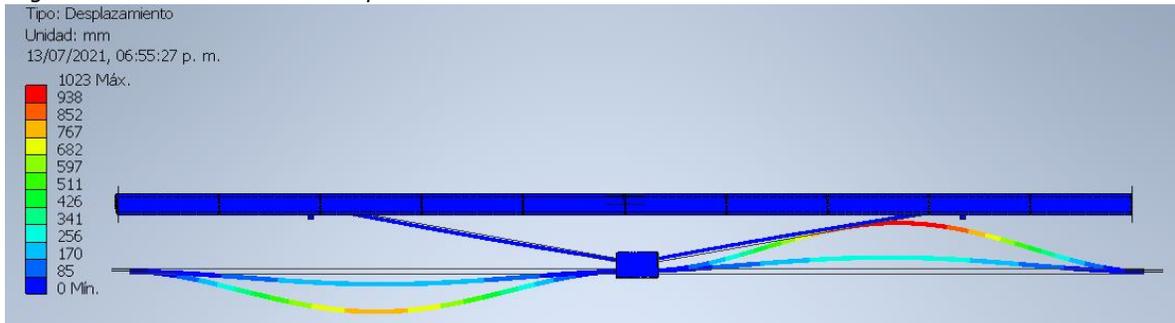


Nota. Frecuencia de modo = 0.81[Hz]

En el segundo modo se observa un cambio de frecuencia y un cambio en el modo de vibración. Su frecuencia, comparada con el segundo modo no amortiguado, baja a 3.95 Hz. Se puede observar que, a diferencia del primer modo amortiguado, la masa no tiene movimiento y las barras que funcionan como resortes son las que reciben el movimiento y disipan la energía. Este comportamiento es el que se encuentra en los movimientos de los demás modos analizados. Al haber sintonizado el sistema a la frecuencia de excitación también se ven alteradas las otras frecuencias. Esto ocurre por utilizar un modelo discreto (una masa puntual) cuando en realidad se trata de un modelo distribuido (una viga). Su movimiento pasa de uno lateral a un movimiento combinado vertical y lateral.

**Figura 53**

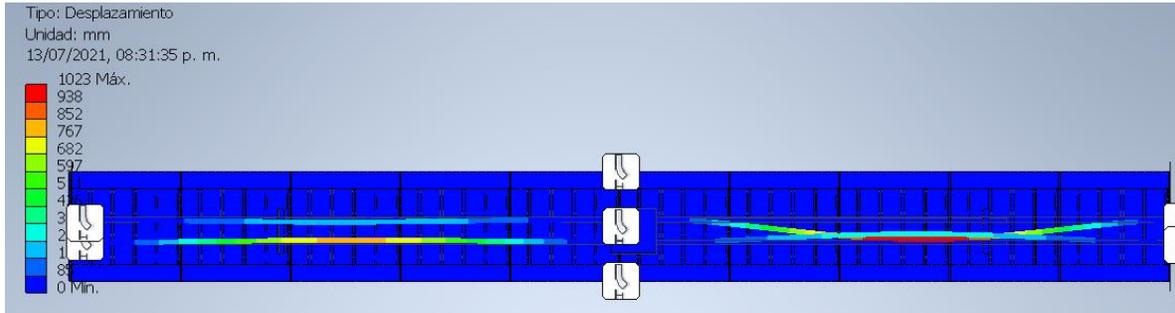
*Segundo modo de vibración de la primera solución*



Nota. Frecuencia de modo = 3.95[Hz]

**Figura 54**

*Segundo modo de vibración de la primera solución b*

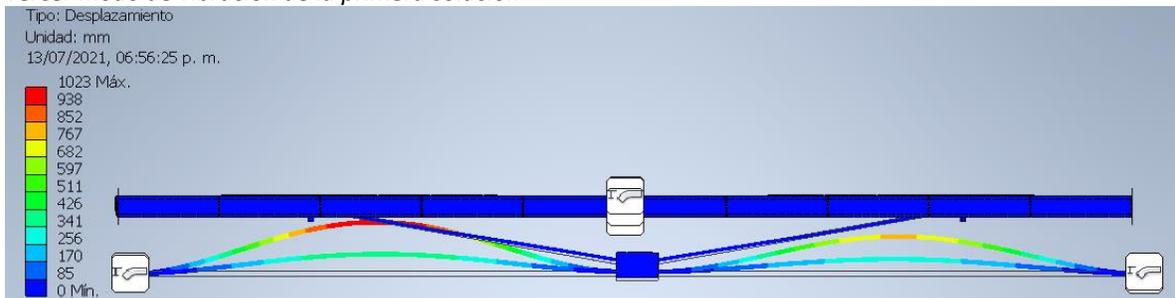


Nota. Frecuencia de modo = 3.95[Hz]

En el tercer modo amortiguado se puede observar algo semejante al segundo modo, donde el movimiento, a pesar de ser principalmente vertical, en el amortiguador se presenta un aumento en el movimiento lateral de las barras. Esto podría decir que requieren más rigidez en el eje horizontal "x", perpendicular al puente; tomando en cuenta que la rigidez sólo se calculo vertical por ser la de interés. Cabe destacar que por ser un elemento circular, este tiene la misma rigidez en ambos ejes "x" y "y", ambos perpendiculares al eje principal del puente.

**Figura 55**

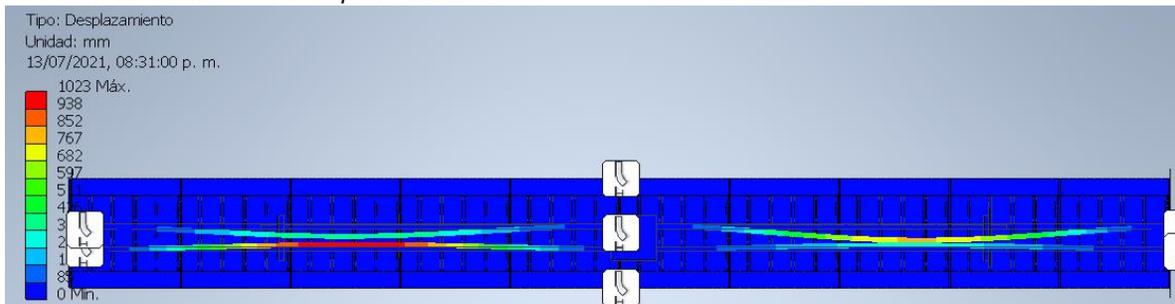
*Tercer modo de vibración de la primera solución*



