



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
Ingeniería Civil – Estructuras
INSTITUTO DE INGENIERÍA

EMPLEO DE UN SISTEMA MECÁNICO EQUIVALENTE PARA CARACTERIZAR EL
COMPORTAMIENTO DE UNA MASA LÍQUIDA SINTONIZADA INSTALADA EN UN EDIFICIO

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
ARTURO LEDO MORENO

TUTOR PRINCIPAL:
Dr. Adrián Pozos Estrada
Instituto de Ingeniería UNAM

Ciudad Universitaria, Cd. Mx., Septiembre de 2022



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. José Alberto Escobar Sánchez

Secretario: Dr. Roberto Gómez Martínez

1^{er.} Vocal: Dr. Pozos Estrada Adrián

2^{do.} Vocal: Dr. Orlando Javier Díaz López

3^{er.} Vocal: Dr. Héctor Guerrero Bobadilla

Lugar donde se realizó la tesis: **Instituto de Ingeniería de la UNAM**

TUTOR DE TESIS:

Dr. Adrián Pozos Estrada

FIRMA

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, me gustaría agradecer a mi familia:

A mis padres, Arturo y Eva, por haberme dado en todo momento de mis estudios su apoyo y confianza para poder seguir formándome profesionalmente.

Del mismo modo a mis hermanas, Erika y Marisol, por representar para mí una motivación a continuar estudiando.

Investigación realizada gracias al Programa UNAM-PAPIIT, IN103422.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo brindado durante todo el tiempo de los estudios de maestría.

A mi tutor principal, el Dr. Adrián Pozos Estrada, al cual le agradezco me haya permitido trabajar con él en el trabajo de investigación de la maestría, gracias por su paciencia y su disposición a siempre compartir sus conocimientos.

A mis sinodales, el Dr. José Alberto Escobar Sánchez, el Dr. Roberto Gómez Martínez, el Dr. Héctor Guerrero Bobadilla y el Dr. Orlando Javier Díaz López, cuyos comentarios y recomendaciones fueron de gran ayuda para la conclusión de esta tesis.

A mis amigos, el ingeniero Sergio García, los arquitectos Gustavo Márquez y Humberto López, los ingenieros Edgar, Adrián y Eduardo, el licenciado Gabriel Gómez y Chucho, que me han acompañado desde la preparatoria hasta estas fechas.

A los nuevos amigos de la maestría, el equipo de ingenieros de Morelos, Alexis Brito, Omar Barón y Esaú Villanueva, los cuales hicieron la estancia en la UNAM más llevadera.

RESUMEN

Algunas de las tendencias actuales en la construcción de edificios emplean estructuras cada vez más altas y ligeras, lo cual lleva a incrementar su flexibilidad, lo que las hacen más sensibles a las acciones dinámicas, una de ellas el efecto del viento. Para poder cumplir las condiciones de servicio deseadas, es indispensable cumplir con requisitos adicionales de diseño. Resultado de lo anterior, la posibilidad de controlar la respuesta dinámica de las estructuras es de vital importancia en el proceso de diseño.

En el presente trabajo se estudia la efectividad de las masas líquidas sintonizadas, mediante el uso de un modelo matemático equivalente en sistemas equivalentes de 1 y 2 grados de libertad, y en el modelo matemático de un edificio alto.

Para los análisis, se desarrollan modelos de sistemas equivalentes de 1 y 2 grados de libertad en MATLAB, y un modelo matemático de un edificio alto en el programa *ETABS*, con el fin de evaluar las aceleraciones y desplazamientos sin y con el sistema de masa líquida sintonizada. Para la simulación de las fuerzas de viento, se emplea el programa *SVT Pro*, el cual simula señales de viento turbulento, las cuales son transformadas a fuerzas posteriormente. Para la modelación de la masa líquida sintonizada, se emplea un sistema equivalente que es caracterizado con masa, rigidez y amortiguamiento equivalentes. Se realiza un análisis paramétrico y se identifican los parámetros óptimos del sistema equivalente, los cuales garantizan la máxima reducción de los sistemas estructurales estudiados.

ABSTRACT

Some of the current trends in building construction employ taller and lighter structures, which leads to increase their flexibility, and makes them more sensitive to dynamic actions, one of them, the effect of wind. In order to fulfill the desired serviceability conditions, it is essential to meet additional design requirements. As a result, the possibility of controlling the dynamic response of structures is of vital importance in the design process.

In the present work, the effectiveness of tuned liquid dampers is studied, with the use of an equivalent mechanical model in equivalent systems of 1 and 2 degrees of freedom, and in the mathematical model of a tall building.

For the analysis, models of equivalent systems of 1 and 2 degrees of freedom were developed in MATLAB®, and a mathematical model of a tall building in the computer program ETABS®, in order to evaluate the accelerations and displacements with and without the tuned liquid damper system. For the simulations of wind forces, the SVT PRO program is used, that program simulates turbulent wind signals, which are subsequently transformed into forces. For the modeling of the tuned liquid dampers, an equivalent system is used that is characterized with equivalent mass, stiffness and damping. A parametric analysis is performed and the optimal parameters of the equivalent system are identified, those which guarantee the maximal reduction of the studied structural systems.

ÍNDICE

RESUMEN.....	IV
ABSTRACT.....	V
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	1
1.2 OBJETIVO GENERAL.....	1
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	1
1.4 JUSTIFICACIÓN.....	1
1.5 ALCANCE Y LIMITACIONES.....	1
2. ANTECEDENTES DEL DESARROLLO DE SISTEMAS EQUIVALENTES Y EMPLEO DE MASAS LÍQUIDAS SINTONIZADAS EN EDIFICIOS.....	3
2.1 ANTECEDENTES DEL DESARROLLO DE SISTEMAS EQUIVALENTES.....	3
2.2 EMPLEO DE MASAS LÍQUIDAS SINTONIZADAS EN EDIFICIOS.....	3
2.2.1 ONE RINCON HILL (SOUTH TOWER), SAN FRANCISCO, CALIFORNIA-UNITED STATES.....	3
2.2.2 HIGHCLIFF APARTMENTS, HONG KONG.....	4
2.2.3 L-TOWER, TORONTO, CANADA.....	5
2.2.4 14 YORK STREET, TORONTO, CANADA.....	6
2.2.5 ONE BLOOR STREET EAST, TORONTO, CANADA.....	7
2.2.6 WEST GEORGIA, TORONTO, CANADA.....	8
2.2.7 CHAPULTEPEC UNO, CIUDAD DE MÉXICO, MÉXICO.....	9
3. MASAS LÍQUIDAS SINTONIZADAS Y DESARROLLO DEL MODELO MECÁNICO EQUIVALENTE.....	12
3.1 AMORTIGUADORES DE MASA LÍQUIDA SINTONIZADA (MLS).....	12
3.2 MODELOS ANALÍTICOS Y NUMÉRICOS DEL FLUIDO.....	13
3.3 MODELOS MECÁNICOS EQUIVALENTES.....	14
3.3.1 Desarrollo de un modelo de masa sólida sintonizada equivalente (MSSE) de acuerdo con Tait (2008).....	15
4. EVALUACIÓN SISTEMÁTICA DE OSCILADORES DE 1 Y 2 GRADOS DE LIBERTAD SOMETIDOS A LA ACCIÓN DEL VIENTO, CON EL EMPLEO DE UNA MSSE.....	23
4.1. SIMULACIÓN DE VIENTO TURBULENTO Y FUERZAS.....	23
4.2 SOLUCIÓN NUMÉRICA DE LOS OSCILADORES CON EL MÉTODO DE NEWMARK.....	24
4.3 ANÁLISIS PARAMÉTRICO.....	25
4.3.1 RESPUESTA DEL OSCILADOR DE UN GRADO DE LIBERTAD (ESTRUCTURA SIN MSSE).....	25
4.3.2 CARACTERIZACIÓN DE LA MSSE.....	27
4.3.3 OBTENCIÓN DE LOS PARÁMETROS ÓPTIMOS DE DISEÑO DE LA MSSE.....	36
5. ANÁLISIS SISTEMÁTICO DE UN EDIFICIO SOMETIDO A CARGAS DE VIENTO SIN Y CON MSSE.....	41
5.1. MODELADO ESTRUCTURAL EN PROGRAMA COMPUTACIONAL.....	41
5.2 CARACTERIZACIÓN DEL VIENTO PARA ANÁLISIS.....	42
5.3 ANÁLISIS CON EL PROGRAMA ETABS.....	49
5.4 RESULTADOS.....	58
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	65
6.1 CONCLUSIONES.....	65
6.2 RECOMENDACIONES.....	65

REFERENCIAS	67
APÉNDICE A. RESUMEN DE ECUACIONES PARA DETERMINAR PARÁMETROS EQUIVALENTES .	68
APÉNDICE B. MODELO DEL OSCILADOR PARA REPRESENTAR LA MSSE EN UN PROGRAMA DE CÓMPUTO DE ANÁLISIS ESTRUCTURAL	70

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Planteamiento del problema

En años recientes, los edificios que se construyen en México, tanto en la ciudad como en la república, tienden a incrementar su altura, lo que los hace más sensibles a los efectos del viento. La flexibilidad que exhiben estos edificios y su bajo amortiguamiento pueden ocasionar problemas de aceleraciones excesivas en sus diferentes niveles. En los últimos años en México, y de manera particular en la Ciudad de México, se han empleado sistemas de amortiguamiento auxiliar pasivos, tales como masas sólidas o líquidas resonantes o sintonizadas (tuned mass o liquid dampers en inglés). No obstante que estos sistemas ya se emplean en México, en la normatividad mexicana actual, no existen lineamientos para el empleo de las masas sólidas o líquidas resonantes o sintonizadas en edificios sensibles a los efectos del viento. Por consiguiente, es imprescindible estudiar la respuesta estructural ante efectos de viento de edificios, que incluyen un sistema de amortiguamiento pasivo, en términos de aceleraciones.

1.2 Objetivo general

El objetivo principal de esta investigación es identificar las propiedades mecánicas óptimas de un sistema de disipación de energía pasivo, siendo el caso de estudio una masa líquida sintonizada, mediante el empleo de una masa sólida sintonizada equivalente (MSSE) instalada en un edificio alto. La metodología propuesta por Tait (2008) es adoptada para caracterizar la masa, la rigidez y el amortiguamiento de la MSSE.

1.3 Objetivos específicos

Desarrollar modelos de sistemas equivalentes de 1 y 2 grados de libertad en MATLAB, y un modelo matemático de un edificio alto en el programa *ETABS*.

Evaluar las aceleraciones y desplazamientos sin y con la MSSE.

Simular señales de viento turbulento y transformarlas a fuerzas.

Realizar un análisis paramétrico e identificar los parámetros óptimos del sistema equivalente, los cuales garantizan la máxima reducción de los sistemas estructurales estudiados.

1.4 Justificación

En la actualidad, cada vez existe un mayor número de edificaciones de gran altura, y, aunado a esta tendencia, cada vez son más las construcciones de edificios con materiales de alta resistencia, lo anterior conlleva a edificios altos que presentan una mayor flexibilidad, lo cual los haría sensibles a los efectos del viento, por lo que una problemática actual se centraría en reducir tanto las aceleraciones como los desplazamientos producidos por este efecto, para lo anterior, se han realizado una serie de propuestas que consisten en la colocación de masas sintonizadas, las cuales pueden ser sólidas o líquidas, y para este trabajo se optará por la representación de las masas líquidas dado que a las mismas se les puede dar otro uso dentro de la edificación (ya sea como sistema contra incendios o como parte del sistema de abastecimiento de agua potable).

1.5 Alcance y limitaciones

En el presente estudio se muestra la efectividad de los TLDs modelados como una MSSE, sin embargo, se limita el presente estudio a aquellas masas líquidas sintonizadas que están contenidas dentro de tanques rectangulares, ya que, los mismos tanques pueden ser de cualquier forma geométrica, (siendo las más comunes la rectangular y la circular), además de lo anterior, en las estructuras pueden ser colocados varios tanques, sobre todo cuando se presentan aberturas en los edificios, y en este trabajo sólo se modelará un tanque por edificio, colocado en el último

entrepiso, aunque estos tanques usualmente se pueden colocar en cualquier nivel; del mismo modo, el edificio y los modelos se someterán únicamente a cargas de viento en análisis elásticos lineales, conociendo de la teoría que los TLDs no son tan efectivos para la reducción en respuesta de desplazamiento y aceleraciones que provocan los movimientos del terreno.

2. ANTECEDENTES DEL DESARROLLO DE SISTEMAS EQUIVALENTES Y EMPLEO DE MASAS LÍQUIDAS SINTONIZADAS EN EDIFICIOS

2.1 Antecedentes del desarrollo de sistemas equivalentes

Es posible modelar el comportamiento de las masas líquidas sintonizadas como un modelo equivalente o análogo al de una masa sólida sintonizada, y aunque el comportamiento del fluido puede ser modelado como un fenómeno no lineal, se han realizado varios estudios que proponen modelos simplificados de análisis, entre los que resaltan los desarrollados por Sun et al. (1995) quienes propusieron una masa, rigidez y amortiguamiento equivalentes de la masa líquida sintonizada usando un modelo análogo a una masa sólida sintonizada en un modelo dinámico de un sistema de un grado de libertad para tanques rectangulares, circulares y anulares, sujetos a una vibración armónica en su base. Otros estudios, como el de Yu et al. (1997) modelaron una masa líquida sintonizada como una masa sólida con rigidez y amortiguamiento no lineales; el anterior modelo describía el comportamiento de la masa líquida sintonizada ante un amplio intervalo de amplitudes de excitación.

Expresiones empíricas fueron desarrolladas para determinar las propiedades de un modelo no lineal de masas sólidas sintonizadas para hacer la analogía con las propiedades necesarias para el modelado de masas líquidas sintonizadas (Yu et al., 1999; Olson y Reed, 2001).

Las propiedades de un modelo de masa sólida sintonizada dependientes de la amplitud del movimiento con energía de disipación igual a la de un modelo de masa líquida sintonizada equipada con rejillas que proporcionaron amortiguamiento extra, fueron evaluadas experimentalmente usando una mesa vibradora por Tait et al. (2004), y la verificación de su desempeño fue corroborada por el mismo autor en un trabajo posterior (*The efficiency and robustness of an unidirectional tuned liquid damper and modeling with an equivalent TMD*).

Un modelo mecánico equivalente lineal compuesto de un sistema estructura-masa líquida sintonizada, capturó los valores de masa total, rigidez y amortiguamiento equivalentes fue desarrollado para disminuir la respuesta ante excitaciones sinusoidales y aleatorias (Tait, 2008). Más recientemente, Love et al. (2011) continuaron con los trabajos de Tait (2004) para el modelo y las propiedades de la masa sintonizada líquida en tanques de forma cercana a la rectangular y el modelado en sistemas de un grado de libertad.

2.2 Empleo de masas líquidas sintonizadas en edificios

A continuación, se presentan algunos proyectos de edificios en los que se han instalado masas líquidas sintonizadas (TLD por sus siglas en inglés).

2.2.1 ONE RINCON HILL (SOUTH TOWER), SAN FRANCISCO, CALIFORNIA-UNITED STATES

Es un edificio completado en el año 2008 y fue diseñado por la empresa Magnusson Klemencic Associates (Estados Unidos). El edificio tiene una altura total de 188 m a partir del nivel de calle, con altura de entrepisos de 2.9 m. El edificio cuenta con un área neta de la torre de 71,063 m². Las propiedades mecánicas de los materiales de la estructura son: Concreto: 41.4 MPa para vigas, 55.2 MPa para columnas y muros, 37.9 MPa para losas, Acero de refuerzo: A615 Gr50, Acero de presfuerzo: Torones presfuerzados de 7 hilos Gr270, BRB's: Acero estructural de 5,300 KN de capacidad.

La Tabla 2.1 muestra las características del dispositivo de amortiguamiento auxiliar empleado en el edificio One Rincon Hill y la Figura 2.1 muestra una vista del edificio.

Tabla 2.1.- Propiedades del TLD del One Rincon Hill

Parámetro	Valor
Amortiguamiento intrínseco	1.5%
Tipo de amortiguador	Amortiguadores de masa líquida sintonizada (TLD), compuestos de 2 tanques de dimensiones 9.14 m x 7.62 m x 1.52 m, con peso de 208,652 kg (por ambos tanques, es decir cada tanque pesa 104,326 kg)
Relación de la masa del amortiguador con la masa modal	0.56%
Amortiguamiento adicional	1.5%
Aceleración sin amortiguamiento	26 mili-g
Aceleración de la estructura amortiguada	18 mili g

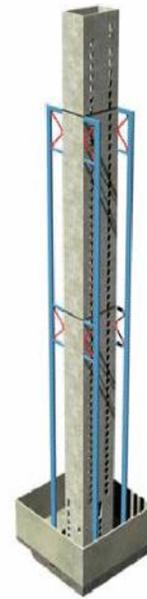


Figura 2.1. Edificio One Rincon Hill (tomada de Lago et al., 2019)

2.2.2 HIGHCLIFF APARTMENTS, HONG KONG

Es un edificio completado en el 2003 por la empresa Magnusson Klemencic Associates (Estados Unidos). El proveedor de amortiguadores fue Hip Hing Construction Company (Hong Kong). El edificio tiene una altura de 252.3 m a partir del nivel de calle y una altura de entrepisos igual a 3.15 m. El área neta de la torre es de 34,931 m². Las propiedades mecánicas de la estructura incluyeron concreto de 65 MPa para columnas y muros de cortante, 45 MPa para losas, y para el acero de refuerzo se empleó BS 4449, tipo T, grado 460

La Tabla 2.2 muestra las características del dispositivo de amortiguamiento auxiliar empleado en el edificio Highcliff Apartments y la Figura 2.2 muestra una vista del edificio.

Tabla 2.2.- Propiedades del TLD del Highcliff Apartments

Parámetro	Valor
Amortiguamiento intrínseco	1.5%
Tipo de amortiguador	Amortiguadores de masa líquida sintonizada (TLD), compuestos de 4 tanques de dimensiones 9.67 m x 3.60 m x 1.20 m, con peso de 34,812 kg (peso de cada tanque)
Relación de la masa del amortiguador con la masa modal	0.34%
Amortiguamiento adicional	1.6%
Aceleración sin amortiguamiento	24 mili-g
Aceleración de la estructura amortiguada	15 mili g



Figura 2.2. Highcliff apartments (tomada de depositphotos.com)

2.2.3 L-TOWER, TORONTO, CANADA

Es un edificio completado en el 2015 que fue diseñado por Jablonsky Ast & Partners (Canadá). El proveedor de amortiguadores fue Gradient Wind Engineering Inc (Canadá). El edificio cuenta con una altura: 234 m a partir del nivel de calle, con altura de entresijos igual a 2.95 m. El edificio cuenta con un área neta de 38,814 m². Las propiedades mecánicas de la estructura incluyeron concreto de 25 MPa para los niveles superiores, 55 MPa para los niveles inferiores y acero de refuerzo de 400 MPa.

La Tabla 2.3 muestra las características del dispositivo de amortiguamiento auxiliar empleado en el edificio L-Tower y la Figura 2.3 muestra una vista del edificio.

Tabla 2.3.- Propiedades del TLD del L-Tower

Parámetro	Valor
Amortiguamiento intrínseco	1.7%
Tipo de amortiguador	Amortiguadores de masa líquida sintonizada (TLD), compuestos de 1 tanque de dimensiones 8.50 m x 12.50 m x 4.75 m, con peso de 208,652 kg (por ambos tanques, es decir cada tanque pesa 104,326 kg)
Relación de la masa del amortiguador con la masa modal	No proporcionado
Amortiguamiento adicional	2.3%
Aceleración sin amortiguamiento	No proporcionado
Aceleración de la estructura amortiguada	No proporcionado



Figura 2.3. L-Tower (tomada de arquitecturaenconstruccionenelmundo.blogspot.com)

2.2.4 14 YORK STREET, TORONTO, CANADA

Es un edificio completado en el 2015 fue diseñado por Jablonsky Ast & Partners (Canadá). El proveedor de amortiguadores fue Gradient Wind Engineering Inc (Canadá). El edificio tiene una altura de 234 m a partir del nivel de calle, con altura de entresijos de 2.95 m. El área neta de la torre es de 58,000 m².

Sistema de amortiguamiento:

La Tabla 2.4 muestra las características del dispositivo de amortiguamiento auxiliar empleado en el edificio 14 York Street y la Figura 2.4 muestra una vista de la torre.

Tabla 2.4.- Propiedades del TLD del 14 York Street

Parámetro	Valor
Amortiguamiento intrínseco	1.7%
Tipo de amortiguador	Amortiguadores de masa líquida sintonizada (TLD), compuestos de 1 tanque de dimensiones 14.00 m x 19.19 m x 6.00 m
Relación de la masa del amortiguador con la masa modal	No proporcionada
Amortiguamiento adicional	3.2%
Aceleración sin amortiguamiento	30 mili-g
Aceleración de la estructura amortiguada	18 mili g



Figura 2.4. 14 York Street (tomada de tourvista.com)

2.2.5 ONE BLOOR STREET EAST, TORONTO, CANADA

Es un edificio completado en el 2015 fue diseñado por Jablonsky Ast & Partners (Canadá). El proveedor de amortiguadores fue Gradient Wind Engineering Inc (Canadá). El edificio cuenta con una altura de 255 m a partir del nivel de calle y un área neta de 68,634 m².

La Tabla 2.5 presenta las características del dispositivo de amortiguamiento auxiliar empleado en el edificio One Bloor Street East y la Figura 2.5 muestra una vista del edificio.

Tabla 2.5.- Propiedades del TLD del One Bloor Street East

Parámetro	Valor
Amortiguamiento intrínseco	1.7%
Tipo de amortiguador	Amortiguadores de masa líquida sintonizada (TLD), compuesto de 1 tanque de dimensiones 18.00 m x 19.50 m
Relación de la masa del amortiguador con la masa modal	No proporcionada
Amortiguamiento adicional	2.3%
Aceleración sin amortiguamiento	25.5 mili-g
Aceleración de la estructura amortiguada	18 mili g



Figura 2.5. One Bloor Street East (tomada de urbantoronto.ca)

2.2.6 WEST GEORGIA, TORONTO, CANADA

Es un edificio completado en el 2015 fue diseñado por John Bryson & Partners (Canadá). El proveedor de los amortiguadores fue Gradient Wind Engineering Inc (Canadá). El edificio cuenta con una altura de 187 m a partir del nivel de calle y con un área neta de 54,00 m².

La Tabla 2.6 muestra las características del dispositivo de amortiguamiento auxiliar empleado en el edificio West Georgia y la Figura 2.6 presenta una vista del edificio.

Tabla 2.6.- Propiedades del TLD del West Georgia

Parámetro	Valor
Amortiguamiento intrínseco	1.7%
Tipo de amortiguador	Amortiguadores de masa líquida sintonizada (TLD), compuestos de 2 tanques de dimensiones 18.00 m x 19.50 m
Relación de la masa del amortiguador con la masa modal	No proporcionada
Amortiguamiento adicional	2.3%
Aceleración sin amortiguamiento	22.1 mili-g
Aceleración de la estructura amortiguada	18 mili g



Figura 2.6. Edificio West Georgia (tomada de Lago et al., 2019)

2.2.7 CHAPULTEPEC UNO, CIUDAD DE MÉXICO, MÉXICO

Es un edificio alto ubicado en Paseo de la Reforma, cuenta con una altura total de 241.6 m. La subestructura cuenta con 12 sótanos alojados en un cajón perimetral de concreto reforzado. El sistema constructivo empleado fue de tipo Top-Down.

La Tabla 2.7 muestra las características del dispositivo de amortiguamiento auxiliar empleado en el edificio Chapultepec Uno y la Figura 2.7 presenta una vista del edificio.

Tabla 2.7.- Propiedades del TLD de la torre Chapultepec Uno

Parámetro	Valor
Amortiguamiento intrínseco	2%
Tipo de amortiguador	Amortiguadores de masa líquida sintonizada (TLD), compuestos de 1 tanque de dimensiones 12.00 m x 5.15 m, con 5 rejillas y una profundidad promedio del agua de 5 m.
Relación de la masa del amortiguador con la masa modal	No proporcionada
Amortiguamiento adicional	No proporcionada
Aceleración sin amortiguamiento	24 mili-g
Aceleración de la estructura amortiguada	No proporcionada



Figura 2.7. Chapultepec Uno (tomada de Pinterest.com)

A continuación, se presenta una tabla resumen con las propiedades más importantes de los edificios mencionados.

Tabla 2.8.- Propiedades de los edificios equipados con TLD

<i>Nombre del edificio</i>	<i>País y ciudad</i>	<i>Altura desde el nivel del terreno</i>	<i>Amortiguamiento intrínseco de la estructura</i>	<i>Dimensión de la masa líquida</i>	<i>Amortiguamiento adicional dado por el TLD</i>	<i>Reducción máxima de aceleraciones</i>
One Rincon Hill	Estados Unidos / California	188 m	1.5 %	2 tanques de 9.14 m x 7.62 m x 1.52 m	1.5 %	31 %
Highcliff Apartments	Hong Kong	252.3 m	1.5 %	4 tanques de 9.67 m x 3.6 m x 1.2 m	1.6 %	37.50 %
L-Tower	Canadá / Toronto	234 m	NA	1 tanque de 8.5 m x 12.5 m x 4.75 m	3.5 %	No proporcionado
14 York Street	Canadá / Toronto	234 m	NA	1 tanque de 14 m x 19.187 m x 6 m	3.5 %	40 %
One Bloor Street East	Canadá / Toronto	255 m	NA	1 tanque de 18 m x 19.5 m	2.5 %	29.50 %
West Georgia	Canadá / Toronto	187 m	NA	NA	2 %	19.55 %
Chapultepec Uno	México / Ciudad de México	241 m	2 %	1 tanque de 12 m x 5.15 m x 7 m	NA	NA

3. MASAS LÍQUIDAS SINTONIZADAS Y DESARROLLO DEL MODELO MECÁNICO EQUIVALENTE

3.1 Amortiguadores de masa líquida sintonizada (MLS)

El amortiguamiento con masas sintonizadas consiste principalmente en aplicar una modificación dinámica al sistema en sólo algunos puntos de la estructura (usualmente situados en el último nivel de la edificación).

Los amortiguadores de MLS o masas líquidas chapoteantes (Figura 3.1) trabajan de manera similar a los amortiguadores de masa sólida. Los amortiguadores de masas líquidas la mayoría de las veces consisten en un tanque rígido lleno parcialmente con líquido (en la mayoría de las veces agua) en un recipiente rectangular o circular. En este caso el líquido contenido actúa como una masa secundaria y la gravedad actúa como fuerza restauradora en el sistema dinámico que se forma. El líquido contenido en el tanque se sintoniza para chapotear a un periodo cercano al periodo natural de la estructura, en orden de que en la interacción con la estructura se reduzca la respuesta resonante de la misma.

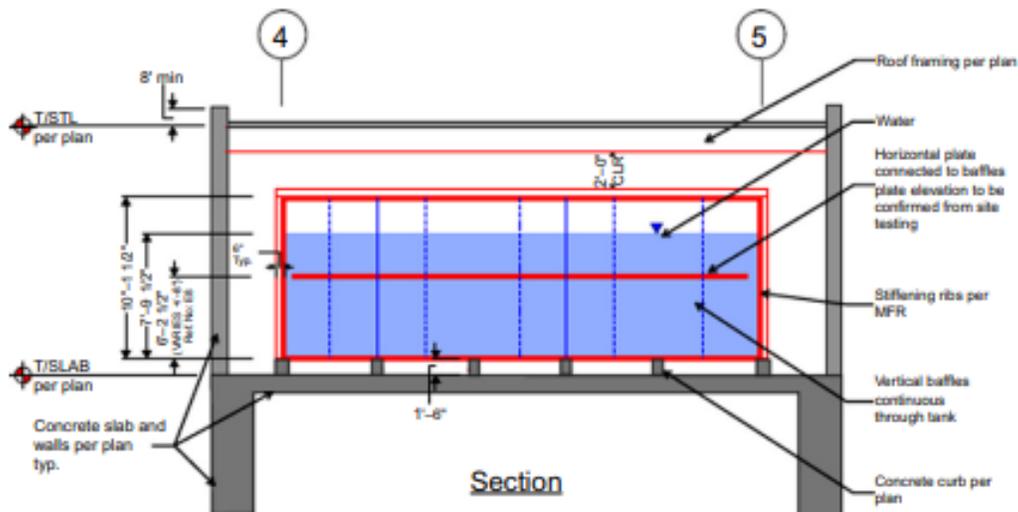


Figura 3.1. Tanque de MLS (tomada de Lago et al., 2019)

La mayor parte de la energía disipada por los amortiguadores de MLS se debe al efecto de la “acción de oleaje”, la cual puede ser incrementada o inducida mediante la inclusión de rejillas (Figura 3.2), o la colocación de pantallas rugosas dentro del tanque.



Figura 3.2. Rejillas en tanque de masa líquida sintonizada (tomada de Lago et al., 2019)

Los amortiguadores de MLS se instalan generalmente en tanques (en edificios actuales se han colocado en cantidades de 1 a 4), o en un número grande de módulos pequeños que se ordenan generalmente en tanques apilados. Lo anterior los puede hacer adaptables tanto a espacios pequeños como a formas irregulares; son simples, requieren poco mantenimiento, fácil instalación y desinstalación, facilidad para la sintonización de la masa, funcionan bi-direccionalmente y pueden funcionar como tanques de almacenamiento.

Los mismos pueden usarse para reducir la torsión en edificaciones, colocando tanques en pares lo más alejados del centro de rigidez del edificio, o planeando los tanques para que su centroide se localice cercano al centro de rigidez del edificio.

Se recomienda que antes de la colocación de los tanques se hagan mediciones en campo del periodo fundamental natural del edificio, para conocer las propiedades “exactas” y posteriormente colocar los tanques. La Figura 3.3 muestra la ubicación de una MLS en un edificio alto.

