



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
PROGRAMA DE MAestrÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA  
CIVIL – ESTRUCTURAS

AMORTIGUADORES DE MASAS SÓLIDAS RESONANTE  
PASIVAS EN EDIFICIOS ESBELTOS

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:  
JOSÉ ARNALDO NÚÑEZ MATOS

TUTOR PRINCIPAL  
DR. ADRIAN POZOS ESTRADA

MÉXICO, D. F. FEBRERO 2017

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: DR. ESCOBAR SÁNCHEZ JOSÉ ALBERTO

SECRETARIO: DR. GÓMEZ MARTÍNEZ ROBERTO

VOCAL: DR. POZOS ESTRADA ADRIÁN

1<sup>ER</sup> SUPLENTE: DR. DÍAZ LÓPEZ ORLANDO JAVIER

2<sup>DO</sup> SUPLENTE: DR. GARCÍA PÉREZ JAIME

TESIS REALIZADA EN:  
INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM.

TUTOR DE TESIS:  
DR. POZOS ESTRADA ADRIÁN

---

FIRMA

## Dedicatoria

*Para las seis más hermosas gemas que la vida me ha  
dado la oportunidad de contemplar, ustedes son mi  
fuente de inspiración.*

*A mi hermano, por tu tiempo, apoyo y amistad.  
Para las 3 más grandes valquirias tapatías que me  
pudieron tocar como guardianas, quienes me han  
cuidado y querido desde antes de mis primeros  
recuerdos y con quienes siempre estaré eternamente  
agradecido.*

*Y a mis padres Clotilde y Rita, a quienes les debo  
todo.*

## Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por los recursos económicos brindados para realizar mis estudios de maestría.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, por haberme permitido formar parte de su historia y entregarme un bello y colorido camino de aprendizaje y descubrimiento. Al programa de Posgrado en Ingeniería, por haberme otorgado todo el conocimiento necesario para poder redescubrir la ingeniería y la ciencia. Al grupo de Ingeniería de viento y al Dr. Adrián Pozos Estrada, por todo su tiempo, conocimiento y paciencia, de corazón, muchas gracias.

Esencialmente a mis sobrinos, Aby, Riqui, Vale, Sofie y Ale, a mi hermanita Majo, a mi cuñado Ariel, a mis hermanas Lorena, Aby y Emma y a mis Padres, por otorgarme cada una de las palabras que en este documento he escrito, ustedes me han ayudado a alcanzar este punto tan importante en mi vida, esta es mi humilde retribución.

A todos los gandules de la facultad, especialmente a Alán, Alaín, Arturo, Maldonado y Bernés. A mis amigos Marisol, Cesar, Michell, Irving, Silvia, Martín, Geovanna, Marco, Ingrid, Ahmed, Claudie, Cesar S, Fernando, Mayela, Francisco, Sandra y Paulo, por hacer cada momento que hemos compartido increíble, siempre serán eternos en mi memoria y en el cabildo.

A quien me brindó la mejor introducción a CU y mi primer amigo en esta aventura, José Tobías Espín ¡va por ti hermano! A mis amigos, Felipe *Ferra* Gómez, Daniel, Adrián, Héctor, Oscar, Abdel, Emmanuel y *Legendario Rey Villano* por hacer de este camino que hemos recorrido juntos, uno sorprenderte y lleno de grandes momentos, siempre compis. A mis compañeros de cubículo, Luis Ernesto, Edmundo y Teresa por hacer muy divertida y amena esta jornada. A Berny, Isaac y Josué, por su apoyo en el posgrado.

A mi amigo Mario Boijseauneau, *wasá* en el mundo de la Universidad, por la compañía en esta odisea por la UNAM y sus alrededores. Al 21-903, por tener los mejores amaneceres de Copilco. A Juan, Gaby, Josué, Lázaro, Lalo, Aarón, Fer, Johanna y Niza por tolerar mi ruidosa y accidentada compañía, mi música descuadrada, mi desorden perpetuo, mi risa tan particular, mis momentos más nefastos y por cada uno de esas noches de películas, fiestas, conciertos, salidas y viajes que son los grandes eventos en esta etapa de mi vida y los mejores personajes en este capítulo de mi vida, sin ustedes no puede ser. Y a toda la banda de la Comarca, en especial a Miguelón (quien no puede olvidarse, es el aval), Tapia y *Kimo*.

Por último, pero no menos importante, al Club Deportivo Guadalajara, por existir.

## Resumen

Las tendencias de diseño han llevado a las frecuencias naturales de las estructuras a valores muy bajos debido a solicitaciones demográficas y económicas, esto da como resultado que el comportamiento dinámico, ante eventos aeroelásticos, pueda llegar a ser inadecuado para el confort del usuario, una solución a este tipo de acoplamientos aerodinámicos es el uso de sistemas mecánicos de disipación energética. En el presente trabajo se presentan los resultados de un análisis matricial de optimización de los parámetros de diseño de una masa sólida resonante de naturaleza pasiva, cuando es acoplado a un edificio con una alta relación de esbeltez de planta regular. La interacción con el viento fue modelada mediante la utilización de señales de viento en las que se consideraron su componente estacionaria y turbulenta, a su vez la parte fluctuante de la señal fue generada con la utilización del método ARMA y considerando el espectro propuesto por J.C. Kaimal. Se encontró el comportamiento en la zona acotada de estudio, se realizaron distintos estudios complementarios del estudio del comportamiento de las masas sólidas resonantes pasivas.