Nota. Frecuencia de modo = 3.98[Hz]

**Figura 56**

*Tercer modo de vibración de la primera solución b*



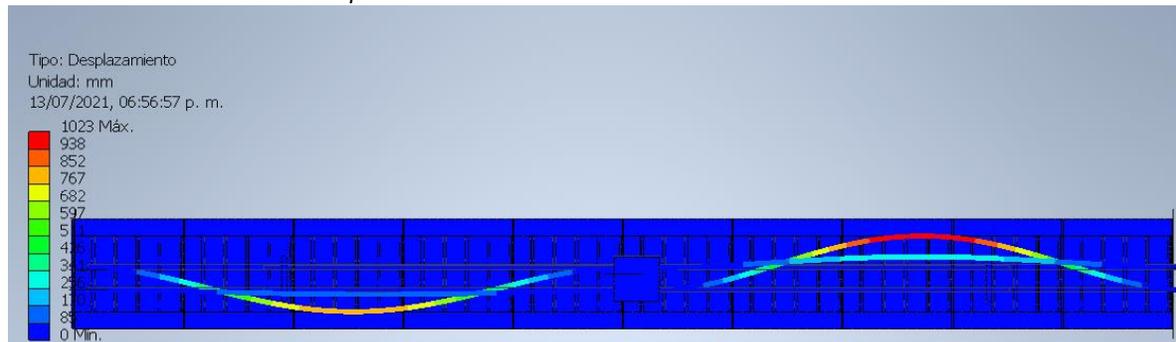
Nota. Frecuencia de modo = 3.98[Hz]

El cuarto modo de vibración las barras que proporcionan la rigidez del sistema son las que están oscilando, ocasionando la flexión de estas. Este modo podría ocasionar un problema por la flexión y por el estado general de esfuerzos que podría inducir.

Algo interesante a resaltar es que, en el primer modo, todo el sistema se mueve como una única masa discreta, mientras que en los siguientes tres modos de vibrar los elementos que reciben el movimiento son los tubos empotrados a la pared. Una solución a esta situación podría ser incrementar la rigidez lateral de estos elementos en particular.

**Figura 57**

*Cuarto modo de vibración de la primera solución*



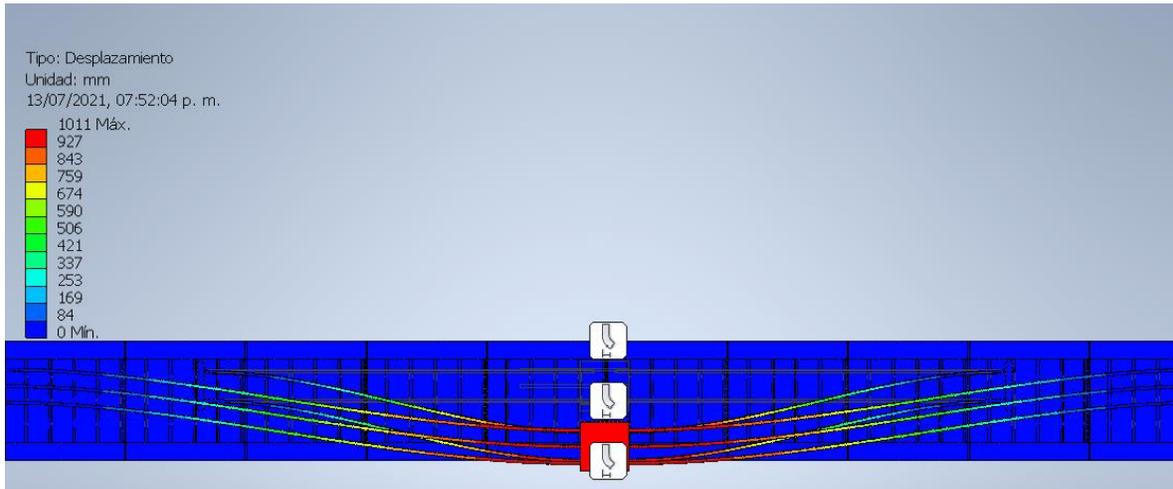
Nota. Frecuencia de modo = 4.01[Hz]

#### 4.6.2 Amortiguador en el centro con PTR

En este rediseño de los elementos de rigidez se puede observar que ocurre lo mismo que con la primera solución propuesta. En el primer modo de vibración amortiguado, el amortiguador transforma un movimiento vertical en un movimiento lateral. Se puede observar que la frecuencia del modo disminuyó comparado con el primer modo de la anterior solución. Esto es debido que la rigidez de este amortiguador resultó más alta al acoplar los cálculos a los valores predeterminados de los perfiles y no inversamente. Igual que el anterior amortiguador, el primer modo cuando la masa se mueve como un elemento discreto.

**Figura 58**

*Primer modo de vibración de la segunda solución*

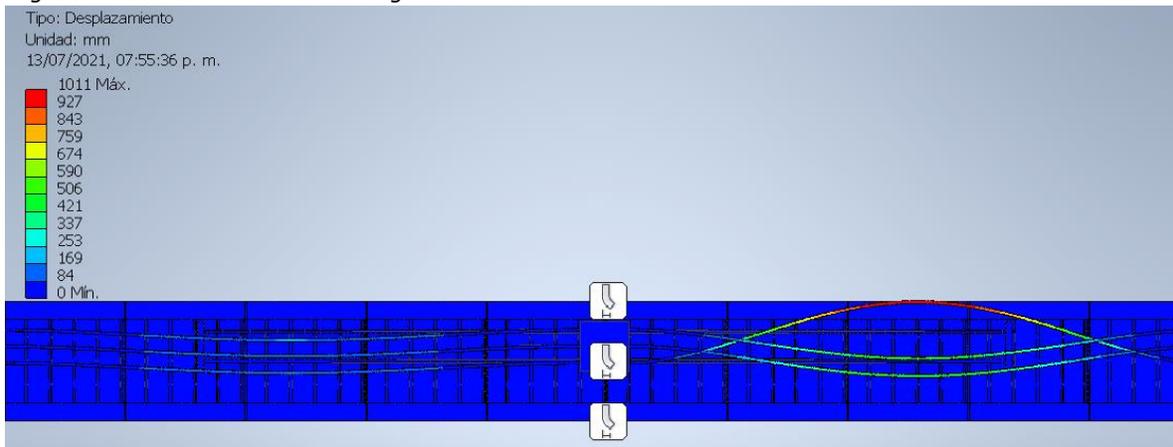


Nota. Frecuencia de modo = 0.54[Hz]

Dentro del segundo modo se observa que, al contrario que el primer amortiguador, este modo de vibraci3n pasa a ser horizontal. Esto se debe a la diferencia en el momento de inercia del PTR que genera dos constantes de rigidez distintas en direcci3n vertical y horizontal. El movimiento de las barras de rigidez resulta asimetrico, es decir, el movimiento es más pronunciado de un lado que del otro.

