



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**REDUCCIÓN DE LA RESPUESTA DE UNA
TORRE DE CONTROL CON EL EMPLEO DE
UN DISIPADOR DE MASA SÓLIDA
SINTONIZADA**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO CIVIL

P R E S E N T A:

JORGE ALVAREZ CHOMBO

DIRECTOR DE TESIS

DR. ADRIÁN POZOS ESTRADA
INSTITUTO DE INGENIERÍA



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2017



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.

Dedicatorias

Le agradezco a Dios por darme la fortaleza para llegar a este instante.

A mis padres por su cariño, paciencia, por la formación que he recibido y todo el apoyo incondicional brindado a lo largo de mi vida. Siendo yo consciente del sacrificio que esto representó.

A mis hermanos por ser mis compañeros de vida y por todo el apoyo incondicional brindado.

A mi novia Alejandra por su paciencia y apoyo en todo momento, y sobre todo por su amistad.

A toda mi familia, por sus enseñanzas y apoyarme siempre.

A mis amigos que tanto estimo y a mis paisanos, para que este trabajo sirva de fuente de motivación para lograr sus metas.

Agradecimientos

A la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Facultad de Ingeniería, a las cuales siempre guardaré admiración, respeto y cariño, por mostrarme un panorama distinto, por formarme como un profesional íntegro y por darme una formación privilegiada con los mejores profesores de nuestro país.

Al Doctor Adrián Pozos Estrada por su tiempo, paciencia y dedicación, y por darme la oportunidad de colaborar en sus proyectos.

A todos los profesores de la facultad de ingeniería por su entrega y compromiso, por hacer su trabajo cada día con la misma pasión y sobre todo por su tiempo, que considero es una de las mayores inversiones para lograr el desarrollo de nuestro país.

Le agradezco al Instituto de Ingeniería, por permitirme incursionar en el campo de la investigación, por ser parte del programa de becarios y por el apoyo económico brindado.

Al grupo de Ingeniería de Viento del Instituto de Ingeniería, por su apoyo en los temas que me permitieron realizar el presente trabajo.

A todos los compañeros del cubículo 208, Abdel, David, Edmundo, Fernando y Teresa por su paciencia y apoyo.

A todos los profesores que contribuyeron en mi formación académica.

Contenido

Resumen.....	1
Abstract	1
Nomenclatura.....	2
Objetivo del trabajo.....	3
Introducción	3
Antecedentes.....	4
Capítulo 1 Caracterización del viento	6
1.1 Características físicas.....	6
1.2 Leyes que rigen el comportamiento de los fluidos	7
1.3 Ecuación de Bernoulli	8
1.4 Número de Reynolds	8
1.5 Capa Límite	9
1.6 Viento turbulento	10
1.7 Efectos del viento en estructuras	10
1.7.1 Sensibilidad de estructuras al viento	11
Capítulo 2 Descripción del fenómeno de desprendimiento de vórtices.....	11
2.1 Desprendimiento de la capa límite	11
2.2 Parámetros de influencia.....	13
2.3 Número de Strouhal	13
2.4 Número de Scruton	14
Capítulo 3 Dispositivos para reducir la vibración en estructuras.....	15
3.1 Definición de vibración	15
3.2 Clasificación de los dispositivos disipadores de energía	15
3.2.1 Activo.....	15
3.2.2 Pasivo.....	16
3.2.3 Híbrido	16
3.2.4 Semiactivo	16
3.3 Campo de aplicación.....	16
3.3.1 Sistemas de control Activo.....	16
3.3.2 Sistemas de control pasivo	17

Capítulo 4 Procedimientos para determinar las acciones del viento y la respuesta de la estructura de acuerdo a la normatividad	21
4.1 Analítico	21
4.2 Experimental.....	21
4.3 Aceleraciones y desplazamientos	22
4.3.1 Aceleración	22
4.3.2 Desplazamiento	22
Capítulo 5 Modelado de la torre de control y consideraciones de análisis.....	23
5.1 Geometría.....	23
5.2 Obtención de las fuerzas y análisis	24
5.2.1 Análisis modal	24
5.2.2 Amortiguamiento	26
5.2.3 Análisis por desprendimiento de vórtices.....	28
Capítulo 6 Análisis de resultados	29
6.1 Análisis por desprendimiento de vórtices.....	29
6.1.1 Fuerzas parcialmente correlacionadas	29
6.1.2 Análisis Considerando Fuerzas Totalmente correlacionadas	44
Capítulo 7 Conclusiones y recomendaciones.....	51
7.1 Conclusiones.....	51
7.2 Recomendaciones.....	52
Bibliografía.....	53
Direcciones electrónicas.....	54

Índice de Figuras

Figura 1 Torre Latinoamericana 1956, Ciudad de México (182m). https://goo.gl/sksW1w	4
Figura 2. Edificios altos en México, 2017.....	5
Figura 3. Capa límite.....	9
Figura 4. Diferencia entre dos capas límite turbulentas, 1.-Capa límite en una zona con obstrucciones y 2.-Capa límite en una zona con pocas obstrucciones.....	10
Figura 5. Desprendimiento de la capa límite. https://goo.gl/HZg5iB	12
Figura 6. Regímenes de fluido circulando a través de un cilindro circular. Lienhard, 1966.	13
Figura 7. Calle de torbellinos de Von Kármán. https://goo.gl/27ApgD y https://goo.gl/FZT8FQ	14
Figura 8. Rascacielos Taipei 101 y su dispositivo disipador MSS. https://goo.gl/QmNxt5 y https://goo.gl/6m5GHC	18
Figura 9. Torre City Corp y su dispositivo disipador MSS. Simiu et al. ,1996 y https://goo.gl/p3cWv2	18
Figura 10. Rascacielos Chiba-Port y su dispositivo disipador MSS. Connor, 2002 y https://goo.gl/67ympV	19
Figura 11. Puente Milenio y sus dispositivos disipadores MSS. https://goo.gl/ybe48A y https://goo.gl/x2ZJwB	19
Figura 12. Torre Huis Ten Bosch y su dispositivo disipador MSS. Connor, 2002 y https://goo.gl/h7WWC4	20
Figura 13. Estela de luz y sus dispositivos disipadores MSS. Aportación del Dr. Adrián Pozos Estrada (Apuntes de la clase de viento) y https://goo.gl/9j9uzT	20
Figura 14. Puente Álamo sus dispositivos disipadores MSS. Datos del mapa ©2017 Google, INEGI https://goo.gl/FQCHSj y https://goo.gl/XexmHY	21
Figura 15. Modelo geométrico de la torre de control. Captura de pantalla del modelo hecho en el programa ANSYS-APDL© (2013).....	23
Figura 16. Configuración deformada del primer modo de vibrar. Captura de pantalla del análisis modal hecho en el programa ANSYS Mechanical APDL© (2013).....	25
Figura 17. Configuración deformada del segundo modo de vibrar. Captura de pantalla del análisis modal hecho en el programa ANSYS Mechanical APDL© (2013).....	26
Figura 18. Configuración deformada del tercer modo de vibrar. Captura de pantalla del análisis modal hecho en el programa ANSYS Mechanical APDL© (2013).....	26
Figura 19. Vista en planta, Vibración producida por el fenómeno de desprendimiento de vórtices alternantes.....	28

Figura 20. Representación gráfica de la respuesta de aceleraciones de la estructura original y la estructura mejorada con el disipador MSS.....	33
Figura 21. Historia en el tiempo de la aceleración en el nodo 392, debida a la primera simulación.....	34
Figura 22. Historia en el tiempo de la aceleración en el nodo 392, debida a la segunda simulación.....	35
Figura 23. Historia en el tiempo de la aceleración en el nodo 392, debida a la tercera simulación.....	35
Figura 24. Historia en el tiempo de la aceleración en el nodo 392, debida a la cuarta simulación.....	36
Figura 25. Historia en el tiempo de la aceleración en el nodo 392, debida a la quinta simulación.....	36
Figura 26. Historia en el tiempo de la aceleración en el nodo 392, debida a la sexta simulación.	37
Figura 27. Historia en el tiempo de la aceleración en el nodo 392, debida a la séptima simulación.....	37
Figura 28. Historia en el tiempo de la aceleración en el nodo 392, debida a la octava simulación.....	38
Figura 29. Historia en el tiempo de la aceleración en el nodo 392, debida a la novena simulación.....	38
Figura 30. Historia en el tiempo de la aceleración en el nodo 392, debida a la décima simulación.....	39
Figura 31. Representación gráfica de la respuesta de desplazamientos de la estructura original y la estructura mejorada con el disipador MSS.....	43
Figura 32. Representación gráfica de la respuesta de aceleraciones de la estructura original y la estructura mejorada con el disipador MSS (fuerzas totalmente correlacionadas).	46
Figura 33. Historia en el tiempo de la aceleración en el nodo 392, debida a la simulación de fuerzas totalmente correlacionadas.	47
Figura 34. Representación gráfica de la respuesta de desplazamientos de la estructura original y la estructura mejorada con el disipador MSS (fuerzas totalmente correlacionadas).....	50
Figura 35. Variación de las fracciones de amortiguamiento con la frecuencia natural. Chopra, 2014.....	55
Figura 36. Variación de las fracciones de amortiguamiento con la frecuencia natural, relacionando diferentes modos.....	56

Índice de tablas

Tabla 1. Edificios altos en México, 2017. Elaboración propia.	4
Tabla 2. Percepción de incomodidad en las personas ante oscilaciones horizontales (Simiu et al., 1996).	22
Tabla 3. Propiedades del disipador de masa sólida sintonizada.	24
Tabla 4. Resultados del análisis modal de la torre de control. Elaboración propia con base en los resultados arrojados por el programa ANSYS Mechanical APDL© (2013).	25
Tabla 5. Parámetros requeridos para la simulación de las fuerzas de desprendimiento.	28
Tabla 6. Aceleración máxima media obtenida en la estructura original de la torre de control (Sin MSS).	30
Tabla 7. Aceleración máxima media obtenida en la estructura mejorada con el disipador MSS.	31
Tabla 8. Comparación de la respuesta de aceleraciones de la estructura original de la torre de control y la estructura mejorada con el disipador MSS.	32
Tabla 9. Desplazamientos máximos medios obtenidos en la estructura original de la torre de control (Sin MSS).	40
Tabla 10. Desplazamientos máximos medios obtenidos en la estructura mejorada con el disipador MSS.	41
Tabla 11. Comparación de la respuesta de desplazamientos de la estructura original de la torre de control y la estructura mejorada con el disipador MSS.	42
Tabla 12. Aceleraciones máximas medias obtenidas en la estructura, debidas a fuerzas totalmente correlacionadas.	44
Tabla 13. Comparación de la respuesta de aceleraciones de la estructura original de la torre de control y la estructura mejorada con el disipador MSS (fuerzas totalmente correlacionadas).	45
Tabla 14. Desplazamientos máximos medios obtenidos en la estructura, debidos a fuerzas totalmente correlacionadas.	48
Tabla 15. Comparación de la respuesta de desplazamientos de la estructura original de la torre de control y la estructura mejorada con el disipador MSS (fuerzas totalmente correlacionadas).	49

Tabla de Ecuaciones

Ecuación 1-1	6
Ecuación 1-2	6
Ecuación 1-3	7
Ecuación 1-4	7
Ecuación 1-5	8
Ecuación 1-6	8
Ecuación 2-1	13
Ecuación 2-2	14
Ecuación 5-1	23
Ecuación 5-2	23
Ecuación 5-3	27
Ecuación 5-4	27
Ecuación 5-5	27
Ecuación 5-6	28

Resumen

En el presente trabajo se analiza el comportamiento de una torre de control de tráfico aéreo, sujeta al fenómeno de desprendimiento de vórtices alternantes. Además, se demuestra que la instalación de un disipador de masa sólida sintonizada, resulta ser una opción válida para reducir la vibración excesiva en este tipo de estructuras.

Abstract

In this work the behavior of an air traffic control tower, subjected to the phenomenon of vortex shedding, is analyzed. Further, it is demonstrated that the installation of a tuned mass damper results to be a valid option to reduce excessive vibration in this type of structures.

Nomenclatura

T	Temperatura absoluta.
ρ	Densidad.
μ	Viscosidad dinámica.
M	Flujo másico.
Q	Gasto.
F	Fuerza.
m	Masa.
k	Rigidez de la estructura.
a	Aceleración.
U	Velocidad.
P_R	Presión de remanso.
Re	Número de Reynolds.
S_t	Número de Strouhal.
b	Dimensión característica transversal del cuerpo.
S_t	Frecuencia de desprendimiento de vórtices.
S_c	Número de Scruton.
ζ	Amortiguamiento estructural.
g	Aceleración de la gravedad.
C_v	Coefficiente de amortiguamiento.
C_{v2}	Coefficiente de amortiguamiento viscoso.
v	Velocidad en un instante anterior.
s	Desplazamiento.
t	Tiempo.
ω	Frecuencia circular.
T_n	Frecuencia natural.
M_{SS}	Masa sólida sintonizada (disipador).
M_{MSS}	Masa del disipador.
M_{Mod}	Masa modal del modo fundamental.
M_{tot}	Masa total de la torre de control (sin MSS).
K	Rigidez del disipador.
$\%MM$	Cociente masa del disipador con respecto a la masa modal del modo fundamental, en porcentaje.
$\%MT$	Cociente masa del disipador con respecto a la masa total de la torre de control, en porcentaje.
c	Matriz de amortiguamiento.
m'	Matriz de masas de la estructura.
k'	Matriz de rigidez de la estructura.
h	Incremento de tiempo.
D	Diámetro.
S_L	Factor de empuje transversal.

Objetivo del trabajo

Revisar que el uso de disipadores pasivos de energía, como es el caso de una masa sólida sintonizada, representa una opción válida para reducir la vibración inducida en una estructura debida al fenómeno de desprendimiento de vórtices alternantes.

Introducción

Las consecuencias que los eventos meteorológicos tienen sobre las edificaciones, significan una gran cantidad de pérdidas humanas y materiales. Los análisis realizados en este trabajo representan una medida de validez al uso de disipadores pasivos de energía, para reducir la vibración en estructuras sensibles a los efectos dinámicos del viento, particularmente aquellas consideradas esbeltas.

En el capítulo 1 se describen las propiedades más importantes que se deben conocer para caracterizar al viento.

En el capítulo 2 se mencionan algunos ejemplos de fenómenos aeroelásticos, y las estructuras que presentan mayor sensibilidad a los efectos del viento.

La descripción general del fenómeno de desprendimiento de vórtices, y los parámetros que lo describen se presentan en el capítulo 3.

En el capítulo 4 se hace una reseña de los dispositivos que actualmente se utilizan para reducir la vibración debida al viento en estructuras.

En el capítulo 5 se mencionan los procedimientos, mediante los cuales se pueden determinar las acciones del viento.

La normatividad que establece los límites permisibles en cuanto a aceleración y desplazamiento debido a viento se menciona en el capítulo 6.

Las características generales de la estructura y el proceso de modelación, se describen en el capítulo 7.

En el capítulo 8 se mencionan las herramientas que se utilizaron para simular las acciones producidas por el viento, y los análisis que se hicieron.

La respuesta de la estructura frente a las acciones generadas por del viento se presenta en el capítulo 9.

Finalmente en el capítulo de conclusiones y recomendaciones, se pueden encontrar las observaciones que se tuvieron después de elaborar el presente trabajo.

Antecedentes

La inauguración de la Torre Latinoamericana en el año 1956 (Figura 1) da inicio a la historia de los rascacielos en México, generando una fuerte tendencia a la construcción de desarrollos inmobiliarios en vertical, debido en la mayoría de los casos a la densificación de las zonas urbanas y a la necesidad de albergar grandes corporativos, los cuales promueven el desarrollo económico de nuestro país.



Figura 1 Torre Latinoamericana 1956, Ciudad de México (182m).
<https://goo.gl/sksW1w>

Según CONAPO hasta el 2010 el 72.3 por ciento de la población vivía en zonas urbanas, y la mitad de esta población se concentraba en tan solo el tres por ciento de las ciudades del país. A la fecha se tienen 1717 edificios altos, de los cuales 201 se ubican en la zona metropolitana del Valle de México; en la tabla 1 se presentan algunos ejemplos.

Por años la filosofía de diseño, se ha enfocado en dar solución a los efectos que la actividad sísmica produce en las edificaciones, dejando en segundo plano los efectos producidos por el viento.

Sin embargo las estructuras que se caracterizan por tener relaciones de esbeltez (relación altura contra dimensión más pequeña en planta) muy grandes, generalmente son sensibles a las acciones generadas por el viento, lo cual obliga al diseñador a darle la debida importancia, con el fin de preservar la seguridad de los usuarios, evitar pérdidas económicas y asegurar un nivel mínimo de confort.

Tabla 1. Edificios altos en México, 2017. Elaboración propia.

Posición	Nombre	Ubicación	Altura (m)	Niveles	Uso	Estado
1	Torre Insignia	Monterrey, Nuevo León.	330	77	Mixto	En construcción
2	Torre KOI	Monterrey, Nuevo León.	279.5	67	Mixto	En construcción
3	Torre Mitikah	Coyoacán, Ciudad de México.	267	60	Oficinas	En construcción
4	Torre Reforma	Cuauhtémoc, Ciudad de México.	246	57	Oficinas	Construido
5	Punto Chapultepec	Cuauhtémoc, Ciudad de México.	238	59	Mixto	En construcción
6	Corporativo Bancomer	Cuauhtémoc, Ciudad de México.	235	50	Oficinas	Construido
7	Torre Mayor	Cuauhtémoc, Ciudad de México.	225	55	Mixto	Construido

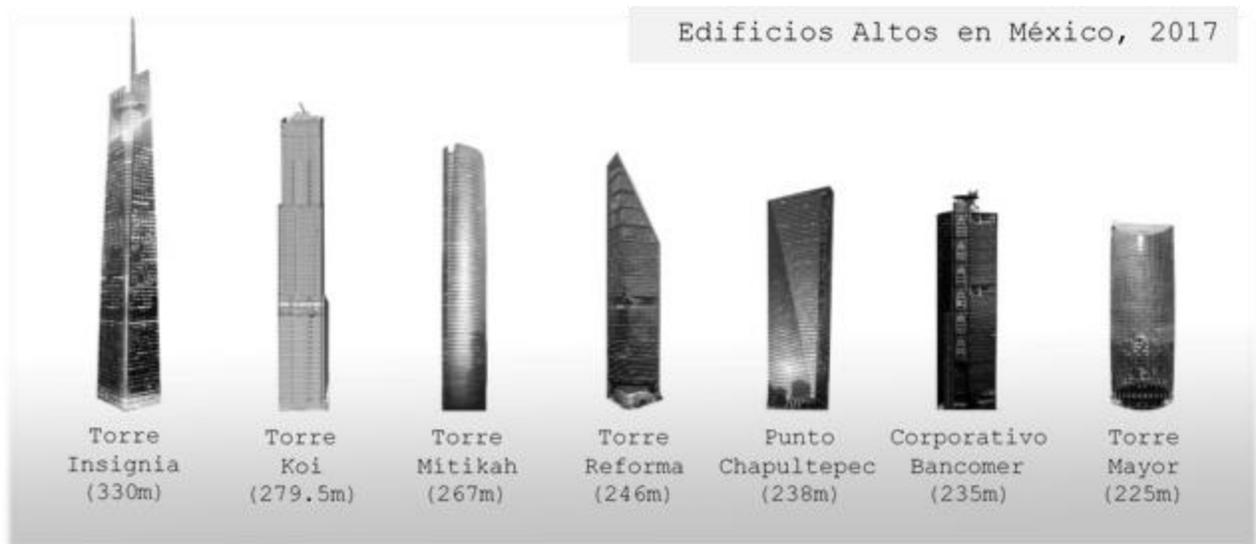


Figura 2. Edificios altos en México, 2017.

La vibración inducida por el viento puede ser un fenómeno potencialmente dañino, y seguramente molesto o perjudicial para los usuarios; sin embargo la energía de vibración puede ser disminuida o eliminada mediante el uso de dispositivos disipadores de energía, uno de los cuales se estudia en el presente trabajo.

Capítulo 1 Caracterización del viento

Para simular correctamente el comportamiento de una estructura en un lugar determinado, es necesario asignar al viento algunos parámetros o propiedades, para que las acciones actuantes sobre un modelo sean similares a las acciones que presenten en la realidad, ya que de no ser así se cometería el error de subestimar o sobreestimar dichas acciones.

Las características del viento cambian con el tiempo, pues el flujo atmosférico es turbulento, cambia con la posición a lo largo del terreno dependiendo de la orografía, y cambia con la altura sobre el terreno. Determinar con precisión las acciones que genera implica cierta dificultad, primero porque los problemas aerodinámicos son conceptual y matemáticamente complejos, y segundo porque las estructuras suelen estar generalmente poco adaptadas para tener una interacción suave con el viento. Por lo que no se pretende entrar en demasiados detalles cuando se quiere estimar las acciones presentes sobre una estructura, bastando con realizar una descripción general que asegure su integridad (Meseguer et al., 2013).