## Abstract

The design trends have carried the natural frequencies of the structures in a very low value as a response of demographic and economic solicitations. This, it could bring as a result that the dynamic behavior, in front of aeroelastic phenomena, could become inadequate from a service point of view. A solution for this aerodynamic coupling is the use of mechanical energy dissipation systems. The results of a matrix analysis of optimization for the design parameters of a solid tuned mass damper of passive behavior, when is the solution of a high-slenderness building with a regular plant are presented. The interaction with the wind was modeled by the utilization of wind signals, considering their turbulent and steady components, also the turbulence component was recreated using the ARMA model using the spectral power density function proposed by J.C. Kaimal. It was found the behavior in the studied zone, a group of complement studies of the behavior of the tuned mass was realized also.

## Contenido

Simbología .....	iv
Lista de Ilustraciones .....	viii
Lista de Tablas .....	x
Introducción .....	1
Antecedentes .....	2
Masas Sólidas Resonantes (MSR).....	3
Parámetros de diseño .....	9
Normatividad de aceleraciones y generación de señales de viento .....	14
ISO 10137 (2007).....	14
NBCC – 2005.....	15
AIJ-2004.....	16
NTC-2004.....	16
Metodología .....	18
Resultados .....	25
Discusión .....	30
Valores Óptimos.....	30
Consideraciones completarias de diseño.....	31
Aceleraciones esperadas.....	32
Recomendaciones para futuros trabajos .....	33
Conclusiones .....	34
Referencias.....	35
Software de Referencia.....	37
Anexo A: Método ARMA .....	38
Anexo B: Diseño estructural (E-Base).....	41
Características del edificio .....	41
Reglamentos aplicados.....	41
Sistema estructural seleccionado .....	41
Análisis de Cargas.....	41
Modelación del edificio .....	45
Diseño estructural .....	50
Revisión del comportamiento dinámico ante cargas dinámicas de viento. ....	54
Anexo C: Uso de Ansys APDL y MathLab.....	56

Amortiguación de Rayleigh .....	56
Ansys APDL .....	56
Programación en MATLAB .....	59
Ejemplo del código .....	60

## Simbología

$A$	Aceleración, Área
$a_0$	Acción espectral
$A_t$	Área de la sección
$A_\theta(t)$	Aceleración angular de la vibración torsional
$B_1, B_2$	Factores de amplificación de momentos para diseño de piezas flexocomprimidas
$B$	Respuesta de fondo
$C$	Matriz de correlación, Coeficiente que depende de la ley de variación del momento flexionante
$c$	Amortiguación del sistema
$C_a$	Constante de alabeo de la sección
$c_e$	Coeficiente de presión exterior
$C_e$	Factor de exposición
$C_{eH}$	Factor de exposición a la altura H
$C_g$	Factor del efecto ráfaga
$C_D$	Coeficiente de arrastre
$C_{k(t)}$	Matriz de correlación cruzada
$coh(y_i, x_i, y_j, z_j, f)$	Función de coherencia
$C_i$	Coeficiente de presión interior
$D$	Dimensión en planta en la dirección paralela al viento
$dRc$	Diferencial en el eje relacionado a la relación de amortiguación
$dRf$	Diferencial en el eje relacionado a la relación de frecuencias
$E$	Módulo de elasticidad
$E_n(j, i)$	Matriz de porcentajes de disminución de la respuesta
$f_1, f_0$	Frecuencia Natural
$F_D(z, t)$	Fuerza del viento, dependiente del tiempo t y la altura z
$f_{nW}^2, f_{nD}^2$	Frecuencia natural cuadrática del modo en la dirección estudiada
$F$	Relación de energía de ráfaga
$F_0/K$	Respuesta estática
$F_R$	Factor de resistencia
$F_y$	Esfuerzo de fluencia del acero
$g_p$	Factor pico
$H$	Altura de referencia



$I_x, I_y$	Momento de inercia de la sección
J	Constante de torsión de Saint Venant
K	Factor de rugosidad de la edificación
k	Factor de longitud efectiva
K <sub>p</sub>	Rigidez del sistema principal
K <sub>a</sub>	Rigidez del sistema amortiguador
L	Longitud total del elemento
M	Masa del sistema principal
m	Masa del sistema amortiguador
$M_p, M_y$	Momentos plásticos y elásticos resistentes de la sección
$M_m$	Momento resistente nominal de una sección compuesta
$M_n(j, i)$	Matriz de respuestas para el nodo n
$M_nB(j, i)$	Matriz de respuestas base para el nodo n
$M_{uo}(\frac{x}{y})(\frac{B}{A})$	Momentos de diseño que actúan alrededor de los ejes X y Y, respectivamente, de las secciones transversales extremas de una barra flexocomprimida para los extremos A y B
$M_{tio}(\frac{x}{y})(\frac{B}{A})$	Momentos actuantes de diseño para los análisis de extremos, para los extremos A, B en las direcciones X y Y
N1 - N9	Nodos, del 1 al 9
$P_u$	Fuerza axial de diseño que obra en una columna comprimida axialmente o flexocomprimida
$P_{su}$	Carga crítica de pandeo elástico de la columna
$P_{se2}$	Carga crítica de pandeo elástico de la columna
$P_{ij}(t)$	Correlación cruzada entre el n-ésima y la m-ésima posición
Q	Ductilidad
T	Período, periodo fundamental de vibración del suelo
r	Distancia al centro de torsión
$r, r_x, r_y$	Radio de giro de la sección
$r_D$	Radio de la esfera que limita el volumen de la masa del sistema amortiguador.
$R_c$	Relación de amortiguación, Resistencia nominal a la compresión pura
$R_f$	Relación de frecuencias
s	Factor de reducción por tamaño
$S_i(f)$	Función de densidad de potencia espectral
$S_x, S_y$	Módulo elástico de flexión de la sección
$U_{Est}$	Desplazamiento de la estructura principal