**Figura 59**

*Segundo modo de vibraci3n de la segunda soluci3n*



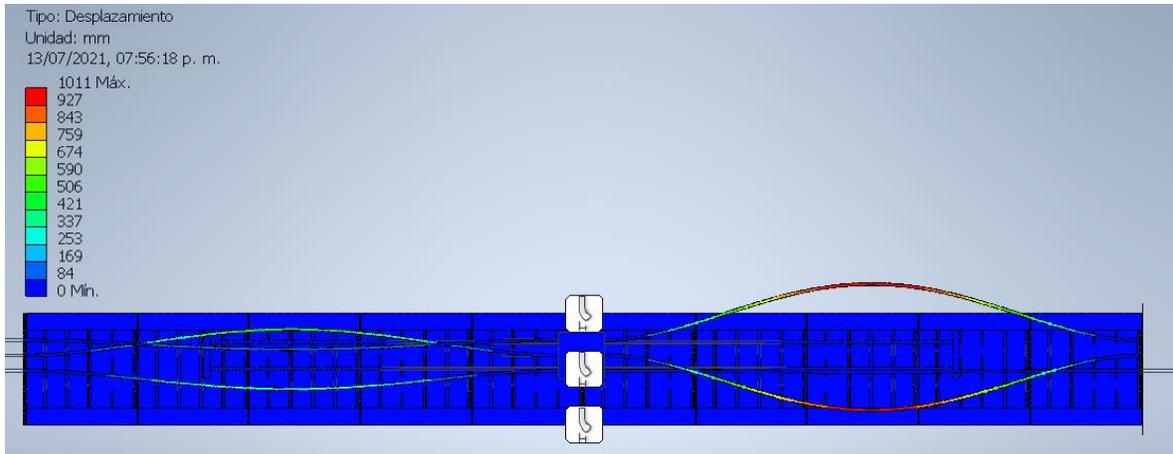
Nota. Frecuencia de modo = 4.07[Hz]

En el tercer modo aparece un suceso interesante, es que de ambos lados existe un elemento que no recibe movimiento en los absoluto y estos elementos estn opuesto en lados. Es decir mientras del lado izquierdo el elemento de la extrema izquierda no se mueve, en la derecha el elemento de la extrema derecha es el que no resulta excitado para nada. En lo demás es parecido al segundo modo, solo que el movimiento es más abierto hacia afuera en vez de hacia dentro del segundo modo. También los elementos de la izquierda si presentan un movimiento más representativo,

alrededor de  $\frac{1}{4}$  del movimiento de los elementos de la derecha. La frecuencia sube 0.1 Hz respecto al segundo y 0.9 Hz respecto al tercer modo anterior.

**Figura 60**

*Tercer modo de vibración de la segunda solución*

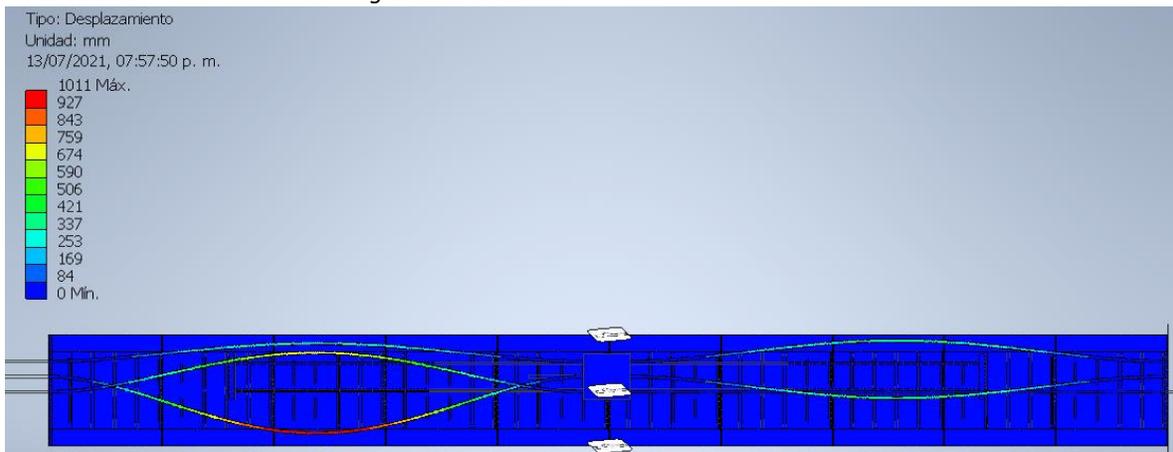


Nota. Frecuencia de modo = 4.08[Hz]

En el cuarto modo se puede observar lo opuesto del tercero donde los elementos de la izquierda reciben el movimiento en su mayoría, mientras que los de la derecha reciben  $\frac{1}{4}$  de ese movimiento. Se presenta en parte el mismo fenómeno del tercer modo, pues solo en el lado derecho un elemento no recibe movimiento alguno.