1.1 Características físicas

Las propiedades más significativas del aire, para el cálculo de las acciones del viento sobre un cuerpo son la densidad y la viscosidad; la primera condiciona la magnitud de las fuerzas aerodinámicas que aparecen sobre los cuerpos, y la segunda, además de condicionar también tales fuerzas, es la propiedad responsable de los fenómenos físicos que gobiernan el flujo en el entorno del cuerpo.

La viscosidad mide la resistencia al deslizamiento de unas capas de fluido sobre otras, por tal motivo, para que sus efectos sean notorios debe haber diferencias importantes de velocidad de unas capas de fluido frente a otras. La viscosidad depende de otras magnitudes físicas, principalmente de la temperatura, sabiendo que el aire es un fluido poco denso y poco viscoso en relación a otros fluidos comunes, para los propósitos de la aerodinámica de las edificaciones se puede hacer una importante simplificación, suponiendo que el valor de la viscosidad es constante, lo quiere decir que se tratará al viento como un fluido newtoniano.

En las siguientes expresiones se indica la variación de la temperatura, T , densidad y viscosidad, ρ y μ , en un intervalo de temperaturas en el entorno de la temperatura ambiente.

$$\frac{\rho}{\rho_0} = \frac{T_0}{T} \quad \text{Ecuación 1-1}$$

$$\frac{\mu}{\mu_0} = \frac{T_0 + T_s}{T + T_s} \left(\frac{T}{T_0}\right)^{3/2} \quad \text{Ecuación 1-2}$$

Donde:

T_0 - Es la temperatura absoluta y el subíndice cero en las variables indica los valores de referencia a una temperatura de 0°C, considerando la presión de 1 atmósfera.

$T_0=273.15$ K

$\rho_0=1.292 \text{ kg/m}^3$
 $T_s=110.4 \text{ K}$
 $\mu_0= 1.716 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$

Donde las variaciones transversales de velocidad no existan o sean extremadamente pequeñas, los efectos viscosos resultan despreciables, y el fluido se comporta en esas regiones como si fuera no viscoso. Esto no es así donde las variaciones transversales de la velocidad sean significativas, situación que se presenta en el flujo alrededor de los cuerpos, en regiones de fluido cercanas a ellos, en las llamadas capas límite y en las estelas que se forman corriente debajo de los cuerpos, regiones donde los términos viscosos sí son relativamente importantes (Meseguer et al., 2013).

1.2 Leyes que rigen el comportamiento de los fluidos

Para describir la interacción fluido-estructura, se deben satisfacer cuatro principios fundamentales:

1. Conservación de la masa (ecuación de continuidad).

Expresa que fijado un determinado periodo de tiempo y un cierto volumen de control fijo en el espacio, si no hay en su interior elementos que inyecten o que extraigan materia, la masa que entra en dicho volumen de control ha de ser igual a la que sale.

$$M = \rho_1 Q_1 = \rho_2 Q_2 \quad \text{Ecuación 1-3}$$

Donde:

M .- Es el flujo másico en kg/s.

ρ .- Es la densidad del fluido (si el fluido es incompresible la densidad de entrada es igual a la de salida).

Q .-Es el gasto de entrada y de salida respectivamente.

2. Segundo principio de Newton (establece el balance de la cantidad de movimiento).

Las ecuaciones de conservación de la cantidad de movimiento indican que, en cada una de las direcciones ligadas a los ejes del sistema de referencia, la variación con el tiempo de la cantidad de movimiento de un volumen fluido se equilibra con la resultante de las fuerzas que actúa sobre el mismo.

$$F = ma \quad \text{Ecuación 1-4}$$

Donde:

F .- Fuerza.

m .- Masa.

a .- Aceleración.

3. Primer principio de la termodinámica, que conduce a la ecuación de la energía.

A grandes rasgos lo que establece es el balance en un volumen de control, de la variación de la energía total, del trabajo producido por las fuerzas exteriores y del calor recibido del exterior.

4. Segundo principio de la termodinámica.

Afirma que la energía tiene calidad, así como cantidad, y los procesos reales ocurren hacia donde disminuye la calidad de la energía (Cengel & Boles, 2012).

1.3 Ecuación de Bernoulli

De las ecuaciones de Navier-Stokes, se deduce, que tras asegurar el cumplimiento de algunos condicionantes, que a bajas velocidades, como es el caso del flujo alrededor de cuerpos sometidos al viento terrestre, se puede establecer una relación entre la velocidad y la presión estática a lo largo del camino que una partícula sigue en su desplazamiento. Esta relación está definida en la ecuación de Bernoulli, que establece la dependencia a lo largo de una línea de corriente entre la presión estática y la velocidad en un punto del dominio fluido, p y U con las condiciones de presión y velocidad, p_∞ y U_∞ , existentes corriente arriba.

$$p + \frac{\rho U^2}{2} = p_\infty + \frac{\rho U_\infty^2}{2} = p_R \quad \text{Ecuación 1-5}$$

Donde ρ es la densidad del fluido, como se mencionó se considerada constante, $\rho U^2/2$ la presión dinámica $\rho U_\infty^2/2$ la presión dinámica de la corriente incidente y p_R la presión de remanso, la presión que alcanza al decelerar la corriente hasta una velocidad nula, presión que es, además, la máxima que se puede alcanzar en el dominio del fluido, lo anterior solo es válido cuando el fluido es considerado como potencial, una excepción a lo anterior son las capas límite que se desarrollan sobre las superficies de los cuerpos, y las estelas que se forman corriente debajo de los mismos, donde la viscosidad del aire aun siendo muy pequeña en términos relativos, desempeña un papel importante, y el flujo ya no presenta el comportamiento definido en la ecuación de Bernoulli (Meseguer et al., 2013).

1.4 Número de Reynolds

Este número establece la importancia relativa de los términos inerciales frente a los viscosos, comparando los órdenes de magnitud de ambos en un cierto volumen de control.

$$R_e = \frac{\rho U c}{\mu} \quad \text{Ecuación 1-6}$$

Donde:

c .- Longitud característica del cuerpo.

U .- Velocidad característica.

μ .- Viscosidad dinámica del fluido.

ρ .- Densidad del fluido.

En la aerodinámica de las estructuras el valor del número de Reynolds es muy grande, aunque la longitud característica y la velocidad sean relativamente bajas, ya que la viscosidad dinámica del aire es del orden de 10^5 Pa·s, se obtiene que el número de Reynolds que tiene el viento alrededor de un obstáculo de dimensiones comunes, es del orden de 10^6 , lo que indica que los términos viscosos vienen a ser la millonésima parte de los términos inerciales.

Al ser muy grande el número de Reynolds en la aerodinámica civil se permite realizar importantes simplificaciones al modelar el flujo alrededor de obstáculos, pues se puede despreñar el efecto de los términos viscosos en la ecuación de movimiento (Meseguer et al., 2013).

1.5 Capa Límite

En una escala macroscópica, cuando una corriente incide sobre un cuerpo, no puede haber discontinuidad entre las velocidades de una partícula en la superficie de un cuerpo y una partícula de un fluido en contacto con este. La velocidad de sus partículas de un cuerpo en reposo es nula, lo mismo pasa con las partículas fluidas justo en contacto con la superficie del cuerpo (figura 3).

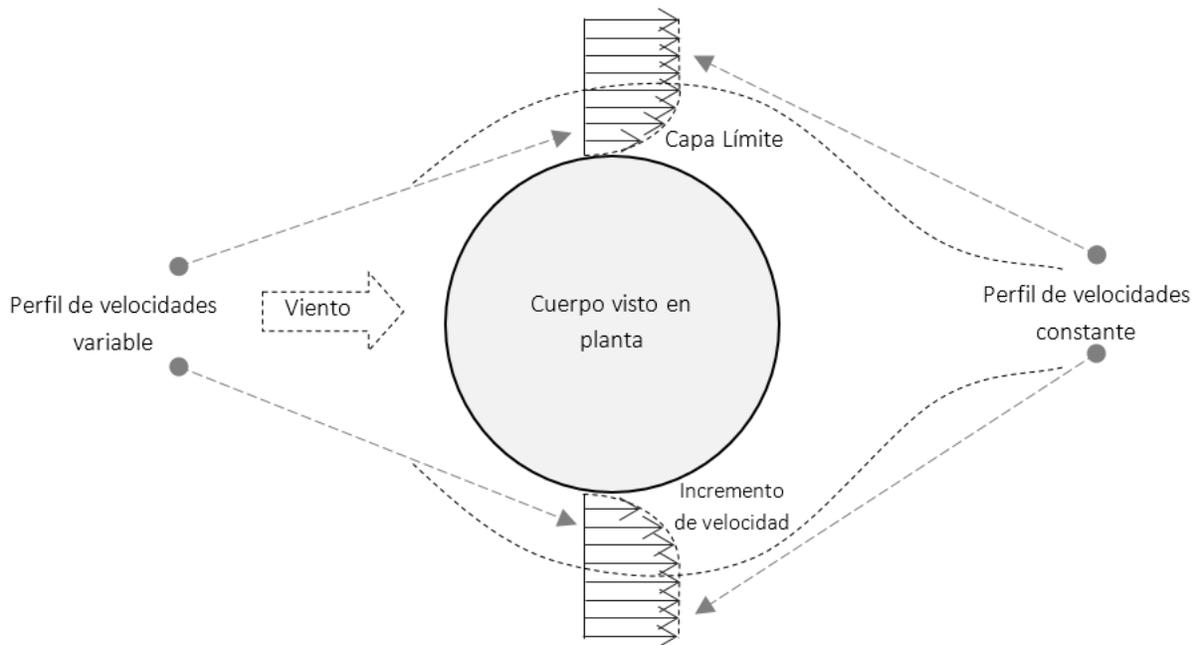


Figura 3. Capa límite.

Esto provoca que las líneas de flujo se atrasen cuando más cerca estén de un objeto, y sean arrastradas por las líneas más alejadas al objeto, formando un perfil que muestra la variación de la distribución de las velocidades, esto debido a los efectos viscosos del aire quedan confinados en esta zona denominada capa límite, la cual que parte desde el contacto viento-objeto, donde se tiene un valor nulo de velocidad, hasta el valor correspondiente de la corriente externa donde las variaciones de velocidad son despreciables.

El comportamiento de una capa límite está gobernado por el número de Reynolds, el cual se va incrementando con la distancia recorrida, de modo que antes o después se alcanza el valor para el que las pequeñas perturbaciones (intencionadas o accidentales) no pueden ser amortiguadas y la capa límite laminar deviene en turbulenta. El paso en la capa límite de régimen laminar a régimen turbulento se denomina transición.

Las perturbaciones que generan la transición de la capa límite de laminar a turbulenta son causadas por diversas causas, siendo las más relevantes el caso de la aerodinámica de las edificaciones la turbulencia de la corriente incidente y la rugosidad superficial del cuerpo.

Cuando la capa límite es turbulenta se produce un proceso de mezcla muy efectivo, el cual tiene la característica principal el transporte de cantidad de movimiento desde las regiones más alejadas del cuerpo hacia las más cercanas (Meseguer et al., 2013). En la Figura 4 se puede observar que en dos capas límite turbulentas, el perfil de velocidades se levanta entre mayor sea la cantidad de turbulencia.

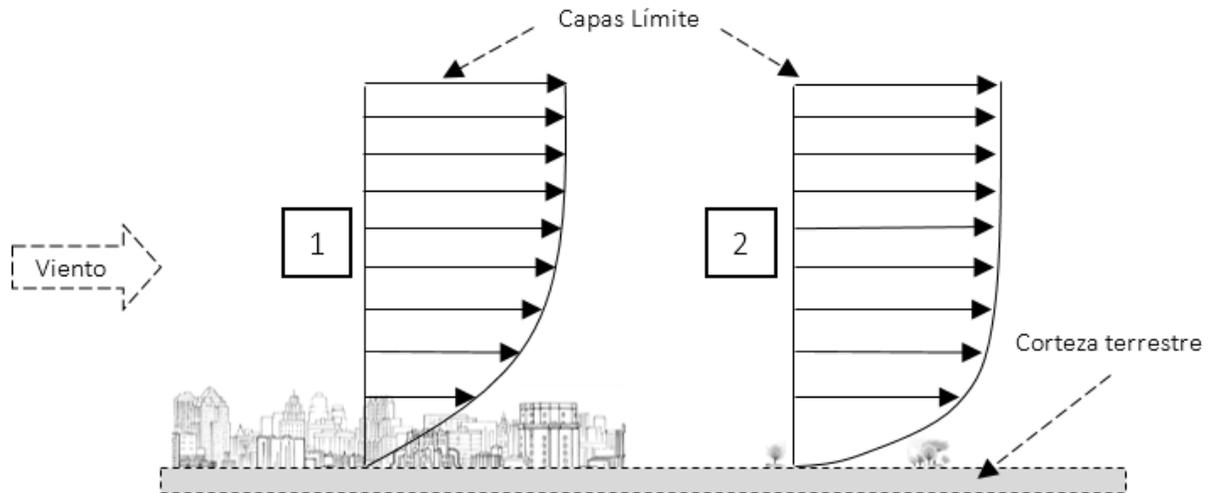


Figura 4. Diferencia entre dos capas límite turbulentas, 1.-Capa límite en una zona con obstrucciones y 2.-Capa límite en una zona con pocas obstrucciones.

1.6 Viento turbulento

Como menciona Espinosa (2011) en su tesis de maestría, una de las medidas más importantes para caracterizar al viento turbulento es la energía total contenida en las fluctuaciones de éste, expresada como la desviación estándar de las fluctuaciones de la velocidad del viento y normalizada respecto a la velocidad media, es conocida como intensidad de turbulencia.

Otra medida es la función de densidad de potencia espectral, la cual describe la distribución de la energía en cada frecuencia, mientras que la función de correlación espacio-temporal describe qué tanto puede fluctuar la velocidad del viento en un lugar determinado en función del tiempo.

Finalmente, la escala de longitud es una medida promedio del tamaño de los remolinos turbulentos en el viento y puede ser estimada integrando las funciones de correlación cruzada de la velocidad.

1.7 Efectos del viento en estructuras

La optimización de los materiales y métodos de fabricación de estructuras, han dado lugar a construcciones más flexibles y con menor amortiguamiento que las que se construían en el pasado, en consecuencia ha aumentado el número de estructuras que presentan sensibilidad a las acciones del viento atmosférico.

La turbulencia de la corriente incidente, es una de las causas principales que generan vibración en una estructura, que además de afectar el valor de la carga de viento estática, es una fuente de cargas aerodinámicas no estacionarias. Aunque la turbulencia no es la única causa de las cargas no estacionarias, pues éstas pueden ser debidas también a fluctuaciones del flujo inducidas por el propio cuerpo, como es la calle de torbellinos que se forma a sotavento del cuerpo.

Dentro de las inestabilidades aeroelásticas se suelen distinguir diversos tipos, tales como desprendimiento de torbellinos (vórtices), galope transversal, galope de estela, divergencia torsional, flambeo y bataneo.

La no uniformidad de la corriente incidente puede ser debida a la turbulencia presente en el propio viento atmosférico, ya que esta tiene un contenido de frecuencias muy amplio y da lugar a lo que se denominan cargas de ráfagas, pero también la no estacionariedad de la corriente incidente puede ser debida a que el cuerpo se encuentra inmerso en la estela producida por otro obstáculo situado corriente arriba.

En la actualidad todos los fenómenos aeroelásticos, no están completamente entendidos, por lo que en muchos estudios se emplean modelos empíricos en los cuales las características esenciales del fenómeno aerodinámico, son aportadas por datos experimentales. En general, los modelos incluyen en sus formulaciones un número suficiente de parámetros para ajustar algún modelo a las características más notables de los fenómenos aeroelásticos que se quieren analizar.

Las cargas de viento no estacionarias influyen de manera importante en los fenómenos de fatiga de las estructuras, sin embargo también hay que considerar un estado de cargas variables con el tiempo, aunque no ponga en peligro la integridad de la estructura, puede provocar efectos que tengan consecuencias sobre la funcionalidad de la misma, ya que pueden afectar a la comodidad de sus usuarios (Meseguer et al., 2013).

1.7.1 Sensibilidad de estructuras al viento

Las estructuras esbeltas, estructuras ligeras, acabados, cubiertas, entre otros. Son algunos sistemas o elementos que presentan mayor sensibilidad a los efectos del viento. Cabe mencionar que el viento siempre está actuando, sin embargo en estructuras de poca altura, los efectos que produce no comprometen su estabilidad.

El viento genera una carga dinámica (varía respecto al tiempo), la cual se incrementará entre más grande sea su velocidad y el área de contacto del objeto que impida su movimiento; generando empujes y succiones, provocando por ende vibración en la estructura.

Capítulo 2 Descripción del fenómeno de desprendimiento de vórtices

2.1 Desprendimiento de la capa límite

Si la presión aumenta en el sentido del flujo, las partículas tienden a frenarse, pero debido a la uniformidad transversal de la presión, las láminas fluidas más alejadas de la superficie del cuerpo, que tienen mayor velocidad, luchan contra este gradiente adverso. A consecuencia de esta deceleración asociada al gradiente adverso de presiones, que se presenta por igual sobre todas las partículas fluidas situadas en una misma línea perpendicular a la superficie del cuerpo, las partículas más próximas a la pared terminan por retroceder en vez de avanzar, y en la zona en la que ocurre este retroceso se dice que la capa límite está desprendida (Meseguer et al., 2013)(Figura 5).

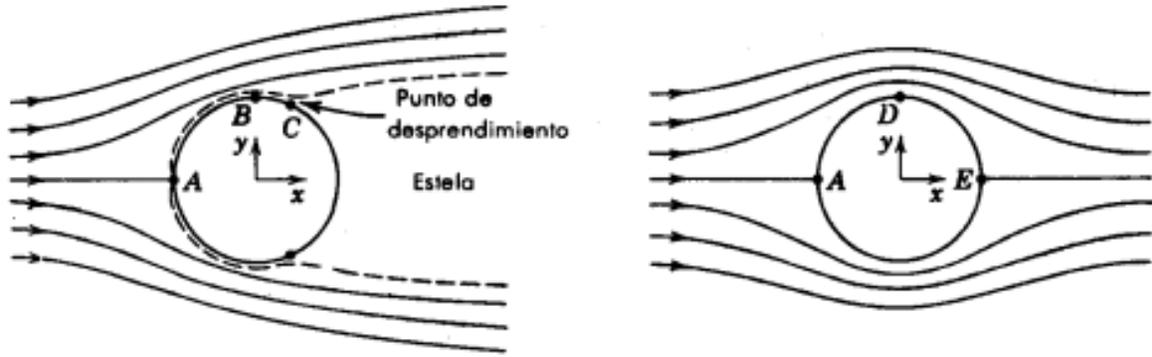


Figura 5. Desprendimiento de la capa límite. <https://goo.gl/HZg5iB>

A medida que una partícula fluye hacia la cara frontal de un cilindro, la presión en dicha partícula se eleva desde la presión de la corriente libre hasta la presión de estancamiento. La alta presión de fluido cerca del borde frontal impulsa el flujo alrededor del cilindro formando capas límite a ambos lados. Sin embargo a número de Reynolds altos, la alta presión no es suficiente para forzar el flujo alrededor de la parte posterior del cilindro. Cerca de la sección más ancha del cilindro, las capas límite se separan de cada lado de la superficie, formando dos capas de corte que arrastran el flujo y forman una estela (Blevins, 1990).

Dicho fenómeno se presenta en un sin número de estructuras esbeltas, sin embargo es más apreciable en aquellas que tienen sección transversal circular (Figura 6).