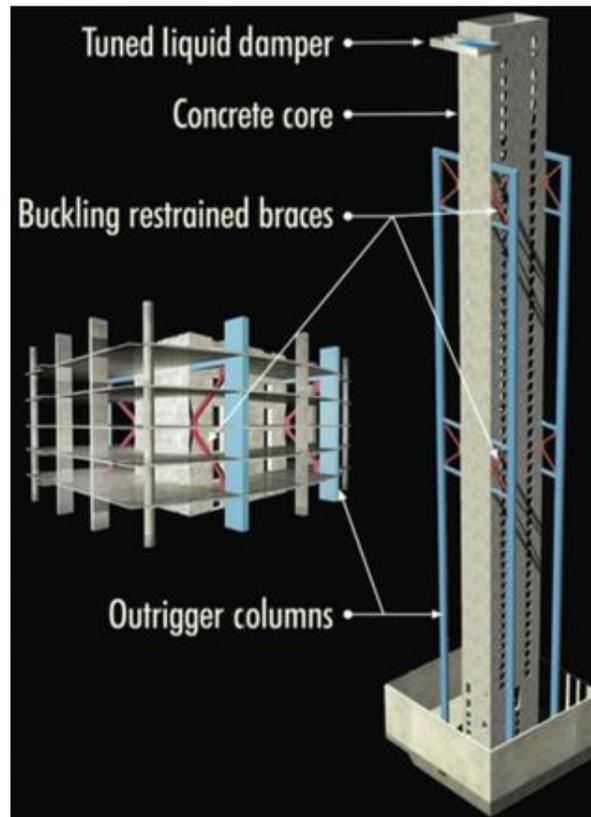


Figura 3.3. Esquema de masa líquida sintonizada y su ocupación en el hotel One Rincon Hill (tomada de Lago et al., 2019)

3.2 Modelos analíticos y numéricos del fluido

Se han realizado numerosas investigaciones para evaluar la respuesta de los amortiguadores líquidos. Adicional a los modelos que ya se han hecho, de los cuales algunos simplemente refieren al agua en tanques, existen modelos en los que se adicionan pantallas o rejillas, como medio adicional de disipación de energía, y aunque varios de los modelos intentan capturar la esencia del fenómeno no lineal del líquido, éstos son difíciles en su aplicación por lo que se opta por los modelos lineales y simplificados, como se muestra en la Figura 3.4.

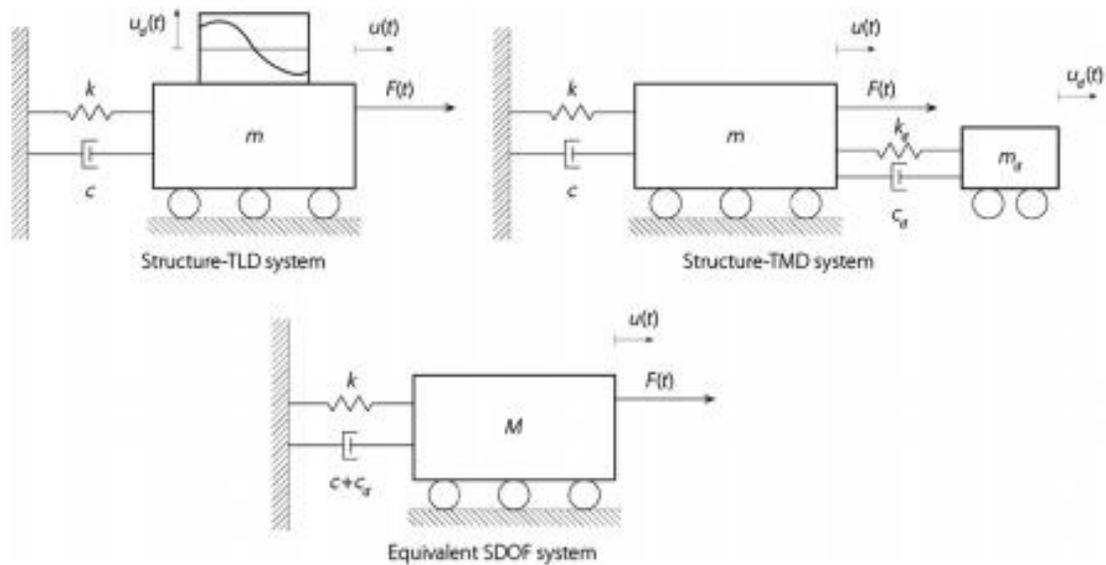


Figura 3.4. Modelos de masa líquida sintonizada (tomada de Lago et al., 2019)

3.3 Modelos mecánicos equivalentes

El diseño preliminar de los amortiguadores de MLS casi siempre se complementa usando modelos mecánicos equivalentes (Figura 3.5). El modelo de la masa líquida sintonizada debe permitir que se pueda modelar como una masa sólida sintonizada. El líquido chapoteando dentro del tanque siempre y cuando éste sea de geometrías simples con amplitudes de respuesta pequeñas pueden modelarse usando sistemas de resortes y de masa lineales, las pantallas y medios extra de disipación también deben ser tomados en cuenta en el amortiguamiento del sistema mecánico equivalente. Tanto la masa como el resorte pueden ser modelos lineales o no lineales. La energía disipada por el sistema puede modelarse con base en estudios de pruebas experimentales.

Deben ser tres parámetros fundamentales los necesarios para el modelado, la relación de masa, la relación de sintonizado de frecuencias y la relación de amortiguamientos, los cuales se expondrán posteriormente en el desarrollo del trabajo.

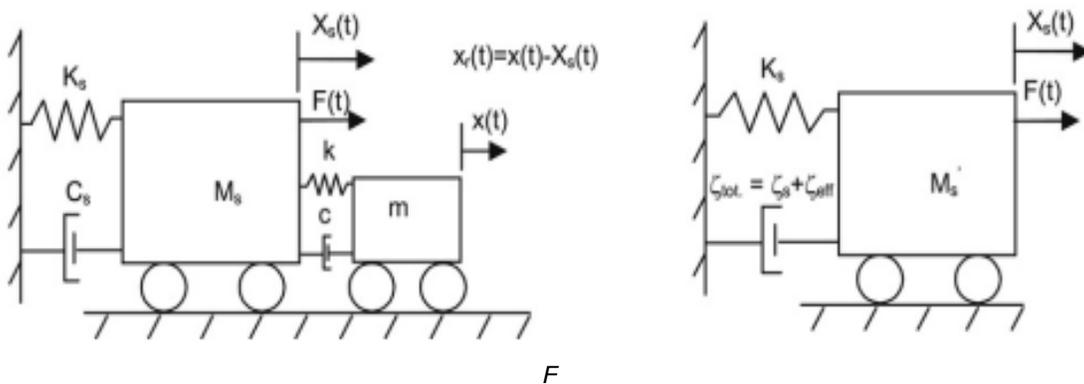


Figura 3.5. Modelos mecánicos equivalentes de MLS en estructuras (Tait, 2008)

3.3.1 Desarrollo de un modelo de masa sólida sintonizada equivalente (MSSE) de acuerdo con Tait (2008)

El procedimiento para caracterizar la MSSE se presenta a continuación.

Una vez definida la estructura cuya respuesta (por ejemplo, aceleraciones o desplazamientos) será reducida, se determinan sus propiedades dinámicas (i.e., frecuencia de la estructura (f_s), masa de la estructura (M_s), amortiguamiento de la estructura (ζ_s) y rigidez (K_s)).

Una vez definidas las propiedades dinámicas de la estructura principal, se realiza el dimensionamiento del tanque de la MLS y el tirante del agua, donde las dimensiones están definidas como: longitud (L) dimensión en la dirección de análisis, base (b) dimensión perpendicular a la dirección de análisis, altura del agua (h) y densidad del agua (ρ) igual a 1 tonelada sobre metro cúbico. Se calcula la masa equivalente del líquido chapoteando (Ec. (1)), la cual será necesaria posteriormente para elaborar los sistemas equivalentes de 1 y 2 grados de libertad. Los parámetros anteriores se muestran en la Figura 3.6.

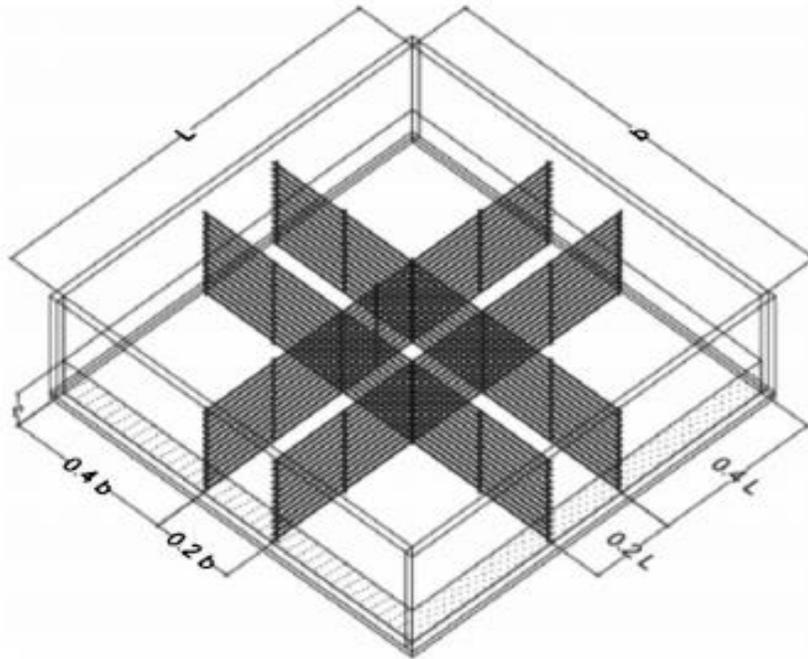


Figura 3.6. Parámetros fundamentales de la MLS (Tait, 2008)

$$m_{eq} = \frac{8\rho bL^2}{\pi^3} \tanh\left(\frac{\pi h}{L}\right) \quad (1)$$

Se empieza por calcular el factor pico ($P.F.$) de la ecuación de Davenport (Ec. 2), es como se pueden obtener las desviaciones estándar de las aceleraciones iniciales y objetivo, que son la base de los cálculos para la aplicación de esta metodología.

$$P.F. = \sqrt{2 \cdot \ln(600 \cdot \omega_s)} + \frac{0.577}{\sqrt{2 \cdot \ln(600 \cdot \omega_s)}} \quad (2)$$

Como se puede notar, sólo es necesaria la frecuencia circular de la estructura original (ω_s).

Para empezar el uso de la metodología, es necesario contar con el valor de la aceleración máxima que producen las fuerzas provocadas por el viento en un modelo de oscilador de un grado de libertad, ya sea para una señal o un conjunto de ellas, luego de esto será necesario proponer la aceleración objetivo que se desea alcanzar, y para obtener las desviaciones estándar de ambas cantidades será necesario dividir las entre el factor pico de la ecuación de Davenport, como se indica en las operaciones siguientes:

$$\sigma_{acel} = \frac{a_i}{P.F.} \dots\dots\dots \sigma_{acel-obj} = \frac{a_{ob}}{P.F.} \quad (3)$$

El amortiguamiento efectivo (ζ_{eff}), necesario para que la respuesta de la estructura sin dispositivo de amortiguamiento auxiliar se reduzca a una respuesta objetivo, se calcula como se muestra en la siguiente ecuación, la cual ocupa las desviaciones estándar de las aceleraciones, para lo cual se aplica la ecuación 32 del trabajo de Love et al. (2012), dada por:

$$\zeta_{eff} = \zeta_s \left(\frac{\sigma_{s-inicial}^2}{\sigma_{s-objetivo}^2} - 0.8 \right) \quad (4)$$

donde $\sigma_{s-inicial}$ y $\sigma_{s-objetivo}$ representan la desviación estándar de la respuesta de la estructura sin dispositivo de amortiguamiento auxiliar y la desviación estándar de la respuesta de la estructura con dispositivo, respectivamente.

Se calcula el amortiguamiento efectivo óptimo (ζ_{eff}^{opt}) y se muestra en la siguiente ecuación, y como se puede observar, está en función del parámetro de relación de masas.

$$\zeta_{eff}^{opt} = \frac{1}{4} \sqrt{\frac{\mu + \mu^2}{1 + \frac{3\mu}{4}}} \quad (5)$$

La ecuación antes mostrada se encuentra en función de un parámetro que se conoce como relación de masas, la cual corresponde al cociente de la masa equivalente del amortiguador líquido sintonizado entre la masa de la estructura más la masa líquida sintonizada. Se calcula la relación de masas (μ) de acuerdo con la Ec. (3). El valor de μ se emplea posteriormente para el cálculo de los parámetros óptimos de absorción.

$$\mu = \frac{m_{eq}}{M_s} \quad (6)$$

Para obtener un valor de cociente de amortiguamiento óptimo igual al efectivo se tiene que proceder a hacer iteraciones variando el valor del cociente de masas hasta que ambos cocientes de amortiguamiento efectivo se igualen.

Posteriormente, se procede a calcular la relación de frecuencias óptimas, denotada por la letra omega, con el valor obtenido previamente con el cociente de masas, dada por:

$$\Omega^{opt} = \frac{\sqrt{1 + \frac{\mu}{2}}}{1 + \mu} \quad (7)$$

La ecuación anterior representa la relación entre frecuencias de la masa líquida sintonizada, sobre la estructura ya equipada con el TLD.

El cociente de la relación de amortiguamientos corresponde sólo a la división de la frecuencia circular natural del líquido chapoteando, entre la frecuencia de la estructura a la cual ya se adicionó la masa líquida, esta expresión está dada por:

$$\Omega = \frac{\omega_a}{\omega_s} \quad (8)$$

La ecuación que se muestra a continuación, es para calcular la frecuencia natural circular correspondiente a la masa del líquido chapoteando, en el modo que se desea suprimir o disminuir su efecto de aceleración y desplazamiento, cabe aclarar que, en este caso al ser un oscilador de un grado de libertad, sólo tendría un modo de vibrar, por lo que el valor de n que se muestra en la ecuación corresponde el valor de 1 (al ser el primer modo); se menciona lo anterior dado que en algunos trabajos o investigaciones se suele omitir la variable “ n ”, lo anterior dado que en la mayoría de los casos se desea reducir la aceleración correspondiente al primer modo de vibrar de la estructura. La primera ecuación mostrada abajo es una simplificación de la ecuación original.

$$\omega_a^2 = \frac{\pi g}{L} \tanh\left(\frac{\pi h}{L}\right) \quad (9)$$

$$\omega_n^2 = \frac{n\pi g}{L} \tanh\left(\frac{n\pi h}{L}\right) \quad (10)$$

Para realizar lo anterior, se requiere proponer las dimensiones del tanque de la masa líquida sintonizada. Lo ideal en estos casos es proponer valores de largo y ancho (L y b , respectivamente) recordando que se están estudiando masas líquidas sintonizadas en forma de tanques rectangulares; las dimensiones siempre quedarán regidas por el espacio disponible en el correspondiente nivel de la estructura donde se coloque el dispositivo, y una vez teniendo esto se continúa iterando el tirante h del agua; la ecuación nos permite obtener la masa equivalente chapoteando del modo fundamental que se desea suprimir.

$$m_{eq} = \frac{8\rho bL^2}{\pi^3} \tanh\left(\frac{\pi h}{L}\right) \quad (11)$$

Se calcula la masa que toma en cuenta el componente no participativo del líquido del tanque con el modo fundamental del líquido chapoteando (M'_s) con la ecuación (12), la cual corresponde al cálculo de la masa de la estructura más la masa efectiva del TLD.

$$M'_s = M_s + (\rho b h L - m_{eq}) \quad (12)$$

Una vez calculados los parámetros anteriores, se inicia un proceso iterativo para obtener la altura del tirante de agua de la masa líquida sintonizada óptima (h_{opt}), para verificar si la altura supuesta cumple con la aproximación de la siguiente ecuación:

$$\zeta_{eff} = \zeta_s \left(\frac{\sigma_{s-inicial}^2}{\sigma_{s-objetivo}^2} - 0.8 \right) \cong \zeta_{eff}^{opt} = \frac{1}{4} \sqrt{\frac{\mu + \mu^2}{1 + \frac{3\mu}{4}}} \quad (13)$$

Con los parámetros anteriores, se calcula la frecuencia natural del sistema de masa líquida sintonizada, asegurando que nos acercamos al óptimo.

$$\omega_a^2 = \frac{\pi g}{L} \tanh\left(\frac{\pi h}{L}\right) \quad (14)$$

$$\omega_n^2 = \frac{n\pi g}{L} \tanh\left(\frac{n\pi h}{L}\right) \quad (15)$$

Se calcula la frecuencia de la estructura que toma en cuenta el modo fundamental de chapoteo del agua en el tanque (ω_{ps}):

$$\omega_{ps} = \sqrt{\frac{K_s}{M_s'}} \quad (16)$$

Con la frecuencia y la relación óptima de sintonización se calcula la frecuencia de la estructura que toma en cuenta el modo fundamental del chapoteo del líquido en el tanque (ω_a):

$$\omega_a = \omega_{ps} \Omega^{opt} \quad (17)$$

Con lo anterior, se calcula el amortiguamiento correspondiente al agua chapoteando aportado por la viscosidad del líquido (ζ_w), suponiendo un coeficiente de contaminación (SC) igual a la unidad ya que se supone que el agua no tiene contaminantes (Tait et al., 2004):

$$\Omega = \frac{\omega_a}{\omega_s'} \quad (18)$$

Con la relación de masas que se encontró anteriormente, se procede a encontrar el cociente óptimo de respuestas de la estructura sin y con la masa líquida sintonizada como:

$$R^{opt} = \frac{1 + \mu}{\sqrt{2\mu + \frac{3\mu^2}{2}}} \quad (19)$$

Cabe destacar que la relación de masas que se usa en esta ecuación es la calculada inicialmente, para igualar los amortiguamientos efectivos, y no habría que recalcular con los valores obtenidos.

Con el valor de la relación del movimiento relativo entre la estructura y el sintonizador (R^{opt}), se recurre a la sustitución en el cociente dado por la ecuación (20), y posteriormente lo que se hace es un despeje para encontrar la respuesta de la estructura sin TLD.

$$R = \frac{\sigma_r}{\sigma_s} \quad (20)$$

El movimiento relativo de la estructura con respecto al TLD se puede expresar según Tait (2008) como:

$$\sigma_s = \frac{\sigma_{acel-obj}}{\omega_s^2} \quad (21)$$

Despejando de las 2 ecuaciones anteriores, se tiene:

$$\sigma_r = \sigma_s R \quad (22)$$

El resultado anterior se usará después para obtener el amortiguamiento equivalente.

El amortiguamiento óptimo efectivo de la masa sintonizada dado por la absorción del líquido se calcula con como:

$$\zeta_a^{opt} = \sqrt{\frac{\mu + \frac{3\mu^2}{4}}{4 + 6\mu + 2\mu^2}} \quad (23)$$

Recordando que la relación de masas que se usa en esta ecuación es la calculada inicialmente, igual que en el caso anteriormente expuesto.

El amortiguamiento dado por absorción (ζ_a) es igual al amortiguamiento equivalente, proporcionado por la masa sintonizada más la adición del amortiguamiento dado por la disipación de energía proporcionada por el paso del líquido chapotenado a través de las pantallas de fricción.

$$\zeta_a = \zeta_{eq} + \zeta_w \quad (24)$$

Para continuar con la metodología es necesario seguir con un proceso de iteraciones, ahora con el amortiguamiento equivalente, esto porque el amortiguamiento dado por las pantallas puede ser calculado con los datos obtenidos en los pasos anteriores como se ve a continuación.

Se calcula el amortiguamiento que tiene en cuenta las pérdidas energéticas por la adición de pantallas (ζ_w), con la siguiente expresión:

$$\zeta_w = \left(\frac{1}{2h_{opt}} \right) \sqrt{\frac{\nu}{2\omega_a}} \left(1 + \frac{2h_{opt}}{b} + SC \right) \quad (25)$$

En la fórmula anterior, la viscosidad del agua es siempre conocida, (siempre será dato del líquido que se esté usando, independientemente cual sea); un dato que puede ser desconocido es SC, el cual es el factor de contaminación de superficie, pero para el caso del agua este resulta igual a la unidad, según Tait (2008).

Para una excitación cualquiera, el cociente de amortiguamiento equivalente (ζ_{eq}), se calcula como se muestra a continuación:

$$\zeta_{eq} = c_l \sqrt{\frac{32}{\pi^3}} \tanh^2\left(\frac{\pi h}{L}\right) \Delta \Xi \frac{\sigma_r}{L} \quad (26)$$

Se nota que se desconocen ciertos valores de algunas literales, sin embargo, a continuación, se muestran aquellas que se pueden calcular con los datos que tenemos hasta ahora; determina el amortiguamiento debido a pérdidas asociadas al componente del flujo del chapoteo en la dirección de análisis (Δ_n), y en el modo que se desea suprimir.

$$\Delta_n = \left[\frac{1}{3} + \frac{1}{\sinh^2\left(\frac{n\pi h_{opt}}{L}\right)} \right] \quad (27)$$

Con lo anterior se observa que se tienen 2 parámetros desconocidos, el primero de ellos c_l , el cual corresponde al coeficiente de pérdidas, y se calcula a partir de fórmulas de la hidráulica, y el segundo, un término relacionado al amortiguamiento dado por las pantallas dentro del tanque, el cual se muestra en el siguiente punto.

El amortiguamiento de las pantallas debidas a la posición de las mismas dentro del tanque se estima con la ecuación (28), donde x_j representa la posición de las mismas medidas desde un mismo punto de origen que se toma igual a cualquier extremo del tanque, y n representa al modo de vibrar que se desea suprimir en la dirección de análisis (como ya se mencionó anteriormente, este siempre suele ser el primero, por lo que en algunos cálculos se omitirá el uso de esa literal).

$$\Xi_n = \sum_{j=1}^{ns} \sin\left(\frac{n\pi x_j}{L}\right)^3 \quad (28)$$

Los trabajos de Tait y Love (2008, 2011 y 2012), tanto experimentales como analíticos, en su mayoría han mostrado la colocación de 2 pantallas para la disipación de energía, a 0.4L y a 0.6L, por lo que si tomamos esto como parámetro sólo queda una literal por resolver, que es la del coeficiente de pérdidas por pantallas.

El coeficiente de pérdidas, está relacionado a las pérdidas por arrastre, y se calcula según la siguiente ecuación:

$$c_l = S c_d \quad (29)$$

La relación de solidez (S), representa al cociente del área de las rejillas y el área total que éstas ocupan, y se calcula de acuerdo con:

$$S = \frac{A}{bh} \quad (30)$$

Con los parámetros anteriores se obtiene el coeficiente de pérdidas por presión (c_l), el coeficiente de pérdidas energéticas en orificios propuesto por Darcy-Weisbach (c_c), y al final el coeficiente de arrastre (c_d) como se muestra con las ecuaciones siguientes.

Teniendo la relación de solidez, se continúa con el uso de la ecuación para encontrar el coeficiente de contracción, que es una modificación a los resultados obtenidos experimentalmente por Weisbach 1855 (Tait et al.2005)

$$C_c = 0.405e^{-\pi S} + 0.595 \quad (31)$$

El coeficiente de pérdidas por presión según lo propuesto por Baines y Peterson (1951) es igual a lo expresado por la siguiente ecuación (Referencia 13)

$$c_l = \left(\frac{1}{C_c(1-S)} - 1 \right)^2 \quad (32)$$

Los valores anteriores se usan para calcular el coeficiente de arrastre con la ecuación (Referencia 13)

$$C_d = \frac{C_l}{S} \quad (33)$$

Con lo anterior es posible calcular el coeficiente de pérdidas, si se tiene el coeficiente de arrastre, caso contrario, se usan las ecuaciones de Baines y Peterson.

Finalmente, se comprueba que se cumpla la igualdad (o al menos de forma aproximada) de la ecuación siguiente:

$$\zeta_a = \zeta_{eq} + \zeta_w \quad (34)$$

Un camino alternativo, es despejar el coeficiente de pérdidas con la ecuación siguiente:

$$c_l = \frac{\zeta_{eq}}{\sqrt{\frac{32}{\pi^3} \Delta_n \Xi_n \frac{\sigma_r}{L} \tanh^2 \left(\frac{\pi h_{opt}}{L} \right)}} \quad (35)$$

Una vez conocido el coeficiente de pérdidas necesario para cumplir la igualdad de los amortiguamientos, se empieza por iterar el valor de la relación de solidez de las rejillas, hasta que el coeficiente de pérdidas sea igual al despejado en la ecuación anterior.

Ambos procesos resultan en métodos iterativos y se debe proceder con el que se considere más sencillo.

Para finalizar el cálculo de los parámetros de la MSSE se calcula su coeficiente de amortiguamiento para excitaciones aleatorias, según la siguiente ecuación:

$$c_{eq} = \sqrt{\frac{32}{\pi^3} \Delta_n \Xi_n \omega_a^{opt} \sigma_r \tanh^3 \left(\frac{\pi h_{opt}}{L} \right)} c_l \frac{16 \rho b L}{\pi^3} \quad (36)$$

Una vez que quedan definidas las dimensiones del tanque, altura del tirante y elementos de disipación de energía (rejillas), se calculan las propiedades equivalentes para caracterizar el MSSE. A manera de resumen, las siguientes expresiones presentan las expresiones fundamentales para el diseño de la MSSE.

-Masa equivalente del modo fundamental de chapoteo del tanque:

$$m_{eq} = \frac{8\rho bL^2}{\pi^3} \tanh\left(\frac{\pi h_{opt}}{L}\right) \quad (37)$$

-Coeficiente de amortiguamiento equivalente de la masa líquida sintonizada:

$$c_{eq} = \sqrt{\frac{32}{\pi^3} \Delta_n \Xi_n \omega_a^{opt} \sigma_r} \tanh^3\left(\frac{\pi h_{opt}}{L}\right) c_l \frac{16\rho bL}{\pi^3} \quad (38)$$

-Rigidez equivalente de la masa líquida sintonizada:

$$k_{eq} = \frac{8\rho bLg}{\pi^2} \tanh^2\left(\frac{\pi h_{opt}}{L}\right) \quad (39)$$

Se debe tener en cuenta que los parámetros finales deben incluir el tirante óptimo del agua (h_{opt}), el cual es el que se obtuvo del proceso iterativo, y verificado en la ecuación 11.

Un resumen de las expresiones empleadas para determinar los parámetros de la MSSE se presenta en el Apéndice A.

4. EVALUACIÓN SISTEMÁTICA DE OSCILADORES DE 1 y 2 GRADOS DE LIBERTAD SOMETIDOS A LA ACCIÓN DEL VIENTO, CON EL EMPLEO DE UNA MSSE

4.1. Simulación de viento turbulento y fuerzas

Para llevar a cabo el análisis eólico de la estructura es necesario obtener las fuerzas que actúan en ella. Para este fin se utiliza el programa *SVTpro* (Ortegón Esparza y Pozos Estrada, 2016) el cual realiza la simulación de señales estacionarias en el plano con el empleo de un modelo de autoregresión y media móvil. El programa permite utilizar diferentes funciones de densidad de potencia espectral para caracterizar el viento turbulento. En el presente estudio se utiliza la función de densidad de Kaimal, la cual toma en cuenta la variación de la media de velocidad del viento respecto a la altura. Cada señal simulada está conformada por 6000 puntos, con un paso del tiempo de 0.1 s, teniendo así una duración de 10 minutos. Intervalo de tiempo típico para análisis dinámicos ante cargas de viento.

Para determinar las fuerzas de viento y realizar el análisis transitorio es necesario convertir las velocidades del viento a fuerzas actuantes en la estructura, la cual está definida como:

$$F(t) = \frac{1}{2} \rho [\bar{V} + v(t)]^2 A C_D \quad (40)$$

donde ρ es la densidad del aire de 1.23 kg/m^3 , \bar{V} es la velocidad media del viento en m/s, $v(t)$ es la velocidad turbulenta del viento en m/s, A es el área de referencia en m^2 y C_D es el coeficiente de arrastre, adimensional. La fuerza obtenida se escala para obtener la respuesta deseada en el modelo de estudio. La Figura 4.1 muestra una señal de viento simulada con el programa *SVTpro* y la Figura 4.2 muestra la señal de fuerza de viento calculada con la Ec. (40) y empleando la señal de viento de la Figura 4.1.