**Figura 61**

*Cuarto modo de vibración de la segunda solución*



Nota. Frecuencia de modo = 4.08[Hz]

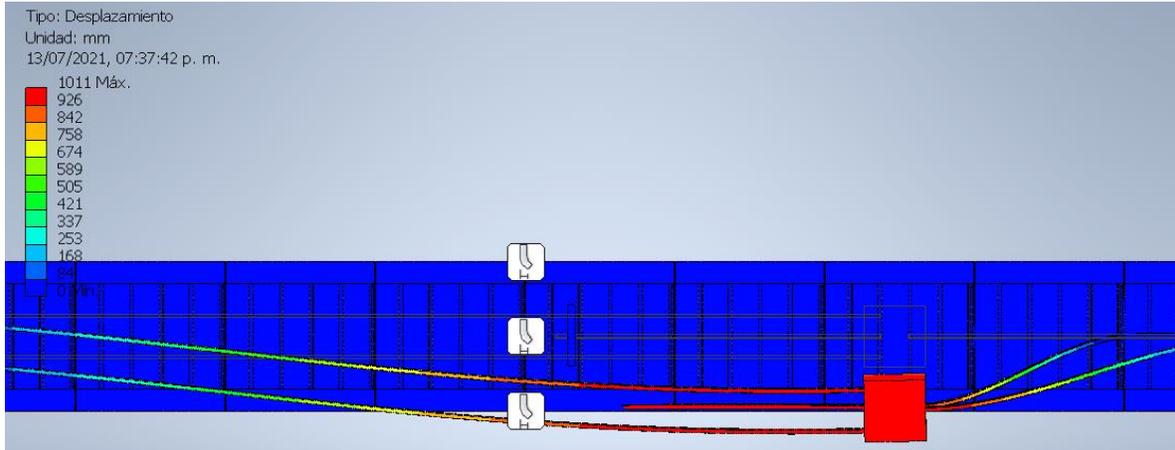
### 4.6.3 Amortiguador a un cuarto del puente y con parámetros optimizados

En el primer modo de vibrar del último diseño se observa la tendencia de los anteriores dos amortiguadores, dónde el modo de vibrar cambia a un movimiento lateral. La frecuencia sube un poco debido a varios factores: La rigidez no es calculada para la frecuencia del primer modo del puente ya que la frecuencia óptima no es la frecuencia del primer modo. Se puede observar cómo

los elementos con menor rigidez son los que presentan el mayor movimiento, estos son los del lado derecho (recordando que la rigidez es mayor mientras menos longitud tenga un elemento). Así mismo se observa que todo el sistema se desplaza y no solo unos cuantos elementos.

**Figura 62**

*Primer modo de vibración de la tercera solución*

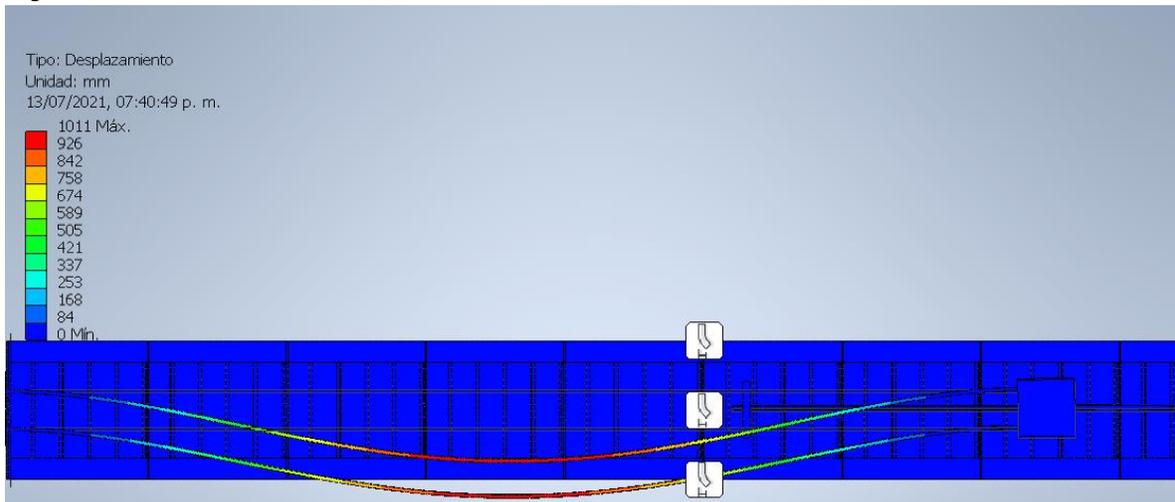


Nota. Frecuencia de modo = 0.58[Hz]

Dentro del segundo modo se observa un cambio importante, la frecuencia baja hasta 1.74 Hz. Es un cambio mayor, observando que los anteriores modos subían su frecuencia hasta 3.98 Hz. Su movimiento es más parecido al del segundo amortiguador ya que es lateral; los elementos con menos rigidez son los que presentan el mayor movimiento y este es hacia el mismo lado.

**Figura 63**

*Segundo modo de vibración de la tercera solución*

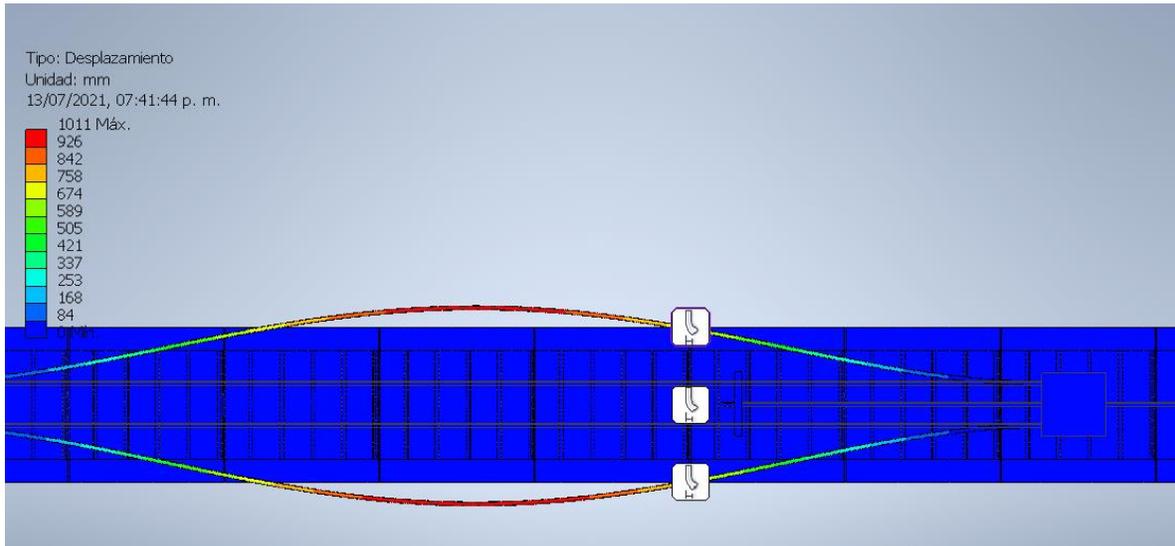


Nota. Frecuencia de modo = 1.74[Hz]

El tercer modo es semejante al segundo, la diferencia es que el movimiento de los elementos que tienen el movimiento es opuesto en dirección. La frecuencia es la misma. Solo los perfiles reciben movimiento.