$U_{Est T=200}$	Desplazamiento de la estructura principal ante cargas con 200 de período de retorno
$U_{D Libre}$	Desplazamiento adicional al presentado por el desplazamiento en conjunto con la estructura principal
$U_{D T=200}$	Desplazamiento del amortiguador ante cargas con 200 de período de retorno
$U_{D Total}$	Desplazamiento total del amortiguador en el grado de libertad
$V_H, V(z)$	Velocidad del viento a la altura H, z
$w$	Dimensión en planta en la dirección perpendicular al viento
$X(t), X$	Respuesta del sistema principal, desplazamiento
$x(t), x$	Respuesta del sistema amortiguador, desplazamiento
$x_H$	Parámetro de referencia de Altura
$\dot{x}$	Respuesta del sistema principal, velocidad
$\dot{X}$	Respuesta del sistema amortiguador, velocidad
$\ddot{x}$	Respuesta del sistema principal, aceleración
$\ddot{X}$	Respuesta del sistema amortiguador, aceleración
$Z_x, Z_y$	Módulo plástico de flexión de la sección
$a_0$ y $a_1$	Constantes
$a_w, a_w$	Aceleración esperada, perpendicular y paralela al viento respectivamente
$a_r$	$78.5 \times 10^{-3} \left[ \frac{V_H}{\eta_w} \frac{V_H}{f_{nW} \sqrt{wD}} \right]^{3.3}$
$\beta_w, \beta_D$	Fracciones de la amortiguación estructural en cada una de las direcciones
$\gamma_{opt}$	Relación de frecuencias óptima
$\Delta$	Deflexión estática debido a fuerzas generadas por una velocidad $V_H$
$\Delta_{RC}, \Delta_{Rf}$	Incrementos en los ejes de estudio Rc y Rf.
$\rho$	Densidad del aire
$\Delta \xi_{eq}$	Incremento en la amortiguación
$\zeta_{opt}^2$	Relación de amortiguación cuadrática óptima
$\zeta_1$	Amortiguación esperada
$\eta_w, \eta_D$	Frecuencia natural en la dirección paralela y perpendicular al viento respectivamente
$\lambda_c$	Parámetro de esbeltez
$\mu$	Relación de la masa del sistema principal y el amortiguador
$\xi, \zeta_1$	Relación de amortiguación
$\rho_B$	Densidad media del edificio en Kg/m <sup>3</sup>

$\sigma_v^2$	Varianza del viento turbulento
$v(z, t)$	Turbulencia del viento, dependiente del tiempo t y la altura z, Vector de velocidades normalizadas
$X_0$	Respuesta máxima del sistema principal
$\psi(t)$	Vector de ruido blanco
$\Omega_1, \Omega_2$	Frecuencias de respuesta indeterminada
$\omega_i, \omega_j$	Frecuencia natural circular del modo i o j

## Lista de Ilustraciones

Figura 1. Espectro de diseño esquemático, donde $a_0$ es la pseudoaceleración, T el período en segundos. (Federal, 2004). .....	2
Figura 2. MSR en el edificio CitiCorp Tower en Nueva York. Los modelos suelen ser simplificados a 2 grados de libertad, el primero representa al modo vibración que se desea amortiguar y el segundo grado de libertad es el sistema amortiguador (Bungale & Martin, 2005). .....	4
Figura 3. Variación de las propiedades dinámicas de un edificio de 99 metros de altura a base de marcos de acero, después de (Tamura, Y.; Suganuma, S., 1996). .....	5
Figura 4. Sistema de dos grados de libertad, representación de una MSR y el sistema principal (Beards, 1996). .....	9
Figura 5. Efecto de una MSR en la respuesta del sistema. Se observan 3 distintos comportamientos para distintos valores críticos de amortiguación en el sistema disipado, los casos frontera cuando los valores son nulos o infinito y un valor intermedio arbitrario. Se puede ver como los valores extremos presentan mayores disminuciones en ciertas frecuencias, pero una respuesta indeterminada en otra frecuencia, el valor intermedio c presenta un comportamiento intermedio entre los dos valores frontera. (Beards, 1996).....	10
Figura 6. Amplitud relativa: a) movimiento estructural $x_0$ , b) movimiento relativo del amortiguador $x_D$ . (Krenk & Høgsberg, 2012).....	12
Figura 7. Sistema de péndulo en Taipei Financial Center (Bungale & Martin, 2005). .....	13
Figura 8. Curva de evaluación de vibraciones inducidas por el viento en edificios para direcciones horizontales para un año de período de retorno (República Federal Democrática de Ethiopia, 2007). .....	15
Figura 9. Aceleración máxima anual, del borrador de AIJ-Guidelines-2004 (Tamura Y. ).....	16
Figura 10. Los resultados de Meshkat muestra el comportamiento del factor de magnificación de aceleración dinámica (ADMF) (Hessamoddin Meshkat & Hashem, 2014). .....	19
Figura 11. Fuerzas puntuales esquemáticas en nodos.....	20
Figura 12. Localización en planta de nodos estudiados.....	20
Figura 13. Modelo construido en el programa Ansys APDL con las señales aplicadas en los nodos	21
Figura 14. Respuesta de desplazamiento neta, archivo de salida del programa Ansys APDL .....	22
Figura 15. Superficie de disminución de respuesta para el nodo 9 para su respuesta de desplazamiento .....	23
Figura 16. Diagrama del proceso de la metodología .....	23
Figura 17. Función de Densidad de Potencia Espectral propuesta por Kaimal.....	24
Figura 18. Superficie generada de la matriz con los porcentajes de disminución en la respuesta (aceleraciones) del Nodo 5.....	25
Figura 19. Curva de la disminución de la respuesta (desplazamientos) para el Nodo 5 cuando el valor de la amortiguación del sistema disipador es el 10% del valor de la amortiguación del sistema principal.....	26
Figura 20. Superficie generada de la matriz con los porcentajes de disminución en la respuesta (desplazamiento) del Nodo 1 .....	26
Figura 21. Curva de la disminución de la respuesta (desplazamientos) para el Nodo 1 cuando el valor de la amortiguación del sistema disipador es el 10% del valor de la amortiguación del sistema principal.....	27