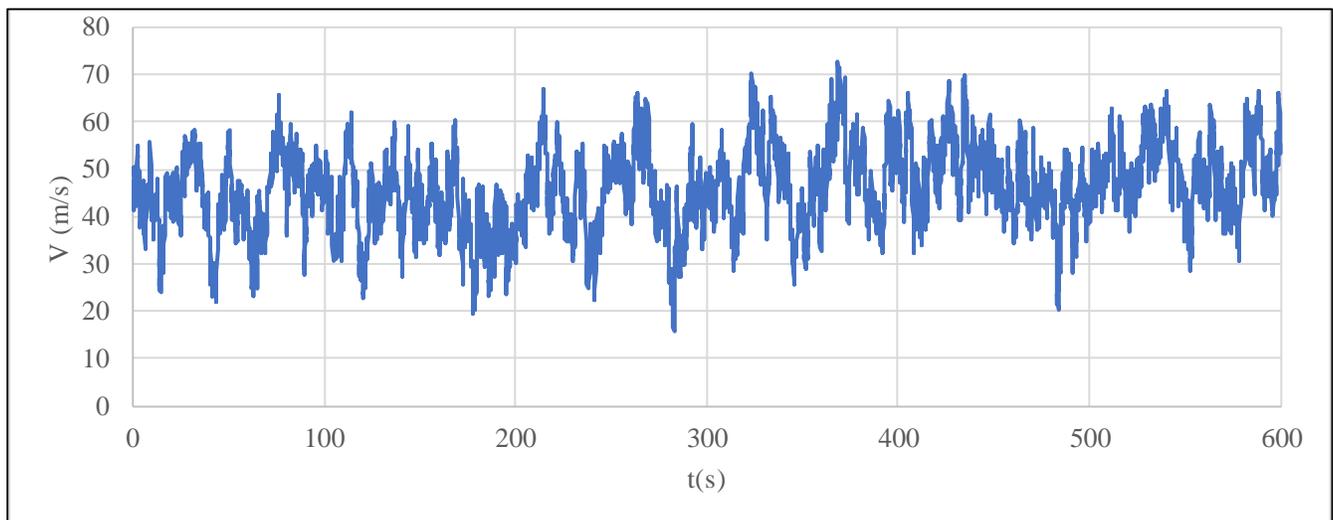


Fig. 4.1 Historia de las velocidades de viento turbulento

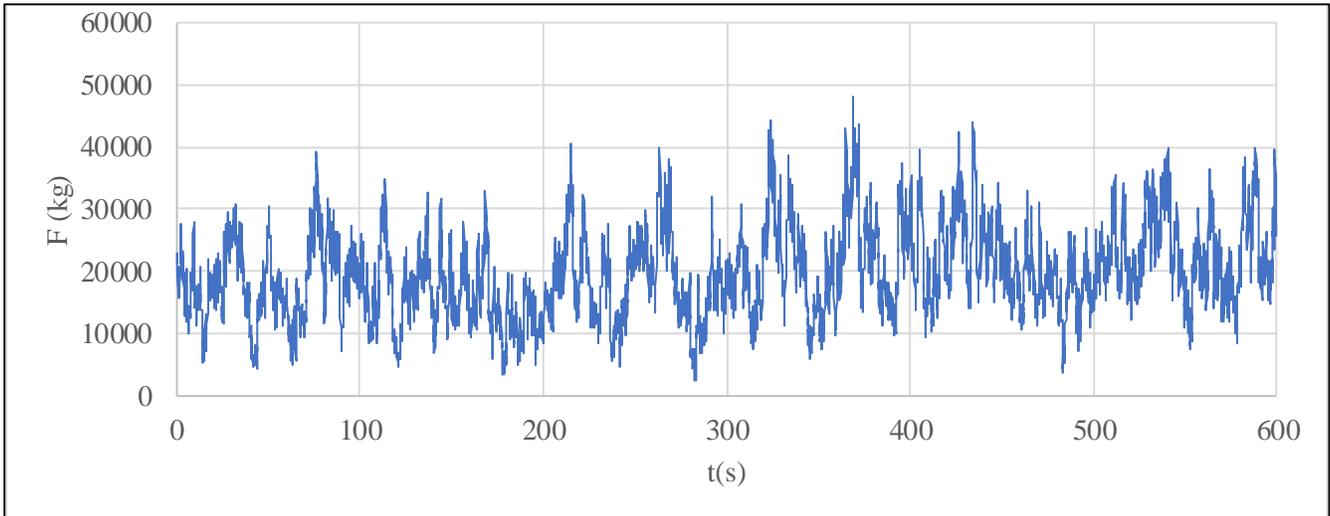


Fig. 4.2 Historia de fuerzas de viento

4.2 Solución numérica de los osciladores con el método de Newmark

Para determinar la respuesta dinámica de una estructura bajo la acción de cargas dependientes del tiempo se implementó el método de integración en el tiempo de Newmark en Matlab (2020) para resolver la ecuación de movimiento en puntos discretos del tiempo. La ecuación de movimiento se define como:

$$\{F(t)\} = [M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} \quad (41)$$

donde $\{F(t)\}$ es el vector de la historia de fuerzas en el tiempo (como las de la Figura 8), $[M]$ es la matriz de masas de la estructura, $[C]$ es la matriz de amortiguamiento de la estructura, $[K]$ es la matriz de rigidez de la estructura, y $\{\ddot{u}\}$, $\{\dot{u}\}$, $\{u\}$ representan los vectores de aceleración, velocidad y desplazamiento, respectivamente.

Para evaluar la efectividad de la MSSE, se emplearon las propiedades de la estructura propuesta por Love y Tait (2012) y se modeló como un sistema de 1GL con propiedades modales. El objetivo del ejercicio fue reducir la respuesta modal de la estructura, en términos de aceleración, de 18 mili-g a 9 mili-g, aproximadamente, con el empleo de la MSSE. Los resultados de la estructura modelada como un sistema de 1GL, sometida a la carga de viento mostrada en la Figura 8, se presentan en la Figura 4.3, en donde se observa que la respuesta máxima es aproximadamente 18 mili-g. Con el empleo de la MSSE, el sistema es modelado como un sistema de 2GL, en donde el primero representa a la estructura principal y el segundo representa la masa líquida sintonizada instalada. Los resultados de la estructura con el empleo de la MSSE se muestran en la Figura 4.4, en donde se aprecia que existe una reducción de la respuesta, lo que indica que las propiedades equivalentes obtenidas en el capítulo anterior resultaron útiles para reducir la respuesta.

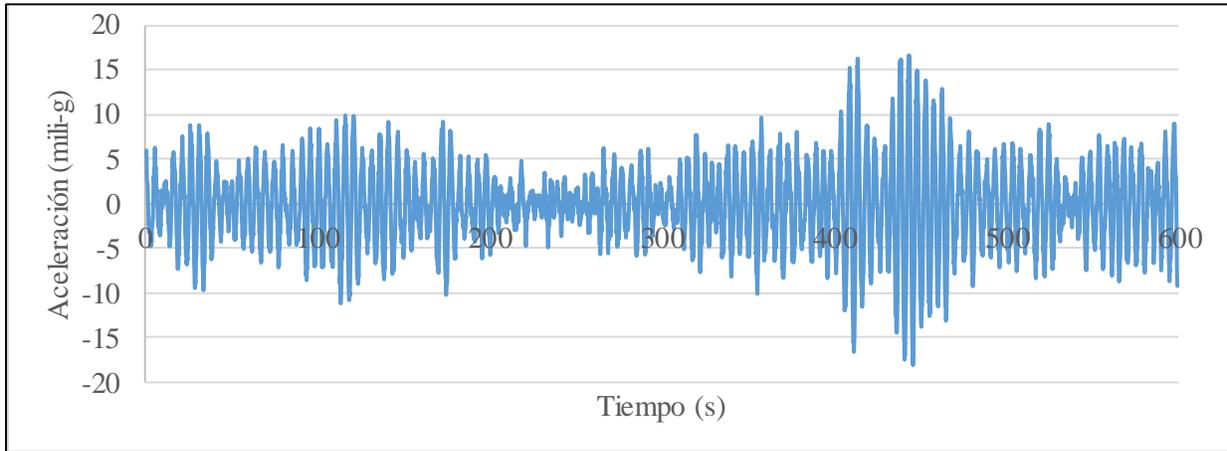


Fig. 4.3 Historia de aceleraciones producidas por las fuerzas de viento en la estructura sin MSSE

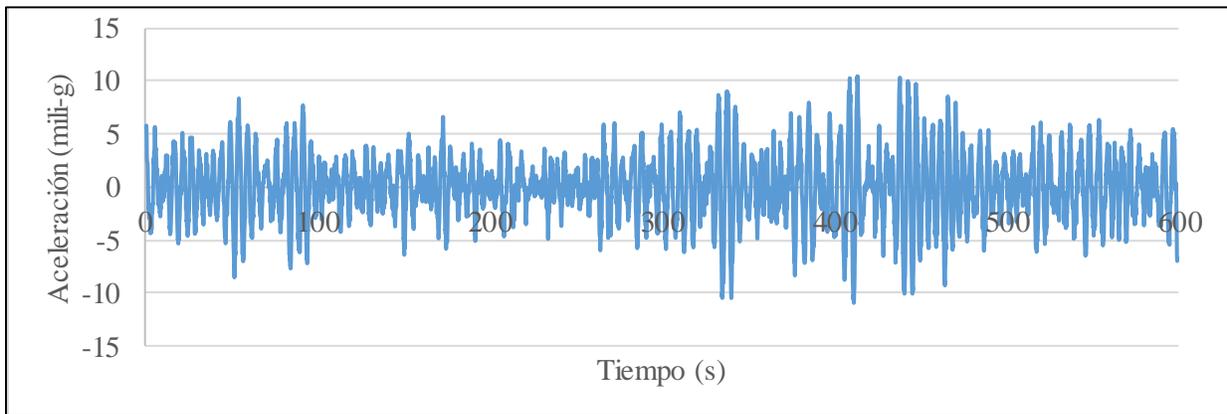


Fig. 4.4 Historia de aceleraciones producidas por las fuerzas de viento en la estructura equipada con una MSSE

4.3 Análisis paramétrico

4.3.1 Respuesta del oscilador de un grado de libertad (Estructura sin MSSE)

Para continuar con el trabajo desarrollado anteriormente, se someterán los modelos de osciladores de uno y dos grados de libertad a la acción de 30 señales aleatorias del viento turbulento, generadas como se indicó en secciones anteriores, con la finalidad de comprobar la efectividad del modelo de la masa líquida sintonizada modelada como un oscilador de un grado de libertad.

En la Figura 4.5 se presenta la variación de la velocidad del viento con el tiempo; en el eje de las abscisas los 10 minutos de análisis en el tiempo de las señales de viento turbulento, mientras que en el eje de las ordenadas están indicadas las velocidades de viento turbulento.

En la Figura 4.6 se muestra en el eje de las abscisas los 10 minutos de análisis en el tiempo de las señales de viento turbulento, lo cual genera fuerzas que no oscilan alrededor del cero debido a la componente media del viento, mientras que en el eje de las ordenadas están indicadas las fuerzas provocadas por las velocidades de viento turbulento, obtenidas aplicando la metodología de secciones anteriores.

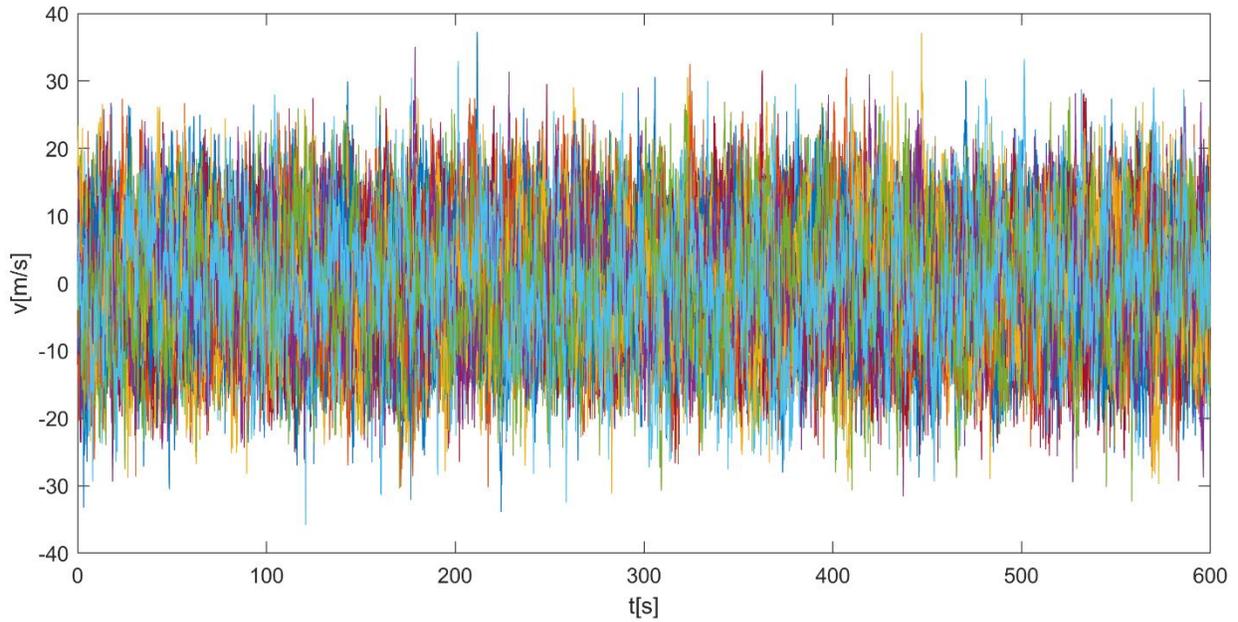


Fig.4.5 Simulación sistemática de las 30 velocidades de viento turbulento

La Figura 4.7 muestra en el eje de las abscisas los 10 minutos de la respuesta del análisis en el tiempo de las señales de viento turbulento, las respuestas que se obtienen son los desplazamientos, las velocidades y las aceleraciones, mientras que en el eje de las ordenadas están indicadas las respuestas de la estructura.

Se observa en la Figura 4.7, que el promedio de las aceleraciones máximas obtenidas es igual a 18 mili-g, esto ya que se busca verificar la reducción promedio de la MSSE, como se mostrará más adelante.

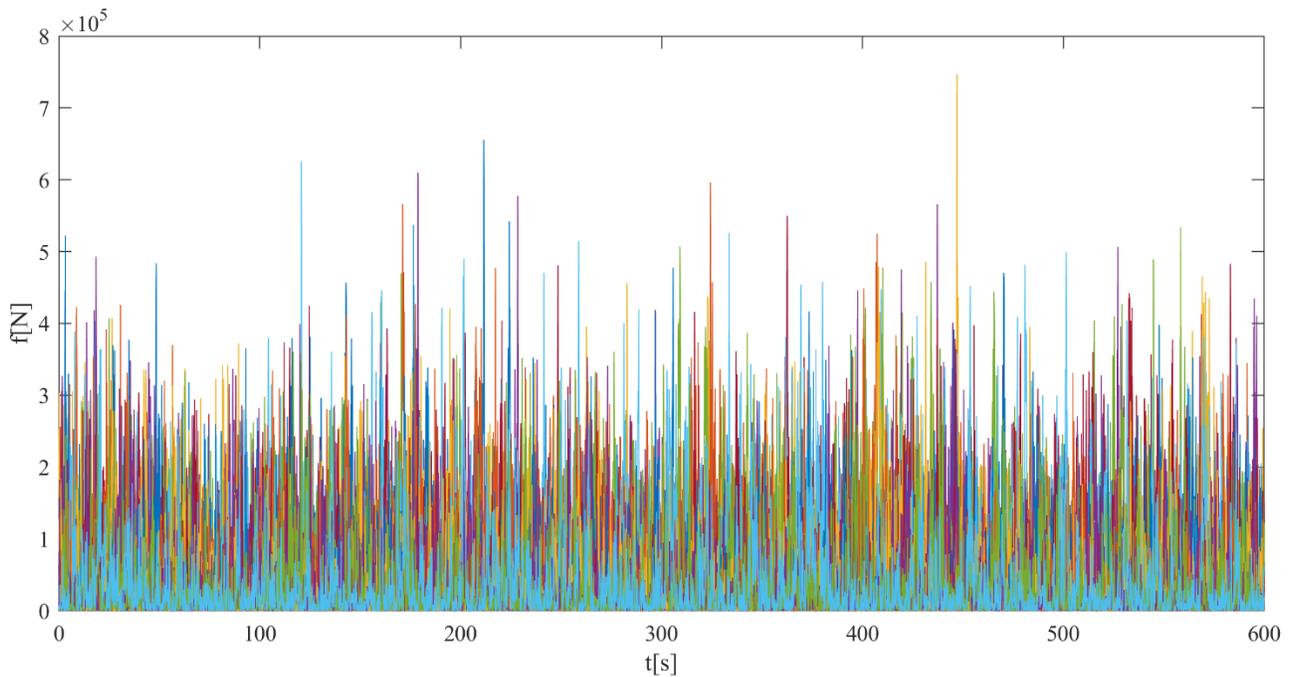


Fig.4.6 Simulación sistemática de las 30 fuerzas provocadas por viento turbulento

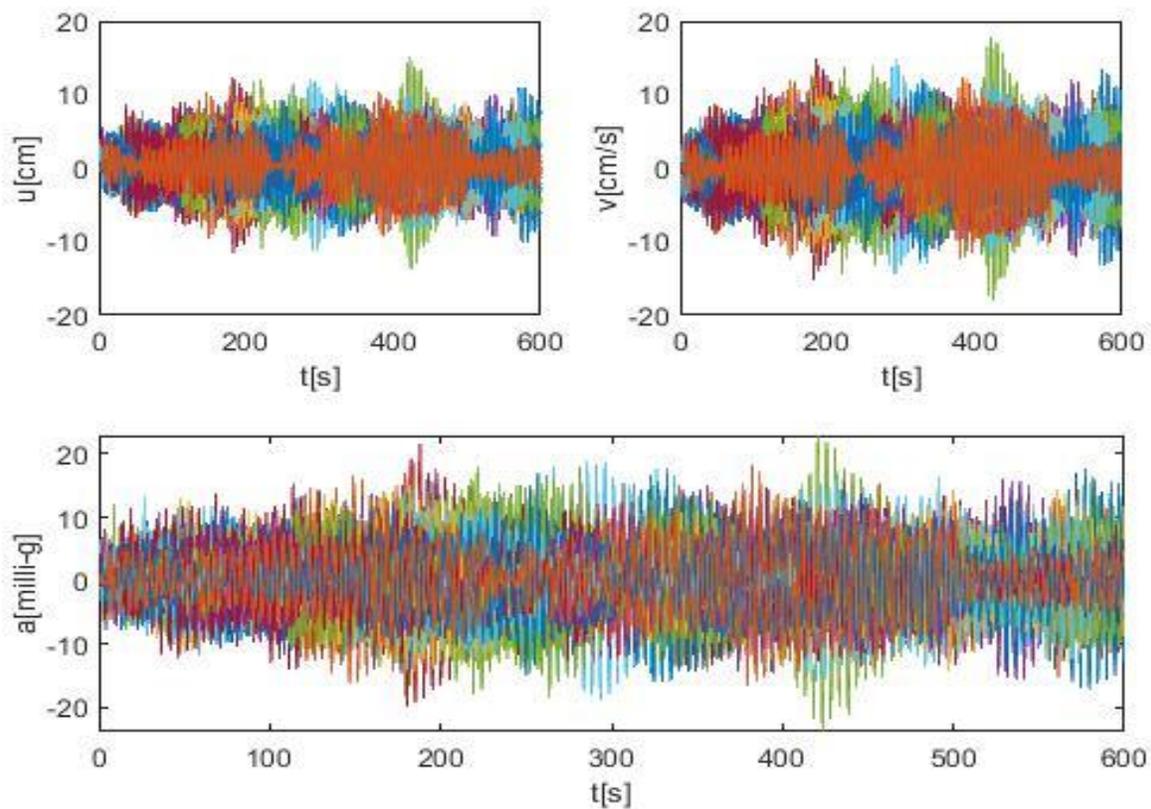


Fig.4.7 Respuesta (desplazamiento, velocidad y aceleración) de la simulación sistemática de las 30 señales

4.3.2 Caracterización de la MSSE

Una vez definida la estructura cuya respuesta (e.g., aceleraciones o desplazamientos) será reducida, se requiere identificar las propiedades dinámicas de la misma. Para este estudio se adoptaron las propiedades dinámicas de un edificio alto reportado por (Tait, 2011), las cuales se indican en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1.- Propiedades dinámicas de la estructura para calibración del oscilador

Propiedad	Valor	Unidad
<i>Masa</i>	4,000,000	kg
<i>Frecuencia natural</i>	0.20	Hz
<i>Frecuencia natural circular</i>	1.26	rad/s
<i>Rigidez</i>	6,316,547	N/m
<i>Amortiguamiento</i>	1	%

Las propiedades anteriores se pueden calcular en osciladores de un grado de libertad con los principios básicos de la dinámica estructural; para el caso del problema los valores dados fueron la masa y la frecuencia natural.

De acuerdo con la metodología adoptada, para el cálculo de la respuesta objetivo, es necesario determinar el factor pico, el cual se calcula como:

$$P.F. = \sqrt{2 \cdot \ln(600 \cdot \omega_s)} + \frac{0.577}{\sqrt{2 \cdot \ln(600 \cdot \omega_s)}} = \sqrt{2 \cdot \ln(600 \cdot 1.27)} + \frac{0.577}{\sqrt{2 \cdot \ln(600 \cdot 1.27)}} = 3.80$$

Aunado a lo anterior, se requiere contar con el valor de la aceleración máxima que producen las fuerzas provocadas por el viento en el oscilador de un grado de libertad, para este ejemplo será igual a 18 mili-g, respuesta la cual se desea reducir un 50 % a 9 mili-g, por lo que para obtener las desviaciones estándar de ambas cantidades será necesario dividir las entre el factor pico, como se indica en las operaciones siguientes.

$$\sigma_{acel} = \frac{a_i}{P.F.} \dots \dots \dots \sigma_{acel-obj} = \frac{a_{ob}}{P.F.}$$

$$\sigma_{acel} = \frac{a_i}{P.F.} = \frac{18}{3.80} = 4.74 \text{ mili-g}$$

$$\sigma_{acel-obj} = \frac{a_{ob}}{P.F.} = \frac{9}{3.80} = 2.37 \text{ mili-g}$$

Cabe recalcar que en este ejercicio se tomó como la aceleración inicial la aceleración máxima promedio de la Figura 13, que fue 18 mili-g, y se busca ver cuanta es la reducción ante señales aleatorias, lo anterior porque algunas ecuaciones del método fueron obtenidas para simulaciones donde la excitación es ruido blanco.

Una vez obtenidas las desviaciones estándar, se aplica el procedimiento mencionado con anterioridad en este trabajo, el cual consiste en obtener un cociente de amortiguamiento efectivo, el cual se calcula como:

$$\zeta_{eff} = \zeta_s \left(\frac{\sigma_{s-inicial}^2}{\sigma_{s-objetivo}^2} - 0.8 \right) = 0.01 \cdot \left(\frac{4.74^2}{2.37^2} - 0.8 \right) = 0.032$$

El valor obtenido de la ecuación anterior se igualará con el cociente de amortiguamiento efectivo óptimo, dado por:

$$\zeta_{eff}^{opt} = \frac{1}{4} \sqrt{\frac{\mu + \mu^2}{1 + \frac{3\mu}{4}}}$$

La ecuación antes mostrada se encuentra en función de un parámetro que se conoce como relación de masas, la cual corresponde al cociente de la masa equivalente del amortiguador líquido sintonizado entre la masa modal de la estructura más la masa líquida sintonizada.

$$\mu = \frac{m_{eq}}{M_s}$$

En lo que procede, este valor se obtendrá por medio de iteraciones, con el fin de igualar o aproximar el amortiguamiento óptimo con el amortiguamiento efectivo.

El cociente de masas es obtenido despejando de las ecuaciones anteriores o iterando valores hasta igualar los amortiguamientos, resultando:

$$\mu = \frac{m_{eq}}{M_s} = 0.017$$

Se realizan las sustituciones correspondientes:

$$\zeta_{eff}^{opt} = \frac{1}{4} \sqrt{\frac{\mu + \mu^2}{1 + \frac{3\mu}{4}}} = \frac{1}{4} \cdot \sqrt{\frac{0.017 + 0.017^2}{1 + \frac{3 \cdot 0.017}{4}}} = 0.032$$

Al sustituir valores es notorio que los cocientes se igualan al valor de 0.032.

Posteriormente, se procede a calcular la relación de frecuencias óptimas, denotada por la letra omega, Ω , en la cual se sustituye el valor del cociente de masas, que se obtuvo en los párrafos anteriores.

$$\Omega^{opt} = \frac{\sqrt{1 + \frac{\mu}{2}}}{1 + \mu} = \frac{\sqrt{1 + \frac{0.017}{2}}}{1 + 0.017} = 0.99$$

De las ecuaciones anteriores, se puede observar que, para esta estructura, la relación óptima de amortiguamientos sería igual a 0.989, lo cual concuerda con la teoría de las masas sintonizadas.

El cociente de la relación de amortiguamientos corresponde sólo a la división de la frecuencia circular natural del líquido chapoteando, entre la frecuencia de la estructura a la cual ya se adicionó la masa líquida.

$$\Omega = \frac{\omega_a}{\omega_s}$$

La ecuación que se muestra a continuación, es para calcular la frecuencia natural circular correspondiente a la masa del líquido chapoteando, en el modo que se desea suprimir o disminuir su efecto de aceleración y desplazamiento, por lo que el valor de n que se muestra en la ecuación corresponde el valor de 1 (al ser el primer modo), nuestro caso al ser una estructura representada por un oscilador de un grado de libertad; se menciona lo anterior dado que en algunos trabajos o investigaciones se suele omitir la variable “ n ”, lo anterior dado que en la mayoría de los casos se desea reducir la aceleración correspondiente al primer modo de vibrar de la estructura.

Sustituyendo valores en la ecuación correspondiente, se obtiene el siguiente resultado.

$$\omega_n^2 = \frac{n\pi g}{L} \tanh\left(\frac{n\pi h}{L}\right) = \frac{\pi \cdot 9.81}{10} \cdot \tanh\left(\frac{\pi \cdot 1.74}{10}\right) = 1.54$$

$$\omega_n = 1.24 \text{ rad} / \text{s}$$

A continuación, la masa equivalente del líquido sintonizado chapoteando en la estructura.

$$m_{eq} = \frac{8\rho bL^2}{\pi^3} \tanh\left(\frac{\pi h}{L}\right) = \frac{8 \cdot 1,000 \cdot 7 \cdot 10^2}{\pi^3} \tanh\left(\frac{\pi \cdot 1.74}{10}\right) = 89,942 \text{ kg}_m$$

Una vez obtenido el valor anterior, se procede a encontrar el valor de la masa total de la estructura, esto es igual a la suma de la masa total de la estructura, más la masa del líquido, a la cual se le resta la masa equivalente del líquido chapoteando:

$$M'_s = M_s + (\rho b h L - m_{eq}) = 4,000,000 + (1,000 \cdot 7 \cdot 1.74 \cdot 10 - 89,942) = 4,031,858 \text{ kg}_m$$

Para obtener la frecuencia natural circular de la estructura a la que se adiciona la masa líquida sintonizada, basta con aplicar los principios de la dinámica estructural.

$$\omega'_s = \sqrt{\frac{K_s}{M'_s}} = \sqrt{\frac{6,316,547}{4,031,858}} = 1.25 \text{ rad} / \text{s}$$

Se procede ahora a sustituir en la relación de amortiguamientos, y se verifica que esta se iguale o se acerque a la relación de amortiguamientos óptima efectiva, lo cual se puede ver que se cumple.

$$\Omega = \frac{\omega_a}{\omega'_s} = \frac{1.24}{1.25} = 0.99$$

Para obtener los parámetros anteriores es necesario tener los datos correspondientes a la base y longitud del tanque, así como su tirante de agua h , para encontrar lo anterior, es necesario conocer el área disponible para la instalación del tanque, y de ahí proponer valores del tirante de agua; para llevar lo anterior a cabo es necesario llevar un proceso iterativo, para lo cual lo mejor es hacer uso de programas de cómputo.

Tabla 4.2.- Propiedades del tanque de la masa líquida sintonizada

<i>Parámetro del TLD</i>	<i>Valor en (m)</i>	<i>Observación</i>
Base (b)	7.00	Propuesto
Longitud (L)	10.00	Propuesto
Tirante de agua (h)	1.74	Iterado

Con los valores de la Tabla 4.2 es posible obtener la rigidez equivalente, de acuerdo con:

$$k_{eq} = \frac{8\rho bLg}{\pi^2} \tanh^2\left(\frac{\pi h_{opt}}{L}\right) = \frac{8 \cdot 1,000 \cdot 7 \cdot 10 \cdot 9.81}{\pi^2} \tanh^2\left(\frac{\pi \cdot 1.74}{10}\right) = 138,041 \text{ N} / \text{m}$$

La Figura 4.8 ilustra las dimensiones del tanque que se obtuvieron de la metodología.

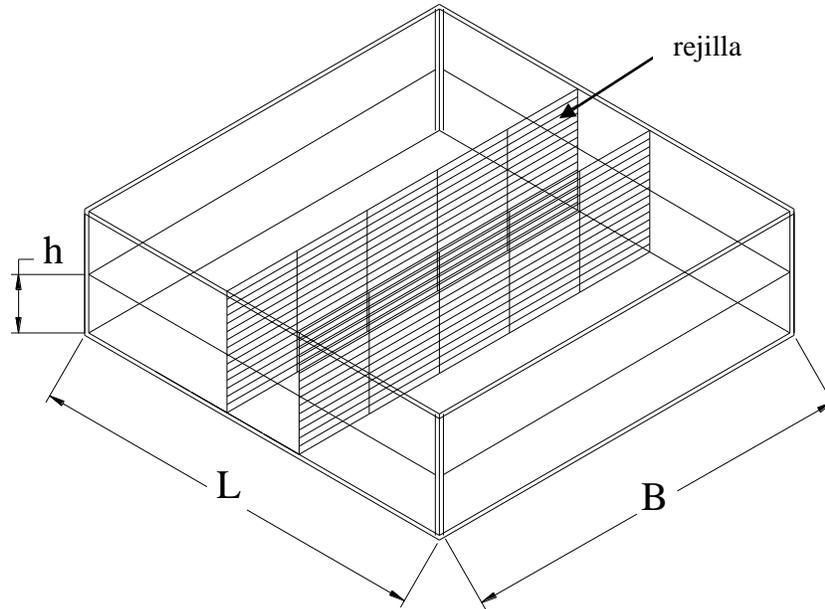


Fig.4.8 Parámetros de la MSSE para este ejercicio

Con lo anterior, ya se han obtenido 2 de las 3 propiedades necesarias para el MSSE, por lo que sólo resta calcular el amortiguamiento equivalente.

Con la relación de masas que se encontró anteriormente, se procede a calcular el cociente óptimo de respuestas de la estructura sin y con la masa líquida sintonizada, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$R^{opt} = \frac{1 + \mu}{\sqrt{2\mu + \frac{3\mu^2}{2}}} = \frac{1 + 0.017}{\sqrt{2 \cdot 0.017 + \frac{3 \cdot 0.017^2}{2}}} = 5.60$$

Con el valor de 5.60, se hace un despeje para encontrar la respuesta de la estructura sin TLD, resultando en:

$$R = \frac{\sigma_r}{\sigma_s}$$

$$\sigma_s = \frac{\sigma_{acel-obj}}{\omega_s'^2} \frac{981}{1000} = \frac{2.37}{1.25^2} \cdot \frac{981}{1000} = 1.49$$

$$\sigma_r = \sigma_s R = 1.49 \cdot 5.60 = 8.27$$

El resultado anterior se usará después para obtener el amortiguamiento equivalente.