**Figura 64**

*Tercer modo de vibración de la tercera solución*

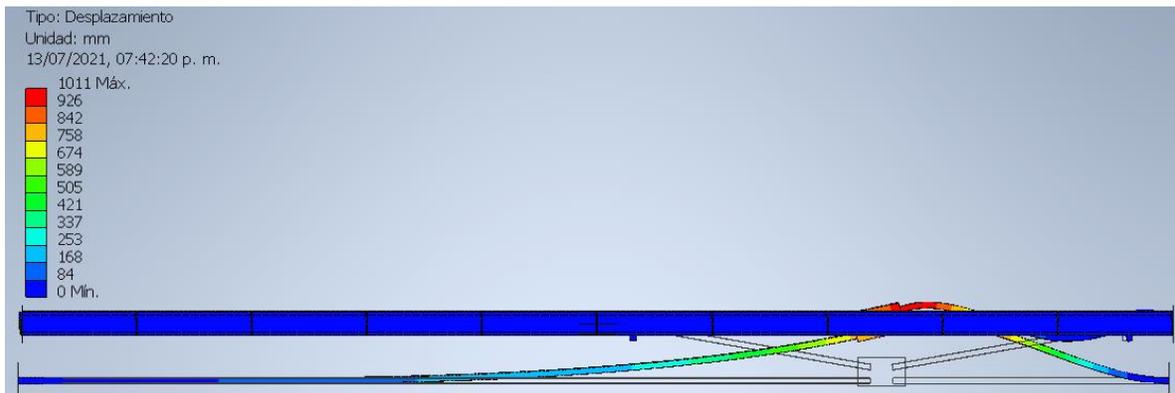


Nota. Frecuencia de modo = 1.74[Hz]

El cuarto modo resulta bastante particular, su frecuencia es 2.07 Hz y es el único modo distinto a un primer modo donde la masa tiene movimiento. Se observa un movimiento vertical que atraviesa al puente. Curiosamente también los elementos con más movimientos son los que cuentan con mayor rigidez. Originalmente este modo era una combinación de movimientos.

**Figura 65**

*Cuarto modo de vibración de la tercera solución*



Nota. Frecuencia de modo = 2.07[Hz]

# Capítulo 5 Análisis de Resultados y Conclusiones

“Este resultado es demasiado bello para ser falso. La belleza de una ecuación es más importante que ajustarse al experimento”.

P.A.M. Dirac

## 5.1 Resultados del trabajo

Se planteó un método de elección de sistema de control de vibraciones basado en una matriz de decisión. A pesar de no contar con calificaciones decisivas para algunas categorías de la matriz de decisión se obtuvieron resultados. La falta de información se debió a que se carece de la práctica de la construcción de puentes y de los sistemas de control. Dentro de las características que no se consideraron previamente se encuentran algunas como: resulta mejor un sistema calculado desde la etapa de diseño del puente, que la implementación del sistema cuando el puente ya está construido; los costos al requerir de proveedores nacionales o internacionales; los tiempos de instalación de cada uno de estos sistemas, etc.

Los resultados demuestran que se llegó a una posible solución que podría satisfacer la problemática de vibraciones en los puentes peatonales. La matriz inicial, sin ponderaciones favorables a ninguna calificación, muestra un sesgo favorable a los sistemas semiactivos. Sin embargo, se obtienen diferentes respuestas de solución para diferentes ponderaciones en los diversos casos. Cada una de estas ponderaciones distintas ayudan a definir las condiciones bajo las cuales los puentes están operando, como es su excitación, tipo de suelo, entre otras características.

Dentro de la descripción de los sistemas se logró dar una explicación breve de cómo funciona cada tipo de sistema de control, así como su clasificación y el estado del arte en cada uno de ellos. Se encontró que las investigaciones se han decantado por los sistemas híbridos, al mostrar un rendimiento adaptable como los sistemas activos y un comportamiento altamente fiable al contar con sistema pasivo como base del sistema. Japón se encuentra investigando estos sistemas y actualmente es el país que ha implementado más sistemas híbridos en sus edificios sin necesariamente ser construcciones de gran altura.

Los sistemas de masa sintonizada se encuentran en todas las clasificaciones al tener diferentes variantes como: masa sintonizada pasivo, activo, semiactivo e híbrido, siendo que se han hecho extensivos estudios para comprobar su utilidad. Otros de los sistemas que se exploran dentro de la matriz de decisión son los más recientes, como los magnetoreológicos y los electroreológicos. A estos últimos se le ha dedicado mucha investigación, debido a su modelado complejo y capacidad de adaptación.

Con la información obtenida se lograron definir las variables a utilizar en el método de elección y otorgarle una calificación a cada tipo de sistema respecto a esta variable. En el caso de las variables

donde se determinó que falta información para poder calificar correctamente, se otorgó una calificación neutra al sistema y a cada clasificación particular.

Una vez obtenida esta matriz, se consiguieron diferentes resultados para distintos tipos de ponderaciones en las variables de cada caso de estudio. Esto significa que el sesgo inicial hacia los sistemas semiactivos no pesó realmente. Con la información obtenida se realizó una segunda matriz de decisión, para poder detallar cuál de los sistemas de control (pasivo o activo) se necesita escoger de varias opciones disponibles. En el caso particular de análisis que se presenta, se dio una mayor ponderación a la variable de la excitación que recibe, por ser un puente peatonal.

Se plantearon 3 casos de estudio, dos con soluciones conocidas y una nueva propuesta. En los primeros dos casos se pudo comparar la solución obtenida de la matriz con la selección que proponen otros autores. En el primer caso, el puente *Millenium*, la matriz arrojó una solución de un sistema híbrido. La solución implementada en el puente real consistió en una serie de amortiguadores (sistema pasivo). En esta comparación el método condujo a un resultado distinto.

La diferencia encontrada puede ser debida a las tecnologías existentes en el momento de construcción. En el segundo caso de estudio (Puente San Bartolo) tanto la solución propuesta por el diseñador como la encontrada con la matriz de decisión resultó ser la misma: un sistema de masa sintonizada pasivo. Esta coincidencia en la solución es posible que se deba a los siguientes factores: el tipo de terreno donde se encuentra el puente, las excitaciones de tipo peatonal, su costo relativamente bajo y la baja importancia que se le da a añadir masa al puente.