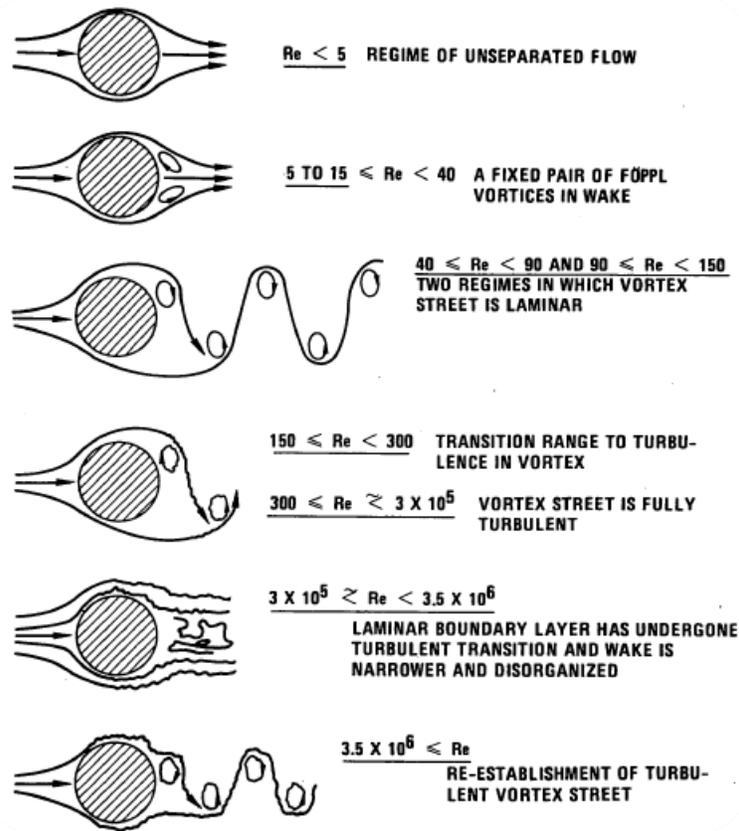


Figura 6. Regímenes de fluido circulando a través de un cilindro circular. Lienhard, 1966.

2.2 Parámetros de influencia

La vibración inducida por el desprendimiento de vórtices es resultado de la interacción fluido-estructura, y depende de factores relativos al flujo como la velocidad y las propiedades de la corriente incidente; y de la estructura, como son las siguientes:

- Rigidez: relaciona las cargas aplicadas con las deformaciones que se generan.
- Amortiguamiento: representa la capacidad que tiene una estructura de disipar energía.
- Masa: concretamente se hace referencia a la densidad.

2.3 Número de Strouhal

Los experimentos hechos sobre el desprendimiento de la capa límite, han mostrado que los torbellinos requieren de un determinado tiempo para formarse, luego se desprenden del cuerpo son arrastrados por la corriente hacia la estela. Estas dos etapas (crecimiento de torbellino y posterior desprendimiento) suceden con periodicidad. Existe una constante de proporcionalidad entre la frecuencia a la que se desprenden los torbellinos y la velocidad media de la corriente incidente. Este parámetro recibe el nombre de número de Strouhal:

$$S_t = \frac{S_t b}{U_\infty}$$

Ecuación 2-1

Donde:

S_t .- es la frecuencia de desprendimiento de los torbellinos.

b .- es una dimensión característica transversal del cuerpo en consideración.

U_∞ .-es la velocidad media de la corriente incidente.

Los torbellinos desprendidos (de manera alterna, figura 7) son arrastrados por la corriente, dispuestos equiespaciadamente en dos hileras más o menos paralelas. Los de una hilera tienen un sentido de circulación opuesta a los de la otra, formando la configuración conocida como calle de Von Kármán.

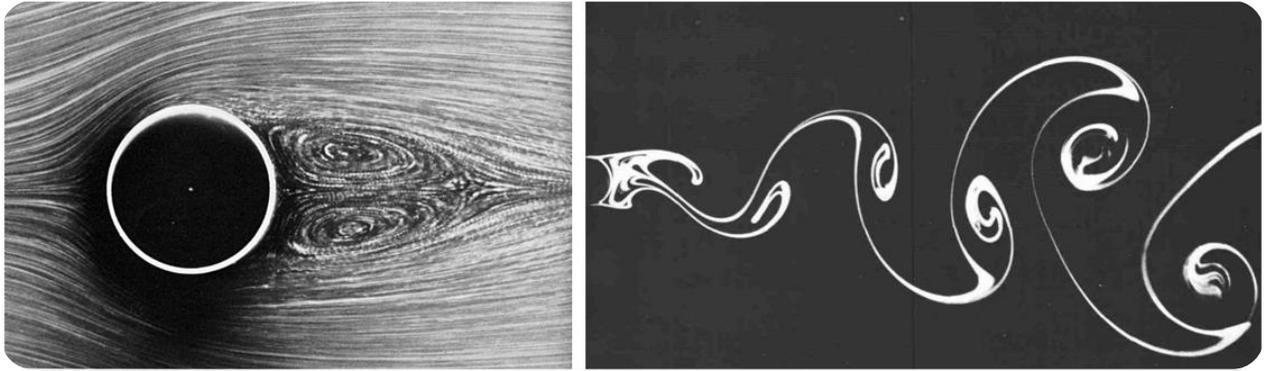


Figura 7. Calle de torbellinos de Von Kármán. <https://goo.gl/27ApgD> y <https://goo.gl/FZT8FQ>

Si la estructura es suficientemente flexible puede disipar esta energía, deformándose, y si la frecuencia de desprendimiento de los torbellinos es similar o se acerca a la frecuencia natural de la estructura, la respuesta de ésta ante la excitación debida a los torbellinos desprendidos puede hacerse significativamente grande pues entra en resonancia, produciéndose principalmente oscilaciones en dirección normal a la corriente incidente (Meseguer et al., 2013).

2.4 Número de Scruton

Otra característica de los resultados experimentales es que las amplitudes de las oscilaciones del cuerpo dependen principalmente del número de Scruton S_c y de la forma geométrica del mismo. Un parámetro formado por el producto de la relación de masas, ρ_c/ρ , y el coeficiente adimensional de amortiguamiento estructural, ζ , es decir:

$$S_c = \frac{\rho_c}{\rho} \zeta$$

Ecuación 2-2

Donde:

ρ_c .- Es la densidad del cuerpo que se encuentra inmerso en el fluido.

ρ .- Es la densidad del fluido.

Capítulo 3 Dispositivos para reducir la vibración en estructuras

La vibración y el control de vibraciones (como el amortiguamiento) de las estructuras son de los principales temas de investigación en ingeniería mecánica, ingeniería aeroespacial, ingeniería civil, y algunas otras disciplinas afines; son vitales para la industria y muchas aplicaciones relacionadas.

Los diseños estructurales que comúnmente se diseñan, frecuentemente son incapaces de hacer frente a los problemas de resonancia estructural, los cuales generan vibraciones excesivas.

Una solución para disminuir o mitigar los altos niveles de vibración y de resonancia estructural es incorporando un dispositivo amortiguador en la estructura.

El amortiguamiento estructural se refiere a la capacidad de una estructura o un componente estructural de disipar energía o a su capacidad de remover la vibración estructural o parte de la energía asociada a esa vibración.

3.1 Definición de vibración

Para entender el efecto de la vibración generada por la interacción fluido-estructura, es necesario tener conocimiento pleno de su significado, por lo que a continuación se citan cuatro fuentes distintas de este:

1. En su sentido general vibración es un movimiento periódico, i.e., un movimiento el cual se repite con todas sus características en un cierto intervalo de tiempo, llamado periodo de vibración y usualmente designado con el símbolo T (Den, 1947).
2. Vibración puede ser considerada como algún movimiento que se repite en un intervalo de tiempo, o se puede definir vibración como oscilaciones de un sistema sobre una posición de equilibrio algunos ejemplos de vibración son: la oscilación de un péndulo, el movimiento de la cuerda de una guitarra, el movimiento de la marea, el aleteo de las alas de un avión en turbulencia, o el vaivén de un edificio alto y esbelto debido al viento o a un sismo (Kelly, 2000).
3. Vibración mecánica: es el movimiento de vaivén de una máquina o elemento de ella en cualquier dirección del espacio desde su posición de equilibrio. (Royo, Rabanaque, & Torres).
4. En su forma más sencilla, una vibración se puede considerar como la oscilación o el movimiento repetitivo de un objeto alrededor de una posición de equilibrio. La posición de equilibrio es la a la que llegará cuando la fuerza que actúa sobre él sea cero (White, 2010).

3.2 Clasificación de los dispositivos disipadores de energía

A continuación se muestra la clasificación existente de los sistemas de disipación de energía en estructuras, dando mayor importancia a los sistemas pasivos, ya que son los que se abordan en el presente trabajo.

3.2.1 Activo

Un sistema de control activo, es aquel en el que una fuente externa alimenta a unos actuadores, que aplican fuerzas a la estructura de una forma predefinida. Estas fuerzas pueden ser usadas para añadir y

disipar energía en la estructura. En un sistema de control de alimentación activa, las señales enviadas al actuador están en función de la respuesta del sistema de medición de sensores (físicos, ópticos, mecánicos, eléctricos, químicos, etc.).

3.2.2 Pasivo

Un sistema de control pasivo no requiere una fuente externa de poder. Los dispositivos de control pasivo generan fuerzas que se desarrollan en respuesta al movimiento de la estructura. La energía en un sistema estructural pasivamente controlado, no se puede incrementar con los dispositivos de control pasivos. A continuación se mencionan algunos de los disipadores más utilizados en este tipo de sistema:

- Amortiguador metálico de fluencia (Metallic Yield Dampers)
- Amortiguador de fricción (Friction dampers)
- Amortiguador viscoelástico (Viscoelastic Dampers)
- Amortiguador fluido viscoso (Viscous Fluid Dampers)
- **Masa sólida resonante o sintonizada (Tuned mass dampers)**
- Masa líquida resonante (Tuned liquid dampers)

3.2.3 Híbrido

El uso común del término “Control híbrido” implica el uso combinado de sistemas de control activos y pasivos. Por ejemplo una estructura equipada con un amortiguador viscoelástico, complementado con un amortiguador de masa activa colocado en la parte superior de la estructura, o una estructura asilada en la base, con actuadores controlados activamente para mejorar su rendimiento.

3.2.4 Semiactivo

Los sistemas de control semiactivo son una clase de sistema de control activo para el cual los requerimientos de energía externa están en orden de la magnitud más pequeña que un sistema de control activo. Generalmente, un sistema semiactivo no añade energía mecánica al sistema estructural, por lo tanto su correcta operación está garantizada, estos sistemas son vistos frecuentemente como un dispositivo de control pasivo (Housner, et al., 1997).

3.3 Campo de aplicación

3.3.1 Sistemas de control Activo

Estos sistemas se utilizan para controlar la respuesta de las estructuras a excitaciones internas o externas, tales como las generadas por: maquinaria, viento, sismo, etc. Donde el nivel de seguridad o la comodidad de los ocupantes es motivo de preocupación.

El control activo hace uso de una amplia variedad de actuadores, incluyendo amortiguadores de masa activos y amortiguadores de masa híbridos; los cuales pueden emplear actuadores: hidráulicos, neumáticos, electromagnéticos, o accionados por algún mecanismo. Una característica esencial de los sistemas de control activo es que se utiliza energía externa para efectuar la acción de control. Esto hace que este tipo de sistema sea vulnerable a la falla de energía, lo cual es siempre una posibilidad, durante un siniestro.

3.3.2 Sistemas de control pasivo

Un sistema de control pasivo puede depender del diseño inicial de la estructura, de la adición de materiales viscoelásticos a la estructura, del uso de amortiguadores de impacto, o del uso de amortiguadores de masa sólida resonante.

Los sistemas de control pasivo tienen tres ventajas principales:

1. Por lo general son relativamente baratos.
2. No consumen o necesitan ningún tipo de energía externa para funcionar, por lo que ante un siniestro, seguirían trabajando.
3. Son inherentemente estables (Housner et al., 1997).

3.3.2.1 Masa sólida sintonizada (MSS)

Un amortiguador de masa sólida sintonizada es una herramienta ingenieril clásica, que consiste en una masa, un resorte y un amortiguador viscoso, colocado con la finalidad de atenuar la vibración deseada, para una frecuencia determinada. La frecuencia del amortiguador se sintoniza con la frecuencia natural del sistema, provocando que el amortiguador vibre en resonancia, disipando la mayor cantidad de energía.

Las MSS más simples solo pueden sintonizarse con una sola frecuencia de la estructura reduciendo substancialmente la respuesta del modo considerado. Sin embargo, la respuesta en una estructura con múltiples grados de libertad puede aumentar a medida de que el número de crujeas o niveles es más grande. De ser así la ingeniería ha dado solución a este problema, instalando un arreglo de disipadores que atenúen la vibración de los modos que se ven afectados.

Las primeras aplicaciones de las MSR se enfocaban en mitigar las acciones inducidas por el viento. Hoy en día estudios experimentales han demostrado su efectividad en la reducción de la respuesta sísmica, aunque con limitaciones.

3.3.2.2 Ejemplos de aplicación

A continuación se muestran algunos ejemplos de edificios altos diseñados con dispositivos de masa sólida sintonizada (MSS) y otros que por motivos de inestabilidad se les adaptaron estos dispositivos.

Taipéi 101 (Taiwán, Republica de China)

Este rascacielos de 508 metros de altura, cuenta con el amortiguador de viento más grande y pesado del mundo, con un diámetro de 5.5 metros y un peso de 660 toneladas, está suspendido entre los niveles 92 y 87, su masa está compuesta de 41 placas de acero de 12.5 cm de espesor. Fue diseñado para mitigar los efectos sísmicos y aeroelásticos (Figura 8).

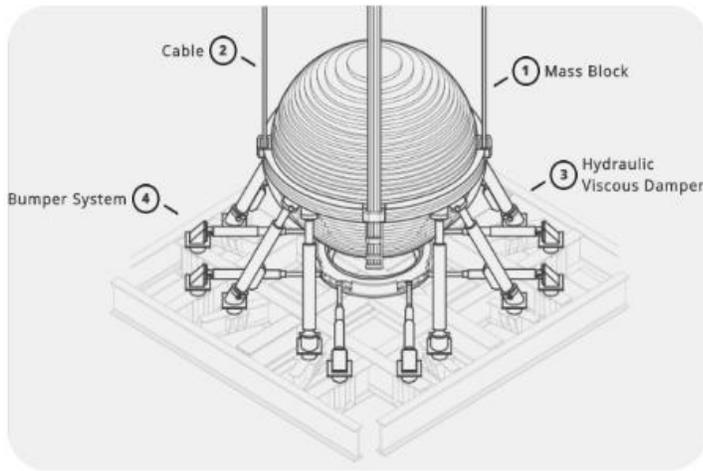


Figura 8. Rascacielos Taipei 101 y su dispositivo disipador MSS. <https://goo.gl/QmNxt5> y <https://goo.gl/6m5GHC>.

Torre City Corp. (Nueva York, Estados Unidos de América)

Este edificio tiene 279 metros de altura y fue uno de los primeros en tener amortiguadores MSS. Su innovador sistema consta de una gran masa formada por una losa de concreto de 400 toneladas, la cual descansa en una capa delgada de aceite en la parte superior del edificio, esta masa está conectada a las paredes exteriores por medio de muelles de acero. Es capaz de disipar la energía generada por acciones externas o internas (Figura 9).

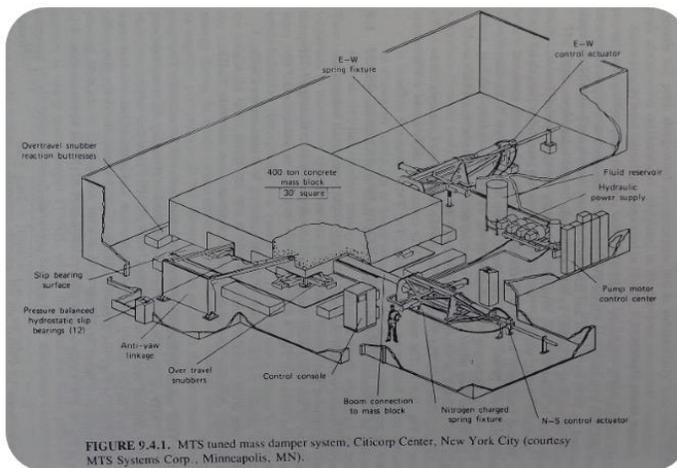


Figura 9. Torre City Corp y su dispositivo disipador MSS. Simiu et al. ,1996 y <https://goo.gl/p3cWv2>.

Chiba-Port Tower (Japón)

La torre Chiba-Port tiene de 125 metros de altura y fue la primera torre en Japón que se equipó con amortiguadores de masa sólida resonante. La función de este sistema es incrementar el amortiguamiento del primer modo de vibrar en ambas direcciones ("X" y "Y"), este sistema reduce del 30 al 40 por ciento los desplazamientos en la planta superior. Por ser una de las primeras versiones de este sistema, se puede observar que consta de un mecanismo muy complejo para el rodamiento y amortiguación, además de tener una masa relativamente grande (Figura 10).



Figura 10. Rascacielos Chiba-Port y su dispositivo disipador MSS. Connor, 2002 y <https://goo.gl/67ympV>.

Puente Milenio (Londres, Inglaterra)

Este puente de 230 metros de largo, tuvo que cerrar temporalmente tres días después de su inauguración, como resultado de movimientos excesivos de su estructura, debidos a la vibración provocada por el tránsito de los usuarios. Después de un intenso programa de investigación se presentó un informe recomendando la instalación de una serie de amortiguadores diseñados para reducir el movimiento del puente a niveles aceptables.

Se instaló una combinación de 37 amortiguadores viscosos, similares a los amortiguadores de automóviles, y 54 amortiguadores de masa sólida resonante. La mayoría de los amortiguadores se situaron debajo de la cubierta del puente con el fin de no afectar su diseño original (Figura 11).



Figura 11. Puente Milenio y sus dispositivos disipadores MSS. <https://goo.gl/ybe48A> y <https://goo.gl/x2ZJwB>.

Huis Ten Bosch Tower (Nagasaki, Japón)

Las versiones más recientes de amortiguadores de masa sólida resonante, como la que se muestra en esta Figura, siguen el mismo principio, sin embargo se han minimizado las limitaciones de este sistema. Ahora

estos mecanismos emplean un conjunto de cojinetes elastoméricos de caucho que funcionan como resortes de corte y algunos polímeros que proveen la capacidad de amortiguamiento viscoelástico. Estas mejoras han permitido hacerlos más compactos, fáciles de modificar y ensamblar, además de añadirles la capacidad de trabajar en múltiples direcciones y requerir un control poco sofisticado (Figura 12).

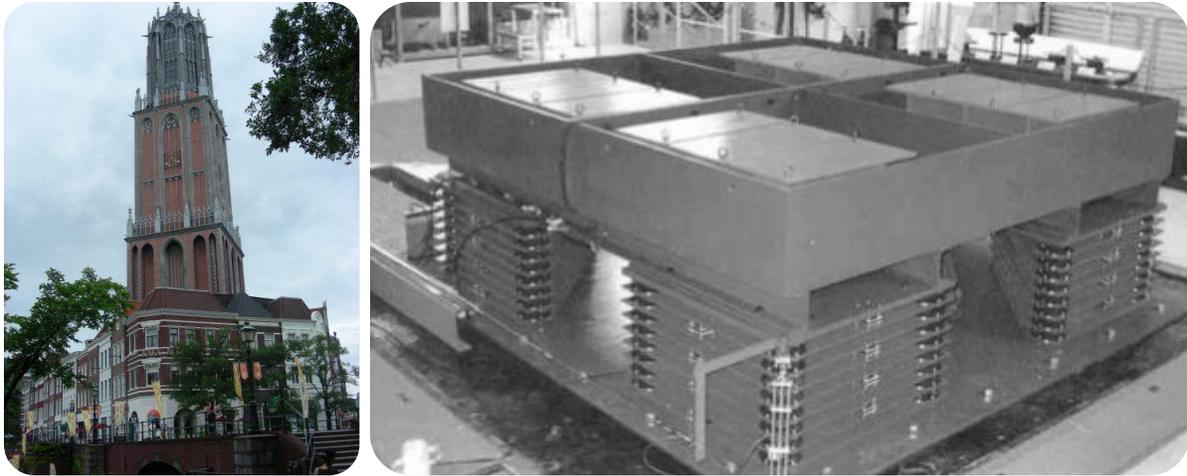


Figura 12. Torre Huis Ten Bosch y su dispositivo disipador MSS. Connor, 2002 y <https://goo.gl/h7WWC4>.

Estela de luz (Ciudad de México, México)

Este monumento de 104 metros de altura, fue inaugurado en enero del 2012, con motivo de los festejos del Bicentenario de la Independencia de México y del Centenario de la Revolución Mexicana. De manera general, los disipadores instalados constan de una masa cilíndrica formada de placas metálicas, la cual se conecta a las paredes perimetrales de la estructura por medio de resortes, además de tener un amortiguador viscoso en su base. Se cuenta con un total de 10 MSS en este monumento, dos exteriores en forma de péndulo y ocho al interior de las columnas, los dos primeros fueron diseñados para contrarrestar las fuerzas sísmicas, y ocho restantes para reducir la respuesta inducida por el viento (Figura 13).