Figura 22. Curva de la disminución de la respuesta (desplazamientos) para el Nodo 5 cuando la relación de las frecuencias es de 1.00.....	28
Figura 23. Superficie generada de la matriz con los porcentajes de disminución en la respuesta (desplazamiento) del Nodo 5 .....	28
Figura 24. Respuesta promedio del comportamiento de los 9 nodos para las matrices de 10x15 ..	29
Figura 25. Comportamiento de la superficie en el eje Rc de la respuesta promedio .....	29
Figura 26. Superficie generada de la matriz con los porcentajes de disminución en la respuesta (desplazamiento) promedio de los 9 nodos estudiados .....	30
Figura 27. Comportamiento promedio de las respuestas en los 9 nodos cuando se tiene 5% de la amortiguación del sistema principal .....	30
Figura 28. Resultados en los nodos alejados del centro de la planta .....	33
Figura B29. Planta tipo de la estructura.....	46
Figura B30. Vista isométrica del modelo reticular. ....	47
Figura B31. Primeros 3 Modos de vibración. Se presentan los primeros modos de translación en sus dos ejes principales y el primer modo de rotación.....	48
Figura B32. Primeros 3 Modos de vibración. Se presentan los segundos modos de translación en sus dos ejes principales y el segundo modo de rotación. ....	48
Figura B33. Parámetros seleccionados para el análisis modal-espectral efectuado por el programa de cómputo. ....	50
Figura B34. Planta adaptada para albergar a la MSR.....	54
Figura C35. Inicio de rutina .....	57
Figura C36. Estructura general del Pseudocódigo .....	57
Figura C37. Materiales a utilizar.....	57
Figura C38. Escritura de archivos de salida .....	58
Figura C39. Reinicio del análisis. ....	58

## Lista de Tablas

Tabla 1. Relaciones de amortiguación de diseño en edificios de concreto reforzado, después de (Tamura, Suda, & Sasaki, 2000).....	6
Tabla 2. Relaciones de amortiguación de diseño en edificios de acero, después de (Tamura, Suda, & Sasaki, 2000). .....	7
Tabla 1. Lista de Sistemas MSR en el mundo (GERB, 2015).....	8
Tabla 2. Edificios altos en México (Espinosa Méndez, Pozos Estrada, & Gómez Martínez, 2011). ....	9
Tabla 3. Desempeño de dispositivos amortiguantes. Muy Bueno (MB) Bueno (B) (después de Shibuya, 2001).....	14
Tabla B1. Cargas gravitacionales .....	42
Tabla B2. Parámetros para el diseño por viento .....	42
Tabla B3. Coeficientes de reducción por área.....	43
Tabla B4. Coeficientes de presión exterior .....	43
Tabla B5. Presiones Netas .....	43
Tabla B6. Anchos Tributarios.....	43
Tabla B7. Fuerzas Distribuidas en Vigas .....	44
Tabla B8. Cargas y coeficientes de presión exterior. La carga se distribuye sobre las vigas y se presentan como cargas longitudinales. ....	44
Tabla B9. Elementos y secciones finales del diseño.....	45
Tabla B10. Períodos y factores de participación de los primeros 20 modos .....	49
Tabla B11. Propiedades geométricas de la sección .....	51
Tabla B12. Eficiencia en vigas diseñadas.....	51
Tabla B13. Propiedades geométricas de la sección .....	52
Tabla B14. Propiedades geométricas de la sección .....	52
Tabla B15. Propiedades geométricas y parámetros de diseño de las NTC. ....	52
Tabla B16. Parámetros para cálculo de aceleraciones.....	54
Tabla B17. Parámetros para el cálculo de aceleraciones.....	55

## Introducción

Los estados de servicio como criterio de diseño cada día son más importantes y se van convirtiendo en variables que impactan de manera directa a la estructura y por ende al monto final del inmueble. Cuando la solución arquitectónica presenta períodos altos en su etapa de pre-diseño, éste puede ser diseñado con las ordenadas espectrales pequeñas, debido a la zona en la que caen sus períodos en el espectro de diseño, esto hace que las solicitaciones sean menos severas y permite que la solución estructural pueda llegar a ser más ligera. Cuando las edificaciones presentan estas características, las aceleraciones debido al viento pueden llegar a ser altas, debido a los grandes períodos.