El tercer caso es distinto, ya que se propone el análisis de un puente que no ha sido estudiado. Se trata del puente localizado en Insurgentes sur y eje 10 Sur. Es un puente peatonal de reciente construcción (menos de 15 años) y que no debería tener problemas por las normas constructivas actuales. Sin embargo, cuando un usuario cruza dicho puente, mientras camina siente la oscilación inducida por el mismo caminar de los peatones. Esta incomodidad al caminar fue por la que se seleccionó para realizar el caso de estudio. Dentro de la solución obtenida por la matriz de decisión, al tener características semejantes a las del segundo caso se obtuvo un resultado similar: un amortiguador de masa sintonizada pasivo.

Como complemento a la solución que se encontró en la matriz de decisión, se realizó un CAD del puente y un análisis modal del mismo. Se obtuvieron los primeros 8 modos de vibración, por las frecuencias cercanas a la excitación peatonal y se despreciaron las frecuencias superiores a estos modos, esto debido a que en estas frecuencias se considera que la misma amortiguación por histéresis del puente puede disipar la energía. Sobre el modelo obtenido se diseñaron 3 soluciones distintas y se compararon los primeros 8 modos de vibración.

Al comparar el sistema original con el sistema de control se puede observar una mejoría en el comportamiento, siendo que la frecuencia de excitación principal se ve absorbida por la masa sintonizada.

El resultado de los distintos sistemas propuestos es interesante, ya que para la primera frecuencia para la cual fueron diseñados, se comportan de la manera esperada: el amortiguador se mueve y esto disipa la energía de la vibración. Así mismo, su nueva frecuencia asegura que con el paso del peatón el amortiguador sea el que se excite y no el puente; lo cual es lo que se busca en este tipo de soluciones.

Para el cálculo de la masa sintonizada, se modeló el puente como un sistema de un solo grado de libertad (para intervenir la frecuencia del primer modo de vibración). Sin embargo, el puente resulta ser un medio continuo con masas distribuidas y un número mayor de grados de libertad, esta simplificación hace que exista incertidumbre en el comportamiento de los demás modos de vibración y explica porque los demás modos de vibración de los sistemas con solución se comportan de manera tan particular.

Al ir desarrollando las ideas de aislamiento de una estructura, en un principio se pensó que esta sería labor únicamente de la ingeniería civil, por contar ya con soluciones que han sido usadas desde hace tiempo. Las últimas tecnologías y sistemas de control requieren de la aproximación de la ingeniería mecánica, dentro del control de vibraciones, siendo que pueden brindar soluciones innovadoras. Algunas de estas soluciones ya están siendo implementadas en otras latitudes.

## 5.2 Trabajo a Futuro

En la etapa de desarrollo de esta investigación y al ir realizando las conclusiones, se pudieron detectar oportunidades de mejora para este trabajo: ciclo de vida de la construcción, mejorar la escala de ponderación utilizada, considerar costo-beneficio e implementación de un modelo de optimización.

Una vez realizado el estudio del puente con un estructurista, se puede conocer mejor las características permitidas para el diseño de la masa añadida al puente. Por lo tanto, resulta pertinente una nueva iteración de diseño del sistema añadido con nuevos análisis para asegurar su funcionamiento, como lo sería un estudio de materiales para encontrar el material más pertinente en el sistema, teniendo en cuenta problemas de corrosión, resistencia, disponibilidad y costo. Así mismo, un modelado a escala del sistema podría dar otros puntos a mejorar y proporcionar un paso extra en su validación como solución. Una vez seleccionado el material, un análisis de fatiga y de ciclo de vida aseguraría su funcionamiento y su mantenimiento, antes de pensar en intervenir nuevamente la estructura.

Una tarea a futuro importante es obtener calificaciones decisivas para las variables en las que se tiene una falta de información. Sería pertinente realizar experimentos dónde se pueda comparar la eficacia de cada sistema cuando se diseña antes y después de la construcción de una estructura. Así mismo, un análisis sobre los distintos proveedores de estos sistemas tanto a nivel nacional como internacional y cómo pueden afectar la elección de un sistema. Dentro de este trabajo es oportuno mejorar la precisión de las variables, obteniendo diferentes tipos de datos, como sería un análisis de costos exhaustivo de cada sistema, los materiales que se ocuparán e incluso la implementación o sus costos de mantenimiento.

Un siguiente paso es mejorar el algoritmo, incorporando métodos con los que se pueda generar una ecuación que contenga todas las variables a evaluar (multiplicadores de Lagrange, optimización multivariable) y así mejorar su eficacia de elección de sistema. Esto es encontrar un área de posibles soluciones que puedan satisfacer las necesidades del caso de estudio.

Un área de crecimiento de este algoritmo es el utilizarlo para estructuras más complejas que tengan problemas de vibraciones ante distintos tipos de excitaciones. Sería necesario conocer cuáles son

las variables preponderantes en distintos diseños estructurales, las normas de construcción vigentes en la zona y las nuevas tecnologías que se vayan desarrollando.

## **5.3 Conclusiones**

Aparentemente los sistemas de control no solamente pueden ser ocupados para las estructuras de puentes, también pueden ocuparse en otras edificaciones. Dentro de la formación de ingeniería mecánica se busca cómo aislar una maquinaria para evitar vibraciones, pero ahora se presenta el problema de aislar sistemas (hospitales, edificios clave) de diversas excitaciones, siendo el mismo problema de manera inversa.

México resulta un país interesante para el estudio de este tipo de vibraciones, ya que es un país altamente sísmico siendo que la ciudad de México presenta un caso especial al tener 3 diferentes tipos de suelo con características distintas. Esta propuesta de matriz de decisión permite tener un amplio espectro de soluciones ante diferentes necesidades y no solo usar la misma solución siempre. Otra de las ventajas que tiene este método, es que se puede utilizar en la etapa de diseño o posterior a la construcción, cuando se presentan problemáticas no previstas.