El amortiguamiento óptimo efectivo de la masa líquida se calcula en función de la relación de masas que ya fue calculada con anterioridad, y resulta en:

$$\zeta_a^{opt} = \sqrt{\frac{\mu + \frac{3\mu^2}{4}}{4 + 6\mu + 2\mu^2}} = \sqrt{\frac{0.02 + \frac{3 \cdot 0.017^2}{4}}{4 + 6 \cdot 0.017 + 2 \cdot 0.017^2}} = 0.06$$

Para calcular el amortiguamiento debido a la pérdida por fricción de los elementos adicionales (en este caso rejillas o pantallas), donde ν representa a la viscosidad del agua, y SC es el coeficiente de contaminación de superficies, el cual se recomienda que se tome igual a la unidad para superficies de agua. El amortiguamiento debido a la pérdida por fricción de los elementos adicionales se calcula como:

$$\zeta_w = \left(\frac{1}{2h}\right) \sqrt{\frac{\nu}{2\omega_n}} \left(1 + \frac{2h}{b} + SC\right) = \left(\frac{1}{2 \cdot 1.74}\right) \sqrt{\frac{0.001}{2 \cdot 1.24}} \left(1 + \frac{2 \cdot 1.74}{7} + SC\right) = 0.014$$

El cociente de amortiguamiento por absorción es igual a:

$$\zeta_a = \zeta_{eq} + \zeta_w = 0.06$$

De lo anterior se despeja el cociente de amortiguamiento equivalente de la masa sintonizada, el cual resulta igual a:

$$\zeta_{eq} = \zeta_a - \zeta_w = 0.06 - 0.014 = 0.046$$

En los cálculos que se muestran a continuación se debe de igualar o acercar el valor del amortiguamiento equivalente para acercarse al óptimo.

La relación de solidez de las pantallas de amortiguamiento del líquido se recomienda que sea menor a 0.5. La relación de solidez depende del área de las rejillas o amortiguadores y de b y h (recordando que lo anterior refiere a las áreas sumergidas dentro del tirante de agua). La relación de solidez resulta igual a:

$$S = \frac{A}{bh}$$

Teniendo la relación de solidez, se continúa con el uso de la ecuación para encontrar el coeficiente de contracción, que es una modificación a los resultados obtenidos experimentalmente por Weisbach (1855) y resulta en:

$$C_c = 0.405e^{-\pi S} + 0.595$$

El coeficiente de pérdidas por presión según lo propuesto por Baines y Peterson (1951) es:

$$c_l = \left(\frac{1}{C_c(1-S)} - 1\right)^2$$

Los valores anteriores se usan para calcular el coeficiente de arrastre:

$$C_d = \frac{C_l}{S}$$

Lo anterior para calcular el coeficiente de pérdidas, que se usa para calcular posteriormente el amortiguamiento, y se procede con la ecuación mostrada a continuación:

$$c_l = S C_d$$

El amortiguamiento de las pantallas debidas a la posición de las mismas dentro del tanque se puede estimar con la ecuación siguiente, donde x representa la posición de las pantallas medidas desde un mismo punto de origen que se toma igual a cualquier extremo del tanque.

$$\Xi_n = \sum_{j=1}^{ns} \sin\left(\frac{n\pi x_j}{L}\right)^3$$

Con todo lo calculado anteriormente se estima el cociente de amortiguamiento equivalente de la masa líquida sintonizada, recordando que el amortiguamiento total debe ser semejante al óptimo:

$$\zeta_{eq} = c_l \sqrt{\frac{32}{\pi^3}} \tanh^2\left(\frac{\pi h}{L}\right) \Delta \Xi \frac{\sigma_r}{L}$$

Con todos los valores anteriores se calcula el parámetro último del oscilador equivalente que es el amortiguamiento:

$$c_{eq} = \sqrt{\frac{32}{\pi^3}} \Delta_n \Xi_n \omega_a^{opt} \sigma_r \tanh^3\left(\frac{\pi h_{opt}}{L}\right) c_l \frac{16\rho b L}{\pi^3}$$

Un procedimiento alternativo es despejar el coeficiente de pérdidas necesario para obtener la igualdad en los amortiguamientos, y esto da como resultado el siguiente despeje:

$$c_l = \frac{\zeta_{eq}}{\sqrt{\frac{32}{\pi^3}} \Delta_n \Xi_n \frac{\sigma_r}{L} \tanh^2\left(\frac{\pi h_{opt}}{L}\right)}$$

En lo que sigue se seguirá el camino descrito en el párrafo anterior:

Ahora se determina el amortiguamiento debido a pérdidas asociadas al componente del flujo del chapoteo en la dirección de análisis (Δ_n), y en el modo que se desea suprimir:

$$\Delta_n = \left[\frac{1}{3} + \frac{1}{\sinh^2\left(\frac{n\pi h_{opt}}{L}\right)} \right] = \left[\frac{1}{3} + \frac{1}{\sinh^2\left(\frac{\pi \cdot 1.74}{10}\right)} \right] = 3.37$$

Para el cálculo del amortiguamiento dado por las pantallas, se usará un conjunto de dos pantallas de disipación de energía ubicadas a 2/5 de L y 3/5 de L, tal y como lo hace el autor Tait (2004) en sus análisis experimentales y en sus procedimientos analíticos, resultando en:

$$\Xi_n = \sum_{j=1}^{ns} \sin\left(\frac{n\pi x_j}{L}\right)^3 = \sin\left(\frac{\pi \cdot 4}{10}\right)^3 + \sin\left(\frac{\pi \cdot 6}{10}\right)^3 = 1.32$$

La ubicación propuesta de las rejillas se muestra en la Figura 4.9.

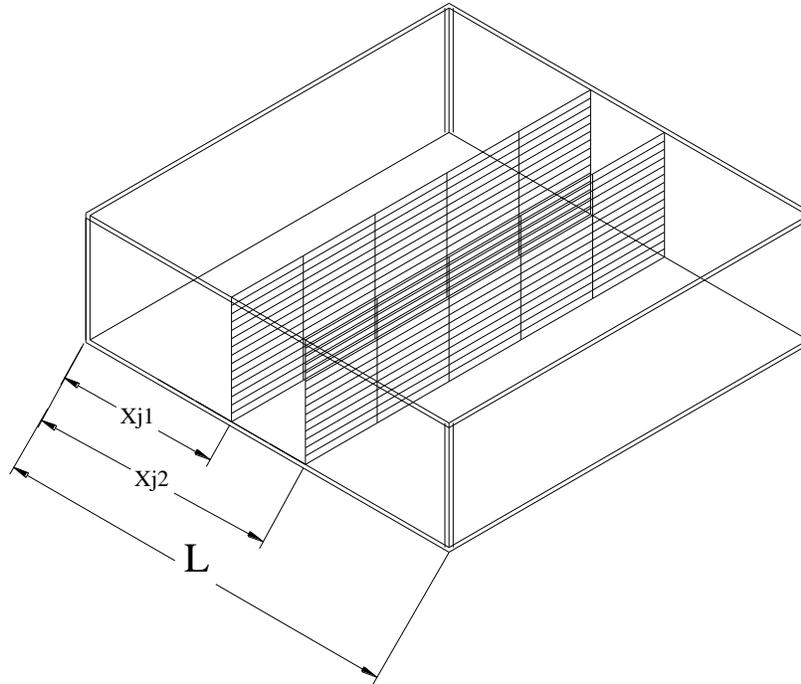


Fig.4.9 Parámetros para el cálculo del amortiguamiento dado por las rejillas

Entonces el coeficiente de pérdidas necesario será:

$$c_l = \frac{\zeta_{eq}}{\sqrt{\frac{32}{\pi^3} \Delta_n \Xi_n \frac{\sigma_r}{L} \tanh^2\left(\frac{\pi h_{opt}}{L}\right)}} = \frac{0.046}{\sqrt{\frac{32}{\pi^3} \cdot 3.37 \cdot 1.32 \cdot \frac{0.0827}{10} \cdot \tanh^2\left(\frac{\pi \cdot 1.74}{10}\right)}} = 5.30$$

Es en este paso donde se usan las siguientes ecuaciones:

$$S = \frac{A}{bh}$$

$$C_c = 0.405e^{-\pi S} + 0.595$$

$$c_l = \left(\frac{1}{C_c(1-S)} - 1 \right)^2 = \left(\frac{1}{(0.405e^{-\pi S} + 0.595)(1-S)} - 1 \right)^2 = 5.30$$

Resolviendo mediante un proceso iterativo, se encuentra que la relación de solidez S que cumple la igualdad es aproximadamente igual a 0.55, por lo que una vez resuelto todo lo anterior, se procede finalmente a calcular el amortiguamiento de la MSSE como se indica a continuación:

$$c_{eq} = \sqrt{\frac{32}{\pi^3}} \Delta_n \Xi_n \omega_n \sigma_r \tanh^3 \left(\frac{\pi h_{opt}}{L} \right) c_l \frac{16 \rho b L}{\pi^3}$$

$$c_{eq} = \sqrt{\frac{32}{\pi^3}} \cdot 3.37 \cdot 1.32 \cdot 1.24 \cdot 0.0827 \cdot \tanh^3 \left(\frac{\pi \cdot 1.74}{L} \right) \cdot 5.30 \cdot \frac{16 \cdot 1,000 \cdot 7 \cdot 10}{\pi^3} = 11,205 \frac{kg_m}{s}$$

Con lo anterior se da por concluido el procedimiento.

Las propiedades equivalentes calculadas se resumen en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3.- Propiedades del oscilador equivalente de la MSSE

Propiedad	Valor	Unidad
Masa	89,942	kg _m
Rigidez	138,041	N/m
Amortiguamiento	11,205	N/(m/s)

A diferencia del ejemplo desarrollado por Love y Tait (2011), aquí el coeficiente de solidez (S) resulta en 0.55 mientras que en su ejemplo lo calculado es de 0.42, esto dado a que el tanque que ellos proponen cuenta con chaflanes en una esquina a diferencia del tanque rectangular de este ejemplo, lo cual se toma como una variación aceptable, y por lo tanto se encuentran igualmente variaciones en la masa equivalente y la rigidez.

Para el análisis sistemático de señales se usaron las propiedades calculadas anteriormente y el procedimiento de la sección 4.3, pero esta vez empleando la MSSE; los resultados obtenidos se resumen en la Figura 4.10.

La Figura 4.10 muestra los resultados de las 30 simulaciones sistemáticas para la aceleración en mili-g de la estructura en estudio, con y sin TLD, la aceleración promedio de la estructura es igual a 18-mili-g como ya se había indicado anteriormente, mientras que la respuesta promedio con el empleo de la MSSE es de 11.80 mili-g, esto quiere decir que, en promedio, se redujo un 35% la respuesta máxima. Lo anterior es congruente con lo mostrado en la metodología propuesta de Tait (2012).

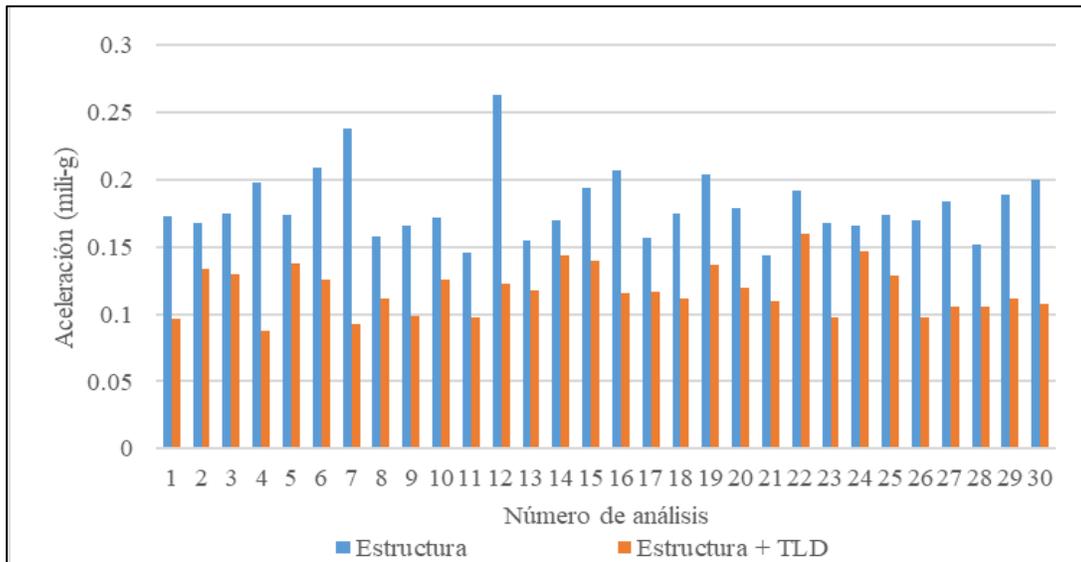


Fig.4.10 Aceleración de la simulación sistemática de las 30 señales con y sin MSSE

4.3.3 Obtención de los parámetros óptimos de diseño de la MSSE

Apoyados de la simulación sistemática de señales, se obtendrán los parámetros óptimos de masa, rigidez y amortiguamiento de las masas líquidas sintonizadas con el empleo de la MSSE. En este estudio se definen como parámetros óptimos a aquellos valores de masa, frecuencia y amortiguamiento que tiene el sistema de las MSSE que reducen la respuesta de interés al máximo. Lo anterior indica que se pueden tener parámetros óptimos para cada tipo de respuesta.

Para identificar los parámetros óptimos, se simulan 30 señales de viento turbulento para las cuales se obtienen las respuestas promedio de la estructura, cuando aún no se equipa con la masa líquida sintonizada (en adelante se trabajará con los promedios tanto de máximos absolutos como de las varianzas, esto con el fin de encontrar los parámetros que mejor se ajusten para obtener una máxima disminución en la respuesta de aceleración y desplazamientos). La tabla 4.4 presenta las respuestas promedio para la simulación de señales sistemática para la estructura sin MSSE.

Tabla 4.4.- Respuestas promedio para la simulación de señales sistemática de la estructura sin MSSE

Respuestas promedio	Cantidad	Unidad
<i>Desplazamiento máximo</i>	8	cm
<i>Aceleración máxima</i>	13	mili-g
<i>RMS* Desplazamiento σ</i>	2	cm
<i>RMS Aceleración σ</i>	4	mili-g
Nota: * RMS = Desviación estándar.		

Para evaluar los parámetros óptimos, se proponen las dimensiones del tanque indicadas en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5.- Propiedades del tanque de la masa líquida sintonizada para las simulaciones

<i>Parámetro del TLD</i>	<i>Valor en (m)</i>	<i>Observación</i>
Base (B)	7.00	Propuesto
Longitud (L)	10.00	Propuesto
Tirante de agua (h)	Variable	Iterado

De la tabla anterior se puede observar que ahora en vez de aplicar la metodología correspondiente la cual usa las varianzas de las aceleraciones inicial y objetivo, se iterarán valores del tirante de agua, para encontrar los resultados óptimos de sintonización de la masa. Lo anterior es posible ya que la masa, la rigidez y el amortiguamiento son todos función del tirante de agua.

Para la posición de las pantallas disipadoras de energía, se usará una relación de solidez de 0.42, y la colocación se hará igual que en lo empleado en la sección anterior.

Para la identificación de los parámetros óptimos se realizó una búsqueda de malla. Las siguientes figuras presentan los resultados de esta búsqueda.

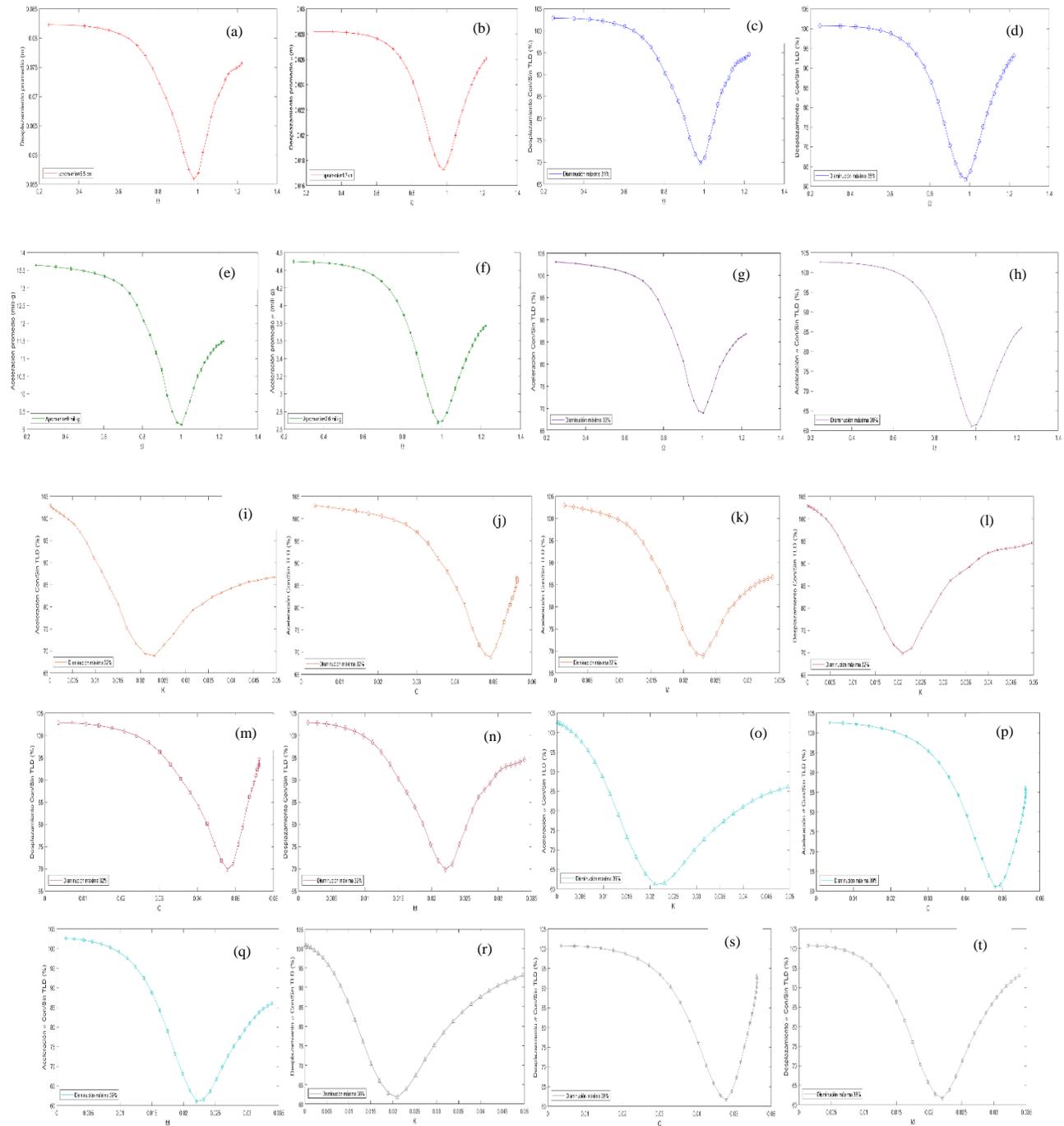


Figura 4.11. Resultados del análisis de identificación de óptimos: (a) Gráfica de Desplazamiento promedio – Relación de frecuencias; (b) Gráfica de Desplazamiento (promedio de varianzas) – Relación de frecuencias (c) Gráfica de Desplazamiento promedio con/sin TLD – Relación de frecuencias (d) Gráfica de Desplazamiento (promedio de varianzas) con/sin TLD – Relación de frecuencias (e) Gráfica de aceleración promedio con/sin TLD – Relación de frecuencias (f) Gráfica de aceleración (promedio de varianzas) con/sin TLD – Relación de frecuencias (g) Gráfica de aceleración promedio con/sin TLD – Relación de frecuencias (h) Gráfica de Desplazamiento (promedio de varianzas) con/sin TLD – Relación de frecuencias (i) Gráfica de aceleración promedio con/sin TLD – Relación de rigideces (j) Gráfica de aceleración promedio con/sin TLD – Relación de amortiguamiento (k) Gráfica de aceleración promedio con/sin TLD – Relación de masas (l) Gráfica de Desplazamiento promedio con/sin TLD – Relación de rigideces (m) Gráfica de Desplazamiento promedio con/sin TLD – Relación de amortiguamientos (n) Gráfica de Desplazamiento promedio con/sin TLD – Relación de masas (o) Gráfica de aceleraciones (promedio de varianzas) con/sin TLD – Relación de rigideces (p) Gráfica de aceleraciones (promedio de varianzas) con/sin TLD – Relación de amortiguamientos (q) Gráfica de aceleraciones (promedio de varianzas) con/sin TLD – Relación de masas (r) Gráfica de Desplazamiento (promedio de varianzas) con/sin TLD – Relación de rigideces (s) Gráfica de Desplazamiento (promedio de varianzas) con/sin TLD – Relación de amortiguamientos (t) Gráfica de Desplazamiento (promedio de varianzas) con/sin TLD – Relación de masas

Tabla 4.6.- Resumen de los análisis sistemáticos para el sistema de 2 GDL

Abcisa	Ordenada	Desplazamiento mínimo (cm)	Aceleración mínima (mili-g)	Disminución máxima (%)	Figura
Relación de frecuencias	Promedio del desplazamiento máximo absoluto	5.5	-	-	(a)
Relación de frecuencias	Desplazamiento promedio de las desviaciones estándar	1.7	-	-	(b)
Relación de frecuencias	Relación de respuestas de desplazamientos máximos	-	-	31	(c)
Relación de frecuencias	Relación del desplazamiento promedio de las desviaciones estándar	-	-	38	(d)
Relación de frecuencias	Promedio de la aceleración máxima absoluta	-	9	-	(e)
Relación de frecuencias	Aceleración promedio de las desviaciones estándar	-	2.5	-	(f)
Relación de frecuencias	Relación de respuestas de aceleraciones máximas	-	-	32	(g)
Relación de frecuencias	Relación de aceleraciones promedio de las desviaciones estándar	-	-	39	(h)
Relación de rigideces	Relación de respuestas de aceleraciones máximas	-	-	32	(i)
Relación de amortiguamientos	Relación de respuestas de aceleraciones máximas	-	-	32	(j)
Relación de masas	Relación de respuestas de aceleraciones máximas	-	-	32	(k)
Relación de rigideces	Relación de respuestas de desplazamientos máximos	-	-	32	(l)
Relación de amortiguamientos	Relación de respuestas de desplazamientos máximos	-	-	32	(m)
Relación de masas	Relación de respuestas de desplazamientos máximos	-	-	32	(n)
Relación de rigideces	Relación de aceleraciones promedio de las desviaciones estándar	-	-	39	(o)
Relación de amortiguamientos	Relación de aceleraciones promedio de las desviaciones estándar	-	-	39	(p)
Relación de masas	Relación de aceleraciones promedio de las desviaciones estándar	-	-	39	(q)
Relación de rigideces	Relación del desplazamiento promedio de las desviaciones estándar	-	-	39	(r)
Relación de amortiguamientos	Relación del desplazamiento promedio de las desviaciones estándar	-	-	39	(s)
Relación de masas	Relación del desplazamiento promedio de las desviaciones estándar	-	-	39	(t)

La tabla 4.6 que se muestra anteriormente presenta un resumen de resultados para los análisis sistemáticos del modelo de 2 grados de libertad sometido a fuerzas producidas por viento, los resultados sobre los cuales se pone un mayor énfasis son los desplazamientos y las aceleraciones, tratando de encontrar los parámetros óptimos para los cuales se obtenga una mayor disminución de estos.

Los parámetros óptimos se obtuvieron en función de la relación de rigideces, la relación de amortiguamientos, la relación de masas y la relación de frecuencias.

Se observa tanto en las gráficas anteriores como en la tabla 4.6, que la disminución tanto de las aceleraciones máximas, como de los desplazamientos máximos es de un 31%, comparando la estructura sin MSSE, (modelada como 1 oscilador de 1GDL), contra la estructura equipada con MSSE (modelada como un oscilador de 2 GDL), para las 30 simulaciones sistemáticas de fuerzas producidas por el viento; mientras si se habla del promedio de las desviaciones estándar tanto de aceleración como de desplazamiento, se logró una disminución del 39 %.

Dado que se hizo variar el tirante del agua en las simulaciones, esto mismo hizo variar la masa, la rigidez y el amortiguamiento de la MSSE, por lo que el punto donde se logra la mayor disminución en las gráficas corresponde al parámetro que se nombrará como óptimo.

De lo anterior es posible observar que conforme con la teoría de los TLD's, al sintonizar las frecuencias de la estructura principal con la de la MSSE, se logra la mayor disminución; en la tabla 4.7 se muestra un resumen de los parámetros óptimos de diseño de la MSSE, los cuales fueron obtenidos a partir de dividir ya sea la masa, rigidez o amortiguamiento de la MSSE en el punto donde se observó la mayor disminución ya sea de desplazamientos o aceleraciones, entre los parámetros originales de la estructura sin MSSE.

Tabla 4.7.- Propiedades de la MSSE

Propiedad de la MSSE	Valor del parámetro óptimo (%)
<i>Masa</i>	2.20
<i>Periodo</i>	0.99
<i>Frecuencia natural</i>	0.99
<i>Frecuencia natural circular</i>	0.99
<i>Rigidez</i>	2.20
<i>Amortiguamiento</i>	4.80

5. ANÁLISIS SISTEMÁTICO DE UN EDIFICIO SOMETIDO A CARGAS DE VIENTO SIN Y CON MSSE

5.1. Modelado estructural en programa computacional

Se modeló un edificio alto en un programa comercial. El modelo matemático se empleó para determinar la siguiente información:

- 1.- Periodo fundamental de la estructura en la dirección en la cual se desea que actúe el MSSE, ya que se necesitará para cálculos posteriores.
- 2.- Masa total de la estructura.
- 3.- Factor de participación modal del modo cuya respuesta que se va mitigar.

Con la información preliminar de los análisis, se calcula la masa generalizada del modo de interés y posteriormente se calcula la masa líquida sintonizada, la cual deberá tener una masa aproximadamente del 2% de la masa modal, esto con el fin de obtener el parámetro más efectivo para la reducción de la respuesta. Aunado a lo anterior, también se estiman la rigidez y el amortiguamiento de la MSSE.

La Figura 5.1 muestra la vista tridimensional (parte izquierda) y el alzado lateral (parte derecha) de la estructura sobre la cual se instalará el oscilador que representa la masa líquida sintonizada.

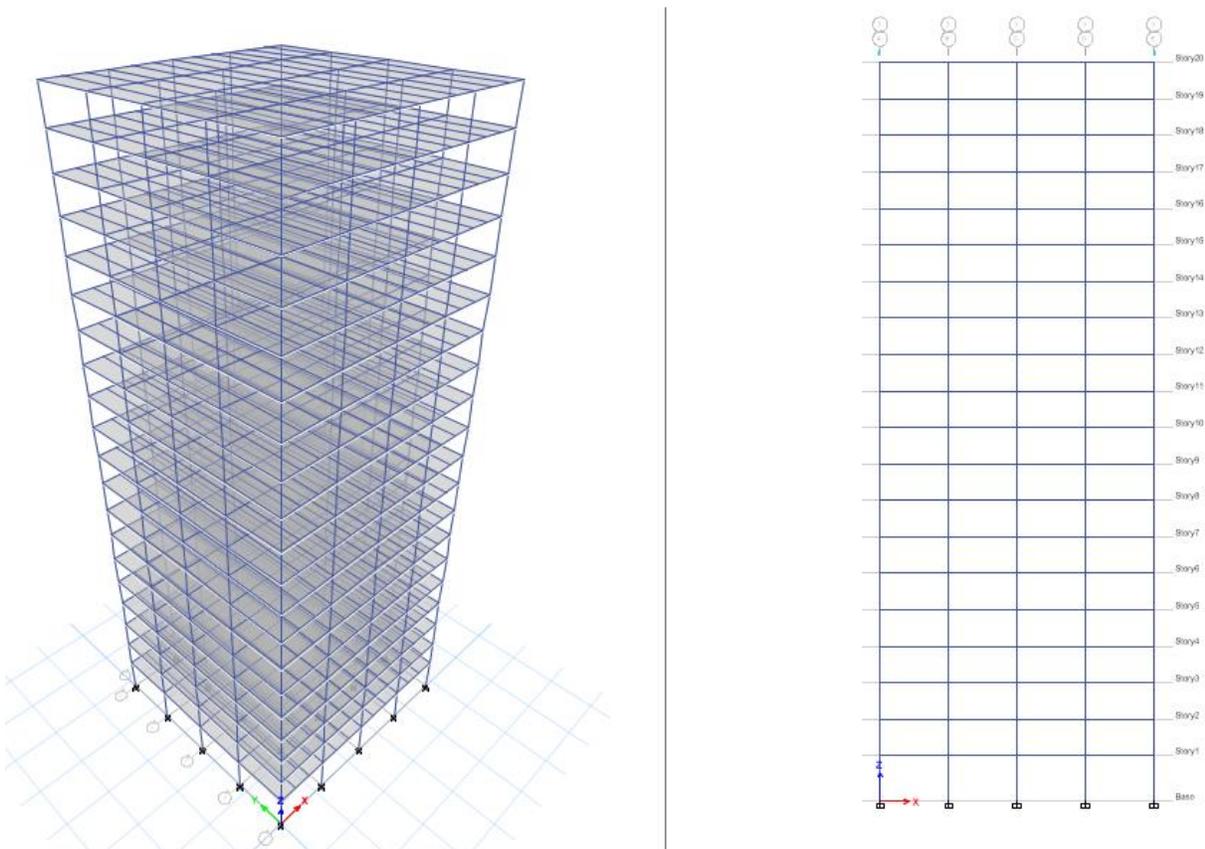


Fig. 5.1 Vista en 3D y lateral de la estructura en la cual se desea colocar una MSSE

Para el edificio modelado, la MSSE se ubicará en el centro de masa del edificio, que coincide con el centro geométrico, y éste a su vez coincide con el centro de torsión del mismo edificio en estudio. Cabe recalcar que según Lago et. al. (2019), conviene posicionar a las masas líquidas sintonizadas en aquellos lugares donde no se generen torsiones importantes en el edificio. Si el edificio fuera de una forma irregular muy pronunciada, o tuviera grandes aberturas en el sitio donde se quisiera colocar la masa líquida sintonizada, lo ideal sería colocar varios tanques de menores dimensiones, pero manteniendo la misma filosofía de no generar modificaciones en el centro de torsión de la estructura. La Figura 5.2 muestra la vista en planta del edificio a tratar en este trabajo y la ubicación de la masa líquida sintonizada.