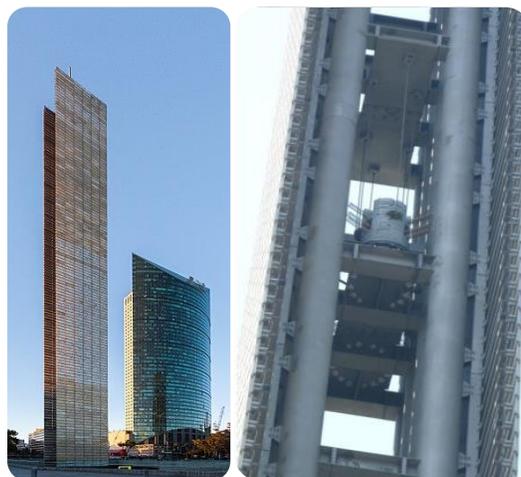


Figura 13. Estela de luz y sus dispositivos disipadores MSS. Aportación del Dr. Adrián Pozos Estrada (Apuntes de la clase de viento) y <https://goo.gl/9j9uzT>.

Puente Álamo (Jalisco, México)

Este puente se inauguró el 26 de enero del 2011 en Tlaquepaque, Jalisco. Su principal objetivo es conectar la carretera Chapala-Guadalajara con la calzada Lázaro Cárdenas, la cual cruza los cuatro municipios centrales de la zona metropolitana de Guadalajara. Su diseño consta de una masa prismática, la cual está conectada a unos amortiguadores viscoelásticos fijados en los paños interiores de las vigas de acero, que sostienen la superficie de rodamiento del puente (Figura 14).



Figura 14. Puente Álamo sus dispositivos disipadores MSS. Datos del mapa ©2017 Google, INEGI <https://goo.gl/FQCHSj> y <https://goo.gl/XexmHY>.

Capítulo 4 Procedimientos para determinar las acciones del viento y la respuesta de la estructura de acuerdo a la normatividad

4.1 Analítico

El primero, referido como análisis estático, se emplea cuando se trata de estructuras o elementos estructurales suficientemente rígidos, que no sean sensibles a los efectos dinámicos del viento.

En caso contrario, se utiliza un segundo procedimiento con base a un análisis dinámico, en el cual se afirma que una construcción o elemento estructural es sensible a los efectos dinámicos del viento cuando se presentan fuerzas importantes provenientes de la interacción dinámica entre el viento y la estructura.

4.2 Experimental

Un tercer procedimiento para evaluar la acción del viento sobre las construcciones consiste en llevar a cabo pruebas experimentales de modelos en túnel de viento. Estas pruebas deben realizarse cuando se desee conocer la respuesta dinámica de estructuras cuya geometría sea marcadamente diferente de las formas comunes para las cuales existe información disponible en los reglamentos o en la literatura. También se recomiendan estas pruebas cuando es necesario calcular coeficientes de presión para diseñar recubrimientos o cubiertas de estructuras que tengan una forma poco común. Cabe mencionar que este último análisis es el que más se apega a la realidad, al considerarse un análisis propio de una estructura en particular (un traje hecho a la medida). En contraste con la incertidumbre que se tiene al modelar el comportamiento del viento mediante expresiones analíticas.

4.3 Aceleraciones y desplazamientos

La respuesta humana debida a las vibraciones ha sido estudiada desde hace algunos años, teniendo como resultado percepciones de incomodidad o molestar. En una torre de control se deben minimizar lo más posible las vibraciones, ya que los operadores de la torre tienen por función dirigir el tránsito de las aeronaves de manera segura y eficiente, con el objetivo de prevenir colisiones; por lo tanto requieren de la mayor concentración.

4.3.1 Aceleración

Según Meseguer et al. (2013) la sensación de malestar e incomodidad que se sufre en ciertos tipos de movimiento se debe a la poca estabilidad del oído medio, cuando éste no es capaz restablecer la posición de equilibrio del cuerpo. Los parámetros más significativos a los que las personas reaccionan cuando se presenta un movimiento oscilatorio son la aceleración, los cambios de magnitud de la aceleración, la frecuencia y amplitud de oscilación.

La normatividad actual en México, se ve muy limitada en este ámbito. En el RCDF (2004) se puede observar que únicamente se solicita al diseñador verificar que en edificios altos, la aceleración debida a empujes dinámicos no pase del 4 por ciento de la aceleración de la gravedad (40 mili-g). Por tal motivo y como complemento de este trabajo, se recurrió a una publicación de la Convención Europea para las Construcciones en Acero (1978), donde se establecen las aceleraciones máximas permisibles asociadas a los modos de vibración, identificados como desplazamientos horizontales.

Tabla 2. Percepción de incomodidad en las personas ante oscilaciones horizontales (Simiu et al., 1996).

Grado de incomodidad	Aceleración (en porcentaje de la aceleración de la gravedad)
Imperceptible	< 0.5% g
Perceptible	0.5% g - 1.5% g
Molesto	1.5% g - 5% g
Muy molesto	5% g - 15% g
Intolerable	> 15 % g

4.3.2 Desplazamiento

Según las NTCDF (2004) , se revisará que los desplazamientos relativos en niveles consecutivos de edificios o entre secciones transversales de torres, causados por las fuerzas de diseño por viento, no excedan de los valores siguientes, expresados como fracción de la diferencia entre los niveles de piso (distorsiones):

a) Cuando no existan elementos de relleno que puedan dañarse como consecuencia de las deformaciones angulares: 0.005;

b) Cuando existan elementos de relleno que puedan dañarse como consecuencia de las deformaciones angulares: 0.002.

*Se consideró el inciso b) para el caso en estudio.

Capítulo 5 Modelado de la torre de control y consideraciones de análisis

5.1 Geometría

El modelo geométrico de la estructura fue generado por Ramírez (2016) en su tesis de licenciatura, por medio de un código en lenguaje Mechanical APDL, del programa ANSYS© (2013), el cual se modificó y adaptó para los fines del presente trabajo (Figura 15).

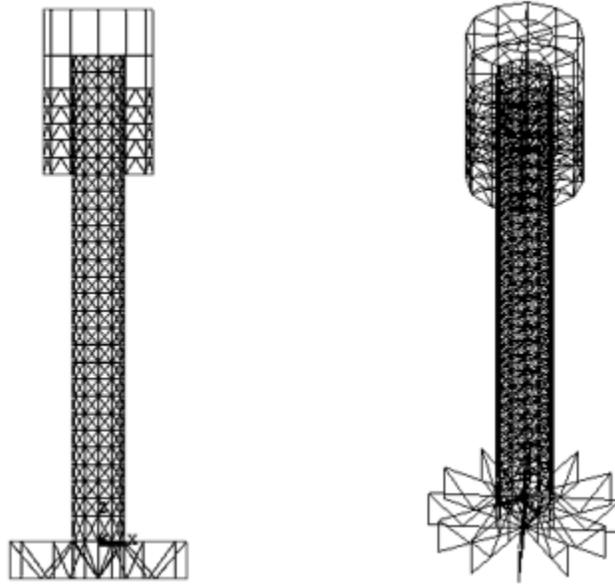


Figura 15. Modelo geométrico de la torre de control. Captura de pantalla del modelo hecho en el programa ANSYS-APDL© (2013).

Para modelar el amortiguador (MSS) se añadieron dos elementos:

Un elemento combin14 el cual representa el comportamiento de un amortiguador viscoelástico de comportamiento no lineal, actuando a tensión y compresión, Al cual fue necesario asignarle una dirección de trabajo y un coeficiente de amortiguamiento viscoso C_{v2} , ya que el coeficiente de amortiguamiento real se calcula con la expresión:

$$C_v = C_{v2} * v$$

la fuerza de amortiguamiento se calcula cómo:

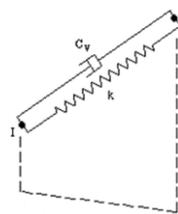
$$F_x = -C_v \frac{ds_x}{dt}$$

Donde:

v.- es la velocidad calculada en un instante anterior.

Ds_x/dt .- es la derivada del desplazamiento con respecto del tiempo.

Tambien se utilizó un elemento mass21 para representar la masa del disipador (MSS), ya que el elemento combin14 no tiene la opción de asignar una masa.



Ecuación 5-1

Ecuación 5-2

Tanto la masa como el coeficiente de amortiguamiento se tomaron del catálogo de un fabricante de disipadores de masa sólida sintonizada. A continuación se muestra una tabla con algunas de sus propiedades:

Tabla 3. Propiedades del disipador de masa sólida sintonizada.

Disipador MSS		
ω	4.21	rad/s
T_n	1.49	s
M_{MSS}	195,601	kg
M_{Mod}	978,006	kg
M_{Tot}	2,286,800	kg
cV_2	3,595,680	$N*s^2/m^2$
K	3,470,257	N/m
%MM	20.0	%
%MT	8.6	%

Donde:

ω .- Es la frecuencia natural circular.

T_n .- Es el periodo natural.

M_{MSS} .-Es la masa del amortiguador.

M_{Mod} .-Es la masa modal del modo fundamental.

M_{tot} .- Es la masa total de la estructura.

cV_2 .-Es el coeficiente de amortiguamiento viscoso.

K .-Es la rigidez del amortiguador

%MM.-Es el porcentaje de la masa del amortiguador respecto a la masa modal.

%MT.-Es el porcentaje de la masa del amortiguador respecto a la masa total.

5.2 Obtención de las fuerzas y análisis

En el presente trabajo se realizó un análisis modal y un análisis paso a paso de la estructura debido al fenómeno de desprendimiento de vórtices. Para ambos análisis, por practicidad se consideró el peso propio de la torre como única fuente de masa.

5.2.1 Análisis modal

Al realizar un análisis modal se pueden obtener las propiedades dinámicas de una estructura. Los resultados más importantes que se obtienen son las frecuencias naturales y la configuración deformada de los modos de vibrar. Los cuales fueron utilizados para calcular el amortiguamiento de la estructura.

El análisis se efectuó con la ayuda del programa ANSYS Mechanical APDL© (2013), arrojando los siguientes resultados:

Tabla 4. Resultados del análisis modal de la torre de control. Elaboración propia con base en los resultados arrojados por el programa ANSYS Mechanical APDL© (2013).

Modo	Frecuencia natural (ciclos/s)	Frecuencia natural circular (Rad/s)	Periodo (s)	Masa efectiva dirección Y (kg)	Fracción de masa acumulada dirección Y	Masa modal o Generalizada (kg)
1	0.670	4.212	1.49	144680.0	0.10	505207.2
2	0.674	4.235	1.48	970752.0	0.78	511467.1
3	1.787	11.227	0.56	65.4	0.78	190956.7
4	3.084	19.377	0.32	27271.7	0.80	58124.2
5	3.131	19.670	0.32	100041.0	0.87	62253.7
6	3.647	22.913	0.27	41.0	0.87	26854.8
7	4.142	26.028	0.24	35722.2	0.89	140394.5
8	4.286	26.927	0.23	154628.0	1.00	210170.4
9	4.945	31.068	0.20	8.4	1.00	6625.5
10	6.200	38.956	0.16	4.3	1	22828.7

Era de esperarse que las frecuencias del primer y segundo modo fueran muy parecidas, esto se debe a que la torre, tiene propiedades similares en todas sus direcciones, ya que es simétrica, y estos modos presentan el mismo comportamiento, en este caso desplazamientos laterales.

En las siguientes imágenes se muestra la configuración deformada de la estructura, generada por el análisis modal.

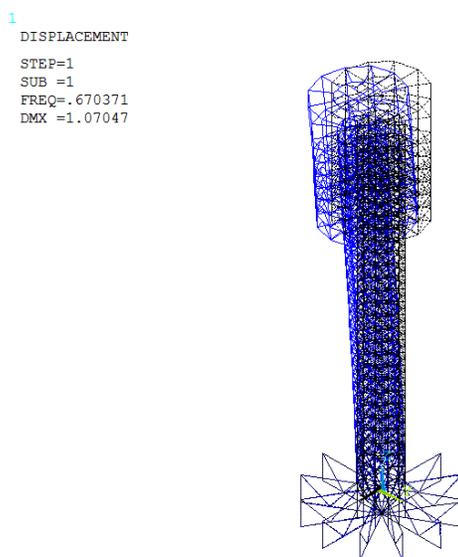


Figura 16. Configuración deformada del primer modo de vibrar. Captura de pantalla del análisis modal hecho en el programa ANSYS Mechanical APDL© (2013).

```
1  
DISPLACEMENT  
STEP=1  
SUB =2  
FREQ=.674016  
DMX =1.07752
```

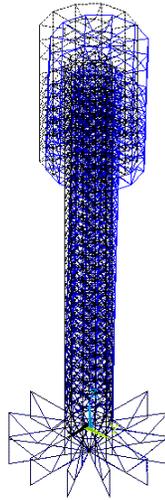


Figura 17. Configuración deformada del segundo modo de vibrar. Captura de pantalla del análisis modal hecho en el programa ANSYS Mechanical APDL© (2013).

```
1  
DISPLACEMENT  
STEP=1  
SUB =3  
FREQ=1.78676  
DMX =1.00481
```

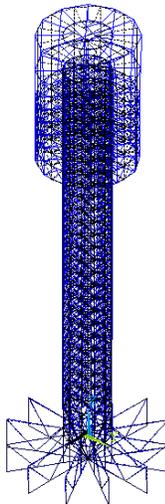


Figura 18. Configuración deformada del tercer modo de vibrar. Captura de pantalla del análisis modal hecho en el programa ANSYS Mechanical APDL© (2013).

Como se puede observar los dos primeros modos describen desplazamientos horizontales, lo que indica que la estructura se comporta adecuadamente. El primer modo corresponde a una traslación dominante en el eje "X" y el segundo también una traslación, dominante en el eje "Y", mientras que el tercer modo corresponde a la torsión al rededor del eje "Z".

5.2.2 Amortiguamiento

Como menciona Chopra (2014) el amortiguamiento es una variable muy compleja de definir analíticamente, pues depende de muchos factores, podría pensarse que es posible determinar la matriz

de amortiguamiento de una estructura a partir de las propiedades de amortiguamiento de los distintos elementos estructurales, tal como se determina la matriz de rigidez, sin embargo la determinación de la matriz de amortiguamiento en esta forma resulta impráctica porque a diferencia de los elementos que conforman la matriz de rigidez, las propiedades de amortiguamiento no están bien establecidas. Incluso si se conocieran con exactitud, la matriz de amortiguamiento resultante desprendería gran parte de la energía disipada por la fricción entre las conexiones, apertura y cierre de grietas, esfuerzos en elementos no estructurales, la fricción entre la propia estructura y elementos no estructurales, etc.

Por tal motivo las propiedades de amortiguamiento de una estructura se deben determinar de manera experimental, si por alguna razón no se pueden hacer las pruebas necesarias o la estructura apenas se está diseñando, es necesario hacer estimaciones con ayuda de datos medidos en otras estructuras.

Una buena aproximación hacia la construcción de una matriz de amortiguamiento clásico que sea en cierta medida consistente con los datos experimentales, se tiene el amortiguamiento de Rayleigh, ya que propone diferentes fracciones de amortiguamiento para cada modo de vibrar, lo cual hace el análisis más próximo a la realidad.

Se considera el amortiguamiento de Rayleigh como:

$$c = a_0 m + a_1 k \quad \text{Ecuación 5-3}$$

Donde:

c .- Matriz de amortiguamiento de la estructura.

m .- Matriz de masas de la estructura.

k .- Matriz de rigidez de la estructura.

Los coeficientes a_0 y a_1 pueden determinarse a partir de las fracciones de amortiguamiento especificadas ζ_i y ζ_j para los modos i -ésimo y j -ésimo, con la expresión:

$$\frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1/\omega_i & \omega_i \\ 1/\omega_j & \omega_j \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} a_0 \\ a_1 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \zeta_i \\ \zeta_j \end{Bmatrix} \quad \text{Ecuación 5-4}$$

Al aplicar este procedimiento a un problema práctico, los modos i y j con las fracciones de amortiguamiento especificadas deben elegirse de manera que garanticen valores razonables para las fracciones de amortiguamiento en todos los modos que contribuyen de manera significativa a la respuesta. Ver anexo 1

Relacionando los modos 1 y 10, y suponiendo que la fracción de amortiguamiento de la estructura es del 1%, tenemos:

$$\begin{Bmatrix} a_0 \\ a_1 \end{Bmatrix} = 2 \begin{bmatrix} 1/\omega_1 & \omega_1 \\ 1/\omega_{10} & \omega_{10} \end{bmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} 1\% \\ 1\% \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0.0760216 \\ 0.0004633 \end{Bmatrix} \quad \text{Ecuación 5-5}$$

La matriz de amortiguamiento queda:

$$c = 0.0760216 m + .0004633 k$$

5.2.3 Análisis por desprendimiento de vórtices

Como se mencionó anteriormente el análisis del fenómeno desprendimiento de vórtices se debe a la presencia de fuerzas normales a la dirección del flujo. En la Figura 18 se muestra de manera esquemática la vibración generada por este fenómeno en un cuerpo cilíndrico circular.

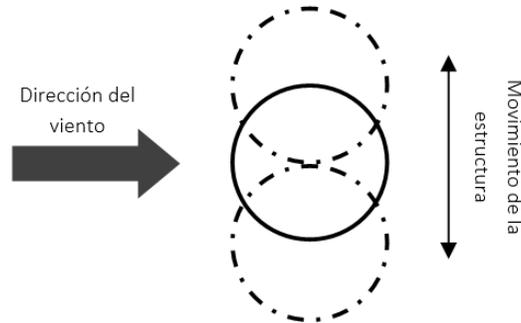


Figura 19. Vista en planta, Vibración producida por el fenómeno de desprendimiento de vórtices alternantes.

Para realizar el análisis fue necesario generar señales, es decir, vectores que contienen una historia en el tiempo de las velocidades o fuerzas generadas por el viento, para ello se utilizó un programa de simulación de fuerzas de desprendimiento de vórtices, elaborado en el Instituto de Ingeniería de la UNAM, el cual se basa en técnicas de simulación de Monte Carlo. Para generar dichas señales fue necesario ingresar al programa algunos parámetros que conforman el modelo matemático, estos se presentan en la tabla 5.

Tabla 5. Parámetros requeridos para la simulación de las fuerzas de desprendimiento.

Parámetros para simulación de vórtices			Descripción
St	0.2	s	Número de Strouhal
f_s	0.674	ciclos/s	Frecuencia de desprendimiento
D	9	m	Diámetro
S_L	0.25	1	Factor de empuje transversal
ρ_a	1.25	kg/m ³	Densidad del aire
h	0.1	s	Incremento de tiempo
V_m	23	m/s	Velocidad media

Se realizaron tantos análisis, como números de juegos de señales se requirieran para obtener resultados representativos, ya que el viento se comporta como una variable aleatoria, es decir, no se puede predecir el resultado exacto ya que cada experiencia en particular arroja resultados diferentes.

Con ayuda del programa ANSYS Mechanical APDL© (2013), se realizaron 20 análisis dinámicos, para los 10 juegos diferentes de señales de fuerzas, ya que se debía analizar la estructura original y después hacer la

comparación con la estructura mejorada con el disipador MSS. Se realizaron análisis elástico-lineales para la estructura original, y no lineales para la estructura mejorada, pues como se mencionó anteriormente, el dispositivo disipador se rige bajo ese comportamiento.

Una vez terminadas las simulaciones, se obtuvo la respuesta de la estructura en términos de historia en el tiempo de las aceleraciones y desplazamientos en los nodos de análisis, y para cada una de las simulaciones se tomaron los valores máximos. Finalmente se obtuvo un promedio de éstos, con el fin de obtener valores representativos.

Capítulo 6 Análisis de resultados

A continuación se presentan los resultados de la respuesta de la torre de control, proveniente del análisis hecho con ayuda del programa comercial ANSYS Mechanical APDL© (2013). Además se presentan de manera particular los resultados obtenidos en el nodo 392 (el de mayor altura, $h=93.5\text{m}$), ya que en este se presentan los valores máximos.

6.1 Análisis por desprendimiento de vórtices

6.1.1 Fuerzas parcialmente correlacionadas

Para el primer análisis por desprendimiento de vórtices, se utilizaron señales de fuerzas las cuales guardaban una correlación parcial entre sí mismas, lo cual hace referencia al comportamiento real del viento. Las figuras 20 a 30, así como las tablas 6 a 8 presentan los resultados, en términos de aceleración, considerando fuerzas debidas a vórtices parcialmente correlacionadas. Las tablas 9 a 11 y la figura 31 presentan los resultados en términos de desplazamientos.

Tabla 6. Aceleración máxima media obtenida en la estructura original de la torre de control (Sin MSS).