# Bibliografía

- (2020). Obtenido de Saint-gobain: <https://www.saint-gobain.com.mx/la-tecnologia-anti-sismica-en-la-actualidad>
- Atlas de riesgo sísmico*. (2020). Obtenido de <https://datos.cdmx.gob.mx/explore/dataset/atlas-de-riesgo-sismico/custom/>
- Balachandran, B., & Magrab, E. B. (2009). *Vibrations*. USA: Cengage Learning.
- Beer, F. P., Johnston Jr., E. R., & Cornwell, P. J. (2010). *Mecánica Vectorial para Ingenieros: Dinámica*. Ciudad de México: McGraw-Hill.
- Chung, L.-L., Lai, Y.-A., Yang, C. W., Lien, K.-H., & Wu, L.-Y. (2013). Semi-active tuned mass dampers with phase control. *Journal of Sound and Vibration*, 3610-3625.
- Connor, J. J. (2003). *Introduction to Structural Motion Control*. Mit-Prentice Hall.
- Dallard, P., Fitzpatrick, T., Flint, A., Low, A., Ridsdill Smith, R., Willford, M., & Roche, M. (2001). London Millennium Bridge: Pedestrian Induced Lateral Vibration. *Journal of Bridge Engineering*, 412-417.
- de la Paz M., V. (2018). *Vibraciones en edificios: Estándares de medición y efectos en la Legislación Extranjera*. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile.
- Earthquake Protection*. (2020). Obtenido de <https://www.earthquakeprotection.com/>
- Google Maps*. (2020). Obtenido de <https://www.google.com/maps/>
- Huergo Ríos, I. F. (2016). *Control de Vibraciones Verticales en Puentes Peatonales Mediante Amortiguadores de Masa Sintonizados*.
- Ikago, K., Saito, K., & Inoue, N. (2012). Seismic control of single-degree-of-freedom structure using tuned viscous mass damper. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 453-474.
- Kilar, V., Petrovčič, S., Koren, D., & Šilih, S. (2013). Viability of a Base Isolation System for the Seismic Protection of a Steel High-Rack Structure. *Journal of Steel Structures*, 253-263.
- Kobori, T., Takahashi, M., Nasu, T., & Niwa, N. (1993). Seismic response controlled structure with active variable stiffness system. *Earthquake engineering and structural dynamics*, 925-941.
- Montanaro, M. I. (2002). Sistemas de Control de Vibraciones en Estructuras de Gran Altura. *Informes de la Construcción*, 31-39.
- Nagarajaiah, S., ASCE, M., & Sonmez, E. (2007). Structures with Semiactive Variable Stiffness Single/Multiple Tuned Mass Dampers. *Journal of Structural Engineering*, 67-77.
- Ok, S.-Y., Kim, D.-S., Park, K.-S., & Koh, H.-M. (2007). Semi-active fuzzy control of cable-stayed bridges using magneto-rheological dampers. *Engineering Structures*, 776-788.

- Peña Ocampo, F. J., Moreno, C. P., & Thomson, P. (2010). Diseño e implementación de un amortiguador de masa sintonizada (TMD) robusto para disminuir la respuesta dinámica en estructura metálica. *Jornadas Argentinas de Ingeniería Estructural*, (págs. 1-17). Buenos Aires.
- Ramírez Centeno, M., & Caamaño Cortes, J. A. (2002). Análisis de Vibración Sísmica y Ambiental de un Edificio antes y después de su refuerzo mediante Dos Cuerpos Anexos. *Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural*, 911-922.
- Rao, S. S. (2012). *Vibraciones Mecánicas*. México: Pearson.
- Scruggs, J. T., & Iwan, W. D. (2005). Structural control with regenerative force actuation networks. *Structural Control and Health Monitoring*, 25-45.
- Seung-Yong, O., Dong-Seok, K., Kwan-Soon, P., & Hyun-Moo, K. (2007). Semi-active fuzzy control of cable-stayed bridges using magneto-rheological dampers. *Engineering Structures*, 776-788.
- Spencer Jr., B. F., & Nagarajaiah, S. (2003). State of the Art of Structural Control. *Journal of Structural Engineering*, 845-856.
- Thenozhi, S., & Yu, W. (2013). Advances in modeling and vibration control of building structures. *Annual Reviews in Control*, 346-364.
- Ulrich, K. T., & Eppinger, S. (2013). *Diseño y Desarrollo de Productos*. Ciudad de México: McGraw-Hill.

# Fuentes digitales de información.

<https://datos.cdmx.gob.mx/explore/dataset/atlas-de-riesgo-sismico/custom/>

<https://www.saint-gobain.com.mx/la-tecnologia-anti-sismica-en-la-actualidad>

<https://www.earthquakeprotection.com/>

Autodesk Inventor (2021 Professional). (2021). [Software de CAD]. Autodesk.  
<https://www.autodesk.mx/products/inventor/overview?term=1-YEAR&support=null>

# Anexos

## A. Factor de Transmisibilidad

El factor de transmisibilidad se define como la cantidad de fuerza externa que transmitida a la base del sistema a través del sistema o viceversa, es decir, la cantidad de fuerza externa transmitida al sistema a través de la base del sistema.

Para poder definirlo necesitamos presentar unas ecuaciones, las cuales serán:

- La relación de frecuencias  $r$ , que es la división entre la frecuencia de la excitación y la frecuencia natural del sistema. La ecuación es la siguiente:

$$r = \frac{\omega_e}{\omega_n}$$

Donde:  $\omega_e \triangleq$  Frecuencia de excitación

$\omega_n \triangleq$  Frecuencia natural no amortiguada

- El desplazamiento de un sistema de un grado de libertad sujeto a una excitación armónica:

$$x(\tau) = \frac{F_o}{k} H(r) \sin(r\tau - \theta(r))$$

Donde:  $F_o \triangleq$  Magnitud de la excitación externa

$k \triangleq$  Rigidez del sistema

$H(r) \triangleq$  Respuesta amplitud del sistema

$\tau \triangleq$  Variable adimensional

$\theta(r) \triangleq$  Respuesta de fase

$t \triangleq$  tiempo

$\zeta \triangleq$  Relación de amortiguamiento

$$H(r) = \frac{1}{\sqrt{(1-r)^2 + (2\zeta r)^2}}$$

$$\tau = t\omega_n$$

$$\theta(r) = \tan^{-1} \left( \frac{2\zeta r}{1-r^2} \right)$$

- La fuerza transmitida a la base o a través de la base:

$$F_T(\tau) = F_o H_{mb}(r) \sin(r\tau - \psi(r))$$

Donde:

$$H_{mb}(r) = \frac{\sqrt{1 + (2\zeta r)^2}}{\sqrt{(1 - r^2)^2 + (2\zeta r)^2}}$$