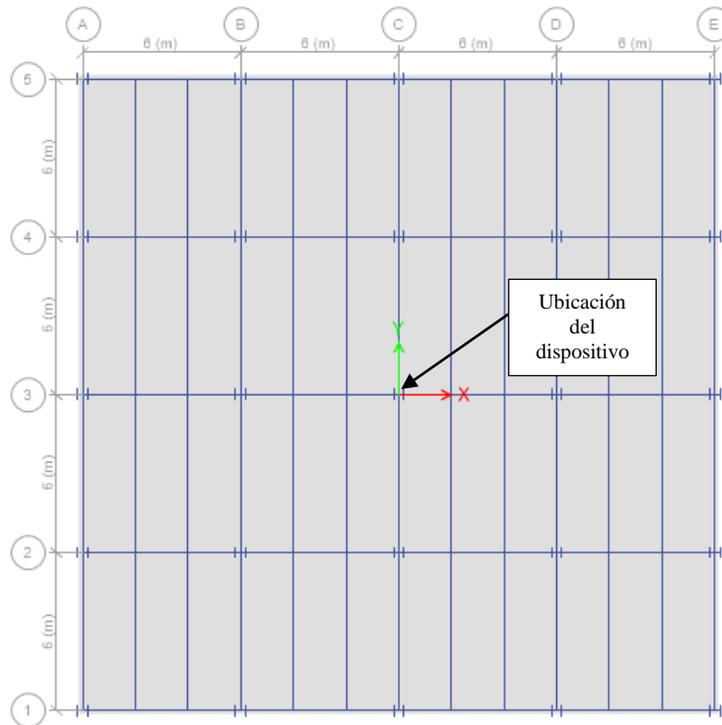


Fig. 5.2 Vista en planta de la estructura en la cual se desea colocar la MSSE

5.2 Caracterización del viento para análisis

De acuerdo con el Manual de Diseño de Obras Civiles para Diseño por Viento (MDOCD-Viento, 2020), en el apéndice 4B.2, CONDICIONES Y ESTADOS LÍMITE DE SERVICIO, nos presenta los valores límite permisible para las condiciones de servicio de estructuras sometidas a la acción del viento. La revisión de los estados límite se realiza independientemente del análisis estático o dinámico. Asimismo, el manual indica en la misma sección que el diseñador podrá optar por revisar los estados límite de servicio para las velocidades asociadas con periodo de retorno de 10 o 50 años.

Por otro lado, el MDOCD-Viento, 2020, la velocidad media para análisis dinámicos, V'_D , la cual corresponde a un tiempo promedio de 10 minutos, está definida como:

$$V'_D = \frac{F_T F_{rz} V_R}{3.6} \quad (42)$$

En la ecuación anterior se divide el término entre 3.6 para pasar de km/h a m/s; F_T corresponde al factor de topografía local, adimensional, toma en cuenta el efecto topográfico local del sitio donde se desplantará la estructura. Por ejemplo, si la construcción se localiza en laderas o cimas de colinas o montañas, de altura importante con respecto al nivel general del terreno en los alrededores, y donde es muy probable que se generen aceleraciones que incrementen la velocidad del flujo del viento. De acuerdo con las características topográficas del sitio, en la Tabla 5.4 se presentan los valores o expresiones para determinar el factor de topografía.

La Tabla 5.1 se presenta Factor de topografía para el viento medio (MDOCD-Viento, 2020), como se puede observar en ese apartado para los terrenos expuestos se usa otro grupo de ecuaciones, referidas a promontorios y terraplenes, y que dependen de la altura de los mismos y la exposición del terreno al viento; para este ejemplo se asume que el edificio se va a desplantar en un terreno prácticamente plano, es decir, que posee una ausencia de cambios topográficos importantes, y con pendientes menores al 5%, lo que corresponde según la tabla que se muestra a continuación a un sitio normal, por lo que no será necesario el uso del otro grupo de ecuaciones, ya que el factor de topografía para este tipo de terreno es igual a la unidad.

Tabla 5.1. Factor de topografía para el viento medio (MDOC-Viento, 2020)

Sitios	Ejemplos de topografía local	F_T
Protegidos	Valles cerrados	0.9
Normales	Terreno prácticamente plano: Ausencia de cambios topográficos importantes, con pendientes menores de 5 %	1.0
Expuestos	Promontorios: Montes, cerros, lomas, cimas, colinas, montañas	Ver las ecuaciones:
	Terraplenes: Peñascos, acantilados, precipicios, diques, presas	2.6 a 2.8 MDOC-2020

F'_{rz} es el factor de exposición y es adimensional, considera el efecto combinado de la rugosidad local, y de la variación de la velocidad con la altura, este parámetro se obtiene con las siguientes expresiones:

$$F'_{rz} = 0.702\bar{b} \quad (43)$$

$$F'_{rz} = 0.702\bar{b} \left(\frac{z}{10} \right)^{\alpha'} \quad (44)$$

$$F'_{rz} = 0.702\bar{b} \left(\frac{\delta}{10} \right)^{\alpha'} \quad (45)$$

La literal \bar{b} es el coeficiente de escala de rugosidad para la velocidad media, es un valor adimensional que se obtiene de la Tabla 5.2 que se muestra a continuación. El exponente de la variación de la velocidad media con la altura, es un valor adimensional y se denota por la literal α' . La altura media a partir del nivel medio del terreno al cual se desea calcular la velocidad media del viento se denota por la literal z .

Tabla 5.2. Valores para caracterizar el perfil de viento medio (MDOCD-Viento, 2020)

Categoría del terreno	\bar{b}	α'
1	1.17	0.10
2	1.00	0.14
3	0.82	0.19
4	0.61	0.26

Los valores de la altura de gradiente, δ , en m, se presentan en la Tabla 5.3 para cada categoría del terreno. Todos los valores anteriores son función de la categoría del terreno.

Tabla 5.3. Valores para caracterizar el perfil de viento medio con la altura gradiente (MDOCD-Viento, 2020)

Categoría del terreno	c	α	δ (m)
1	1.142	0.061	280
2	1.000	0.095	350
3	0.832	0.140	410
4	0.668	0.192	470

La Tabla 5.4 resume las categorías del terreno según su rugosidad.

Tabla 5.4. Valores para categorizar el terreno de desplante (referencia 10)

Cat.	Descripción	Ejemplos	Limitaciones
1	Terreno abierto, prácticamente plano, sin obstrucciones y superficies de agua	Franjas costeras planas, bahías, zonas de pantanos o de lagos, campos aéreos, pastizales y tierras de cultivo sin setos o bardas, superficies nevadas planas	Las obstrucciones existentes tienen alturas menores que 1.5 m. La longitud mínima de este tipo de terreno en la dirección del viento debe ser de 2000 m o 20 veces la altura de la construcción por diseñar, la que sea mayor
2	Terreno plano u ondulado con pocas obstrucciones	Campos de cultivo o granjas con pocas obstrucciones tales como setos o bardas, árboles y construcciones dispersas.	Las obstrucciones existentes tienen alturas de 1.5 a 5 m, la longitud mínima debe ser la mayor entre 1500 m o 20 veces la altura de la construcción por diseñar
3	Terreno cubierto por numerosas obstrucciones estrechamente espaciadas	Áreas urbanas, suburbanas y de bosques, o cualquier terreno con numerosas obstrucciones estrechamente espaciadas. El tamaño de las construcciones corresponde al de las casas y viviendas.	Las obstrucciones existentes presentan alturas de 3 a 10 m. La longitud mínima de este tipo de terreno en la dirección del viento debe ser 500 m o 20 veces la altura de la construcción, la que sea mayor.
4	Terreno con numerosas obstrucciones largas,	Grandes centros urbanos y complejos industriales bien desarrollados.	Por lo menos el 50 % de los edificios tiene una altura mayor que 20 m. las obstrucciones miden de 10 a 30 m de altura. La longitud mínima de este tipo

altas y estrechamente espaciadas	de terreno en la dirección del viento debe ser la mayor entre 400 m y 20 veces la altura de la construcción.
----------------------------------	--

Tanto en el procedimiento de análisis estático como dinámico, intervienen factores que dependen de las condiciones topográficas, y de exposición locales donde se desplanta la construcción (de los cuales se mencionaron los del análisis dinámico en párrafos anteriores).

En la Tabla 5.4 se consignan 4 categorías de terrenos atendiendo a su rugosidad; en la dirección de viento que se esté analizando el terreno inmediato a la estructura deberá presentar la misma categoría o rugosidad, cuando menos en una distancia denominada longitud mínima de desarrollo.

La velocidad regional de ráfaga, V_R , se determina tomando en consideración tanto la importancia de la estructura como la localización geográfica de su sitio de desplante y está asociada a ráfagas de 3 segundos. Para la estructura en estudio, se supone que se ubica en Córdoba, en el estado de Veracruz.

La Tabla 5.5 muestra la velocidad regional, así como los parámetros que caracterizan la rugosidad para la ubicación mencionada.

Tabla 5.5. Parámetros para la obtención del perfil de velocidad media para el análisis dinámico

Parámetro	Valor	Unidades
<i>Velocidad regional VR</i>	129.23	km/h
<i>Periodo de retorno TR</i>	10	Años
<i>Categoría de terreno</i>	2	-
<i>Factor de topografía</i>	1	-
<i>b</i>	1.0	-
<i>α'</i>	0.14	-
<i>δ</i>	350	m

La Figura 5.3 muestra el resultado del perfil de velocidad media para la ciudad de Córdoba, donde cada punto azul representa la velocidad media del viento en el nivel del entresuelo del edificio en estudio.

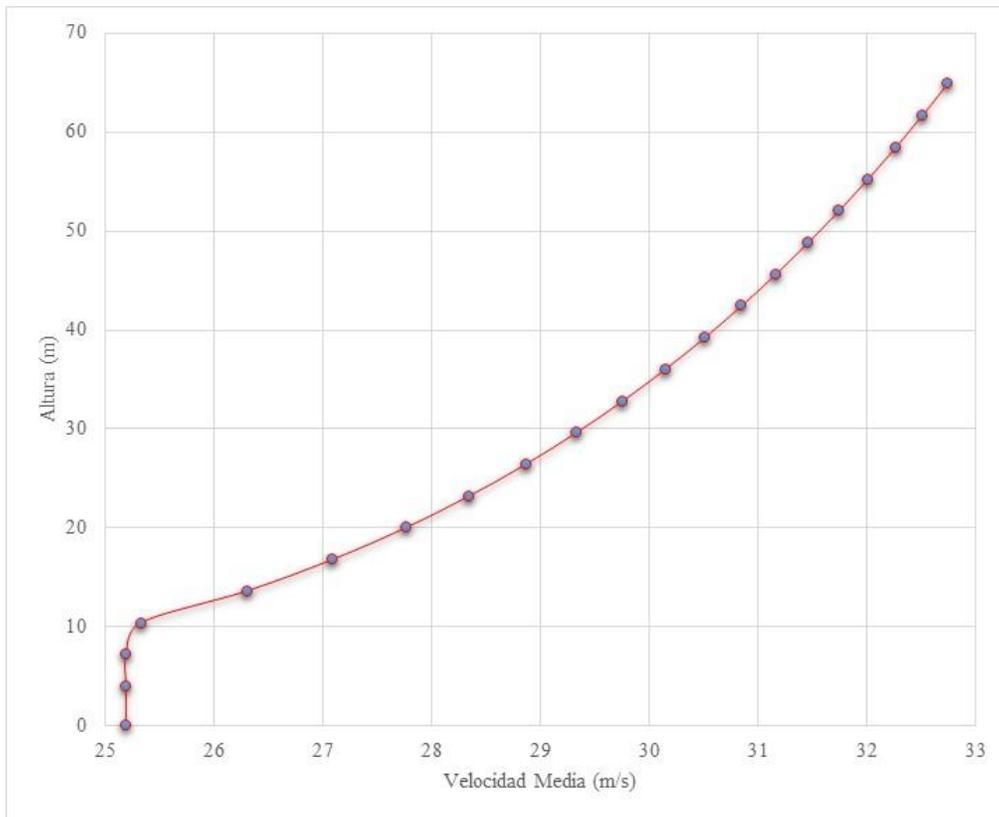


Fig. 5.3 Perfil de velocidad media de Córdoba para periodo de retorno de 10 años

Para llevar a cabo el análisis eólico de la estructura es necesario obtener las fuerzas que actúan en ella. Para ello se utiliza el programa *SVTpro* (Ortegón Esparza y Pozos Estrada, 2016) el cual realiza la simulación de señales estacionarias en el plano con el empleo de un modelo de media móvil y autoregresión. El programa permite utilizar diferentes funciones de densidad de potencia espectral para caracterizar el viento turbulento. En el presente estudio se utiliza la función de densidad de Kaimal, la cual toma en cuenta la variación de la velocidad media del viento respecto a la altura.

Para determinar las fuerzas de viento y realizar el análisis transitorio es necesario convertir las velocidades del viento a fuerzas actuantes en la estructura, de acuerdo con la Ec. (40).

Para esta estructura se realizarán un total de 15 simulaciones sistemáticas, esto es, si el edificio cuenta con 20 entresijos, y se requiere hacer 15 simulaciones sistemáticas, formando un total de 300 juegos de señales, las cuales se obtendrán con el programa anteriormente mencionado, usando la suma de la velocidad media del viento más la suma de la velocidad del viento turbulento.

La Figura 5.4 muestra la interfaz del programa *SVTpro* (Ortegón Esparza y Pozos Estrada, 2016). La Figura 5.5 muestra la interfaz para introducir el perfil de velocidad media del viento para obtener las señales necesarias para usarlas en el programa de análisis estructural, pueden ser introducidas manualmente o cargadas mediante un archivo de texto.

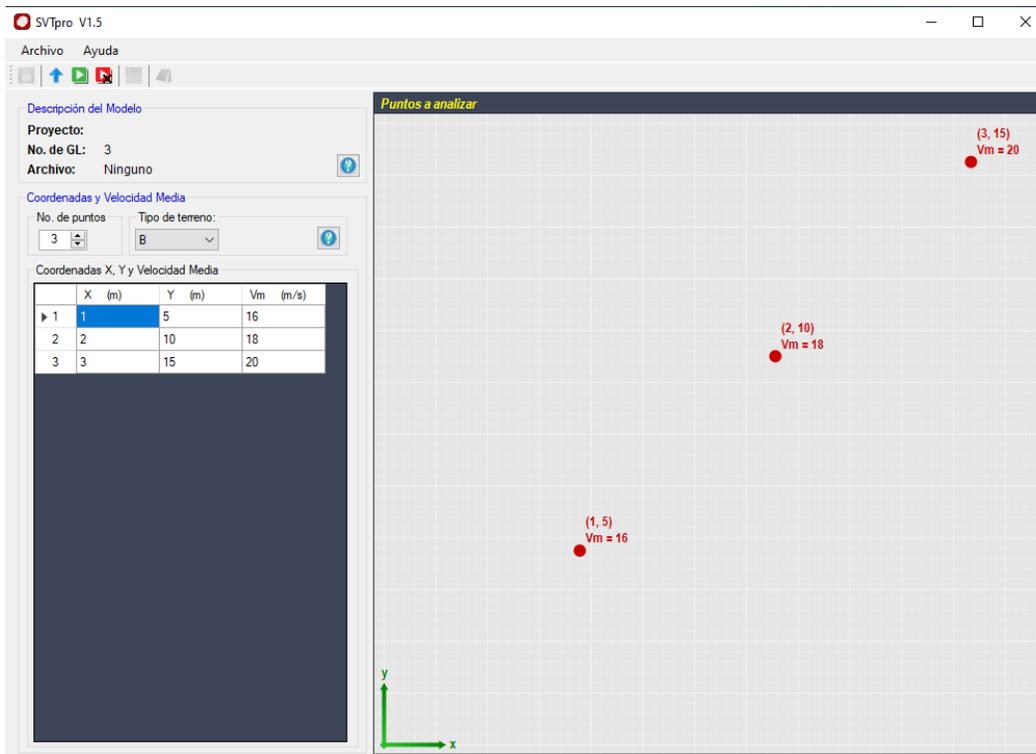


Fig. 5.4 Interfaz del programa SVT pro

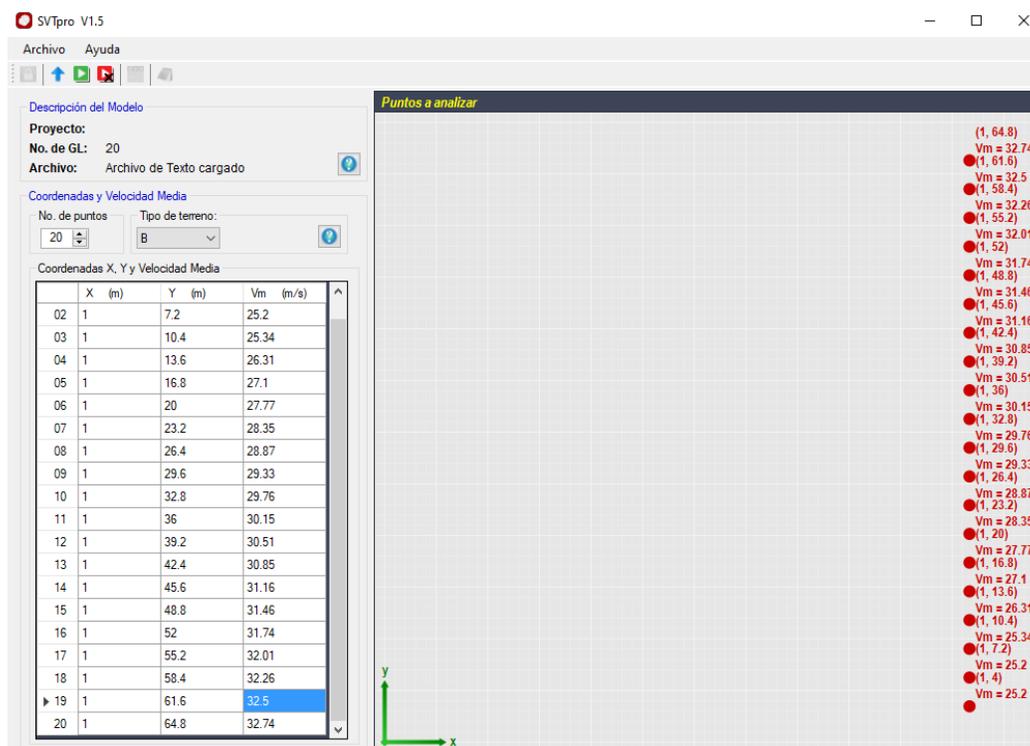


Fig. 5.5 Interfaz del programa SVT pro

La figura 5.6 muestra la pantalla para realizar simulaciones sistemáticas (se realizaron 15), esto con el fin de realizar un total de 45 simulaciones en edificios, 15 para edificios a base de marcos rígidos, 15 para edificios a base de marcos contraventados, y 15 con edificios de marcos flexibles equipados con TLD. Las simulaciones emplearon el espectro de Kaimal y un tiempo total de 600 segundos.

Los resultados deben de ser los de simulación de viento turbulento (Figura 5.7), los cuales se extraen como archivo de texto y mediante hojas de cálculo o de programas externos se convierten esas 15 señales a fuerzas, recordando que para cada simulación existirá un total de 100 señales de fuerzas, las cuales corresponden a los 100 nodos del edificio en una dirección de análisis de viento. Posteriormente, se procede a introducir esas 100 señales de fuerzas en el ETABS, como se muestra más adelante.

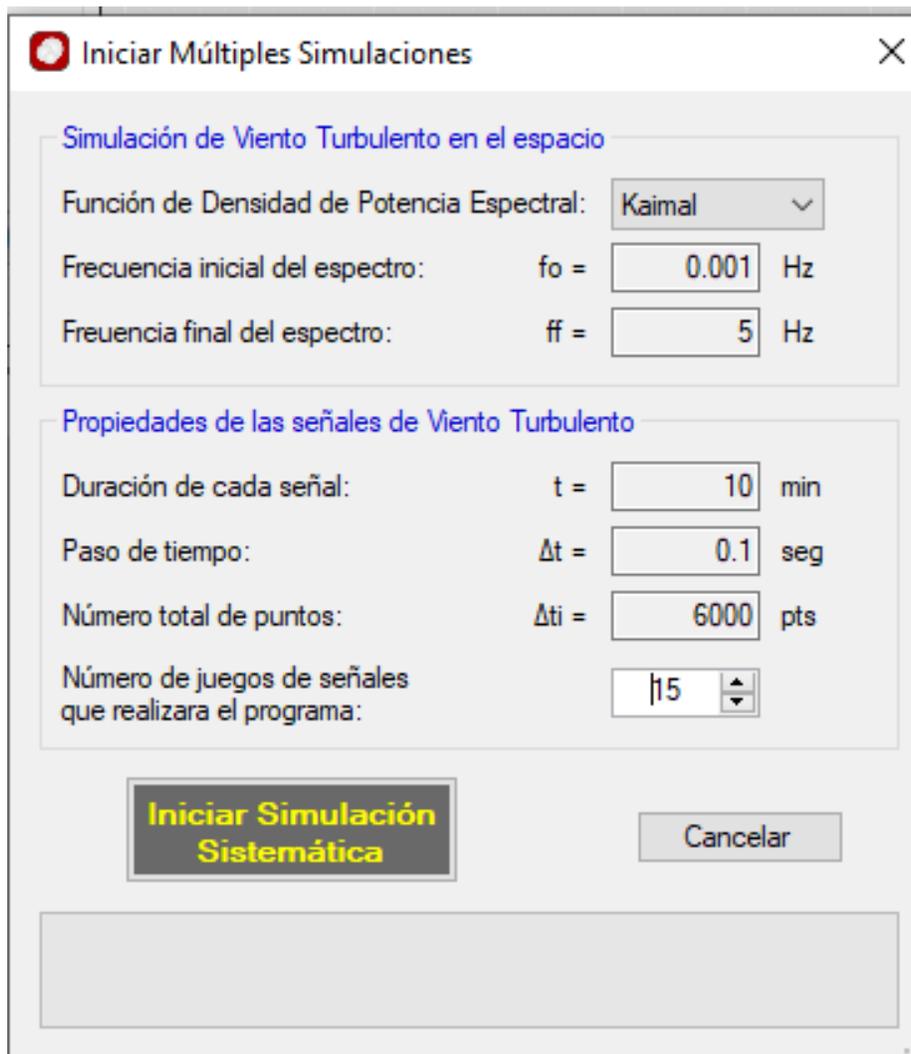


Fig. 5.6 Simulaciones sistemáticas en el programa

Resultados del Modelo ARMA - Simulación Sistemática

Mostrar: Velocidad de Viento Turbulento

Número de simulación: 15 Seleccionar toda la columna

	P 1	P 2	P 3	P 4	P 5	P 6	P 7
0001	31.62237	25.80279	28.76861	27.38851	35.55424	36.76144	38.82997
0002	25.18414	24.4801	25.31284	32.13121	39.8304	37.72398	42.55916
0003	18.12745	23.06136	30.43583	32.61334	41.59385	38.1299	42.38703
0004	22.70804	27.15785	28.98674	27.75143	38.10698	42.12672	39.76562
0005	22.66255	23.13843	29.72991	26.63768	39.00792	38.6223	39.12502
0006	21.08319	23.00853	28.92579	30.15391	39.36082	41.63654	39.0674
0007	24.29327	20.85015	25.67917	31.08578	37.87522	44.63832	37.65111
0008	23.45181	17.00793	21.68738	34.85503	41.17579	46.37889	39.03406
0009	27.0906	24.60866	24.31353	32.52674	40.70201	46.32997	40.23412
0010	32.75188	27.23579	24.44608	31.63151	41.43304	45.24906	37.87549
0011	33.31983	30.19703	24.10801	38.76432	39.3161	44.83726	39.49527
0012	26.3074	39.96421	27.57033	35.29821	35.66496	40.05924	35.67627
0013	41.9664	37.1175	32.32801	27.10665	34.42003	39.96111	37.80443
0014	38.2517	38.163	39.05948	27.89388	35.66073	39.11524	38.748
0015	33.51526	38.42311	30.70927	29.90836	35.90532	36.69201	39.69645

Fig. 5.7 Resultados de las simulaciones sistemáticas para el viento turbulento

5.3 Análisis con el programa ETABS

La Figura 5.8 presenta la creación de casos de carga, incluyendo las señales de fuerzas de viento, en el programa ETABS.

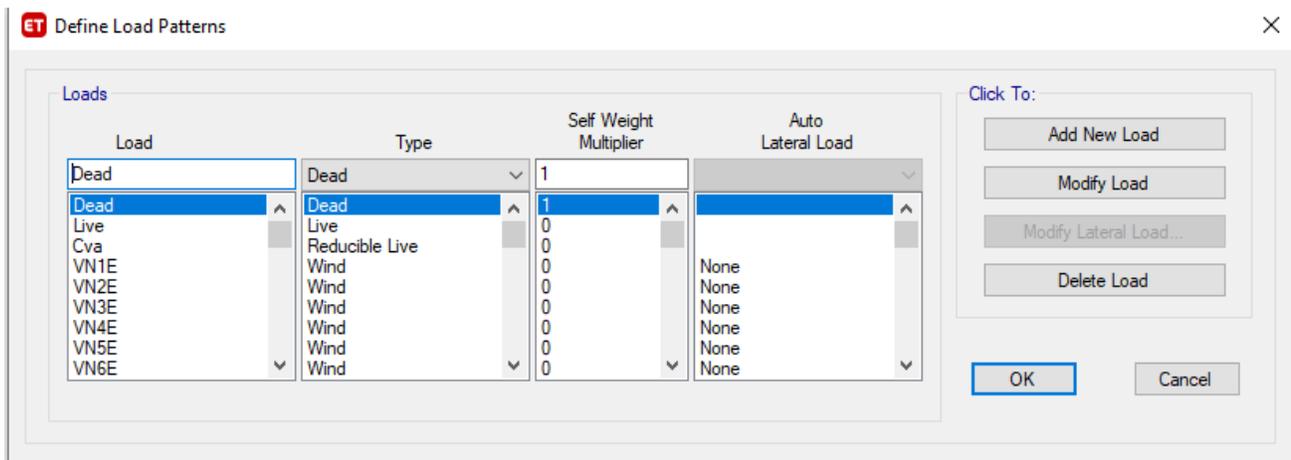


Fig. 5.8 Creación de casos de carga en el ETABS

Para introducir las señales en el programa, se crearán tantos casos de carga como nodos existan en la dirección de análisis; para el caso de este edificio al ser un edificio regular de 5 crujías y 20 niveles, serán un total de 100 casos de carga (únicamente para el análisis dinámico de la estructura sometida a cargas de viento), ya que en los 100 nodos se considera que se encuentran aplicadas las señales de fuerzas dependiendo la altura, la velocidad media del viento turbulento y el área tributaria del nodo en cuestión (figura 5.9).

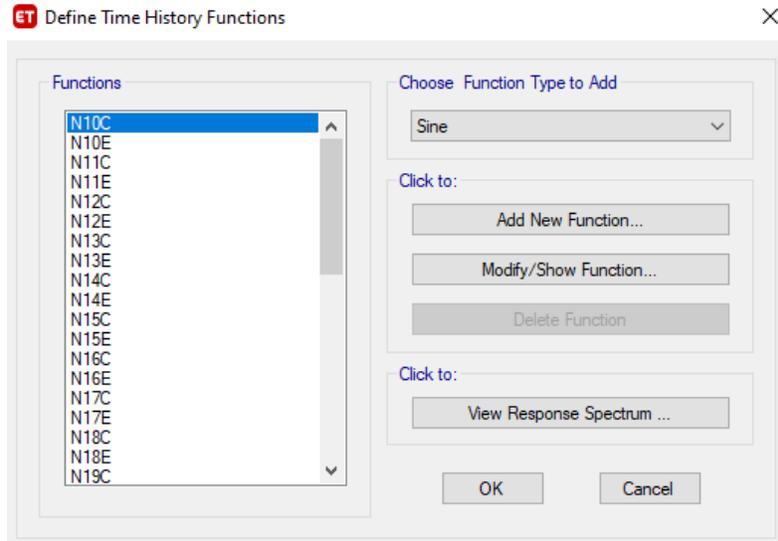


Fig. 5.9 Asignación de señales de fuerzas en el ETABS

Posteriormente se continúa con la asignación de las señales de fuerzas a cada caso de carga, es decir que a cada caso de carga se le asigna una señal de las calculadas anteriormente; esto es, que a los casos de carga asignados a cada nodo corresponde una señal de fuerzas, para el caso de este programa las señales deben de ser asignadas desde un archivo de texto (figuras 5.9 y 5.10).