Algunos reglamentos del mundo proponen valores límite para las aceleraciones como parte de las revisiones por servicio, cada una de estos reglamentos y algunas guías de diseño asignan los valores límite en función de distintos parámetros. Las aceleraciones en edificaciones, debido a cargas dinámicas del viento, pueden rebasar estos valores máximos de aceleración y con esto existe la gran posibilidad de que los ocupantes de estas edificaciones presenten molestias, que pueden ser desde sensación de inseguridad, ansiedad y hasta mareos, debido a que este comportamiento estructural puede presentarse de manera cotidiana. La reacción que presentaría cada persona no es muy sencilla de estandarizar y mucho menos de modelar debido a la complejidad que representa el comportamiento del cuerpo humano, la sensibilidad a la aceleración varía de persona a persona debido a su reacción ante distintos grados de aceleraciones no admisibles. Así mismo, existen objetos tales como instrumentos de medición, mecanismos con baja estabilidad mecánica o cualquier otro objeto que presente situaciones similares tales que puedan ser afectados por altas aceleraciones. Estos casos pueden presentarse en museos, hospitales, industrias, laboratorios, etc, esto se abordará en el capítulo de Antecedentes. Este fenómeno si bien no representa un peligro estructural que pueda presentar efectos de fatiga o falla, puede verse como un estado de servicio no cumplido.

En este trabajo se presenta como solución el uso de Masas Sólidas Resonantes, específicamente el uso de su variante de naturaleza pasiva. Aunque existen parámetros de diseño óptimos para estos sistemas, éstos no se han corroborado con señales de viento generadas de un espectro energético específico para la modelación del viento turbulento. Se realizó un estudio matricial de optimización, las variables a optimizar fueron la relación de frecuencias que tendría el modo de vibración que se desea disipar y la frecuencia propia del sistema amortiguador, para esto fue necesario la utilización de los programas de cómputo de ingeniería asistida. En el capítulo de Metodología se presenta de manera precisa el procedimiento empleado para la obtención de los resultados, aunque existe un capítulo destinado a la descripción de estos. Se logró verificar lo propuesto por algunos investigadores en trabajos previos y además se llegaron a algunas recomendaciones para el diseño de este tipo de sistemas, esto se presenta en el capítulo de Discusión. Adicionalmente se presenta un capítulo con las conclusiones finales y se sugieren algunas recomendaciones de investigación para futuros trabajos.

## Antecedentes

Las tendencias estructurales en las edificaciones modernas han llevado a los períodos naturales de las edificaciones a valores muy altos, como resultado, las solicitaciones actuantes se han modificado debido a que estas son dependientes de las propiedades modales de las edificaciones. Esto debido a que las solicitaciones urbanas han encontrado solución en edificaciones esbeltas con un gran número de pisos habitables, por lo tanto, estructuras más flexibles.

Las fuerzas sísmicas esperadas son menores una vez alcanzada la rama descendente del espectro de diseño que proponen las Normas Técnicas Complementarias en su publicación de 2004, como se puede ver en la Figura 1. Esto ha generado que los efectos dinámicos debido al viento cobren nueva importancia día a día debido a que empiezan a ser las condiciones de servicio ante eventos eólicos las que empiezan a imperar en el diseño.

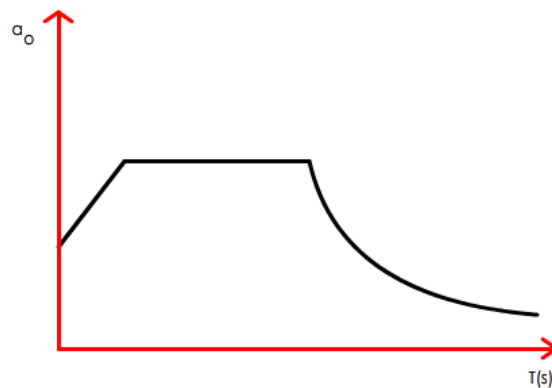


Figura 1. Espectro de diseño esquemático, donde  $a_0$  es la pseudoaceleración,  $T$  el período en segundos. (NTCDV, 2004).

Los efectos del viento siempre han generado problemas de estabilidad en las estructuras, ya sea en sus límites de servicio o supervivencia, el uso de dispositivos disipadores de energía es una solución con relativa novedad, aunque el uso de esta tecnología no es algo novedoso pues ya existen estudios de su uso, uno de los primeros investigadores es Den Hartog en 1934 (Crandall, 2008). Cuando se presentan respuestas dinámicas excesivas es necesario tomar acciones para el control de estas, para esto se pueden realizar varias acciones. La primera posibilidad es aumentar la magnitud de algunas dimensiones de las secciones estructurales, así como el uso de elementos adicionales como contravientos o muros como elementos que agregan resistencia a las cargas laterales de manera adicional a la rigidez inicial (Meseguer Ruiz & Saez Andrés, 2001).