Aceleración máxima media sin masa sólida sintonizada													
Altura (m)	Nodo de análisis	Número de simulación										\bar{a} (m/s ²)	\bar{a} (milli-g)
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
10.4	308	0.031845	0.034397	0.037543	0.05174	0.040687	0.034855	0.03227	0.036017	0.035867	0.042108	0.037733	3.846371
13.2	307	0.038664	0.037893	0.039406	0.053831	0.044294	0.049687	0.042042	0.03788	0.039608	0.037663	0.042097	4.291213
16	306	0.047547	0.048528	0.041307	0.064535	0.057741	0.053621	0.046716	0.044664	0.046049	0.053244	0.050395	5.137125
18.8	305	0.065092	0.065211	0.054318	0.067965	0.069873	0.065092	0.059224	0.057127	0.053825	0.068139	0.062587	6.379878
21.6	304	0.070899	0.073099	0.06042	0.078644	0.07722	0.070726	0.068795	0.066665	0.068753	0.074065	0.070929	7.230234
24.4	303	0.076843	0.091432	0.070794	0.093482	0.091079	0.078177	0.079733	0.086581	0.077847	0.077793	0.082376	8.397156
27.2	302	0.09315	0.097528	0.08179	0.11837	0.10705	0.092349	0.091923	0.087711	0.097956	0.093291	0.096112	9.797329
30	301	0.10859	0.11138	0.10174	0.14112	0.13122	0.11036	0.11273	0.10513	0.12441	0.10956	0.115624	11.786340
32.8	300	0.12219	0.13334	0.1113	0.15262	0.15045	0.12046	0.12164	0.1353	0.13585	0.12327	0.130642	13.317227
35.6	299	0.13218	0.14639	0.11769	0.1662	0.16323	0.13745	0.13994	0.1451	0.13236	0.12875	0.140929	14.365851
38.4	298	0.14854	0.17204	0.13701	0.20144	0.18902	0.15845	0.15391	0.16443	0.15037	0.15602	0.163123	16.628236
41.2	297	0.16138	0.17594	0.15397	0.22091	0.20885	0.18521	0.17981	0.18561	0.18414	0.16651	0.182233	18.576249
44	296	0.17944	0.19684	0.16546	0.23878	0.22069	0.2066	0.19694	0.19876	0.19609	0.1841	0.198370	20.221203
46.8	295	0.20946	0.2244	0.18153	0.27164	0.24583	0.21592	0.22057	0.22275	0.20834	0.20275	0.220319	22.458614
49.6	294	0.20816	0.22468	0.19597	0.30556	0.25863	0.23946	0.23093	0.24454	0.24261	0.22032	0.237086	24.167788
52.4	293	0.23375	0.24477	0.20935	0.32113	0.28541	0.26272	0.24783	0.25165	0.25874	0.24385	0.255920	26.087666
55.2	292	0.25187	0.2769	0.22065	0.36119	0.32704	0.28418	0.27814	0.27665	0.28048	0.25326	0.281036	28.647910
58	291	0.27325	0.31229	0.23502	0.38081	0.34577	0.29198	0.29767	0.30998	0.30691	0.28381	0.303749	30.963201
60.8	290	0.28252	0.33807	0.25898	0.3666	0.36913	0.30798	0.30957	0.33445	0.31664	0.30265	0.318659	32.483078
63.6	289	0.2988	0.36271	0.27394	0.38988	0.38049	0.32931	0.33243	0.3619	0.34173	0.32737	0.339856	34.643833
66.4	288	0.31869	0.38773	0.29211	0.44631	0.41769	0.35525	0.35591	0.3905	0.36953	0.33705	0.367077	37.418654
69.2	461	0.3427	0.39275	0.31698	0.50025	0.446	0.38402	0.40362	0.39414	0.3981	0.36101	0.393957	40.158716
72	462	0.36499	0.41594	0.33169	0.52537	0.47046	0.39804	0.41653	0.41969	0.40085	0.37767	0.412123	42.010499
74.8	463	0.38774	0.45424	0.35354	0.53668	0.49029	0.43108	0.42435	0.4465	0.42486	0.41469	0.436397	44.484913
77.6	464	0.39765	0.44423	0.36743	0.55442	0.50616	0.44777	0.44299	0.44766	0.4315	0.4222	0.446201	45.484302
80.4	465	0.42933	0.48468	0.40509	0.60129	0.54833	0.47608	0.48161	0.47782	0.48078	0.4544	0.483941	49.331397
86	391	0.46169	0.5347	0.41442	0.64355	0.58194	0.50965	0.50217	0.5317	0.52252	0.49217	0.519451	52.951172
93.5	392	0.53604	0.62338	0.50398	0.71497	0.69241	0.58219	0.57853	0.60567	0.57182	0.54199	0.595098	60.662385

Tabla 7. Aceleración máxima media obtenida en la estructura mejorada con el disipador MSS.

Aceleración máxima media con masa sólida sintonizada													
Altura (m)	Nodo de análisis	Número de simulación										\bar{a}	\bar{a}
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	(m/s ²)	(milli-g)
10.4	308	0.033527	0.035315	0.041219	0.042442	0.038512	0.042895	0.040886	0.040571	0.03684	0.03654	0.038875	3.962762
13.2	307	0.045534	0.040525	0.044307	0.046094	0.045368	0.051727	0.046338	0.046476	0.054326	0.048537	0.046923	4.783201
16	306	0.049033	0.047592	0.052073	0.05585	0.050749	0.051157	0.052362	0.053917	0.057669	0.063143	0.053355	5.438787
18.8	305	0.055982	0.04838	0.062029	0.064407	0.056743	0.064626	0.065737	0.064773	0.063831	0.065755	0.061226	6.241213
21.6	304	0.072371	0.058743	0.071645	0.077954	0.070573	0.063747	0.064603	0.086619	0.085494	0.072751	0.072450	7.385321
24.4	303	0.083123	0.070552	0.091176	0.081694	0.078053	0.077434	0.081942	0.095062	0.087594	0.083707	0.083034	8.464190
27.2	302	0.083759	0.077918	0.087648	0.085057	0.080225	0.092592	0.085392	0.12098	0.11282	0.10607	0.093246	9.505209
30	301	0.097229	0.083755	0.10583	0.10001	0.096047	0.099611	0.10282	0.12934	0.12681	0.12792	0.106937	10.900836
32.8	300	0.10038	0.099597	0.11471	0.1115	0.10537	0.10908	0.12021	0.14552	0.14833	0.12705	0.118175	12.046351
35.6	299	0.12369	0.10685	0.13093	0.12474	0.12005	0.11612	0.13039	0.16016	0.15472	0.1264	0.129405	13.191131
38.4	298	0.12663	0.12285	0.14875	0.14047	0.14246	0.14186	0.14089	0.17198	0.16893	0.13683	0.144165	14.695719
41.2	297	0.13512	0.14207	0.16669	0.16197	0.15274	0.15122	0.15323	0.21057	0.19536	0.15132	0.162029	16.516718
44	296	0.14609	0.1575	0.1867	0.18391	0.16809	0.17471	0.16316	0.22733	0.21127	0.18011	0.179887	18.337105
46.8	295	0.1726	0.16954	0.20292	0.19557	0.17029	0.18788	0.18478	0.25305	0.24009	0.18869	0.196541	20.034760
49.6	294	0.18428	0.17299	0.21407	0.20629	0.17918	0.19662	0.20568	0.27491	0.26378	0.21246	0.211026	21.511315
52.4	293	0.20017	0.18527	0.23903	0.22328	0.1929	0.20717	0.22157	0.303	0.28874	0.22034	0.228147	23.256575
55.2	292	0.2178	0.19573	0.26378	0.2357	0.20988	0.22847	0.24541	0.31611	0.30579	0.24515	0.246382	25.115392
58	291	0.23406	0.21685	0.26842	0.26196	0.22579	0.2496	0.25008	0.34486	0.32673	0.26071	0.263906	26.901733
60.8	290	0.25136	0.22665	0.28924	0.2944	0.23046	0.25989	0.28169	0.3659	0.35217	0.28881	0.284057	28.955861
63.6	289	0.26785	0.24865	0.30968	0.30932	0.25932	0.27861	0.28771	0.386	0.36997	0.32038	0.303749	30.963201
66.4	288	0.29041	0.27099	0.331	0.31402	0.27868	0.29772	0.31792	0.42683	0.40977	0.34105	0.327839	33.418858
69.2	461	0.30036	0.27625	0.35543	0.32387	0.30287	0.31387	0.33686	0.44263	0.42504	0.3604	0.343758	35.041590
72	462	0.31653	0.28902	0.37306	0.34998	0.31064	0.33171	0.34343	0.45693	0.445	0.36975	0.358605	36.555046
74.8	463	0.34959	0.30824	0.39959	0.38827	0.32736	0.34014	0.35889	0.49042	0.47328	0.38413	0.381991	38.938940
77.6	464	0.35458	0.3228	0.41612	0.3961	0.3365	0.35735	0.37296	0.51066	0.47908	0.39917	0.394532	40.217329
80.4	465	0.37317	0.34358	0.44873	0.41689	0.37181	0.38628	0.41442	0.54099	0.52117	0.4307	0.424774	43.300102
86	391	0.40969	0.36942	0.46542	0.46334	0.38138	0.42925	0.44387	0.5893	0.56326	0.45578	0.457071	46.592355
93.5	392	0.45227	0.44262	0.53918	0.49843	0.4451	0.44897	0.48875	0.67056	0.66566	0.57038	0.522192	53.230581

Tabla 8. Comparación de la respuesta de aceleraciones de la estructura original de la torre de control y la estructura mejorada con el disipador MSS.

Comparación de las respuestas de Aceleración						
Altura (m)	Nodo	Sin MSS		Con MSS		Reducción de la respuesta
		\bar{a} (%g)	Percepción	\bar{a} (%g)	Percepción	
10.4	308	0.38%	Imperceptible	0.40%	Imperceptible	-3%
13.2	307	0.43%	Imperceptible	0.48%	Imperceptible	-11%
16	306	0.51%	Perceptible	0.54%	Perceptible	-6%
18.8	305	0.64%	Perceptible	0.62%	Perceptible	2%
21.6	304	0.72%	Perceptible	0.74%	Perceptible	-2%
24.4	303	0.84%	Perceptible	0.85%	Perceptible	-1%
27.2	302	0.98%	Perceptible	0.95%	Perceptible	3%
30	301	1.18%	Perceptible	1.09%	Perceptible	8%
32.8	300	1.33%	Perceptible	1.20%	Perceptible	10%
35.6	299	1.44%	Perceptible	1.32%	Perceptible	8%
38.4	298	1.66%	Molesto	1.47%	Perceptible	12%
41.2	297	1.86%	Molesto	1.65%	Molesto	11%
44	296	2.02%	Molesto	1.83%	Molesto	9%
46.8	295	2.25%	Molesto	2.00%	Molesto	11%
49.6	294	2.42%	Molesto	2.15%	Molesto	11%
52.4	293	2.61%	Molesto	2.33%	Molesto	11%
55.2	292	2.86%	Molesto	2.51%	Molesto	12%
58	291	3.10%	Molesto	2.69%	Molesto	13%
60.8	290	3.25%	Molesto	2.90%	Molesto	11%
63.6	289	3.46%	Molesto	3.10%	Molesto	11%
66.4	288	3.74%	Molesto	3.34%	Molesto	11%
69.2	461	4.02%	Molesto	3.50%	Molesto	13%
72	462	4.20%	Molesto	3.66%	Molesto	13%
74.8	463	4.45%	Molesto	3.89%	Molesto	12%
77.6	464	4.55%	Molesto	4.02%	Molesto	12%
80.4	465	4.93%	Molesto	4.33%	Molesto	12%
86	391	5.30%	Muy Molesto	4.66%	Molesto	12%
93.5	392	6.07%	Muy Molesto	5.32%	Muy Molesto	12%

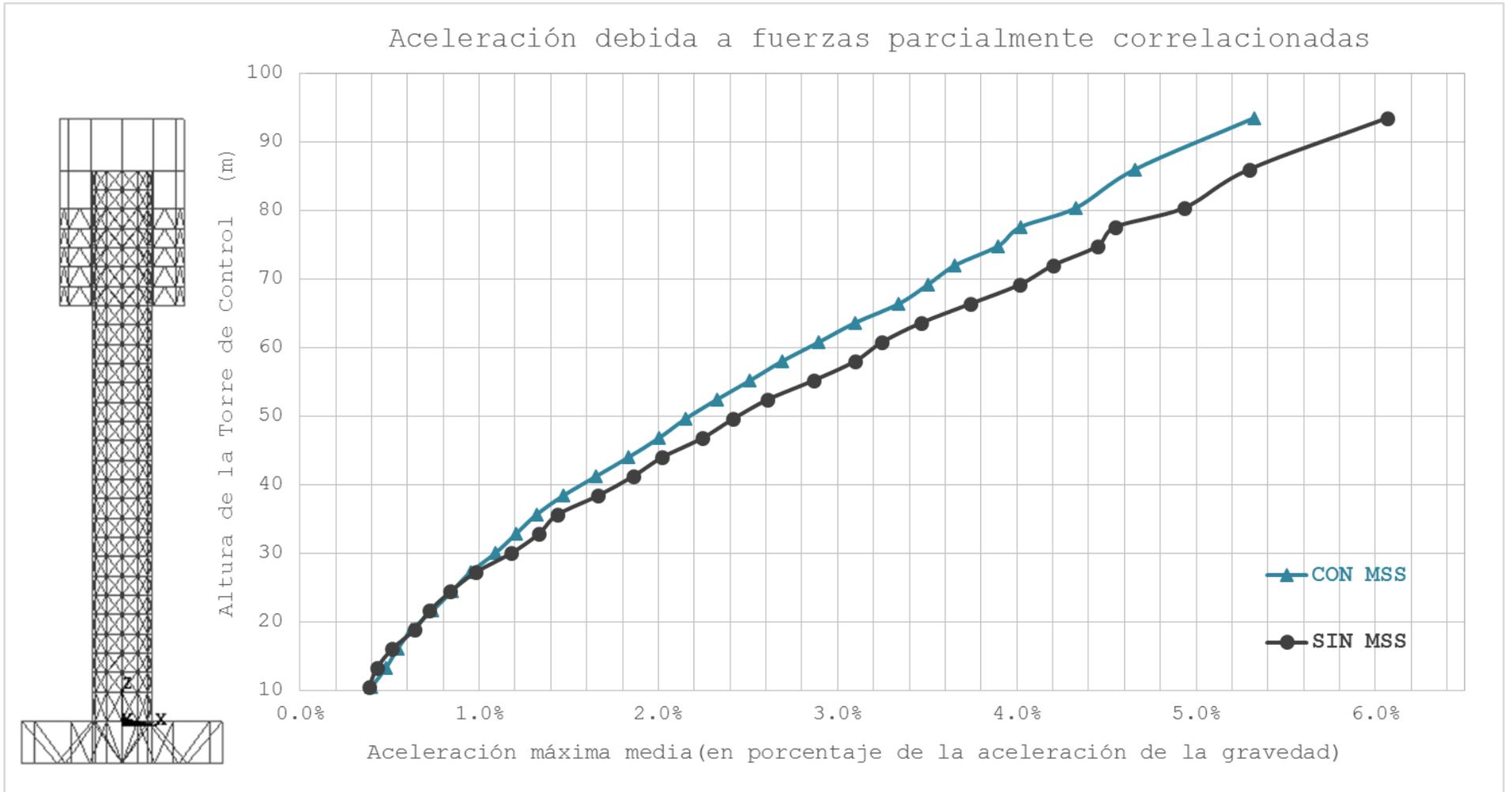


Figura 20. Representación gráfica de la respuesta de aceleraciones de la estructura original y la estructura mejorada con el disipador MSS.

Como una medida para medir la reducción de la respuesta, se utilizó la siguiente expresión:

$$\%R = \frac{\sigma_{SMSS} - \sigma_{CMSS}}{\sigma_{SMSS}} * 100$$

Donde:

σ , representa la desviación estándar y se calcula con la siguiente expresión:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(x_i - m)^2}{n - 1}}$$

m .- Media.

x_i .- Cada uno de los valores de la población.

n .- Número de valores que conforma la población.

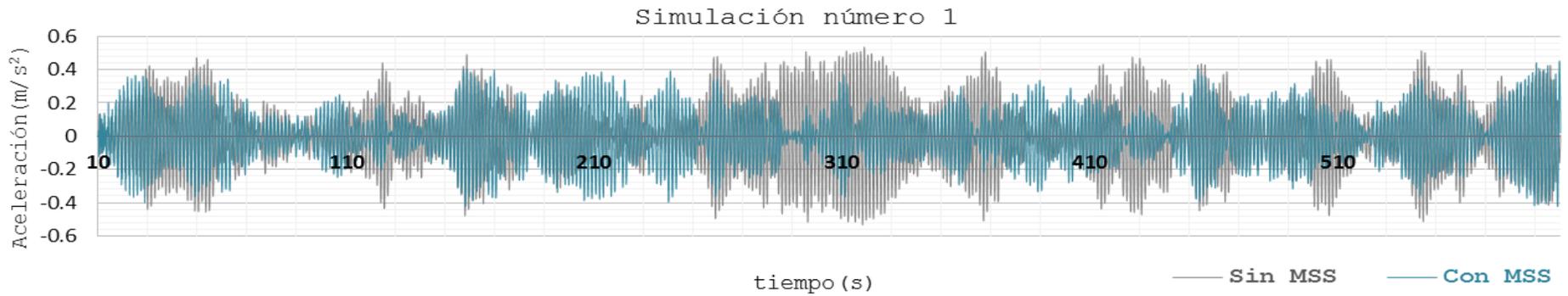


Figura 21. Historia en el tiempo de la aceleración en el nodo 392, debida a la primera simulación.

$$\%R1 = \frac{0.201562948 - 0.160408991}{0.201562948} * 100 = 20\%$$

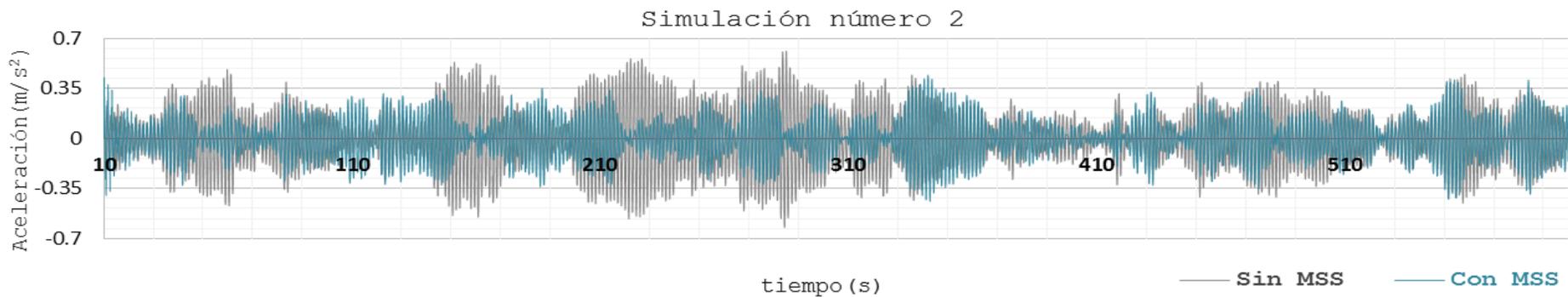


Figura 22. Historia en el tiempo de la aceleración en el nodo 392, debida a la segunda simulación.

$$\%R2 = \frac{0.206068681 - 0.142984501}{0.206068681} * 100 = 31\%$$

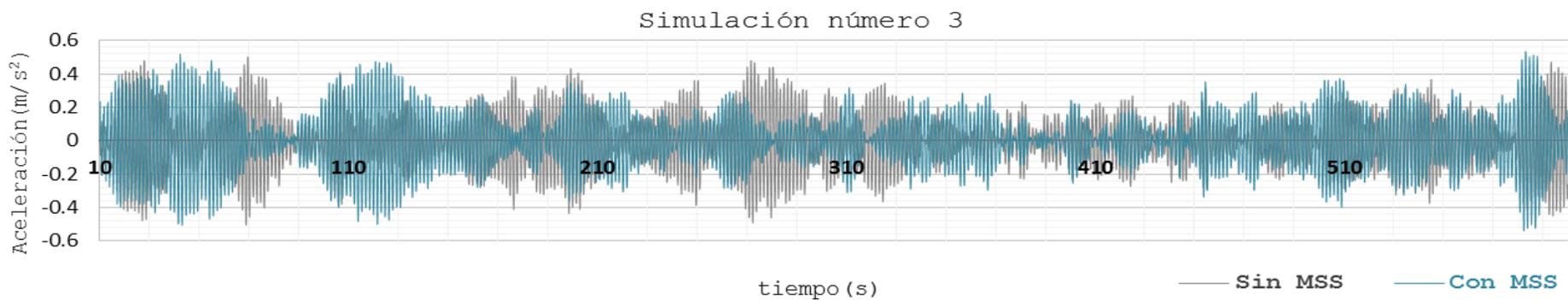


Figura 23. Historia en el tiempo de la aceleración en el nodo 392, debida a la tercera simulación.