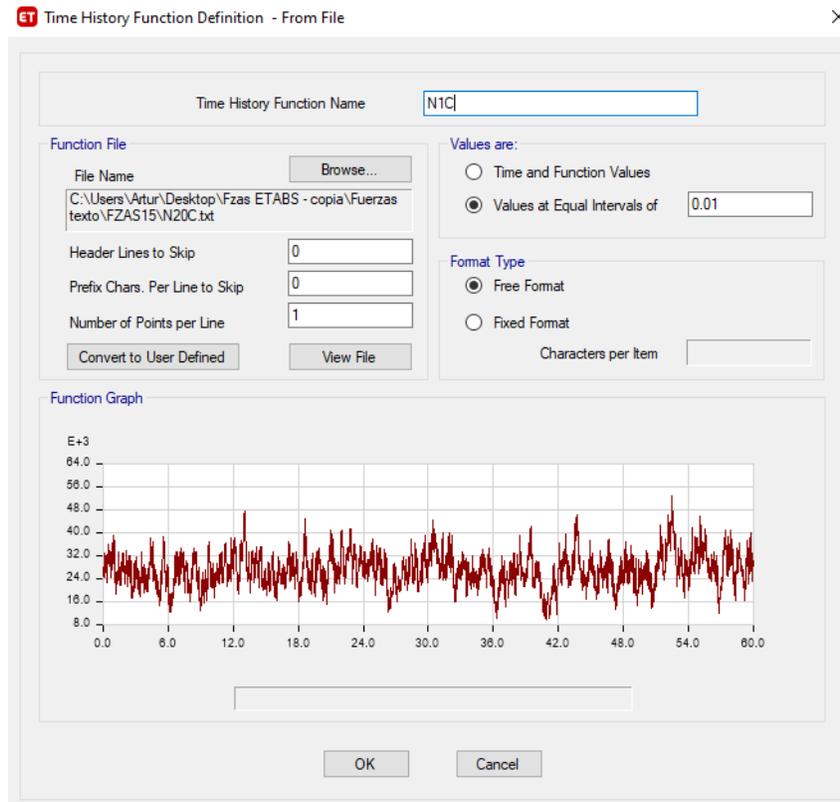


Fig. 5.10 Lectura de señales de fuerzas desde el texto de SVT pro

A cada uno de los nodos en dirección de análisis se le asigna una carga unitaria en las mismas unidades que estén las señales de fuerzas (figura 5.11)

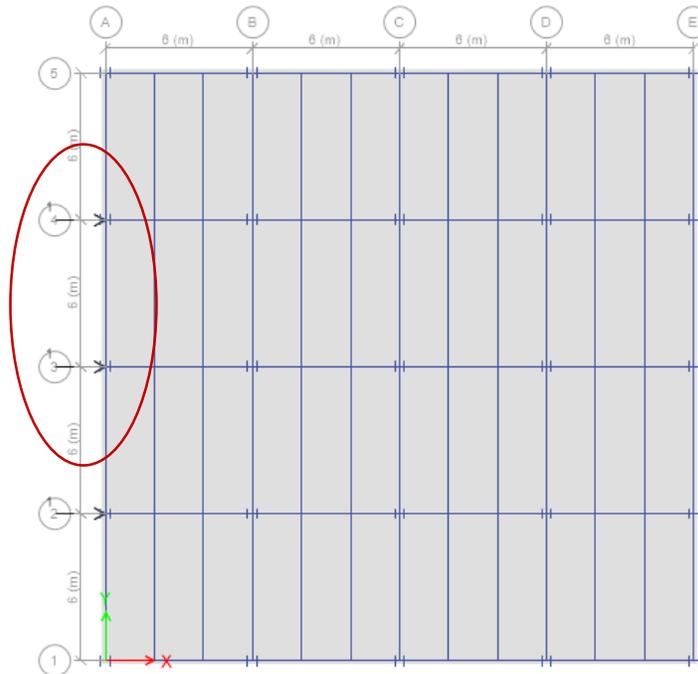


Fig. 5.11 Asignación de fuerzas unitarias por nodo

A cada fuerza unitaria asignada en el caso de carga correspondiente (figura 5.12), se crearán tantos casos como fuerzas unitarias existan.

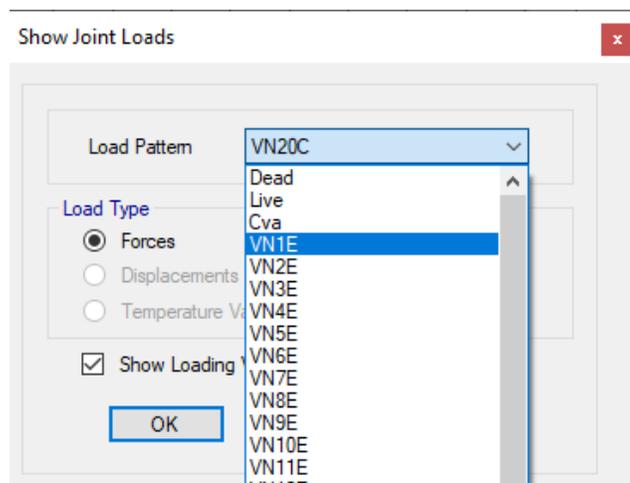


Fig. 5.12 Asignación de casos de carga a las fuerzas unitarias

Una vez terminado el proceso anterior, se procede a continuación con las combinaciones de carga para el análisis dinámico, como se muestra en las figuras 5.13 y 5.14, y como se puede notar es de suma importancia colocar las opciones para análisis de tiempo historia lineal, donde para este ejercicio se seleccionó la opción de análisis lineal modal, posteriormente a cada caso de carga se le asigna su función correspondiente, y se coloca el número total de segundos de la señal (10 minutos o 6000 segundos) a intervalos de 0.1 segundos.

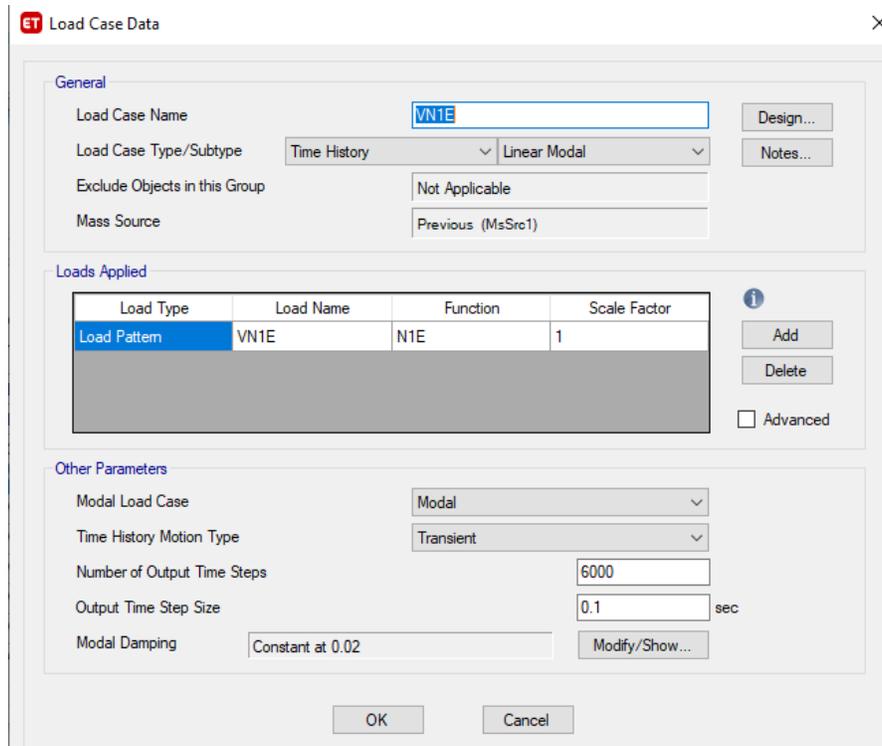


Fig. 5.13 Creación de casos de carga dinámicos

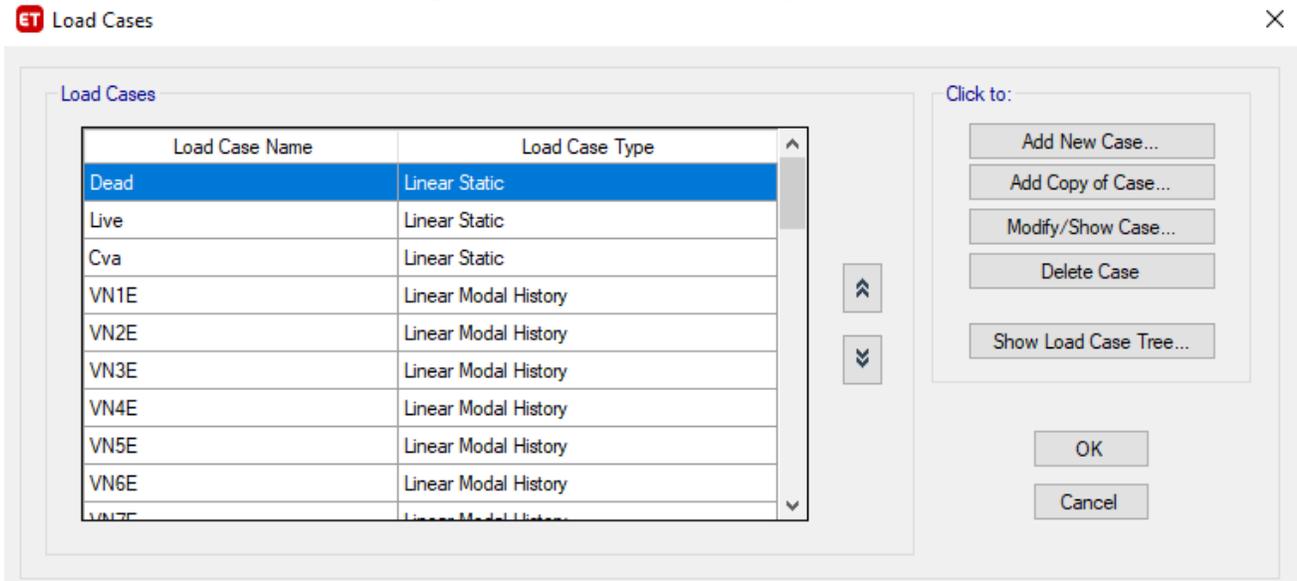


Fig. 5.14 Creación de cargas para el análisis dinámico

El amortiguamiento seleccionado al ser un análisis de viento lineal es del 2% como se aprecia en la figura (5.15), esto se tiene que repetir para cada nodo y cada caso de carga hasta completar todos.

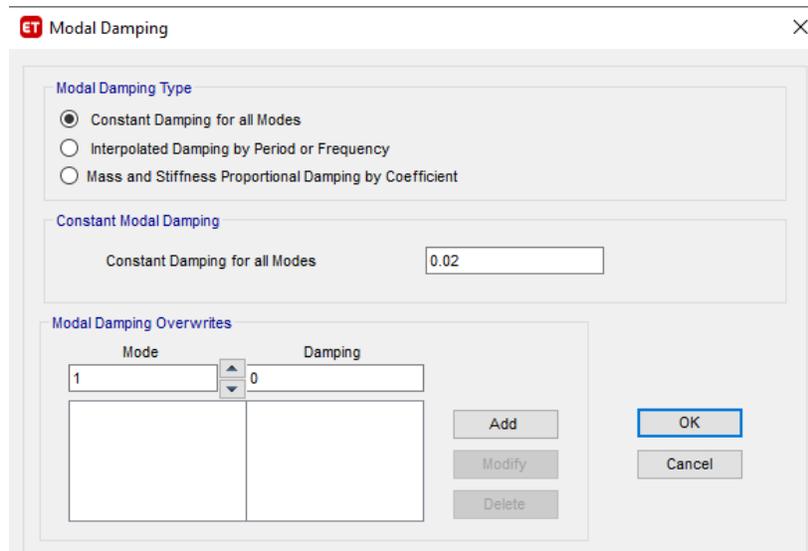


Fig. 5.15 Asignación de amortiguamiento modal de la estructura

En un último caso de carga, se hace un análisis tiempo historia para tener la combinación dinámica de todas las señales, que deben ser aplicadas en conjunto con la carga muerta, el peso propio y la carga viva accidental necesaria para los efectos dinámicos. Lo anterior se ilustra en la figura 5.16.

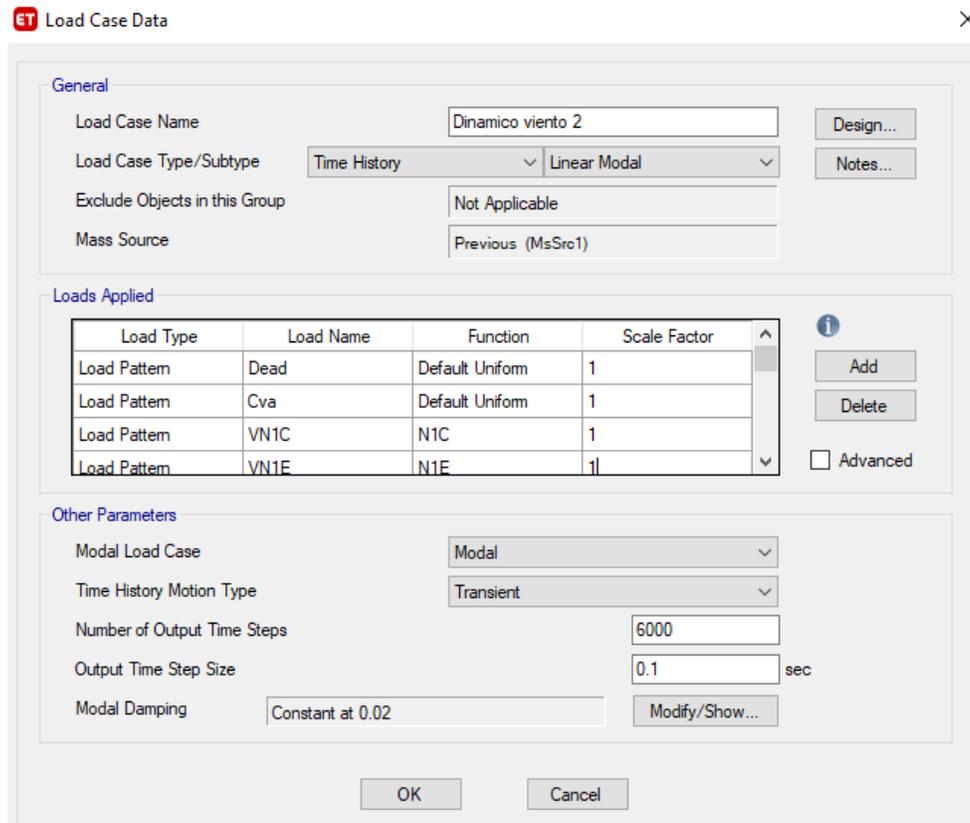


Fig. 5.16 Creación del análisis dinámico de todas las señales

Una vez completados los pasos anteriores, se procede con el análisis usual en el programa de análisis estructural, es decir, se corre el análisis todas las veces o tantos análisis como sean requeridos, y después de esto se extraen los datos que sean necesarios siendo los más importantes los de desplazamiento y las aceleraciones en los entrepisos. Posteriormente para los próximos 15 análisis se equipará la estructura con una MSSE en el nivel de azotea, como se puede apreciar en la figura 5.17.

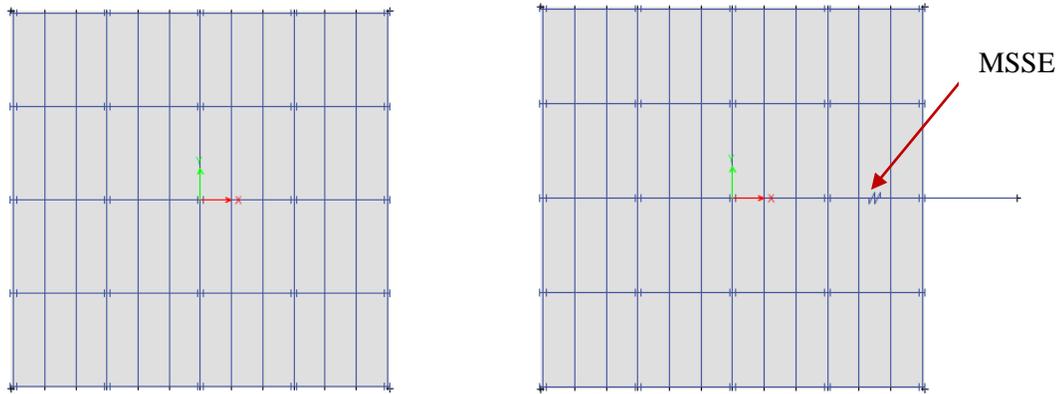


Fig. 5.17 Entrepisos en planta sin/con MSSE

Para el modelado de la MSSE, se tienen en cuenta las siguientes consideraciones:

- 1.- Se debe seleccionar la ubicación de la masa (i.e., el nodo donde se concentrará toda la MSSE), y dibujarlo primero.
- 2.- A continuación, se debe de dibujar el elemento *link* que representará a la MSSE, pero teniendo siempre en cuenta que se debe de partir del punto de la estructura hacia el nodo de la masa y no al revés, ya que en ese caso la MSSE no funcionaría como el oscilador planteado.
- 3.- En el apartado de asignación de masas para el análisis modal, deben seleccionarse las casillas de patrones de carga y masas adicionales, además de que se debe retirar la opción de concentrar la masa en el nivel de entrepisos, ya que esto haría que no se tome en cuenta la MSSE como un oscilador (figura 5.18).

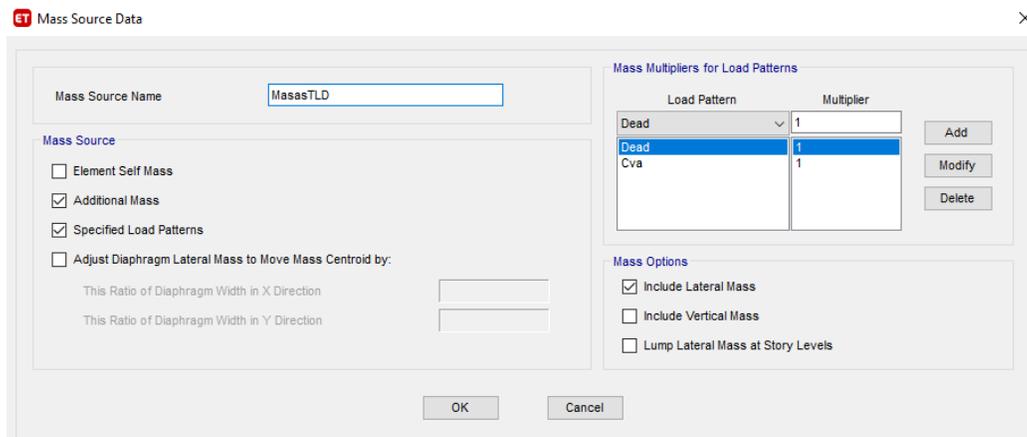


Fig. 5.18 Asignación de masas para el análisis modal

4.- Se asignan las propiedades a la MSSE como se indicó en el capítulo del oscilador, teniendo en cuenta que esta vez las propiedades a asignar serán las óptimas que se encontraron en el ejercicio de resolver el oscilador de 2 GDL ante 30 simulaciones de viento turbulento, esto es, asignar las propiedades que representan una mayor disminución en la respuesta tanto de aceleraciones como de desplazamientos.

Más detalles de la modelación de la MSSE con el programa ETABS se presentan en el Apéndice B. De los datos obtenidos del edificio en estudio, los más importantes son el peso, del cual podemos obtener la masa, y los factores de participación modal de la masa, ya que, recordando, la masa líquida sintonizada se usará para disminuir la componente de la aceleración de un solo modo, (caso de este edificio sería el modo que más contribuya con masa modal) generalmente es la relacionada al primer modo, pero pueden ser los modos superiores dependiendo de la estructuración del edificio. En la tabla 5.5 se presenta un resumen de propiedades del edificio en estudio. Se observa en la tabla 5.5 que el peso total del edificio es 12,428 ton_f, por lo tanto, su masa total será 1,267 ton_m, y la masa modal del primer modo se puede apreciar también en la misma tabla.

De los resultados obtenidos a partir de los análisis sistemáticos de osciladores de 2 grados de libertad, se usarán los parámetros óptimos para obtener la mayor disminución en la respuesta de aceleraciones y desplazamientos con las masas líquidas sintonizadas, de lo anterior, los parámetros a usar se muestran en la tabla 5.6.

Tabla 5.5.- Propiedades de la estructura en la dirección de análisis

Propiedad	Valor	Unidad
<i>Masa</i>	1,267,340	kg _m
<i>Masa modal</i>	987,640	kg _m
<i>Periodo</i>	3.19	s
<i>Frecuencia natural</i>	0.314	Hz
<i>Frecuencia natural circular</i>	1.972	rad/s
<i>Rigidez</i>	3,838,790	N/m
<i>Amortiguamiento</i>	77,900	N/(m/s)

Tabla 5.6.- Propiedades de la MSSE

Propiedad	Valor	Unidad
<i>Masa</i>	21,700	kg _m
<i>Periodo</i>	3.19	s
<i>Frecuencia natural</i>	0.31	Hz
<i>Frecuencia natural circular</i>	1.97	rad/s
<i>Rigidez</i>	84,450	N/m
<i>Amortiguamiento</i>	3,740	N/(m/s)

Con los valores anteriores se procede a ingresar las propiedades de la MSSE en el programa ETABS, como se muestra en las Figuras 5.19 a 5.21.

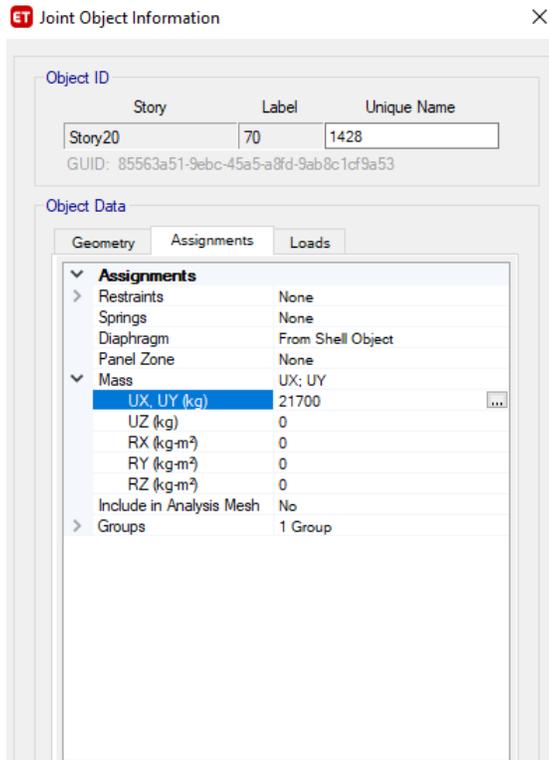


Fig. 5.19 Asignación de masas para la MSSE

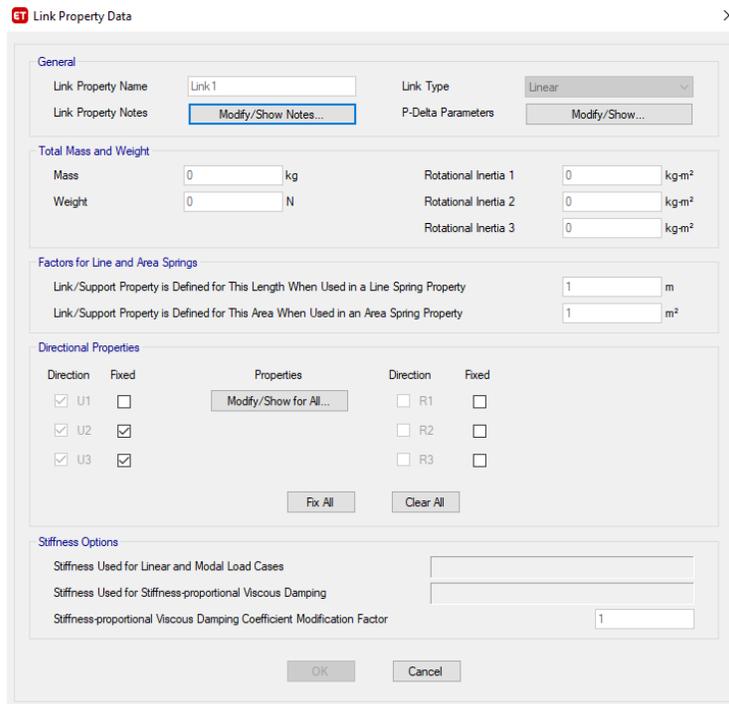


Fig. 5.20 Fijación de GDL para la MSSE

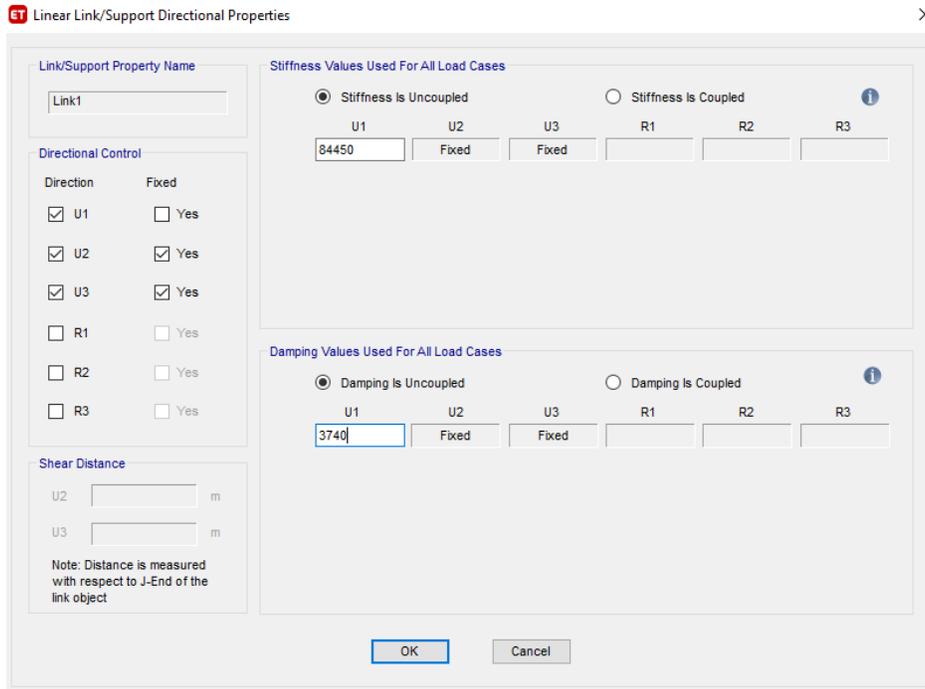


Fig. 5.21 Asignación de rigidez y amortiguamiento para la MSSE

Para la caracterización de la MSSE es necesario conocer los ejes locales del oscilador, para saber qué grados de libertad fijar o empotrar, dependiendo de cuáles sean los que se vayan a utilizar. La Figura 5.22 muestra los ejes locales para la MSSE.

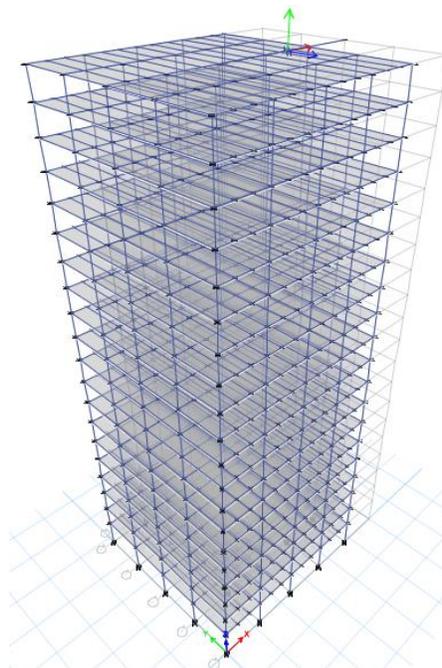


Fig. 5.22 Ejes locales para la MSSE

Por último, se considerará el edificio adicionando contraventeos HHS 10 x 10 x 0.375 en la dirección de análisis del viento, para comparar su efectividad contra la adición de la MSSE. El edificio con contraventeos se muestra en la figura 5.23.

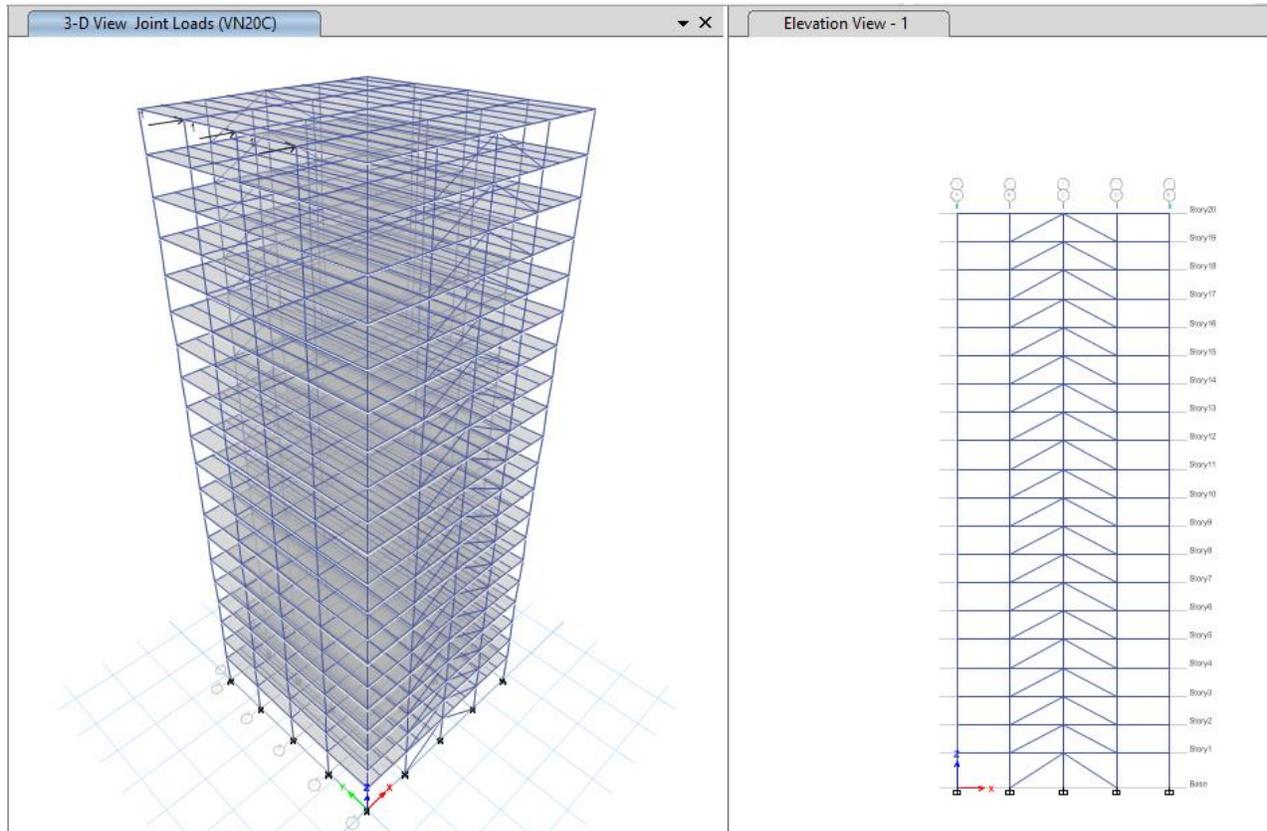


Fig. 5.23 Modelo de edificio con contraventeos

5.4 Resultados

La figura 5.24 muestra las aceleraciones máximas absolutas resultado de las 15 simulaciones en el edificio de marcos rígidos sin y con MSSE. También se muestran las aceleraciones promedio de los máximos absolutos de las simulaciones anteriormente mencionadas. Se observa en la figura 5.24 que el empleo del sistema TLD es efectivo para reducir la aceleración máxima absoluta, así como la aceleración máxima promedio en todos los niveles del edificio. También se observa que la máxima reducción se presenta en la parte alta del edificio, como se esperaba.