La optimización de los parámetros de diseño es importante ya que puede incrementar de manera importante la eficiencia de estos dispositivos, mientras las aceleraciones pueden llegar a tener reducciones del orden del 10.3%, las reducciones en los desplazamientos pueden llegar a ser de hasta el 30.6% (Sinan Melih & Gebrail). Adicionalmente se han realizado otros trabajos con la intención de encontrar valores óptimos de diseño, tales como los presentados por Den Hartog en 1956 y Steen Krenk en 2012 entre otros. En el caso de fenómenos aeroelásticos debidos al viento, el comportamiento de las estructuras suele apoyarse de programas computacionales (Meseguer Ruiz & Saez Andrés, 2001). El estudio de este tipo de sistemas mecánicos vuelve necesaria la



interacción de distintas partes de la ingeniería y de las matemáticas, tales como la mecánica, álgebra lineal, estadística, entre otras, para poder representar el sistema y obtener una simulación fiable.

### Masas Sólidas Resonantes (MSR)

El uso de masas sólidas resonantes como medida de control de estados de falla y servicio relacionado al comportamiento dinámico ha sido objeto de estudio de la ingeniería estructural. Se ha logrado encontrar varias vías para solucionar este tipo de problemas, específicamente cuando éstos son debido a fenómenos aeroelásticos. Estas vibraciones suelen ser combinaciones de distintos fenómenos, tales como el galope, flameo, bataneo, divergencia torsional o desprendimientos de vórtices, entre otros. Cuando la energía de las fuerzas dinámicas (turbulencia) es mayor en el intervalo de frecuencias bajas, estas frecuencias pueden llegar a generar un acoplamiento con los modos de frecuencias bajas de las estructuras, estos efectos pueden agravarse si la edificación presenta coeficientes de amortiguamiento bajos (Meseguer Ruiz & Saez Andrés, 2001). Debido a esto, la respuesta estará en función de la distribución de los modos, la magnitud de sus frecuencias naturales y la amortiguación propia del sistema estructural (Chopra A. K., 2014). Una alternativa es el uso de sistemas amortiguadores que aumenten el valor de la amortiguación total, ya sea de la estructura completa o algún modo natural en particular con el fin de disminuir la amplitud de la respuesta mediante una mayor disipación energética.

Estos sistemas pueden considerarse de dos tipos por un lado se encuentran los sistemas pasivos, los cuales se limitan a trabajar con unos parámetros establecidos y sólo pueden aumentar la amortiguación y el comportamiento de un solo modo de vibración, éstos disipan energía mediante deformaciones controladas, la energía disipada depende la deformación relativa a cortante y la velocidad del dispositivo, estos sistemas tiene la ventaja de no requerir monitoreo ni necesitan energía eléctrica para su uso (Bungale & Martin, 2005). Por otro lado, se encuentran los amortiguadores activos, estos pueden variar sus propiedades mecánicas con la ayuda de elementos con rigidez variable, lo que nos brinda variaciones en sus frecuencias naturales, esto hace que sea necesario un sistema de control para poder hacer uso de este tipo de sistemas debido a que se requiere un sistema de medición en tiempo real en zonas estratégicas para el registro del comportamiento y la retroalimentación de las bases de datos, todo esto hace que se incrementen los costos de mantenimiento y servicio si se compara con su contra parte pasiva (Meseguer Ruiz & Saez Andrés, 2001).

Otro tipo de amortiguadores son los de Masas Líquidas Resonantes, que cuentan con los mismos principios, estos sistemas suelen componerse de un tanque con forma de U, éste tiene sus dos columnas horizontales llenas del fluido seleccionado, el flujo de una columna a otra es restringido por aberturas parciales que generan las pérdidas energéticas. La naturaleza del mecanismo que proporcionará el aumento de amortiguación es una variable que nos presenta otra forma de clasificación de los sistemas amortiguadores, estos pueden ser viscoelásticos, hidráulicos o neumáticos.

Los componentes de una MSR son: una masa, su magnitud suele ser obtenida como porcentaje de la masa modal y un grupo de actuadores hidráulicos o neumáticos. La masa descansa sobre apoyos hidráulicos los cuales son colocados de tal manera que se obtengan los grados de libertad que se deseen trabajar (Meseguer Ruiz & Saez Andrés, 2001). En el caso del presente trabajo nos centraremos en el uso de MSR del tipo pasivo, éstas cuentan con las ventajas de tener menor costo de mantenimiento y reparación debido a que no requiere un sistema de control tan complejo, así mismo puede ser ajustado de cualquier manera para variar la frecuencia de vibración, aunque la gama de frecuencias que estos sistemas pueden recorrer es muy acotada.