$$\%R3 = \frac{0.165674198 - 0.169305229}{0.165674198} * 100 = -2\%$$

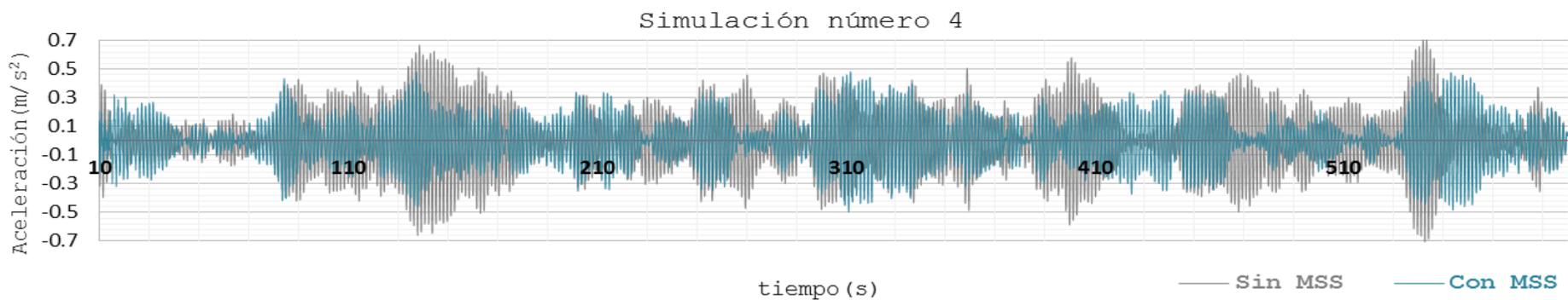


Figura 24. Historia en el tiempo de la aceleración en el nodo 392, debida a la cuarta simulación.

$$\%R4 = \frac{0.214004428 - 0.165376111}{0.214004428} * 100 = 23\%$$

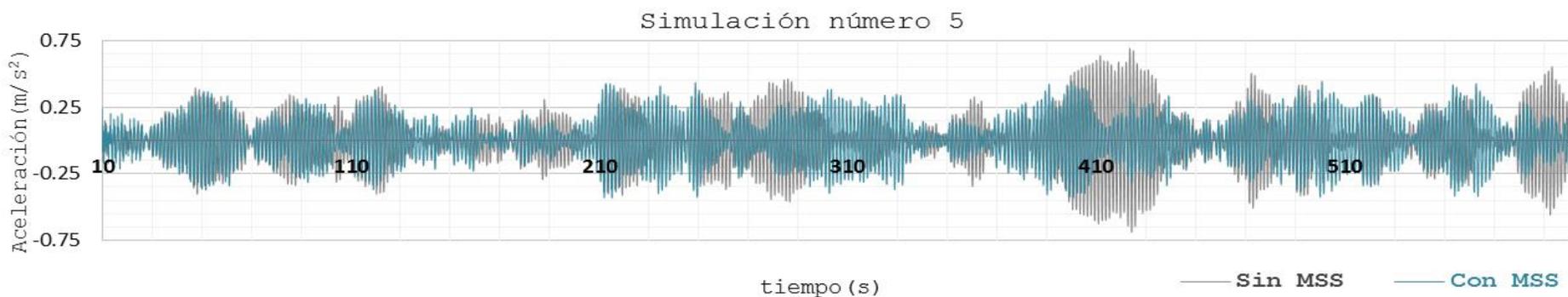


Figura 25. Historia en el tiempo de la aceleración en el nodo 392, debida a la quinta simulación.

$$\%R5 = \frac{0.191733355 - 0.167847945}{0.191733355} * 100 = 12\%$$

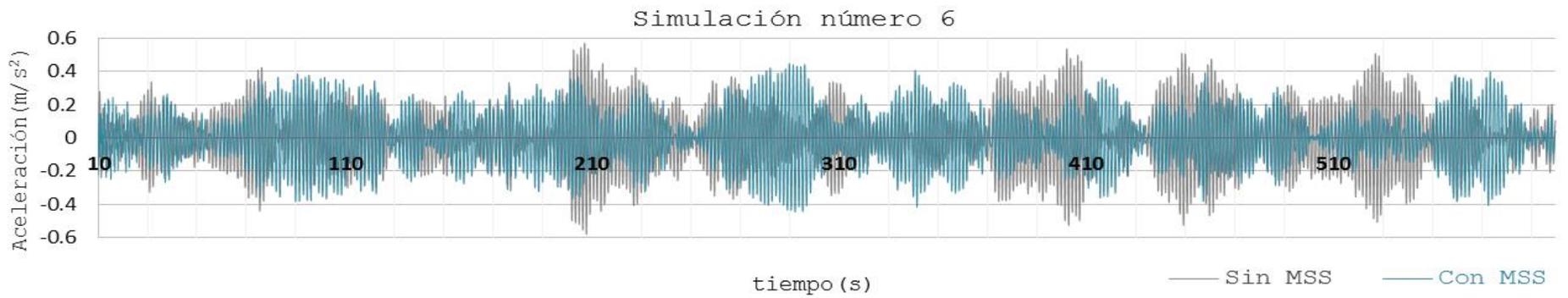


Figura 26. Historia en el tiempo de la aceleración en el nodo 392, debida a la sexta simulación.

$$\%R6 = \frac{0.17658745 - 0.161877326}{0.17658745} * 100 = 8\%$$

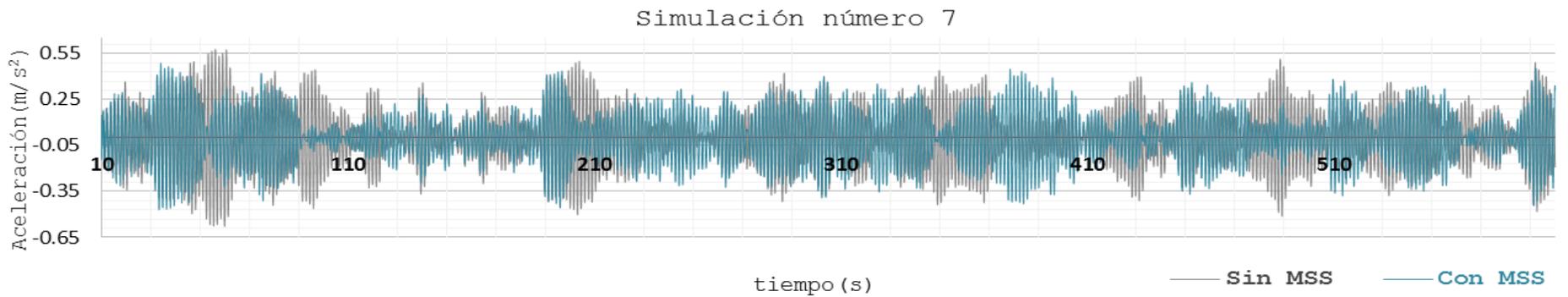


Figura 27. Historia en el tiempo de la aceleración en el nodo 392, debida a la séptima simulación.

$$\%R7 = \frac{0.189051896 - 0.167744044}{0.189051896} * 100 = 11\%$$

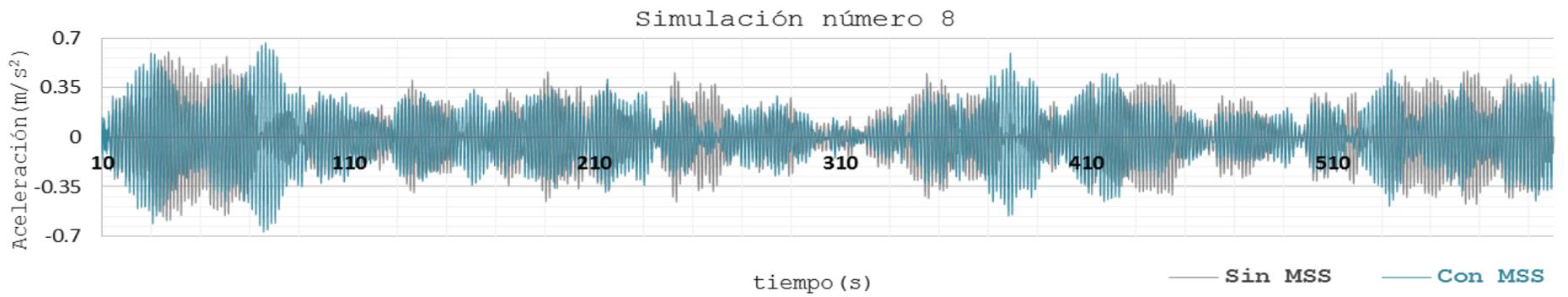


Figura 28. Historia en el tiempo de la aceleración en el nodo 392, debida a la octava simulación.

$$\%R8 = \frac{0.195663148 - 0.195738361}{0.195663148} * 100 = -0.04\%$$

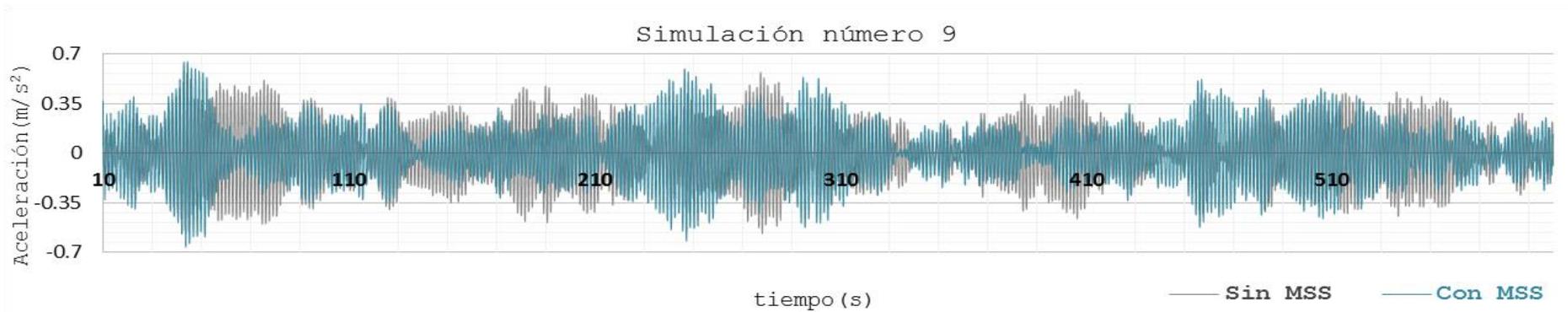


Figura 29. Historia en el tiempo de la aceleración en el nodo 392, debida a la novena simulación.

$$\%R9 = \frac{0.208960566 - 0.200274387}{0.208960566} * 100 = 4\%$$

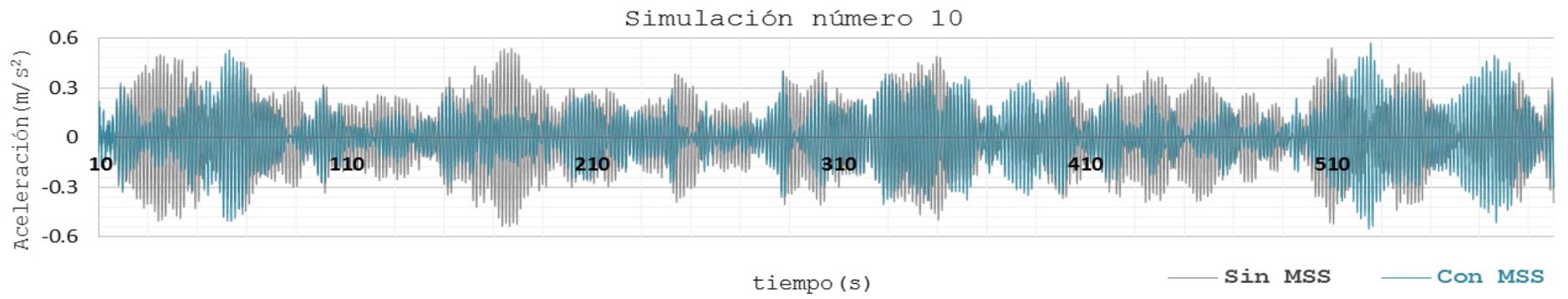


Figura 30. Historia en el tiempo de la aceleración en el nodo 392, debida a la décima simulación.

$$\%R10 = \frac{0.198834677 - 0.158014095}{0.198834677} * 100 = 21\%$$

Tabla 9. Desplazamientos máximos medios obtenidos en la estructura original de la torre de control (Sin MSS).

Desplazamientos Máximos Medios Sin Masa Sólida Sintonizada													
Altura (m)	Nodo de análisis	Número de Simulación										\bar{d}	\bar{d}
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	(m)	(cm)
10.4	308	0.0008279	0.0008747	0.0007665	0.001127	0.0010374	0.0008688	0.000887	0.000917	0.0009057	0.0008494	0.00091	0.09061
13.2	307	0.0013571	0.0014554	0.0012289	0.0018627	0.001727	0.0014103	0.0014579	0.0015581	0.0015068	0.0013596	0.00149	0.14924
16	306	0.0019275	0.0020827	0.001788	0.0026775	0.0024355	0.0020578	0.0020877	0.0021847	0.0021353	0.0019794	0.00214	0.21356
18.8	305	0.0025505	0.0027577	0.0023717	0.0035482	0.0032267	0.002732	0.0027698	0.0028948	0.0028264	0.0026242	0.00283	0.28302
21.6	304	0.0031989	0.0034548	0.0029843	0.0044639	0.0040502	0.0034356	0.0034797	0.0036391	0.0035461	0.0032928	0.00355	0.35545
24.4	303	0.0038925	0.004195	0.0036313	0.0054398	0.0049222	0.004183	0.0042395	0.004429	0.0043052	0.004004	0.00432	0.43242
27.2	302	0.0046242	0.0049931	0.0043186	0.0064844	0.0058579	0.0049708	0.005043	0.0052634	0.0051193	0.0047604	0.00514	0.51435
30	301	0.0054045	0.0058314	0.0050458	0.0075895	0.0068481	0.005809	0.0058895	0.0061543	0.0059762	0.0055598	0.00601	0.60108
32.8	300	0.0062216	0.0067143	0.0058085	0.0087391	0.0078838	0.0066935	0.0067792	0.007087	0.0068769	0.0064	0.00692	0.69204
35.6	299	0.0070714	0.0076397	0.0065997	0.0099379	0.0089627	0.0076055	0.0077111	0.0080618	0.0078136	0.0072817	0.00787	0.78685
38.4	298	0.0079562	0.0085971	0.0074244	0.011184	0.010082	0.0085486	0.0086859	0.0090749	0.0087885	0.0081907	0.00885	0.88532
41.2	297	0.0088789	0.0095841	0.0082768	0.012472	0.011243	0.0095304	0.009693	0.010118	0.009798	0.0091314	0.00987	0.98726
44	296	0.009822	0.010603	0.0091588	0.013798	0.012438	0.010545	0.010736	0.011188	0.010836	0.010102	0.01092	1.09227
46.8	295	0.010792	0.011656	0.010066	0.015172	0.01367	0.011595	0.011808	0.012288	0.011901	0.011096	0.01200	1.20044
49.6	294	0.011783	0.012729	0.010989	0.016576	0.014928	0.01267	0.012903	0.013413	0.012993	0.012114	0.01311	1.31098
52.4	293	0.012796	0.013819	0.011925	0.018	0.016204	0.013766	0.01402	0.014573	0.014101	0.013152	0.01424	1.42356
55.2	292	0.013825	0.014927	0.01288	0.01945	0.017503	0.014878	0.015151	0.015753	0.015229	0.014198	0.01538	1.53794
58	291	0.014862	0.016046	0.01385	0.020918	0.018819	0.016002	0.016296	0.016951	0.016372	0.015261	0.01654	1.65377
60.8	290	0.015901	0.017174	0.014825	0.02239	0.020142	0.017133	0.017448	0.018162	0.017528	0.016337	0.01770	1.77040
63.6	289	0.016971	0.018331	0.015822	0.02389	0.021498	0.018289	0.018628	0.019369	0.018707	0.017441	0.01889	1.88946
66.4	288	0.018054	0.019492	0.016825	0.025406	0.022862	0.019456	0.019819	0.020584	0.01989	0.01856	0.02009	2.00948
69.2	461	0.019092	0.020608	0.017782	0.026878	0.024176	0.020582	0.020962	0.021853	0.021033	0.019629	0.02126	2.12595
72	462	0.020179	0.021775	0.018792	0.028407	0.025553	0.021763	0.022165	0.023063	0.022223	0.020751	0.02247	2.24671
74.8	463	0.021257	0.022932	0.01979	0.029926	0.026926	0.02293	0.023354	0.024277	0.023401	0.021853	0.02366	2.36646
77.6	464	0.022334	0.024073	0.020792	0.03143	0.028286	0.024085	0.024536	0.025488	0.024573	0.022953	0.02486	2.48550
80.4	465	0.023391	0.025186	0.021771	0.03291	0.029616	0.02522	0.025699	0.026697	0.025734	0.02402	0.02602	2.60244
86	391	0.025516	0.027444	0.023727	0.035913	0.032308	0.027513	0.028018	0.029119	0.028064	0.026211	0.02838	2.83833
93.5	392	0.02977	0.031897	0.027418	0.041686	0.037653	0.031946	0.032387	0.033752	0.032379	0.030423	0.03293	3.29311

Tabla 10. Desplazamientos máximos medios obtenidos en la estructura mejorada con el dissipador MSS.

Desplazamientos Máximos Medios Con Masa Sólida Sintonizada													
Altura (m)	Nodo de análisis	Número de Simulación										\bar{d}	\bar{d}
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	(m)	(cm)
10.4	308	0.0007563	0.0007083	0.0008958	0.000854	0.0007305	0.0008368	0.000848	0.0011531	0.0011217	0.000914	0.00088	0.08818
13.2	307	0.001411	0.0013428	0.0016491	0.0015847	0.0013805	0.0015564	0.0015672	0.0020989	0.0020385	0.0016837	0.00163	0.16313
16	306	0.0019571	0.0018688	0.0022942	0.0022128	0.0019199	0.0021732	0.0021732	0.0029297	0.0028511	0.0023441	0.00227	0.22724
18.8	305	0.0025802	0.0024608	0.0030274	0.0029186	0.0025377	0.0028641	0.0028615	0.0038571	0.0037532	0.0030903	0.00300	0.29951
21.6	304	0.0032711	0.0031182	0.0038291	0.0036979	0.0032198	0.0036275	0.0036249	0.0048802	0.0047489	0.0039085	0.00379	0.37926
24.4	303	0.0040216	0.0038344	0.0046902	0.0045434	0.0039589	0.0044475	0.0044534	0.0059822	0.0058215	0.0047928	0.00465	0.46546
27.2	302	0.0048299	0.0046073	0.0056141	0.0054517	0.0047583	0.0053344	0.0053445	0.0071544	0.0069712	0.0057439	0.00558	0.55810
30	301	0.0056897	0.0054253	0.0066004	0.006417	0.0056062	0.0062795	0.0062967	0.0084066	0.0081892	0.006756	0.00657	0.65667
32.8	300	0.0065947	0.0062825	0.0076428	0.0074368	0.0064964	0.00728	0.0072973	0.0097307	0.009475	0.0078216	0.00761	0.76058
35.6	299	0.0075463	0.0071844	0.0087349	0.0085096	0.0074327	0.0083312	0.0083414	0.011113	0.010816	0.0089356	0.00869	0.86945
38.4	298	0.0085447	0.0081318	0.0098787	0.0096257	0.0084121	0.0094282	0.0094344	0.012555	0.012219	0.010098	0.00983	0.98328
41.2	297	0.0095815	0.0091296	0.011065	0.010787	0.0094302	0.010571	0.010578	0.014054	0.01368	0.011304	0.01102	1.10180
44	296	0.01065	0.010157	0.012292	0.011993	0.010483	0.011758	0.01176	0.015602	0.015185	0.012552	0.01224	1.22432
46.8	295	0.011751	0.011221	0.013561	0.013231	0.01157	0.012983	0.012978	0.017199	0.016737	0.01384	0.01351	1.35071
49.6	294	0.012884	0.012312	0.014866	0.014501	0.012688	0.014237	0.014226	0.018843	0.018332	0.015167	0.01481	1.48056
52.4	293	0.014053	0.013421	0.016205	0.015811	0.013844	0.015519	0.015508	0.020525	0.019963	0.016526	0.01614	1.61375
55.2	292	0.01525	0.014558	0.017578	0.017153	0.015022	0.016832	0.016825	0.022239	0.02162	0.017914	0.01750	1.74991
58	291	0.016473	0.015732	0.01898	0.018522	0.016229	0.018171	0.018165	0.023984	0.023314	0.019332	0.01889	1.88902
60.8	290	0.017723	0.016937	0.02041	0.019922	0.017469	0.019554	0.019541	0.02577	0.025057	0.020789	0.02032	2.03172
63.6	289	0.018993	0.018157	0.021867	0.021343	0.018726	0.020959	0.020945	0.027584	0.026824	0.022271	0.02177	2.17669
66.4	288	0.020295	0.019414	0.023356	0.022796	0.020014	0.022397	0.022383	0.029447	0.02863	0.023797	0.02325	2.32529
69.2	461	0.021605	0.020678	0.024838	0.024249	0.021311	0.023838	0.023818	0.031293	0.030419	0.025309	0.02474	2.47358
72	462	0.022854	0.021871	0.026269	0.025647	0.022548	0.025219	0.025195	0.033079	0.032153	0.02676	0.02616	2.61595
74.8	463	0.024115	0.023078	0.027715	0.027062	0.023798	0.026616	0.026584	0.034877	0.033897	0.028223	0.02760	2.75965
77.6	464	0.025384	0.024294	0.029161	0.028475	0.025053	0.028014	0.027975	0.03668	0.035646	0.029697	0.02904	2.90379
80.4	465	0.026666	0.025522	0.030613	0.029897	0.02632	0.029421	0.02937	0.038486	0.037407	0.031169	0.03049	3.04871
86	391	0.029222	0.027996	0.033552	0.032739	0.028833	0.032262	0.032199	0.042131	0.040921	0.034149	0.03340	3.34004
93.5	392	0.033491	0.032332	0.038371	0.0375	0.033243	0.037565	0.036936	0.048525	0.047189	0.039257	0.03844	3.84409

Tabla 11. Comparación de la respuesta de desplazamientos de la estructura original de la torre de control y la estructura mejorada con el disipador MSS.