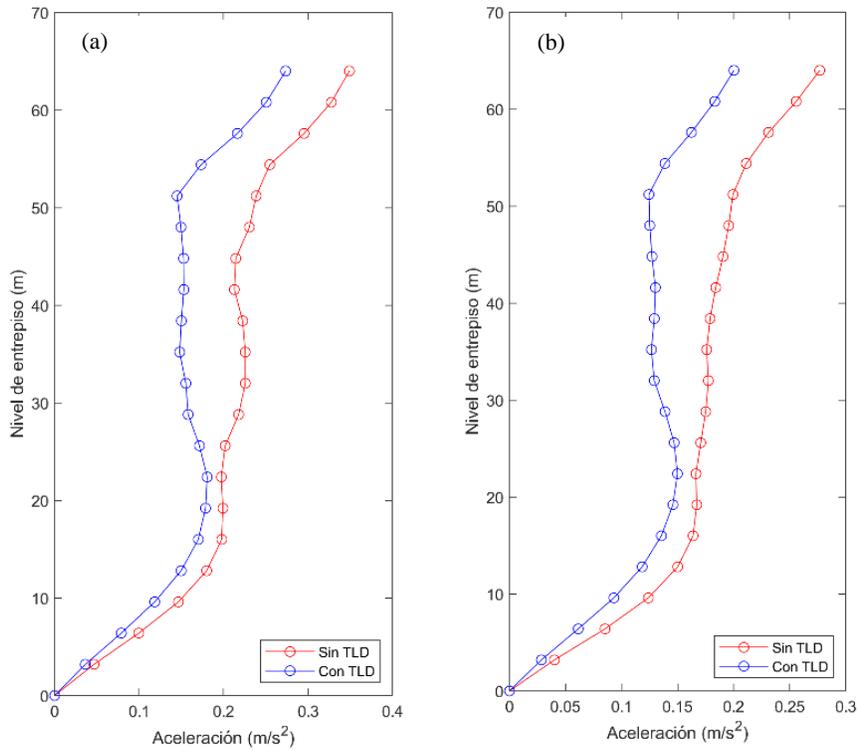


Fig. 5.24 Aceleraciones en diferentes niveles de entrepiso: (a) aceleraciones máximas absolutas; (b) aceleraciones máximas promedio

La figura 5.25 muestra las desviaciones estándar de las aceleraciones máximas absolutas de las 15 simulaciones en el edificio de marcos rígidos, y las 15 simulaciones en los edificios de marcos rígidos equipados con la MSSE en la parte de la azotea. También se presentan los promedios de las desviaciones estándar de las aceleraciones máximas de las simulaciones anteriormente mencionadas. Las observaciones realizadas para la figura 5.24 son igualmente aplicables a la figura 5.25.

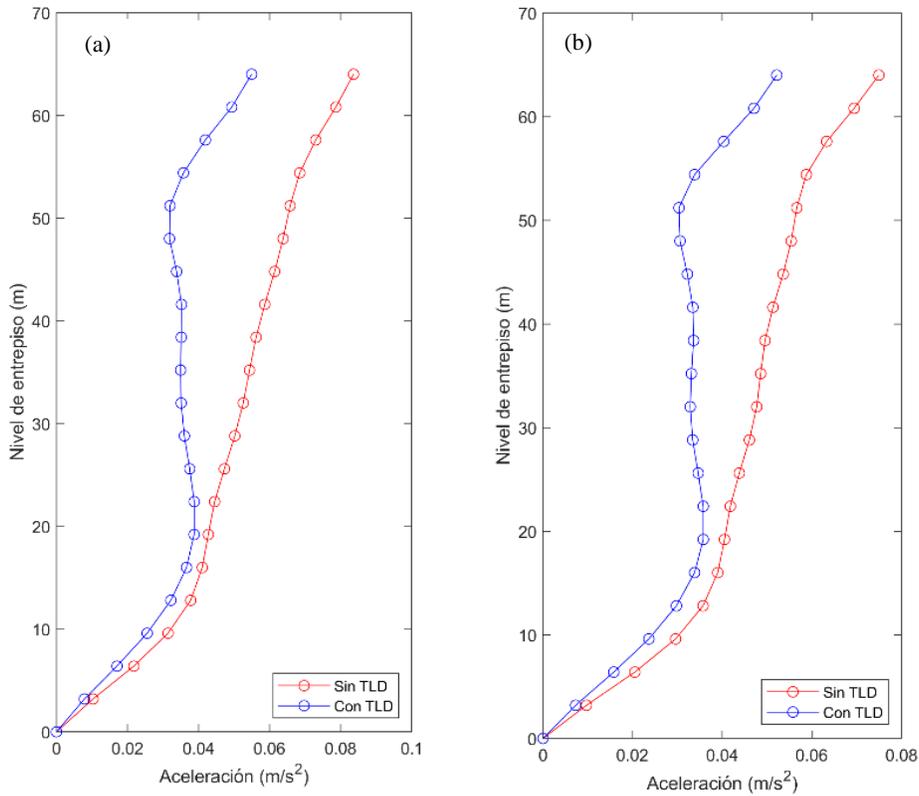


Fig. 5.25 Desviaciones estándar: (a) desviación estándar máxima de aceleraciones; (b) promedio de las desviaciones estándar máximas de aceleraciones

La figura 5.26 muestra las aceleraciones máximas absolutas resultado de las 15 simulaciones en el edificio de marcos rígidos, y las 15 simulaciones en los edificios de marcos rígidos equipados con contraventeos. También se muestran los promedios de los máximos absolutos de las simulaciones anteriormente mencionadas. Se observa en la figura 5.26 que el empleo del sistema de contraventeos es eficiente para reducir la respuesta estudiada. Las principales diferencias que se observan con respecto al empleo de la MSSE es que se presentan reducciones más uniformes a lo largo de la altura del edificio. Si bien, el sistema de contraventeo resulta útil para mitigar la respuesta, se tendría que valorar los beneficios que considerar un sistema u otro, incluyendo una comparación del costo. Los aspectos anteriores están fuera de los alcances del presente estudio.

La figura 5.27 muestra las desviaciones estándar de las aceleraciones máximas absolutas de las 15 simulaciones en el edificio de marcos rígidos, y las 15 simulaciones en los edificios de marcos rígidos equipados con contraventeos en la parte de la azotea. También se incluye en la figura una comparación de los promedios de las desviaciones estándar máximas de las simulaciones anteriormente mencionadas.

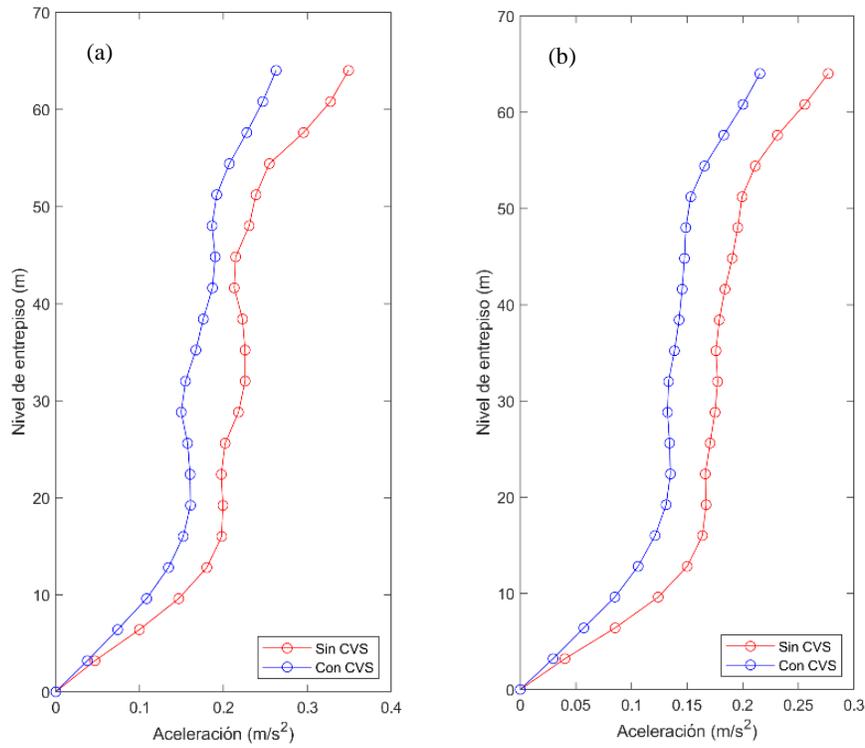


Fig. 5.26 Aceleraciones en diferentes niveles del entrepiso: (a) aceleraciones máximas absolutas; (b) aceleraciones máximas promedio

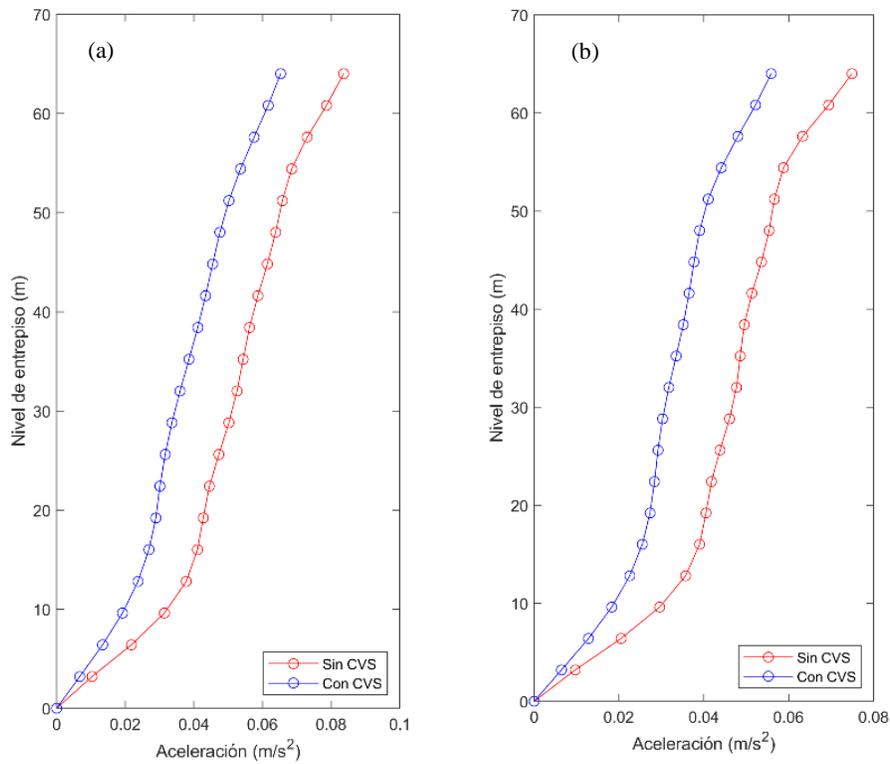


Fig. 5.27 Desviaciones estándar: (a) desviación estándar máxima de aceleraciones; (b) promedio de las desviaciones estándar máximas de aceleraciones

Los análisis realizados para evaluar las aceleraciones fueron repetidos, pero esta vez la respuesta evaluada fue el desplazamiento. Las figuras 5.28 a 5.30 muestran los resultados de estos análisis.

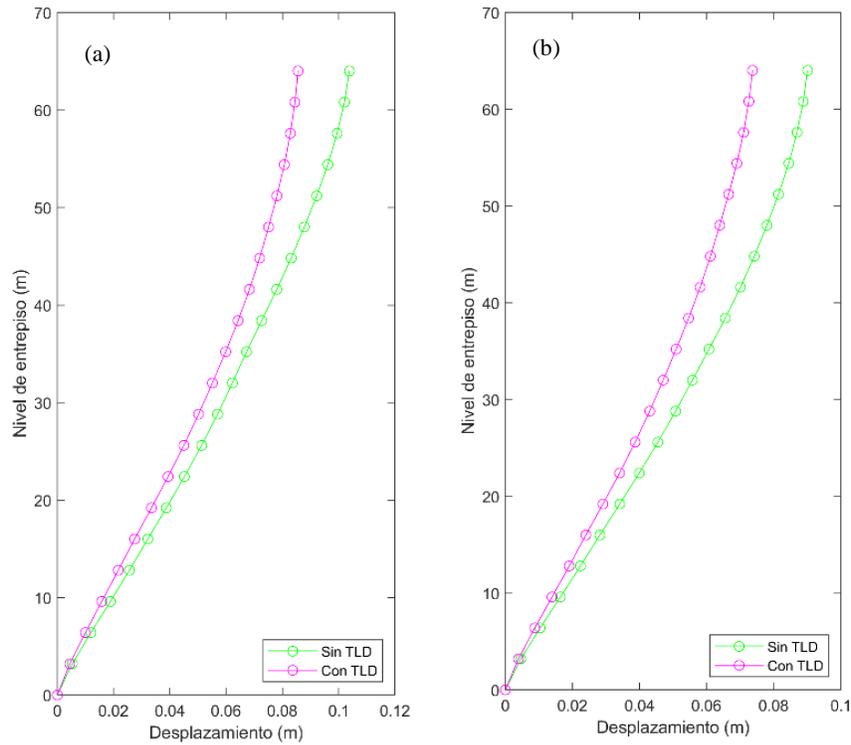


Fig. 5.28 Desplazamientos en diferentes niveles del entrepiso: (a) desplazamientos máximos absolutos; (b) desplazamientos máximos promedio

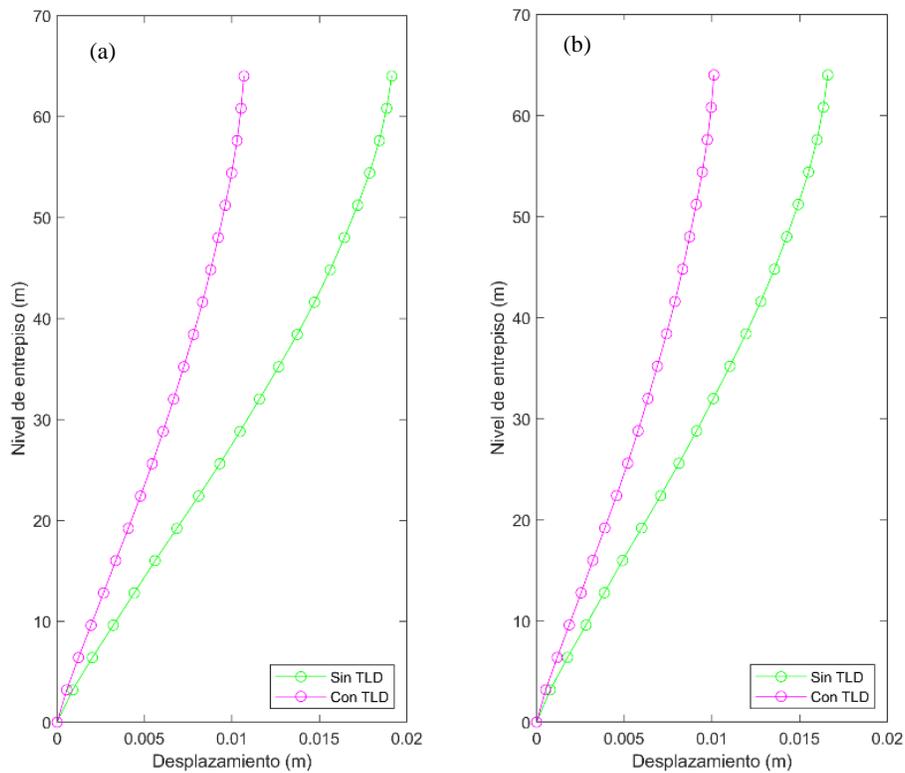


Fig. 5.29 Desviaciones estándar: (a) desviación estándar máxima de desplazamientos; (b) promedio de las desviaciones estándar máximas del desplazamiento

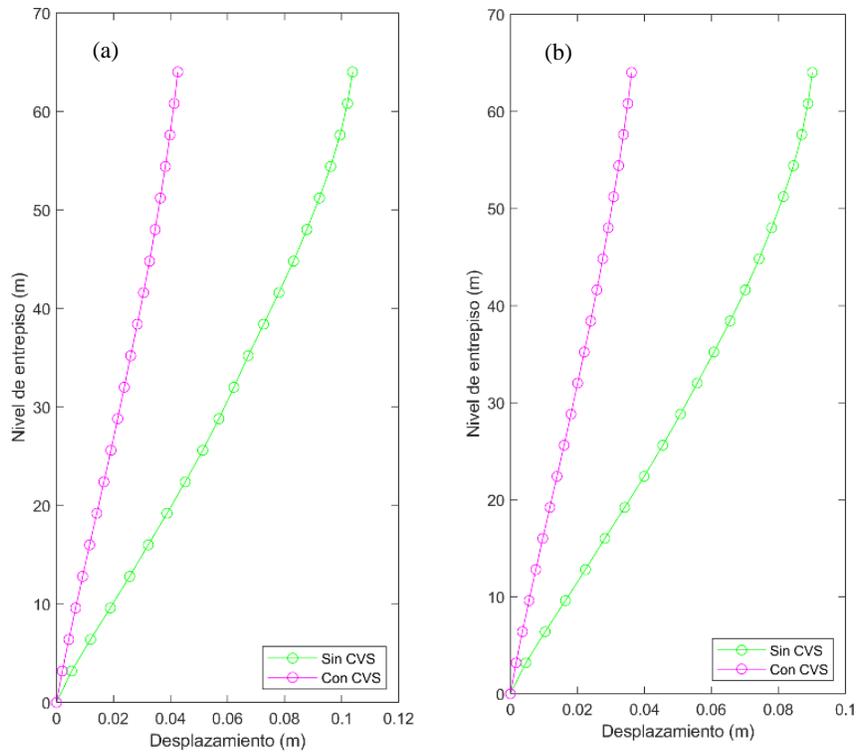


Fig. 5.30 Desplazamientos en diferentes niveles del entrepiso: (a) desplazamientos máximos absolutos; (b) desplazamientos máximos promedio

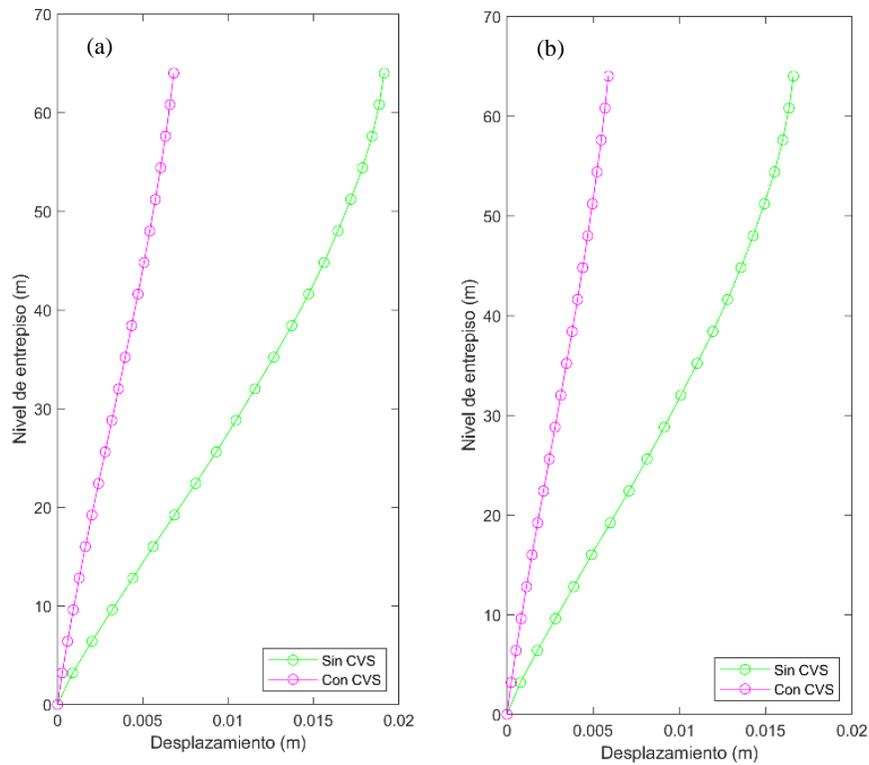


Fig. 5.31 Desviaciones estándar: (a) desviación estándar máxima de desplazamientos (b) promedio de las desviaciones estándar máximas del desplazamiento

Se observa en las figuras 5.27 y 5.28 que el empleo de la MSSE es efectivo para reducir los desplazamientos en el edificio en estudio. Se observa en estas figuras que la MSSE es más efectiva en reducir la desviación estándar de desplazamiento que los desplazamientos máximos. Lo anterior se debe a que los parámetros óptimos determinados para caracterizar la MSSE fueron para mitigar al máximo la aceleración y no el desplazamiento. Por otro lado, cuando se emplea el sistema de contraventeos, se observa que éstos son más efectivos para mitigar el desplazamiento de la estructura, como se esperaba.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

Las conclusiones de este trabajo se presentan a continuación:

1. Se observa que la metodología desarrollada para la obtención de los parámetros para caracterizar la masa líquida sintonizada es sumamente práctica, ya que no requiere modelos complejos para la obtención de las propiedades equivalentes.
2. Los modelos equivalentes de 1 y 2 grados de libertad de la estructura con y sin MSSE son de gran utilidad para predecir la respuesta de la misma ante la acción de las aceleraciones inducidas por las fuerzas de viento.
3. El uso de amortiguadores de masa líquida sintonizada es de gran ayuda en la reducción de las aceleraciones inducidas por el efecto dinámico del viento.
4. El método simplificado para obtención de las propiedades índice de las masas líquidas sintonizadas sólo es aplicable a estructuras equipadas con tanques rectangulares equipados con rejillas para proporcionar un amortiguamiento extra al modo fundamental de chapoteo del agua.
5. El uso de osciladores de un grado de libertad puede ser representado en programas de cómputo con exactitud, y a su vez éstos mismos pueden ser usados para modelar la MSSE.
6. Las MSSE que representan a los TLDs son de gran utilidad a la hora de disminuir desplazamientos en edificios de marcos rígidos; sin embargo, la mejor opción al compararla con el uso de contravientos (arriostamiento), resultaron ser estos últimos, esto era de suponerse ya que resulta en una estructura más rígida. Por otro lado, si se habla de la disminución de aceleraciones resultó igual de efectivo el uso de TLDs, modelados como MSSE, que el uso de contravientos (arriostamiento) .
7. Al comparar los desplazamientos, se observa que la reducción al usar la MSSE y cuando se usan contravientos presenta una disminución constante.
8. Si se observa que la disminución de aceleraciones es mayor en el nivel de azotea, (último nivel), esta misma se encuentra en los niveles inferiores; lo anterior se puede atribuir a que para deducir el modelo se usaron osciladores de 2 grados de libertad, por lo que en modelos de múltiples grados de libertad la mayor disminución se podría encontrar donde se encuentra la altura modal del edificio (es decir, donde se concentraría toda la masa si se modelara como un oscilador de 1 grado de libertad).
9. Al comparar ambas alternativas se logra inferir que la mejor alternativa para reducir desplazamientos es el uso de contravientos o el rigidizar el edificio, mientras que por el otro lado la MSSE demostró un mejor comportamiento en cuanto a la disminución de aceleraciones se refiere.

6.2 Recomendaciones

Se recomienda realizar un análisis de costos para evaluar las alternativas de usar una TLD o un sistema de contraventeo.

Se recomienda emplear los valores óptimos para reducir el desplazamiento y comparar con el sistema de contraventeos, ya que los valores óptimos se asocian con el tipo de respuesta que se desea reducir. En el caso de estudio, los valores óptimos empleados fueron aquellos para reducir al máximo la aceleración.

Si se optó por la colocación de un TLD en el edificio, se recomienda colocar el mismo ya sea en el último o en el penúltimo entrepiso de la estructura; una vez colocado, se sugiere el líquido tenga 2 usos, el primario que sea funcionar como TLD, y el segundo la función de abastecer agua para el edificio, o del mismo modo puede ser parte de la red contra incendios.

Se recomienda colocar el TLD en el centro de masas del entrepiso, esto para que no genere torsiones adicionales sobre las que ya obrarían sobre la estructura.

Si es que la planta donde se colocará el TLD carece de espacio para colocar un solo TLD, el sistema puede ser reducido en grupos de TLDs, siempre y cuando la colocación de estos cumpla con lo dicho en el párrafo anterior, esto es que deberán ser colocados de tal manera que no se generen torsiones no deseadas.

Si es que se desea colocar el TLD sobre una estructura ya existente, se recomienda la realización de mediciones para la obtención del periodo y el amortiguamiento inherente de la estructura, y posteriormente aplicar la metodología de diseño del TLD.

REFERENCIAS

- Sun L. et al. (1995). “*The properties of a tuned liquid damper using TMD analogy*”, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 17(9), 609-612.
- Yu J. (1997). “Nonlinear characteristics of tuned liquid dampers”, PhD Thesis University of Washington, Washington, United States.
- Yu J. et al (1999). “A nonlinear numerical model of tuned liquid dampers”, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 28, 671-686.
- Olson D. and Reed D. (2001). “A nonlinear numerical model for sloped bottom tuned liquid dampers” Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 30, 731-743.
- Tait M. (2004) “The performance of 1-D and 2-D tuned liquid dampers” PhD Thesis. The University of Western Ontario, Ontario, Canada.
- Tait M. et al (2004). “The efficiency and robustness of an unidirectional tuned liquid damper and modeling with an equivalent TMD”, Wind Structures, 7 (4) 235-250
- Tait M. et al (2008) “Modelling and preliminary design of a structure-TLD system” Elsevier, Engineering Structures
- Holmes, J. D. (2015). “Wind loading of Structures”, 3rd Edition, CRC Press, Taylor & Francis Group, UK.
- Love J. and Tait M. (2012). “A preliminary design method for tuned liquid dampers conforming to space restrictions”, Engineering Structures 40 (2012) 187-197.
- Manual de Diseño de Obras Civiles (2020). “Diseño por Viento”, Comisión Federal de Electricidad-Instituto de Investigaciones Eléctricas, México.
- Normas Técnicas Complementarias al Reglamento de Construcciones de la CDMX (2017). “Diseño por Viento” Gaceta Oficial de la CdMx, México.
- Lago A. et al (2019) “Damping technologies for tall buildings: Theory, design, guidance and case of study” Elsevier, The Council on tall buildings and Urban habitat
- Tait M. et al (2005) “Numerical flow models to simulate tuned liquid dampers (TLD) with slat screens” Elsevier, Journals of Fluids and Structures
- Love J. et al (2011) “A hybrid structural control system using a tuned liquid damper to reduce the wind induced motion of a base isolated structure” Elsevier, Engineering Structures
- Davenport, A. G. (1964). “Note on the distribution of the largest value of a random function with application to gust loading”, Proc Inst Civ Eng 28:187-196.
- Tait M. (2004) “The performance of 1-D and 2-D tuned liquid dampers” PhD Thesis, The University of Western Ontario
- Nogales L (2019) “Costo de pérdidas asociadas al estado límite de servicio debido a aceleraciones inducidas por el viento en edificios” Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM, México

Apéndice A. Resumen de ecuaciones para determinar parámetros equivalentes

Pasos a seguir para el modelo equivalente.

Paso	Descripción de los pasos
------	--------------------------

Los datos de la estructura se toman como dato, y sólo se iteran las dimensiones del tanque, la altura del agua, y el número y separación de las rejillas

1.0.- Cálculos iniciales respecto a las masas de la estructura y del tanque:

1.1.- Masa de la estructura M_s

1.2.- (L) , (b) , (h) y (ρ)

$$1.3.- \quad m_{eq} = \frac{8\rho bL^2}{\pi^3} \tanh\left(\frac{\pi h}{L}\right)$$

$$1.4.- \quad M'_s = M_s + (\rho b h L - m_{eq})$$

$$1.5.- \quad \mu = \frac{m_{eq}}{M'_s}$$

$$1.6.- \quad \zeta_{eff} = \zeta_s \left(\frac{\sigma_{s-inicial}^2}{\sigma_{s-objetivo}^2} - 0.8 \right)$$

$$1.7.- \quad \zeta_{eff} = \zeta_s \left(\frac{\sigma_{s-inicial}^2}{\sigma_{s-objetivo}^2} - 0.8 \right) \cong \zeta_{eff}^{opt} = \frac{1}{4} \sqrt{\frac{\mu + \mu^2}{1 + \frac{3\mu}{4}}}$$

2.0.- Cálculo de los valores óptimos:

$$2.1.- \quad \zeta_{eff}^{opt} = \frac{1}{4} \sqrt{\frac{\mu + \mu^2}{1 + \frac{3\mu}{4}}}$$

$$2.2.- \quad \Xi_n = \sum_{j=1}^{ns} \sin\left(\frac{n\pi x_j}{L}\right)^3$$

$$2.3.- \quad \Omega^{opt} = \sqrt{\frac{1 + \frac{\mu}{2}}{1 + \mu}} \quad \Omega = \frac{\omega_a}{\omega_s} \quad \omega_a^2 = \frac{\pi g}{L} \tanh\left(\frac{\pi h}{L}\right) \quad \omega_n^2 = \frac{n\pi g}{L} \tanh\left(\frac{n\pi h}{L}\right)$$

$$2.4.- \quad \zeta_w = \left(\frac{1}{2h}\right) \sqrt{\frac{v}{2\omega_n}} \left(1 + \frac{2h}{b} + SC\right)$$

$$2.5.- \quad R^{opt} = \frac{1 + \mu}{\sqrt{2\mu + \frac{3\mu^2}{2}}} \quad R = \frac{\sigma_r}{\sigma_s}$$

$$2.6.- \quad S = \frac{A}{bh} \quad c_l = S c_d$$

$$C_l = \left(\frac{1}{C_c(1-S)} - 1 \right)^2$$

$$C_c = 0.405e^{-\pi S} + 0.595$$

$$C_d = \frac{C_l}{S}$$

$$\Delta_n = \left[\frac{1}{3} + \frac{1}{\sinh^2\left(\frac{\pi h_{opt}}{L}\right)} \right]$$

$$2.7.- \quad \zeta_{eq} = c_l \sqrt{\frac{32}{\pi^3}} \tanh^2\left(\frac{\pi h}{L}\right) \Delta \Xi \frac{\sigma_r}{L}$$

$$2.8.- \quad \zeta_a^{opt} = \sqrt{\frac{\mu + \frac{3\mu^2}{4}}{4 + 6\mu + 2\mu^2}}$$

$$2.9.- \quad \zeta_a = \zeta_{eq} + \zeta_w$$

$$2.10.- \quad c_{eq} = \sqrt{\frac{32}{\pi^3}} \Delta_n \Xi_n \omega_a^{opt} \sigma_r \tanh^3\left(\frac{\pi h_{opt}}{L}\right) c_l \frac{16\rho b L}{\pi^3}$$

$$2.11.- \quad k_{eq} = \frac{8\rho b L g}{\pi^2} \tanh^2\left(\frac{\pi h_{opt}}{L}\right)$$

3.0 Desplazamientos objetivos

$$\sigma_{acel} = \frac{\sigma_i}{P.F.} \dots \sigma_{acel-obj} = \frac{\sigma_{ob}}{P.F.}$$

Apéndice B. Modelo del oscilador para representar la MSSE en un programa de cómputo de análisis estructural

Se procede a continuación a modelar el oscilador de un grado de libertad sometido a la carga de un pulso en el programa ETABS V18, ya que en este programa se mostrará la aplicación en un edificio, y así poder comprobar el modelado de la MSSE como un oscilador de 1GL.