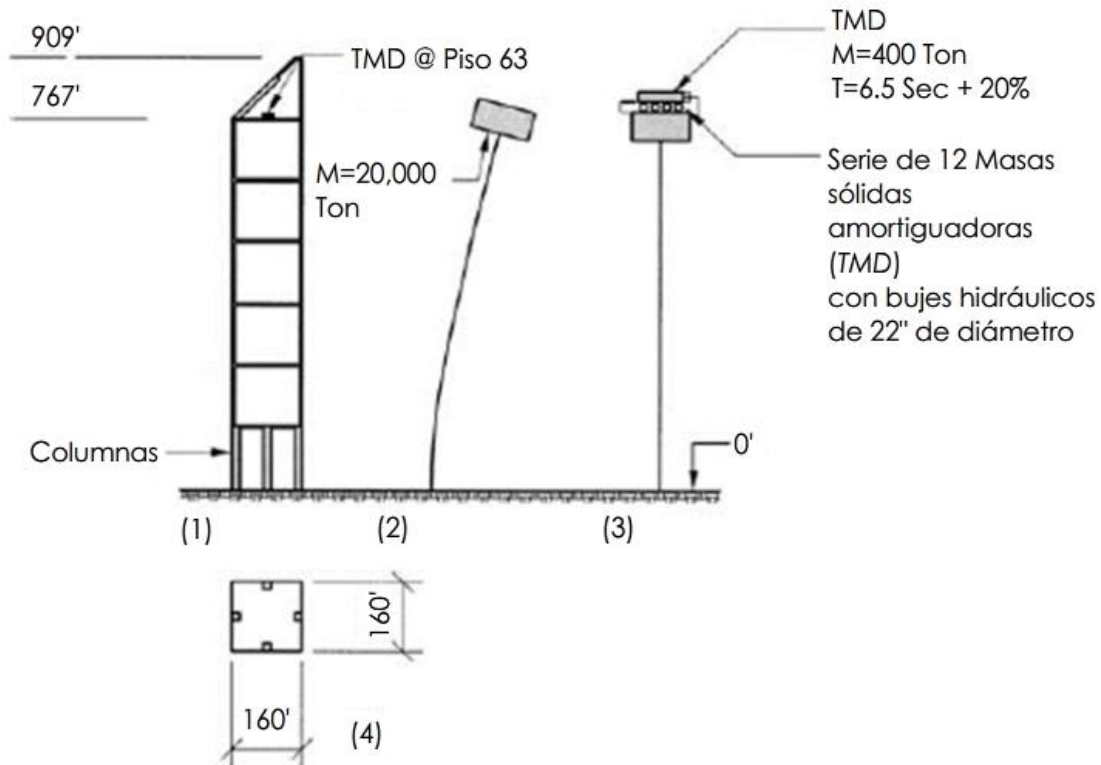


Figura 2. MSR en el edificio CitiCorp Tower en Nueva York. Los modelos suelen ser simplificados a 2 grados de libertad, el primero representa al modo vibración que se desea amortiguar y el segundo grado de libertad es el sistema amortiguador (Bungale & Martin, 2005).

En la Figura 2 se puede ver una forma de ilustrar el modelo matemático: (1) muestra de manera esquemática en elevación el edificio como un oscilador; (2) y (3) nos muestra el sistema de dos masas, el del modo a trabajar y la masa del sistema amortiguador (Bungale & Martin, 2005).

La amortiguación estructural es el parámetro más importante que afecta a la respuesta dinámica de edificios, pero el más incierto debido a la dificultad que implica su modelación. Este, debido a su naturaleza incierta y a que su contribución es muy significativamente, esto reduce la confiabilidad de los procesos de diseño ante efectos dinámicos que puedan experimentar los sistemas estructurales. Además, la determinación de un valor certero del amortiguamiento estructural es muy importante no solo para la evaluación de la respuesta estructural, sino también para el diseño de sistemas pasivos y activos de amortiguación estructural que serán instalados en la edificación y la estructura, causado por la aportación que pueda representar al sistema puede ser muy significativa. De cualquier forma, no hay un método teórico para la estimación de la amortiguación en edificios, pero puede ser estimada con base en muchas mediciones, así como su dispersión, para esto es necesario obtener información de alta calidad de edificios a escala real para los procesos de diseño (Tamura Y. , 2006).

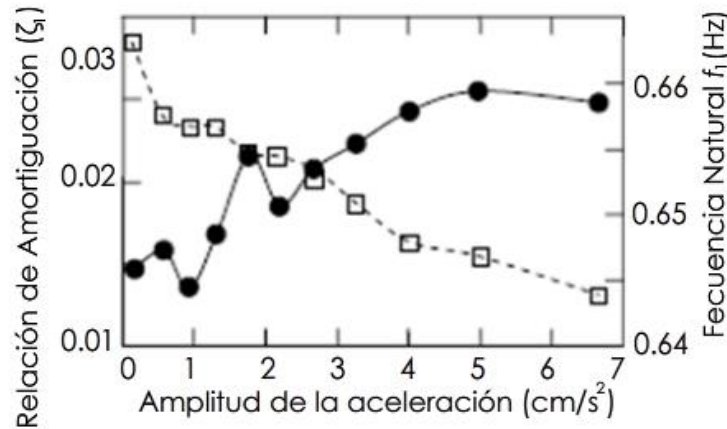


Figura 3. Variación de las propiedades dinámicas de un edificio de 99 metros de altura a base de marcos de acero, después de (Tamura, Y.; Suganuma, S., 1996). Los datos marcados con las geometrías sólidas representa la amortiguación, los datos marcados con los cuadros vacíos representa la frecuencia natural.

Se observa de la Figura 3 que la relación de amortiguación va aumentando con la amplitud mientras que la frecuencia natural disminuye. Estos resultados pueden ser atribuidos a la misma razón física, la contribución de miembros secundarios y el fenómeno de deslizamiento. En el régimen de pequeñas amplitudes, las conexiones, las juntas y las caras de contacto de varios componentes que están pegadas una con otra, si la amplitud incrementa, empiezan a deslizarse lo que genera amortiguación por fricción, pero pérdida de rigidez. Esta es la misma razón por el incremento de la amortiguación y de la frecuencia natural con un incremento de las amplitudes. Si la amplitud llega a un nivel tal que todas las conexiones resbalan, el número de conexiones resbalantes no incrementa por lo que se alcanza un valor pico (Tamura, Y.; Suganuma, S., 1996).