$$\psi(r) = \tan^{-1}\left(\frac{2\zeta r^3}{1 + r^2(4\zeta^2 - 1)}\right)$$

Resulta que al dividir la fuerza transmitida entre la fuerza introducida obtenemos la variación de la respuesta amplitud:

$$H_{mb}(r) = \left| \frac{F_T}{F_0} \right|$$

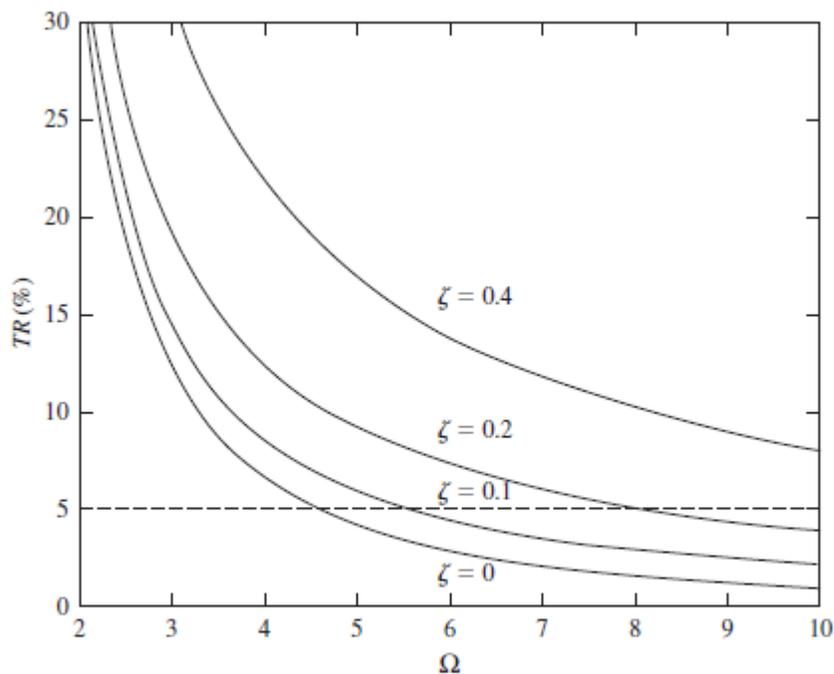
Por lo que resulta útil definir al Factor de Transmisibilidad como función de la variación de la respuesta amplitud:

$$TR = H_{mb}(r)$$

Abreviado TR por sus siglas en inglés (Transmissibility Ratio).

**Figura 61**

*Factor de Transmisibilidad*



**FIGURE 5.34**

Percentage transmission ratio versus excitation frequency for different damping ratios.

Nota. Se muestra una gráfica de cómo cambia el factor de transmisibilidad cuando la relación de frecuencias cambia. Tomada de (Balachandran & Magrab, 2009)

## B. Factor de Amplificación

El factor de amplificación es la relación que existe entre la amplitud de movimiento dinámica y la amplitud de movimiento estática.

La amplitud dinámica se define matemáticamente:

$$X = \frac{F_o}{\sqrt{(k - m\omega_e^2)^2 + (c\omega_e)^2}}$$

Y la deflexión estática bajo la carga  $F_o$  se define:

$$\delta_{est} = \frac{F_o}{k}$$

Donde:  $F_o \triangleq$  Magnitud de la excitación externa

$k \triangleq$  Rigidez del sistema

$\omega_e \triangleq$  Frecuencia de excitación

$\omega_n \triangleq$  Frecuencia natural no amortiguada

$m \triangleq$  Masa del sistema

$\zeta \triangleq$  Relación de amortiguamiento

$c \triangleq$  Amortiguamiento viscoso del sistema

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

∴ El facto se define como:

$$M = \frac{X}{\delta_{est}} = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \left(\frac{\omega_e}{\omega_n}\right)^2\right)^2 + \left(2\zeta \frac{\omega_e}{\omega_n}\right)^2}}$$

Y tomando en cuenta la relación de frecuencias  $r = \frac{\omega_e}{\omega_n}$ , el factor de amplificación queda como:

$$M = \frac{1}{\sqrt{(1 - r^2)^2 + (2\zeta r)^2}}$$

Figura 62

Factor de Amplificación

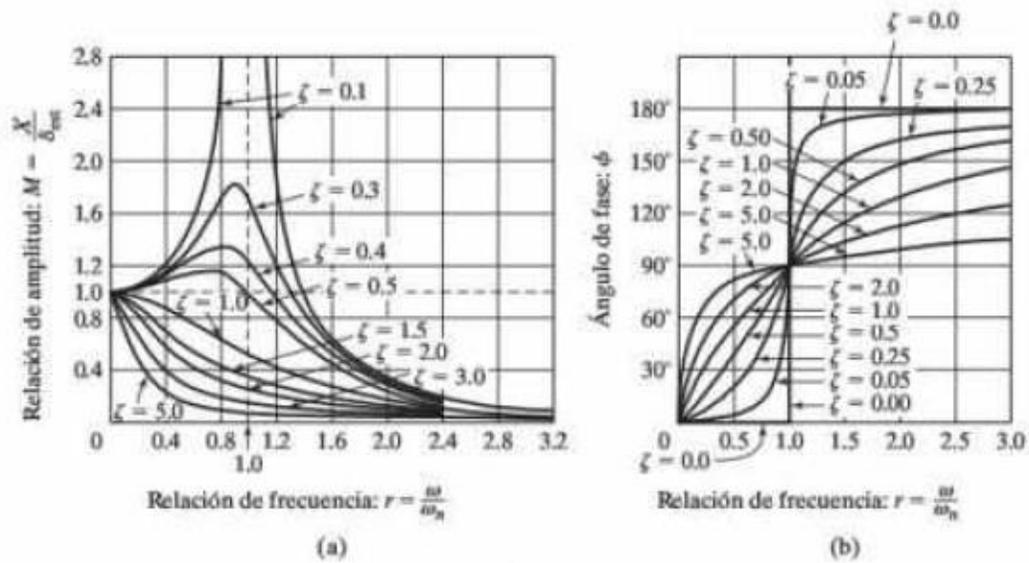


Figura 3.11 Variación de  $X$  y  $\phi$  con la relación de frecuencia  $r$ .

Nota. Se muestra una gráfica de cómo cambia el factor de amplificación cuando la relación de frecuencias hace lo mismo. Tomada de (Balachandran & Magrab, 2009)