Se procede primero a colocar una grilla en 2 dimensiones, sólo son necesarios 2 puntos para el dibujo del oscilador de 1GDL. Posteriormente como se indica en la figura B1, se selecciona la opción de dibujar link, la cual nos da la opción de dibujar un elemento lineal al que se le pueden asignar propiedades de masa, rigidez y amortiguamiento, ya sea lineal o angular en cualquiera de las direcciones ya sean locales o globales (cabe aclarar que si este procedimiento se lleva a cabo en otros programas es necesario indicar que se desea dibujar un link que une a 2 nodos).

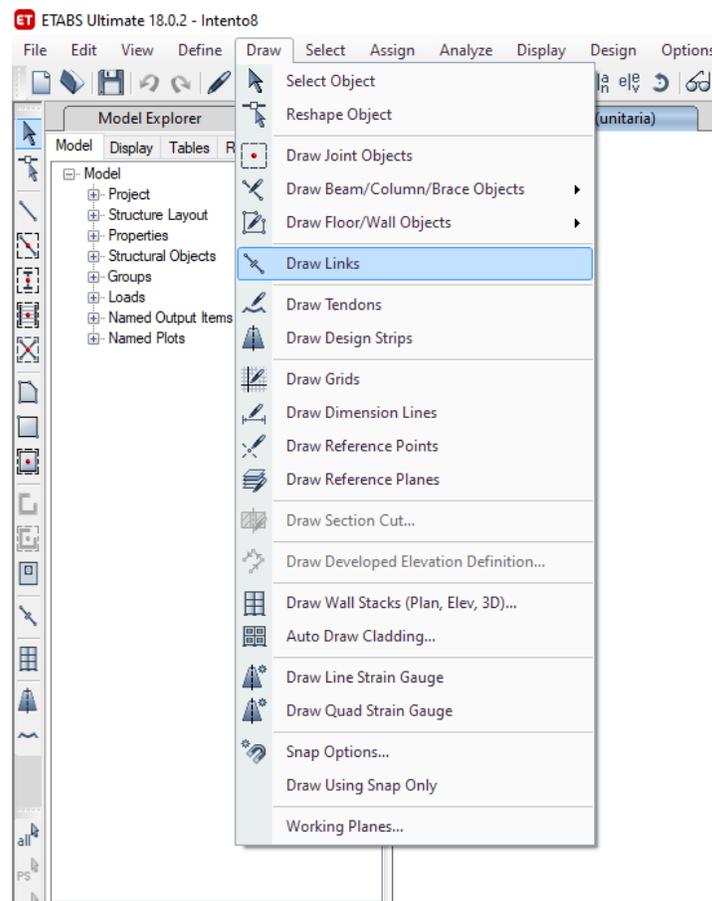


Fig.B1 Modelado de osciladores de 1GDL en ETABS 18

La figura B2 nos muestra el resultado de dibujar un elemento link en el programa. Cabe aclarar que en el origen se indican las coordenadas globales de toda la estructura, mientras que en el elemento link nos muestra las coordenadas locales del elemento, esto es importante al momento de asignar las propiedades de masa y de rigidez en el link.

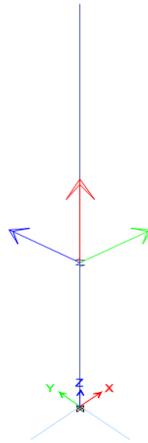


Fig.B2 Modelo de oscilador de 1DGL en ETABS 18 con elemento link

En la figura B3 se presenta el proceso de asignación de masas en el programa, como se nota a primera instancia, la masa se asigna en un apartado adicional, en donde se le asigna al nodo que se dibujó en la parte superior, siendo la dirección donde debe asignarse la masa aquella donde se requiere que trabaje esta de manera global, siendo en este caso sólo necesaria la asignación de la masa en dirección global Z, ya que en esta misma se orientó la MSSE; cabe resaltar que la masa debe ser asignada en este apartado, ya que, aunque se muestra la opción de asignar una masa en donde se asignan propiedades al elemento link, esta asignación es de forma distribuida en la longitud del elemento, y para este caso se necesita concentrada en un extremo al ser un oscilador de un grado de libertad, cabe recalcar que la masa se debe colocar únicamente en las casillas donde el oscilador va a trabajar, en este caso sólo es necesario colocarla en el eje Z, y dejar la otra casilla en 0 (direcciones X y Y).

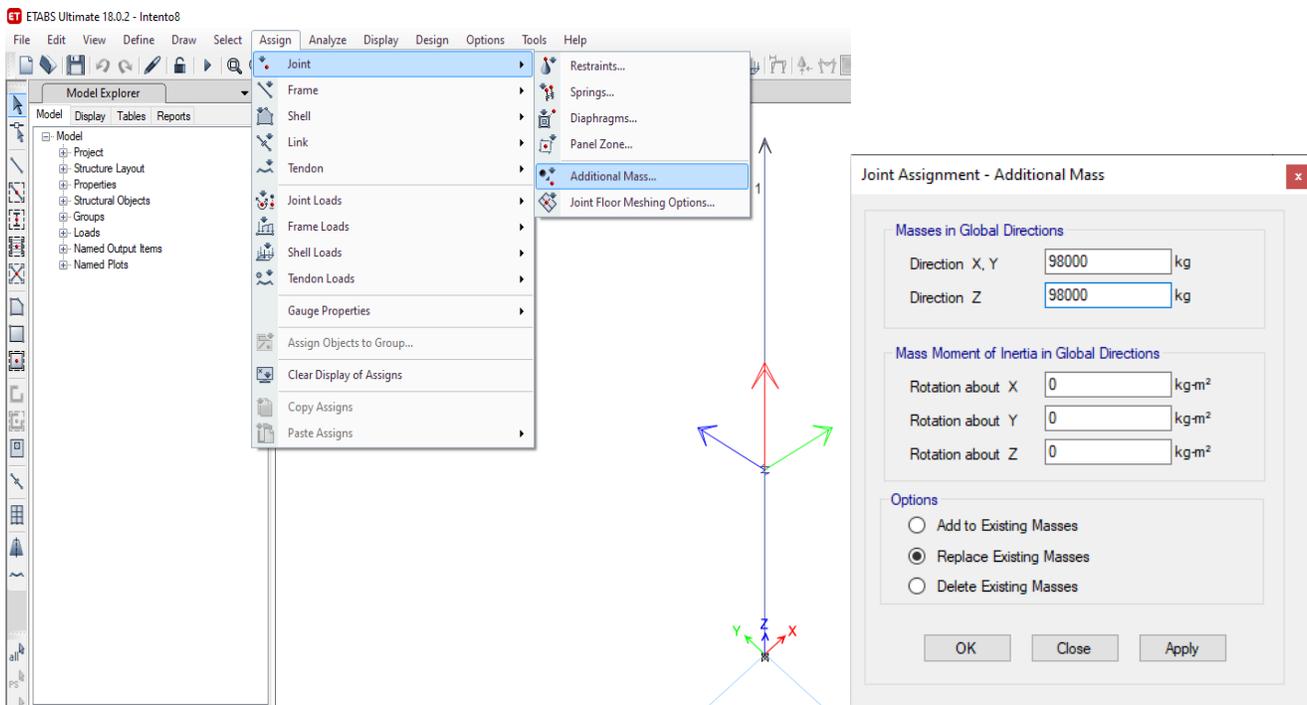


Fig.B3 Asignación de masa en el modelo del oscilador

La figura B4 muestra de manera esquemática el lugar donde se asignan propiedades al elemento link en el programa de cómputo.

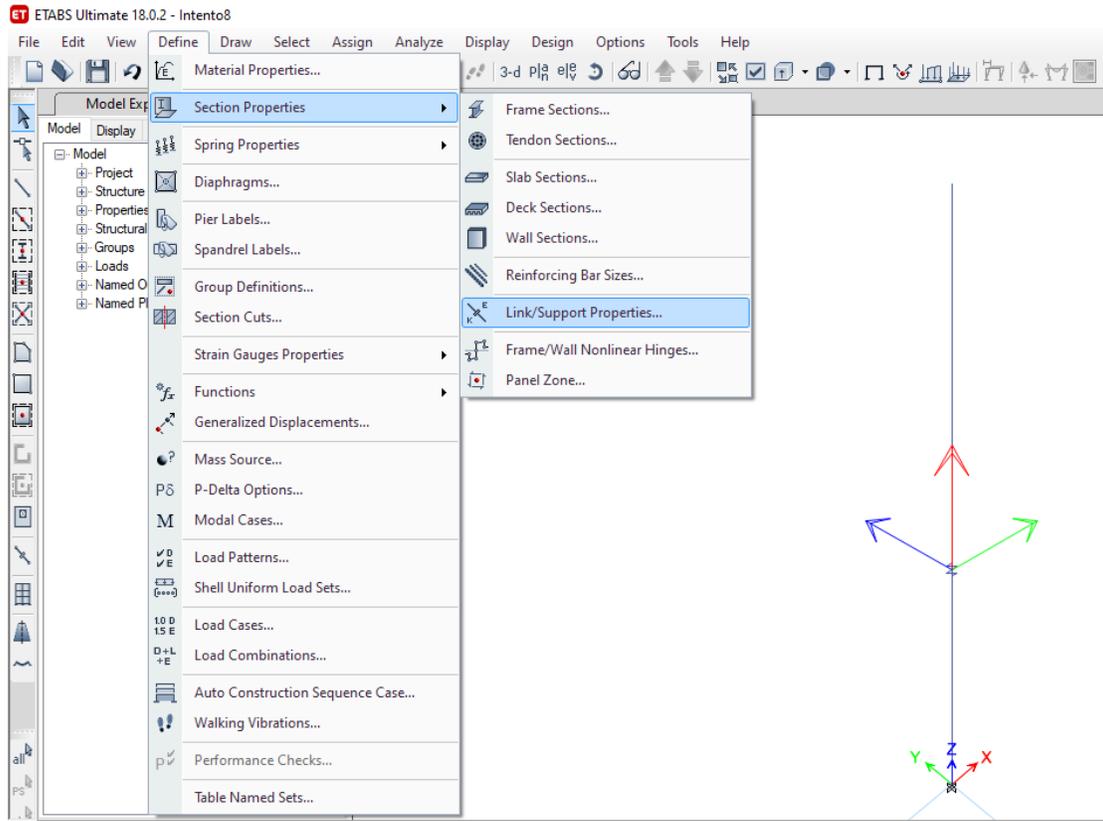


Fig.B4 Asignación de propiedades en el modelo del oscilador

Por otro lado, en la figura B5 se pueden observar los submenús de la opción anterior para la asignación de propiedades del modelo, cabe resaltar de esta figura que no se deben asignar ni peso ni masa en el elemento link, por las razones que se explicaron en los párrafos anteriores, del mismo modo, se debe tener en cuenta que las propiedades mostradas en la parte inferior de la figura corresponden a las propiedades en ejes locales del elemento link, para este caso la dirección U1, corresponde a el eje axial del elemento, que es con el que se va a trabajar, y ya que no se usarán los otros, se debe asignar un empotramiento para que no contribuyan en la respuesta. La figura B5 muestra en la parte inferior las casillas donde se asignan las propiedades de rigidez y amortiguamiento, donde se aprecia que estas sólo pueden ser asignadas en las casillas de la dirección libre o aquella donde esperamos que trabaje nuestro elemento.

Siempre se debe de tener en cuenta las direcciones locales en las que debe de trabajar el oscilador, para el caso de este ejemplo es fácil ver que sólo trabaja en la dirección local U1, pero no siempre es el caso, del mismo modo, en otros programas de cómputo se debe verificar la asignación de los ejes.

ET Link Property Data ×

General

Link Property Name: Link Type:

Link Property Notes: P-Delta Parameters:

Total Mass and Weight

Mass: kg Rotational Inertia 1: kg-m²

Weight: N Rotational Inertia 2: kg-m²

Rotational Inertia 3: kg-m²

Factors for Line and Area Springs

Link/Support Property is Defined for This Length When Used in a Line Spring Property: m

Link/Support Property is Defined for This Area When Used in an Area Spring Property: m²

Directional Properties

Direction	Fixed	Properties	Direction	Fixed
<input checked="" type="checkbox"/> U1	<input type="checkbox"/>	<input type="button" value="Modify/Show for All..."/>	<input type="checkbox"/> R1	<input type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/> U2	<input checked="" type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/> R2	<input type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/> U3	<input checked="" type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/> R3	<input type="checkbox"/>

Stiffness Options

Stiffness Used for Linear and Modal Load Cases:

Stiffness Used for Stiffness-proportional Viscous Damping:

Stiffness-proportional Viscous Damping Coefficient Modification Factor:

ET Linear Link/Support Directional Properties ×

Link/Support Property Name:

Directional Control

Direction	Fixed
<input checked="" type="checkbox"/> U1	<input type="checkbox"/> Yes
<input checked="" type="checkbox"/> U2	<input checked="" type="checkbox"/> Yes
<input checked="" type="checkbox"/> U3	<input checked="" type="checkbox"/> Yes
<input type="checkbox"/> R1	<input type="checkbox"/> Yes
<input type="checkbox"/> R2	<input type="checkbox"/> Yes
<input type="checkbox"/> R3	<input type="checkbox"/> Yes

Shear Distance

U2: m

U3: m

Note: Distance is measured with respect to J-End of the link object

Stiffness Values Used For All Load Cases

Stiffness Is Uncoupled Stiffness Is Coupled ?

U1	U2	U3	R1	R2	R3
<input type="text" value="9806850"/>	<input type="text" value="Fixed"/>	<input type="text" value="Fixed"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>

Damping Values Used For All Load Cases

Damping Is Uncoupled Damping Is Coupled ?

U1	U2	U3	R1	R2	R3
<input type="text" value="50000"/>	<input type="text" value="Fixed"/>	<input type="text" value="Fixed"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>

Fig.B5 Asignación de propiedades en el modelo del oscilador

La figura B6 muestra como ya es habitual la asignación de una fuerza unitaria en la dirección global de análisis, se asigna de esta forma ya que después se ligará a la fuerza pulso que se desea colocar, al nivel de la masa.

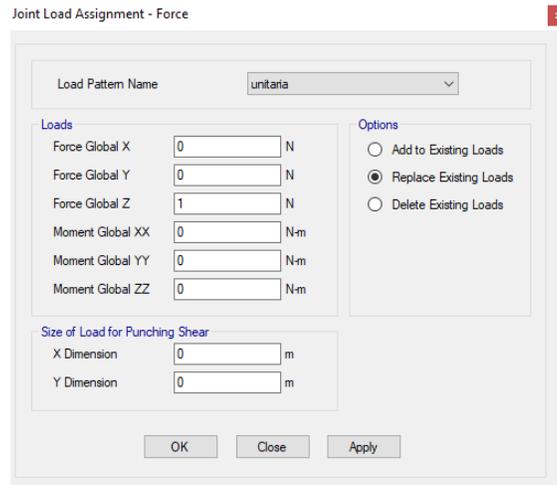


Fig.B6 Asignación de carga unitaria en la dirección de análisis del oscilador

La figura B7 muestra una de las muchas posibles asignaciones de una sollicitación del tipo pulso sobre la masa de la estructura, estas mismas pueden ser asignadas desde un archivo de texto o colocadas manualmente, como si del procedimiento de cargar acelerogramas sísmicos se tratase, para el caso de la figura se cargó desde un archivo de texto; sin embargo, se necesitan 3 puntos para caracterizar esta excitación, si es que se desea introducir la misma manualmente.

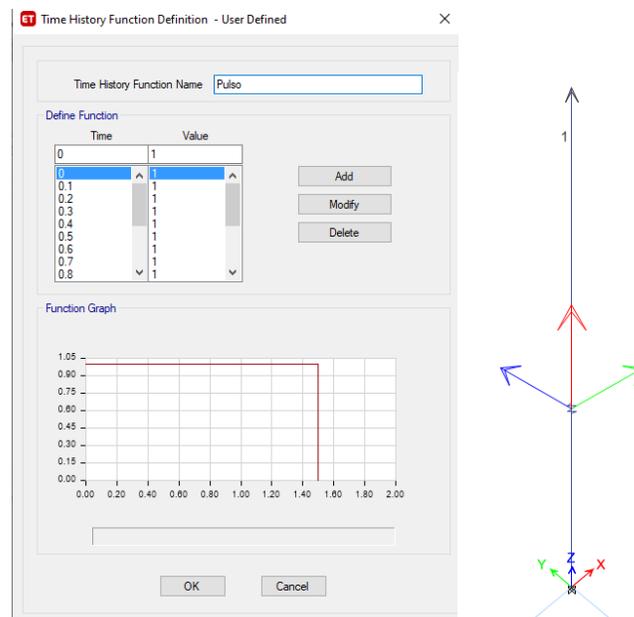


Fig.B7 Asignación de carga en el modelo del oscilador

Es importante recalcar que el pulso usado en este ejemplo tiene una duración de 1.5 segundos, y se debe de notar la diferencia entre el tiempo de análisis y la duración de la vibración.

La figura B8 muestra cómo se asignan las propiedades más importantes del análisis, de aquí cabe resaltar como el punto más importante es el colocar un amortiguamiento nulo, ya que el amortiguamiento del oscilador fue colocado en el elemento link, y si se desea se comporte como la única fuente de amortiguamiento en esta opción del análisis el amortiguamiento debe de ser 0; para la otra parte del análisis es necesario recalcar que es uno en el tiempo-historia, se selecciona la opción de análisis lineal modal y se seleccionan los casos modales.

Se debe mencionar que se debe de colocar un tiempo muy superior de análisis con respecto al de la excitación, esto ya que, al obtener el amortiguamiento por medios manuales como el decaimiento logarítmico, es necesario conocer la mayor parte de la respuesta del oscilador y esto incluye la parte de vibración libre amortiguada que es cuando el pulso ya no está aplicado.

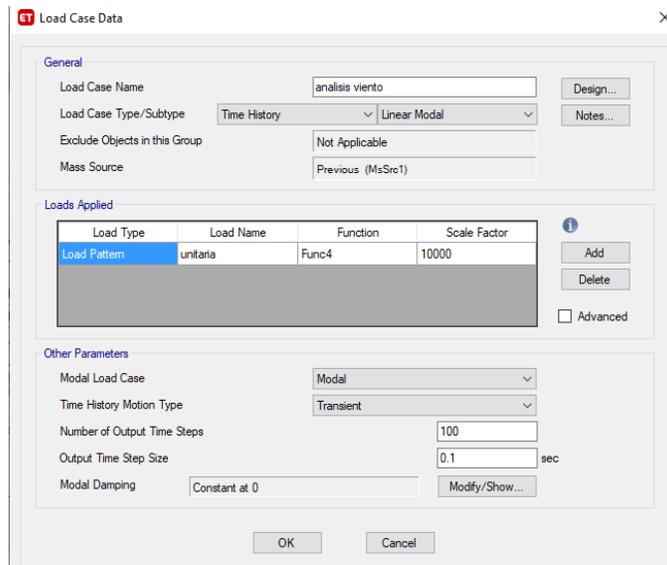
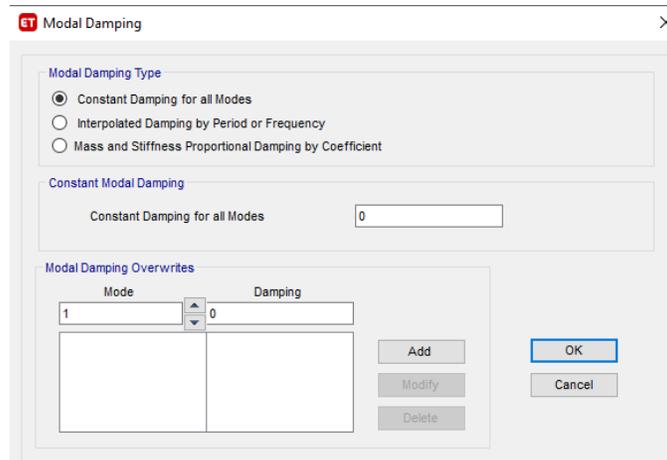


Fig.B8 Asignación de propiedades del análisis en el tiempo en el modelo del oscilador

La figura B9 muestra el resultado del análisis modal al calcular el periodo del oscilador; se debe verificar que en el análisis sólo exista un modo de vibrar (ya que así se planteó el oscilador), caso contrario, se debe revisar por si se cometió algún error en el modelado.

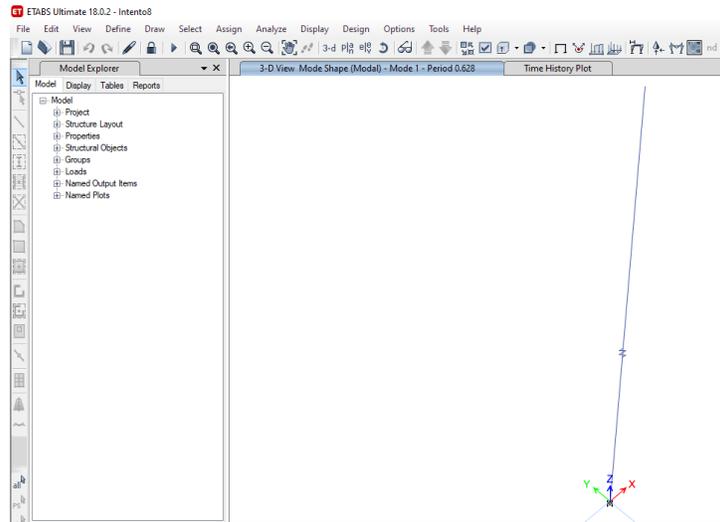


Fig.B9 Periodo del oscilador

La figura B10 muestra los parámetros a colocar en la obtención de la respuesta, donde lo más importante es colocar la coordenada global donde se desea observar el desplazamiento.

Se recalca que las direcciones de la respuesta son en coordenadas globales por lo que hay que tener esto en cuenta al momento de tener osciladores en otras orientaciones.

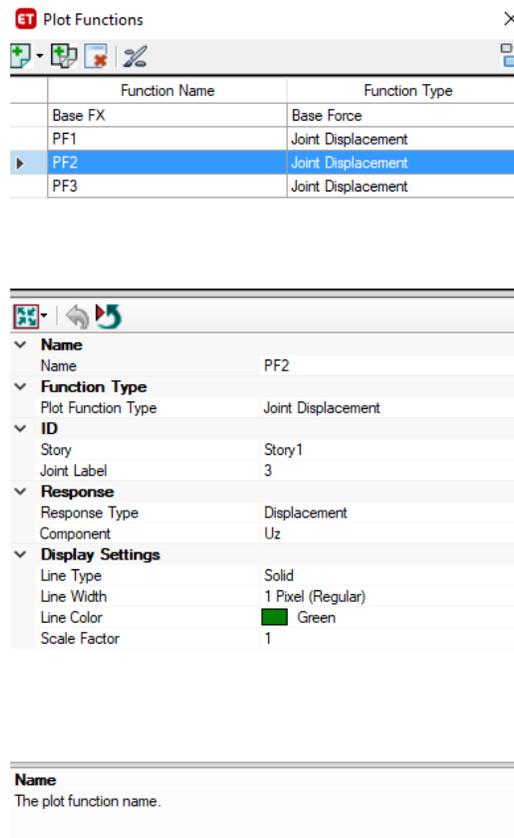


Fig.B10 Respuesta del oscilador en la dirección de análisis

La figura B11 da como resultado la respuesta total, que es la suma de la vibración ante la excitación, más la suma de la respuesta del desplazamiento en vibración libre, esto es consistente con lo expuesto en los textos de dinámica estructural para la respuesta ante pulsos.

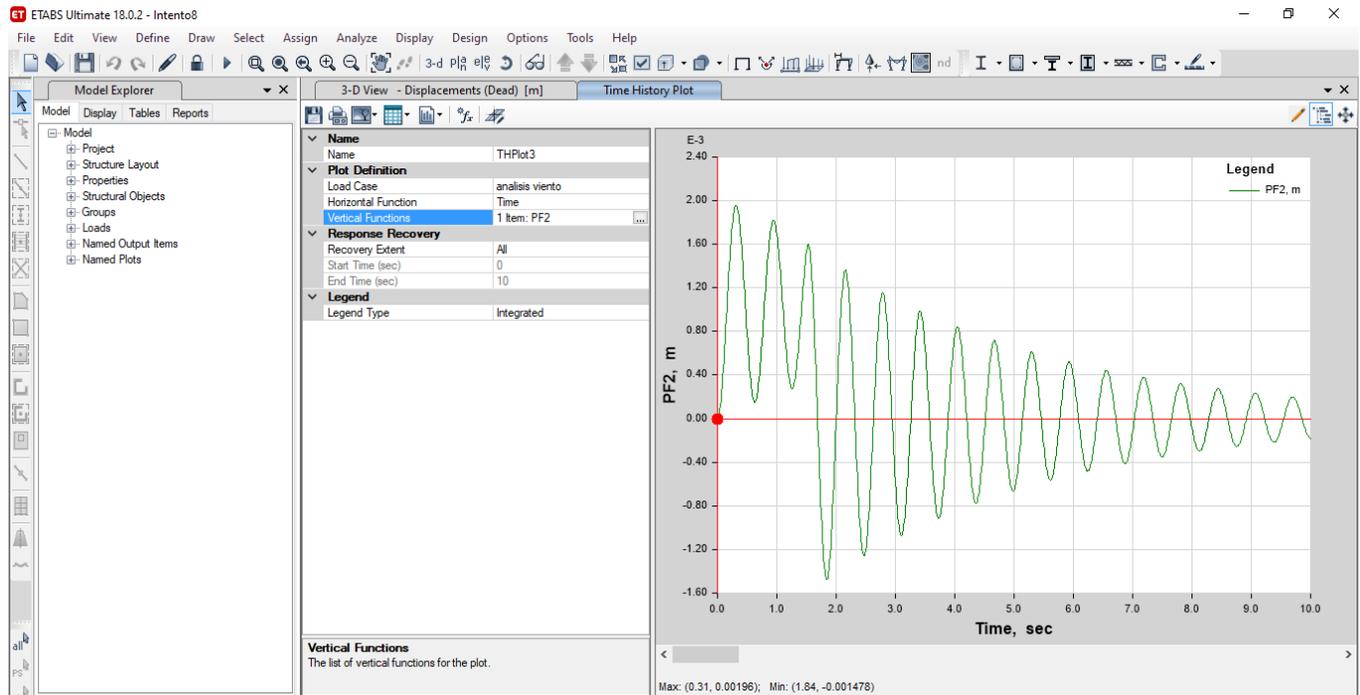


Fig.B11 Gráfica de respuesta del oscilador en la dirección de análisis

La gráfica de la figura B12 muestra la respuesta en términos del desplazamiento para el oscilador modelado en el ETABS tanto como para el oscilador con la ecuación del movimiento resuelta por el método de Newmark: Se observa en la figura B12 que ambas respuestas son iguales, por lo que se puede asumir que de esa manera se puede modelar una MSSE conectada a un edificio y que trabaje como un oscilador de un grado de libertad.

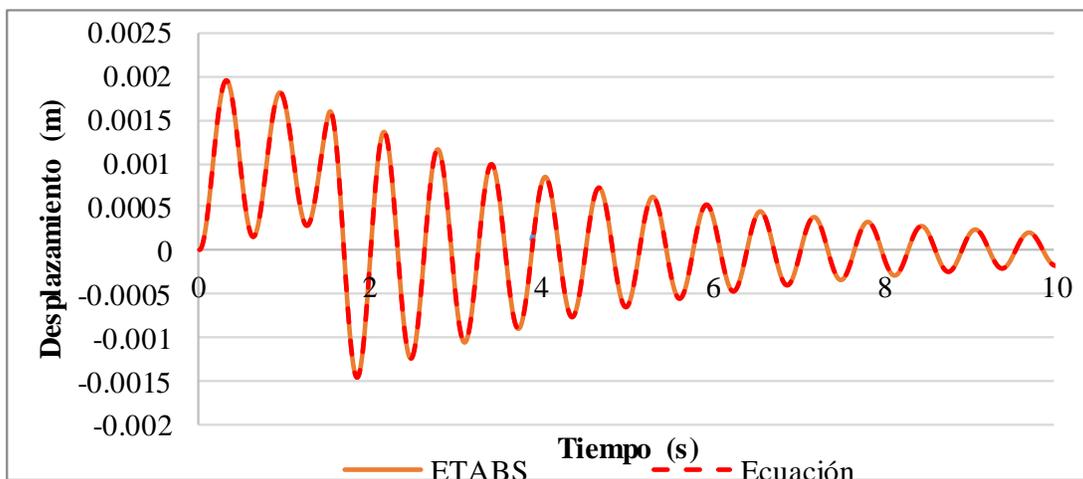


Fig.B12 Gráfica de respuesta del oscilador ETABS vs Solución numérica