Comparación de las respuestas de desplazamiento						
Altura (m)	Nodo	Sin MSS		Con MSS		Reducción de la respuesta
		\bar{d} (cm)	Distorsión	\bar{d} (cm)	Distorsión	
10.4	308	0.09	-	0.09	-	2.68%
13.2	307	0.15	0.00021	0.16	0.00027	-9.31%
16	306	0.21	0.00023	0.23	0.00023	-6.41%
18.8	305	0.28	0.00025	0.30	0.00026	-5.83%
21.6	304	0.36	0.00026	0.38	0.00028	-6.70%
24.4	303	0.43	0.00027	0.47	0.00031	-7.64%
27.2	302	0.51	0.00029	0.56	0.00033	-8.51%
30	301	0.60	0.00031	0.66	0.00035	-9.25%
32.8	300	0.69	0.00032	0.76	0.00037	-9.90%
35.6	299	0.79	0.00034	0.87	0.00039	-10.50%
38.4	298	0.89	0.00035	0.98	0.00041	-11.06%
41.2	297	0.99	0.00036	1.10	0.00042	-11.60%
44	296	1.09	0.00038	1.22	0.00044	-12.09%
46.8	295	1.20	0.00039	1.35	0.00045	-12.52%
49.6	294	1.31	0.00039	1.48	0.00046	-12.94%
52.4	293	1.42	0.00040	1.61	0.00048	-13.36%
55.2	292	1.54	0.00041	1.75	0.00049	-13.78%
58	291	1.65	0.00041	1.89	0.00050	-14.23%
60.8	290	1.77	0.00042	2.03	0.00051	-14.76%
63.6	289	1.89	0.00043	2.18	0.00052	-15.20%
66.4	288	2.01	0.00043	2.33	0.00053	-15.72%
69.2	461	2.13	0.00042	2.47	0.00053	-16.35%
72	462	2.25	0.00043	2.62	0.00051	-16.43%
74.8	463	2.37	0.00043	2.76	0.00051	-16.62%
77.6	464	2.49	0.00043	2.90	0.00051	-16.83%
80.4	465	2.60	0.00042	3.05	0.00052	-17.15%
86	391	2.84	0.00042	3.34	0.00052	-17.68%
93.5	392	3.29	0.00061	3.84	0.00067	-16.73%

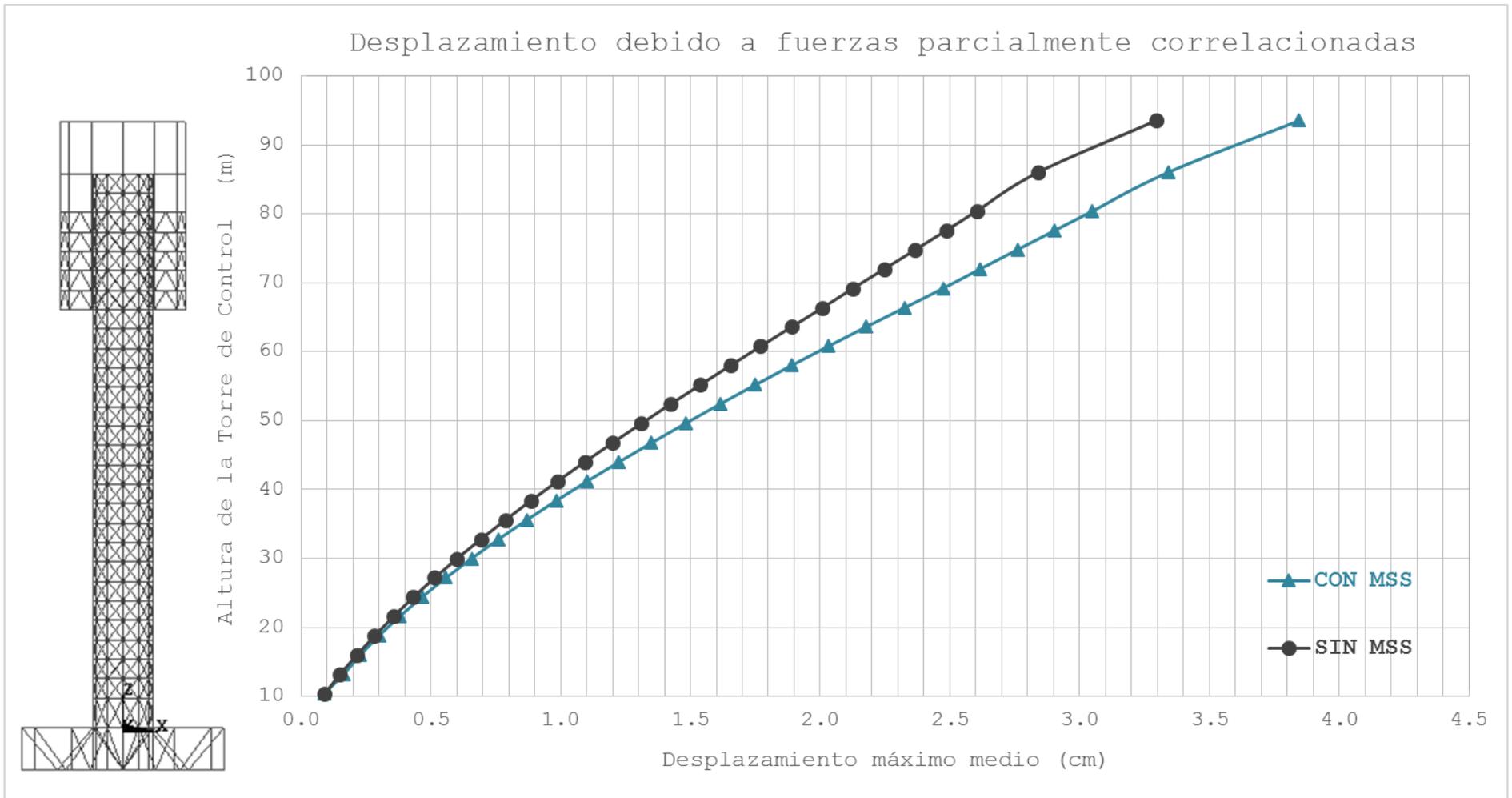


Figura 31. Representación gráfica de la respuesta de desplazamientos de la estructura original y la estructura mejorada con el disipador MSS.

6.1.2 Análisis Considerando Fuerzas Totalmente correlacionadas

De forma adicional se analizó un caso hipotético del desprendimiento de vórtices, en el que las fuerzas de desprendimiento estuvieran totalmente correlacionadas, lo cual hace referencia a la forma en la que los reglamentos actuales generan las fuerzas de desprendimiento, ya que parten de una misma velocidad para calcular todas las fuerzas presentes a lo largo de la altura.

Para esto fue necesario aplicar una misma señal de fuerzas en todos los nodos de análisis y evaluar la respuesta estructural de la torre de control. Las tablas 12 a 13 y las figuras 32 y 33 presentan las aceleraciones inducidas por el viento, y las tablas 14 y 15, y la figura 34 muestran los desplazamientos obtenidos.

Tabla 12. Aceleraciones máximas medias obtenidas en la estructura, debidas a fuerzas totalmente correlacionadas.

Aceleración máxima sin MSS			
Altura (m)	Nodo de análisis	a (m/s ²)	a (milli-g)
10.4	308	0.063811	6.505
13.2	307	0.10902	11.113
16	306	0.15469	15.769
18.8	305	0.20447	20.843
21.6	304	0.26205	26.713
24.4	303	0.3206	32.681
27.2	302	0.37896	38.630
30	301	0.44139	44.994
32.8	300	0.5095	51.937
35.6	299	0.58278	59.407
38.4	298	0.65996	67.274
41.2	297	0.73856	75.286
44	296	0.81757	83.340
46.8	295	0.89838	91.578
49.6	294	0.97925	99.822
52.4	293	1.0597	108.022
55.2	292	1.1471	116.932
58	291	1.2388	126.279
60.8	290	1.3233	134.893
63.6	289	1.411	143.833
66.4	288	1.505	153.415
69.2	461	1.5957	162.661
72	462	1.6835	171.611
74.8	463	1.7842	181.876
77.6	464	1.8624	189.847
80.4	465	1.9651	200.316
86	391	2.1375	217.890
93.5	392	2.4717	251.957

Aceleración máxima con MSS			
Altura (m)	Nodo de análisis	a	a
		(m/s ²)	(milli-g)
10.4	308	0.054026	5.507
13.2	307	0.090262	9.201
16	306	0.12702	12.948
18.8	305	0.16665	16.988
21.6	304	0.20981	21.387
24.4	303	0.25605	26.101
27.2	302	0.30435	31.024
30	301	0.35565	36.254
32.8	300	0.41037	41.832
35.6	299	0.46764	47.670
38.4	298	0.52663	53.683
41.2	297	0.58805	59.944
44	296	0.65277	66.541
46.8	295	0.71974	73.368
49.6	294	0.78661	80.185
52.4	293	0.85241	86.892
55.2	292	0.92094	93.878
58	291	0.99408	101.333
60.8	290	1.0659	108.654
63.6	289	1.1403	116.239
66.4	288	1.218	124.159
69.2	461	1.2907	131.570
72	462	1.3642	139.062
74.8	463	1.4448	147.278
77.6	464	1.507	153.619
80.4	465	1.5941	162.497
86	391	1.7233	175.668
93.5	392	1.9788	201.713

Tabla 13. Comparación de la respuesta de aceleraciones de la estructura original de la torre de control y la estructura mejorada con el dissipador MSS (fuerzas totalmente correlacionadas).

Comparación de las respuestas de aceleración						
Altura (m)	Nodo	Sin MSS		Con MSS		Reducción de la respuesta
		a (%g)	Percepción	a (%g)	Percepción	
10.4	308	0.65%	Perceptible	0.55%	Perceptible	15%
13.2	307	1.11%	Perceptible	0.92%	Perceptible	17%
16	306	1.58%	Molesto	1.29%	Perceptible	18%
18.8	305	2.08%	Molesto	1.70%	Molesto	18%
21.6	304	2.67%	Molesto	2.14%	Molesto	20%
24.4	303	3.27%	Molesto	2.61%	Molesto	20%
27.2	302	3.86%	Molesto	3.10%	Molesto	20%
30	301	4.50%	Molesto	3.63%	Molesto	19%
32.8	300	5.19%	Muy Molesto	4.18%	Molesto	19%
35.6	299	5.94%	Muy Molesto	4.77%	Molesto	20%
38.4	298	6.73%	Muy Molesto	5.37%	Muy Molesto	20%
41.2	297	7.53%	Muy Molesto	5.99%	Muy Molesto	20%
44	296	8.33%	Muy Molesto	6.65%	Muy Molesto	20%
46.8	295	9.16%	Muy Molesto	7.34%	Muy Molesto	20%
49.6	294	9.98%	Muy Molesto	8.02%	Muy Molesto	20%
52.4	293	10.80%	Muy Molesto	8.69%	Muy Molesto	20%
55.2	292	11.69%	Muy Molesto	9.39%	Muy Molesto	20%
58	291	12.63%	Muy Molesto	10.13%	Muy Molesto	20%
60.8	290	13.49%	Muy Molesto	10.87%	Muy Molesto	19%
63.6	289	14.38%	Muy Molesto	11.62%	Muy Molesto	19%
66.4	288	15.34%	Intolerable	12.42%	Muy Molesto	19%
69.2	461	16.27%	Intolerable	13.16%	Muy Molesto	19%
72	462	17.16%	Intolerable	13.91%	Muy Molesto	19%
74.8	463	18.19%	Intolerable	14.73%	Muy Molesto	19%
77.6	464	18.98%	Intolerable	15.36%	Intolerable	19%
80.4	465	20.03%	Intolerable	16.25%	Intolerable	19%
86	391	21.79%	Intolerable	17.57%	Intolerable	19%
93.5	392	25.20%	Intolerable	20.17%	Intolerable	20%

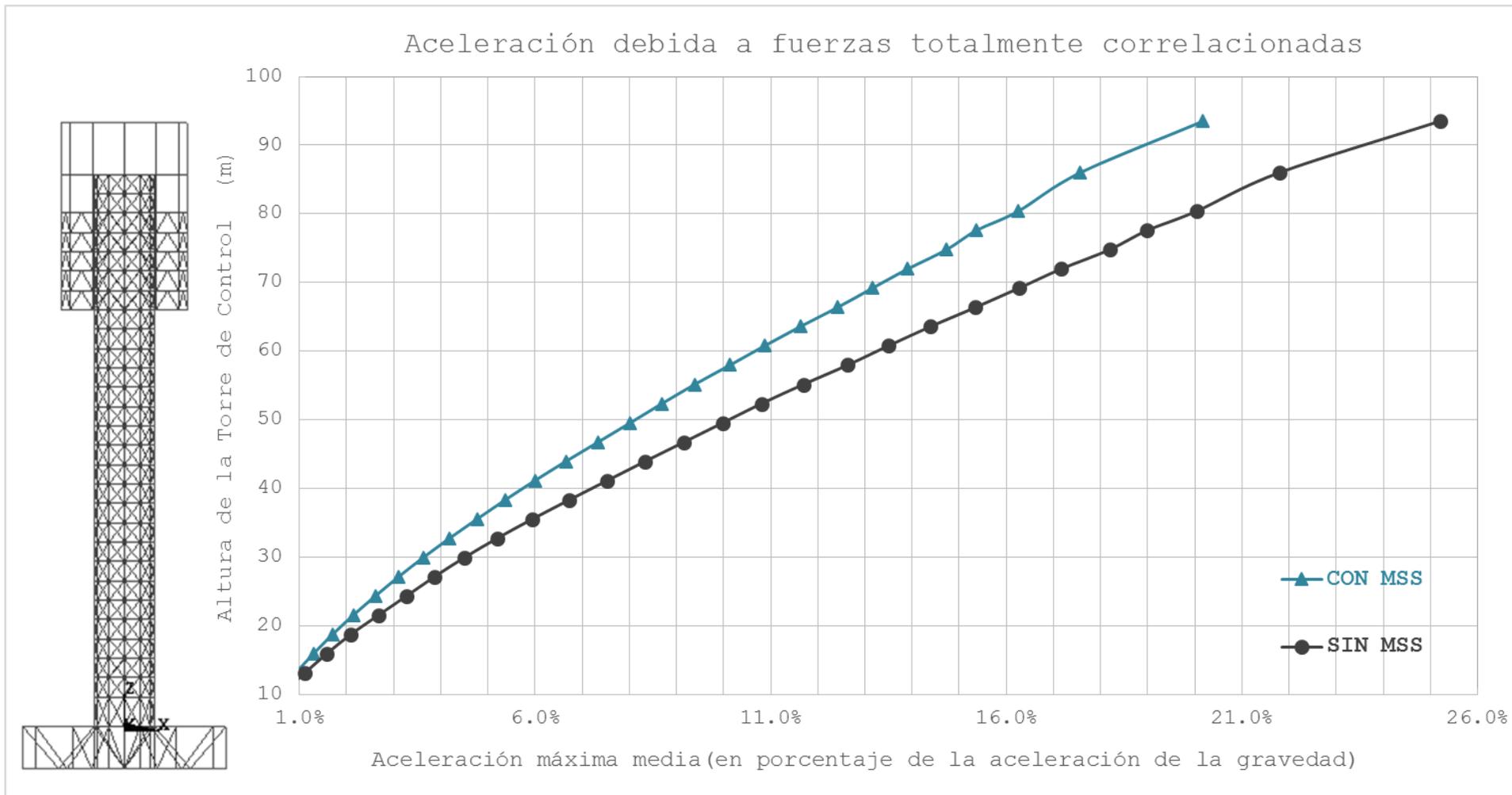


Figura 32. Representación gráfica de la respuesta de aceleraciones de la estructura original y la estructura mejorada con el disipador MSS (fuerzas totalmente correlacionadas).



Figura 33. Historia en el tiempo de la aceleración en el nodo 392, debida a la simulación de fuerzas totalmente correlacionadas.

$$\%RFTC = \frac{0.732067189 - 0.639207929}{0.732067189} * 100 = 13\%$$

Tabla 14. Desplazamientos máximos medios obtenidos en la estructura, debidos a fuerzas totalmente correlacionadas.

Desplazamientos Máximos Sin MSS			
Altura (m)	Nodo de análisis	d (m)	d (cm)
10.4	308	0.0035	0.35147
13.2	307	0.0060	0.60
16	306	0.0085	0.85159
18.8	305	0.0112	1.12
21.6	304	0.0141	1.4136
24.4	303	0.0172	1.72
27.2	302	0.0205	2.05
30	301	0.0240	2.40
32.8	300	0.0277	2.77
35.6	299	0.0315	3.15
38.4	298	0.0355	3.55
41.2	297	0.0396	3.96
44	296	0.0439	4.39
46.8	295	0.0483	4.83
49.6	294	0.0527	5.27
52.4	293	0.0573	5.73
55.2	292	0.0619	6.19
58	291	0.0667	6.67
60.8	290	0.0714	7.14
63.6	289	0.0762	7.62
66.4	288	0.0810	8.10
69.2	461	0.0859	8.59
72	462	0.0908	9.08
74.8	463	0.0956	9.56
77.6	464	0.1004	10.04
80.4	465	0.1052	10.52
86	391	0.1148	11.48
93.5	392	0.1333	13.33

Desplazamientos Máximos Con MSS			
Altura (m)	Nodo de análisis	d (m)	d (cm)
10.4	308	0.0033	0.33
13.2	307	0.0057	0.57
16	306	0.0081	0.81
18.8	305	0.0107	1.07
21.6	304	0.0135	1.35
24.4	303	0.0165	1.65
27.2	302	0.0196	1.96
30	301	0.0230	2.30
32.8	300	0.0266	2.66
35.6	299	0.0303	3.03
38.4	298	0.0341	3.41
41.2	297	0.0381	3.81
44	296	0.0423	4.23
46.8	295	0.0465	4.65
49.6	294	0.0509	5.09
52.4	293	0.0553	5.53
55.2	292	0.0599	5.99
58	291	0.0645	6.45
60.8	290	0.0691	6.91
63.6	289	0.0739	7.39
66.4	288	0.0788	7.88
69.2	461	0.0834	8.34
72	462	0.0881	8.81
74.8	463	0.0928	9.28
77.6	464	0.0975	9.75
80.4	465	0.1022	10.22
86	391	0.1116	11.16
93.5	392	0.1290	12.90

Tabla 15. Comparación de la respuesta de desplazamientos de la estructura original de la torre de control y la estructura mejorada con el dissipador MSS (fuerzas totalmente correlacionadas).

Comparación de las respuestas de desplazamiento						
Altura (m)	Nodo	Sin MSS		Con MSS		Reducción de la respuesta
		d (cm)	Distorsión	d (cm)	Distorsión	
10.4	308	0.35	-	0.33	-	7.15%
13.2	307	0.60	0.0009	0.57	0.0009	4.29%
16	306	0.85	0.0009	0.81	0.0008	4.84%
18.8	305	1.12	0.0010	1.07	0.0009	4.96%
21.6	304	1.41	0.0010	1.35	0.0010	4.74%
24.4	303	1.72	0.0011	1.65	0.0011	4.52%
27.2	302	2.05	0.0012	1.96	0.0011	4.33%
30	301	2.40	0.0012	2.30	0.0012	4.16%
32.8	300	2.77	0.0013	2.66	0.0013	4.02%
35.6	299	3.15	0.0014	3.03	0.0013	3.88%
38.4	298	3.55	0.0014	3.41	0.0014	3.76%
41.2	297	3.96	0.0015	3.81	0.0014	3.70%
44	296	4.39	0.0015	4.23	0.0015	3.64%
46.8	295	4.83	0.0016	4.65	0.0015	3.57%
49.6	294	5.27	0.0016	5.09	0.0016	3.50%
52.4	293	5.73	0.0016	5.53	0.0016	3.44%
55.2	292	6.19	0.0017	5.99	0.0016	3.37%
58	291	6.67	0.0017	6.45	0.0016	3.30%
60.8	290	7.14	0.0017	6.91	0.0017	3.21%
63.6	289	7.62	0.0017	7.39	0.0017	3.04%
66.4	288	8.10	0.0017	7.88	0.0017	2.83%
69.2	461	8.59	0.0017	8.34	0.0017	2.91%
72	462	9.08	0.0017	8.81	0.0017	2.94%
74.8	463	9.56	0.0017	9.28	0.0017	2.92%
77.6	464	10.04	0.0017	9.75	0.0017	2.89%
80.4	465	10.52	0.0017	10.22	0.0017	2.86%
86	391	11.48	0.0017	11.16	0.0017	2.79%
93.5	392	13.33	0.0025	12.90	0.0023	3.27%

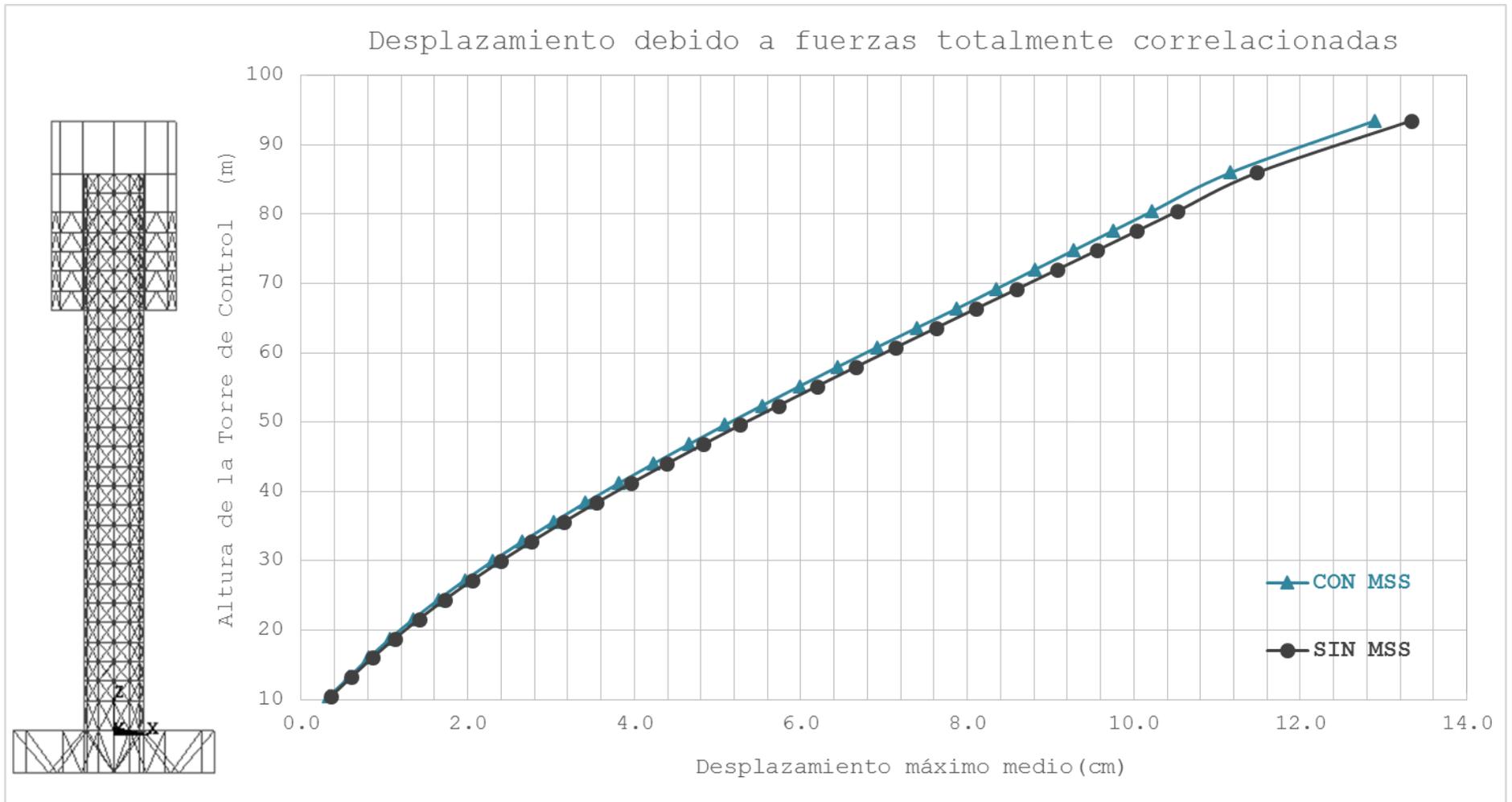


Figura 34. Representación gráfica de la respuesta de desplazamientos de la estructura original y la estructura mejorada con el disipador MSS (fuerzas totalmente correlacionadas).

Los análisis realizados muestran que el empleo de una masa sólida sintonizada (MSS) para reducir la vibración (aceleración y desplazamiento) es útil. La reducción máxima se presenta en la parte más alta de la torre de control, como se esperaba. Se puede observar que los desplazamientos aumentaron un poco; sin embargo están muy por debajo de los valores permisibles, por lo que no ocasiona ningún problema. Por otro lado las aceleraciones se logran reducir; sin embargo, se observa que el porcentaje de reducción de las aceleraciones es bajo. Lo anterior indica que, bajo las condiciones de viento y estructura considerada, el nivel de aceleración que se presentaría en la torre de control sería, en la mayoría de los niveles, molesto. Los niveles de desplazamiento que se presentan en la torre siempre se encuentran por debajo de los límites establecidos. Lo anterior muestra que, aunque el estado límite de servicio en términos de desplazamiento sea satisfecho, el estado límite de servicio en términos de aceleración podría no ser satisfecho.

Una alternativa para lograr una mayor reducción de la respuesta con el empleo de una MSS es realizar un análisis paramétrico variando la masa, el amortiguamiento, y la posición de la MSS. Lo anterior está fuera de los alcances del presente estudio.

Capítulo 7 Conclusiones y recomendaciones

7.1 Conclusiones

En el presente trabajo se estudió la factibilidad de instalar un disipador pasivo de energía en una torre de control, la cual es susceptible a presentar el fenómeno de desprendimiento de vórtices alternantes.

1. En la mayoría de las simulaciones la instalación del disipador tuvo un efecto positivo en la reducción de la respuesta; de manera particular en las simulaciones 3 y 8, el disipador de masa sólida sintonizada parece no ayudar o incluso incrementar la respuesta, esto se debe a que las señales del viento tienen un gran contenido de frecuencias, y algunas de estas frecuencias excitaron los modos superiores de vibración, por lo que el dispositivo al estar sintonizado con el modo fundamental fue incapaz de disipar la energía de vibración de los modos superiores.
2. Como se mencionó anteriormente el viento se comporta de manera aleatoria, lo que hace necesario generar un cierto número de simulaciones, para obtener resultados representativos que nos lleven a realizar una correcta interpretación. Se recomienda para este tipo de análisis simular al menos 30 juegos de señales, en este trabajo únicamente se simularon 10 juegos de señales. Como consecuencia de esto se puede observar en la Figura 19, que en los tres primeros nodos, los cuales están más cerca de la base, hubo un comportamiento adverso, es decir, aumentaron las aceleraciones, a diferencia de los nodos superiores donde hubo una reducción en la respuesta de aceleraciones. Se puede inferir que al hacer un número infinito de simulaciones no se esperarían valores adversos, si no que se suavizarían los resultados teniendo variaciones más pequeñas, lo que conduciría a observar la sobreposición de las gráficas en esa zona. La razón por la cual no se efectuó el número mínimo de simulaciones, es el tiempo, el cual es una limitante en los problemas de simulación numérica de viento turbulento, ya que se requiere de varios días de procesamiento de datos.

3. Como se sabe el viento tiene una dirección dominante, esto no quiere decir que no actúe en otras direcciones, en la mayoría de los casos la orientación de las edificaciones no guardan relación con esta dirección dominante y aunque lo hicieran se debe estudiar la respuesta estructural ante varios ángulos de incidencia del viento, por lo que en un proyecto real, será necesario instalar dispositivos disipadores que trabajen en todas direcciones, además de instalar un arreglo de ellos que permita disipar la vibración de los modos superiores que contribuyen a la respuesta.
4. Se puede observar que los desplazamientos de la torre de control no presentan un problema, pues están dentro de los límites establecidos en las normas. Sin embargo se tienen aceleraciones consideradas excesivas, las cuales no garantizan un nivel mínimo de confort, por lo cual la instalación de un solo disipador es insuficiente, habrá que instalar un arreglo de disipadores u optimizar el existente.
5. Como se mencionó anteriormente , se realizó un análisis de fuerzas totalmente correlacionadas como un ejercicio meramente académico, lo cual nos lleva a la colocación de una misma señal a lo largo de toda la altura de la torre de control, es decir un análisis en el que el viento, de manera hipotética se comporta de un modo sumamente ordenado, en el que un juego de señales idénticas afectan al mismo tiempo a la estructura, lo cual nos lleva a tener una respuesta de aceleración y desplazamiento de orden mayor, a la que obtuvimos cuando efectuamos los análisis de fuerzas parcialmente correlacionadas. De cualquier manera se evidencia el aporte que el disipador tiene para reducir la vibración en la estructura.

7.2 Recomendaciones

1. Un punto muy importante es realizar otro tipo de análisis variando la masa y la posición del disipador, lo cual permitirá optimizar el funcionamiento del dispositivo, esto debido a que generalmente se siguen recomendaciones, pero cada estructura tiene propiedades diferentes, por lo cual se deben estudiar de manera particular.
2. Por simplicidad el disipador se colocó entre dos nodos de la estructura, ubicados sobre el eje de análisis; sin embargo, habría que conectarlo a un mayor número de nodos en ese mismo nivel, para tratar de distribuir las fuerzas de amortiguamiento de manera uniforme en la torre, con el fin de obtener una mejor modelación del comportamiento del disipador y la estructura.
3. Se deben hacer más simulaciones para afinar los resultados.
4. De tener la información, se deben considerar todas las fuentes de masa, sobre la estructura, pues se sabe que esta variable afecta directamente las propiedades dinámicas de la estructura.

Bibliografía

1. ANSYS Mechanical APDL© (2013), versión académica.
2. Blevins, R. D. (1990). *Flow-Induced Vibration* (2nd ed.). Florida, United States of America: Krieger.
3. Cengel, Y. A., & Boles, M. A. (2012). *Termodinámica* (7^a ed.). Ciudad de México, México: McGraw Hill.
4. Chopra, A.K. (2014). *Dinámica de estructuras* (4^a ed.). Estado de México, México: Pearson.
5. Comisión Federal de Electricidad (2008). *Manual de diseño de obras civiles: Diseño por viento*. Ciudad de México, México.
6. Connor, J. J. (2002). *Introduction to Structural Motion Control* (1st ed.). United States of America: Prentice Hall College Div.
7. Den Hartog, J.P. (1947). *Mechanical Vibration* (3rd ed.). United States of America: McGraw-Hill.
8. Espinosa, J. L. (2011). *Uso de Masas Sólidas Resonantes para Controlar Vibraciones Inducidas por Viento Turbulento en Edificios Esbeltos (tesis de maestría)*. Instituto de Ingeniería-UNAM, México.
9. Housner, G. W., Bergman, L. A., Caughey, T. K., Chassiakos, A. G., Claus, R. O., Masri, S. F., . . . Yao, J. (1997). *Structural Control: Past, Present and future*. *Journal of Engineering Mechanics*, 123(9), 897-971.
10. López, O. A., Toledo, H. M. (2014). *Estudio de la seguridad de las edificaciones de vivienda ante la incidencia del viento*. CENAPRED.
11. Meseguer Ruiz, J., et al. (2013). *Aerodinámica civil: efectos del viento en edificaciones y estructuras* (2^a ed.). España: Garceta Grupo Editorial.
12. Ramírez, R. R. (2016). *Estudio del Comportamiento Estructural de una Torre de Control de Sección Circular ante los Efectos del Viento (tesis de licenciatura)*. Facultad de Ingeniería-UNAM, México.
13. Royo, J. A., Rabanaque, G., & Torres, F. (n.d.). *Análisis de Vibraciones e Interpretación de Datos*. Guemisa, 1-14.
14. Simiu, E., y Scanlan R.H. (1996). *Wind effects on structures: Fundamentals and applications to design* (3rd ed.). United States of America: John Wiley & Sons, Inc.
15. Wang, C. Y., & Wang, C. M. (2014), *Structural vibration*, United States of America: Taylor & Francis Group and Informa Business.
16. White, G. (2010). *Introducción al Análisis de Vibraciones*, United States of America: Azima DLI.

Direcciones electrónicas

1. http://www.fringenieria.com/descargas/IEGA_Parteprimera3.pdf
2. http://www.nationalgeographic.com.es/historia/grandes-reportajes/zigurats-los-templos-de-mesopotamia_6780.
3. http://www.inti.gob.ar/cirsoc/pdf/accion_viento/Viento.pdf
4. http://www.inifed.gob.mx/doc/normateca/tec/V4-SE/Volumen_4_Tomo_III_Disenio_por_Viento.pdf
5. <http://www.taipei-101.com.tw/>
6. 2-1. USGS Response to an Urban Earthquake Northridge '94, Prepared by the U.S. Geological Survey 1 for the Federal Emergency Management Agency (FEMA) Open-File Report 96-263, 1996
7. http://www.vibrationdata.com/Newsletters/January2002_NL.pdf

Anexo1.- Amortiguamiento de Rayleigh

Chopra (2014) nos muestra el procedimiento para obtener la fracción de amortiguamiento para cualquier modo de vibrar. Sin embargo para aplicar dicho procedimiento, los modos i y j , y sus fracciones de amortiguamiento deben elegirse de tal manera que garanticen valores razonables de fracciones de amortiguamiento para los demás modos que contribuyen significativamente a la respuesta. Por lo tanto no obtendremos los mismos coeficientes de amortiguamiento, al relacionar los modos 1 y 8, que cuando relacionamos los modos 1 y 10. En la Figura 34 se puede observar el desfase que existe entre las curvas, para dos análisis relacionando diferentes modos.

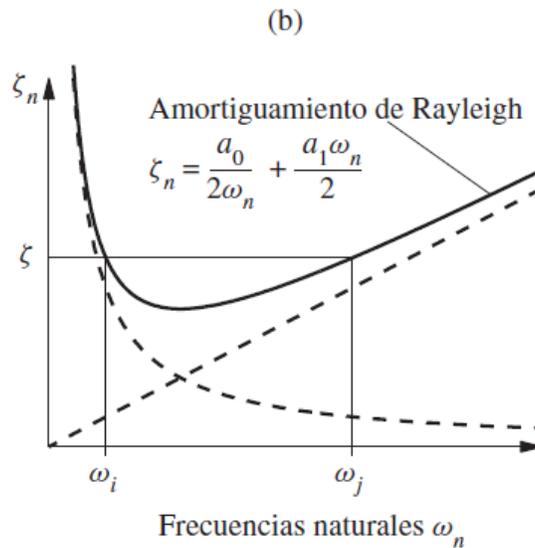


Figura 35. Variación de las fracciones de amortiguamiento con la frecuencia natural. Chopra, 2014.

Relacionando los modos 1 y 8

$$\begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \end{pmatrix} := 2 \begin{pmatrix} \frac{1}{\omega_1} & \omega_1 \\ \frac{1}{\omega_8} & \omega_8 \end{pmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} \zeta_i \\ \zeta_j \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.0728464 \\ 0.0006423 \end{pmatrix}$$

Relacionando los modos 1 y 10

$$\begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \end{pmatrix} := 2 \begin{pmatrix} \frac{1}{\omega_1} & \omega_1 \\ \frac{1}{\omega_{10}} & \omega_{10} \end{pmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} \zeta_i \\ \zeta_j \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.0760216 \\ 0.0004633 \end{pmatrix}$$

Resumen

Relacionando los modos 1 y el 8

a0= 0.072846

a1= 0.000642

Modo	Frecuencia circular ω		ζ
(#)	(ciclos/s)	(rad/s)	(%)
1	0.6704	4.212	1.00%
2	0.6740	4.235	1.00%
3	1.7868	11.227	0.68%
4	3.0839	19.377	0.81%
5	3.1306	19.670	0.82%
6	3.6467	22.913	0.89%
7	4.1424	26.028	0.98%
8	4.2856	26.927	1.00%
9	4.9446	31.068	1.11%
10	6.2001	38.956	1.34%

Relacionando los modos 1 y el 10

a0= 0.0760216

a1= 0.0004633

Modo	Frecuencia circular ω		ζ
(#)	(ciclos/s)	(rad/s)	(%)
1	0.6704	4.212	1.00%
2	0.6740	4.235	1.00%
3	1.7868	11.227	0.60%
4	3.0839	19.377	0.65%
5	3.1306	19.670	0.65%
6	3.6467	22.913	0.70%
7	4.1424	26.028	0.75%
8	4.2856	26.927	0.76%
9	4.9446	31.068	0.84%
10	6.2001	38.956	1.00%

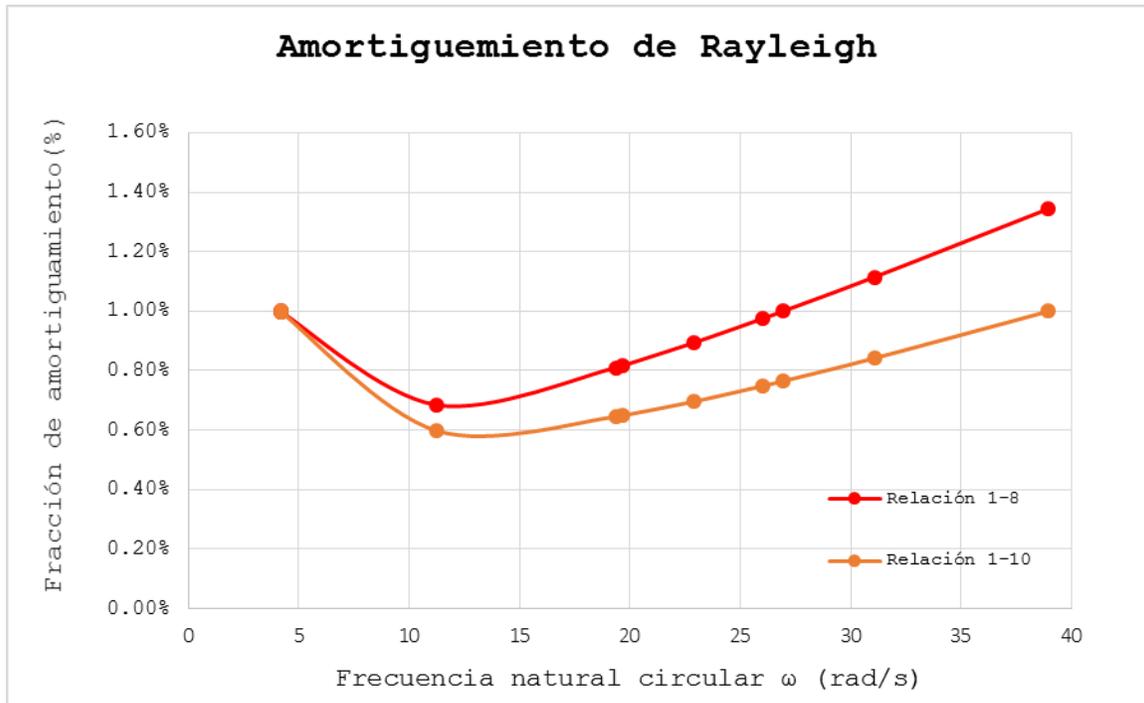


Figura 36. Variación de las fracciones de amortiguamiento con la frecuencia natural, relacionando diferentes modos.