Said Elias y Vasant Matsagar (2014) llegaron a las siguientes conclusiones: los desplazamientos, distorsiones de entre piso y cortante basal pueden ser reducidos si las MSR son colocadas de manera efectiva. Los efectos de robustez pueden ser más visibles en MSR que trabajen con el primer modo de vibración, además de incrementar. Basado en un estudio realizado por (Ajeet & Manish, 2007) de un edificio de cortante de 10 pisos, se encontró que el amortiguamiento suplementario es más efectivo para reducir respuestas sísmicas cuando los edificios son simétricos y su eficiencia se reduce cuando aumenta la irregularidad en planta. La posición óptima de estos sistemas es donde haya un óptimo acoplamiento a los modos a amortiguar (Gürgöze & Müller, 1992). Recientemente las técnicas de medición de vibraciones, la ingeniería de materiales, así como el procesamiento de datos han sido mejorado, con el desarrollo de microprocesadores basados en dispositivos y nuevo software, las técnicas de obtención del amortiguación han sido mejoradas. Además, muchas edificaciones cuentan con sistemas de monitoreo del comportamiento dinámico para sistemas de amortiguación o para verificar el comportamiento asumido en el diseño y sus características dinámicas durante varios tipos de excitación, lo anterior se han vuelto de propiedad común (Tamura Y., 2006).

El Japanese Damping Database (*JDD*) propone las siguientes expresiones para predecir la amortiguación de construcciones de acero y concreto reforzado, considerando la dependencia del decaimiento de la amplitud:

$$\zeta_1 = 0.014f_1 + 470 \frac{x_H}{H} - 0.0018 = \frac{0.93}{H} + 470 \frac{x_H}{H} - 0.0018 \text{ (Concreto Reforzado)} \quad (1)$$

$$\zeta_1 = 0.013f_1 + 470 \frac{x_H}{H} - 0.0029 = \frac{0.65}{H} + 400 \frac{x_H}{H} - 0.0029 \text{ (Acero)} \quad (2)$$

Estas fórmulas consisten en un término dependiente de la frecuencia, un término dependiente de la amplitud y una constante. Es importante destacar que el término dependiente de la frecuencia no puede ser atribuido al puro efecto de la frecuencia, pudiera considerarse como una interacción suelo – estructura. Como se muestra la ecuación ( 1 ), la frecuencia natural del edificio es expresada con una precisión satisfactoria con una función simple de la altura H. Un edificio con una frecuencia natural alta es básicamente un edificio bajo y los efectos de la interacción suelo – estructura son más significativos, resultando una amortiguación más alta. Esto es reflejado en el término que es dependiente de la frecuencia y también puede ser razonablemente expresada como una función de la altura H más la frecuencia natural  $f_1$ , como se observa en las ecuaciones. En comparación con edificios a escala real se llega a una correlación del 88%, aunque es importante resaltar que son curvas experimentales, la curva es esencialmente limitada, la relación de la amplitud original con la altura de referencia es de un valor de  $x_H/H$  menor o igual a  $2 \times 10^{-5}$  (Tamura Y. , 2006). En la Tabla 1 y en la Tabla 2 se presentan algunos de los resultados.

**Tabla 1. Relaciones de amortiguación de diseño en edificios de concreto reforzado, después de (Tamura, Suda, & Sasaki, 2000)**

Altura de la edificación H (m)	Servicio			Seguridad (Rango Elástico)		
	Relación de amortiguación			Relación de amortiguación		
	Frecuencia natural f= 1/0.015H (Hz)	Recomendada (%)	Estándar (%)	Frecuencia natural f= 1/0.018H (Hz)	Recomendada (%)	Estándar (%)
30	2.2	2.5	3	1.9	3	3.5
40	1.7	1.5	2	1.4	2	2.5
50	1.3	1.2	1.5	1.1	2	2
60	1.1	1.2	1.5	0.93	1.5	2
70	0.95	0.8	1	0.79	1.5	2
80	0.83	0.8	1	0.69	1.2	1.5
100	0.67	0.8	1	0.56	1.2	1.5

**Tabla 2. Relaciones de amortiguación de diseño en edificios de acero, después de (Tamura, Suda, & Sasaki, 2000).**

Altura de la edificación (m)	Servicio			Seguridad (Rango Elástico)		
	Relación de amortiguación			Relación de amortiguación		
	Frecuencia natural $f= 1/0.02H$ (Hz)	Recomendada (%)	Estándar (%)	Frecuencia natural $f= 1/0.024H$ (Hz)	Recomendada (%)	Estándar (%)
30	1.7	1.8	2.5	1.4	2	3
40	1.3	1.5	2	1	1.8	2.5
50	1.0	1	1.5	0.83	1.5	2
60	0.83	1	1.5	0.69	1.5	2
70	0.71	0.7	1	0.60	1.5	2
80	0.63	0.7	1	0.52	1	1.5
100	0.50	0.7	1	0.42	1	1.5
200	0.25	0.7	1	0.21	1	1.5

Actualmente existe una alta cantidad de edificaciones que han recurrido a este tipo de soluciones estructurales ya sea por efectos de diseño sísmico o eólico, un ejemplo del uso de estos sistemas es el escogido en el diseño de la torre Taipei Financial Center, el cual usa un amortiguador de péndulo que sirve para mejorar el desempeño de 101 pisos de altura (508 m). El sistema es compuesto por una masa proporcionada por una esfera de acero de 6 metros de diámetro, situada en el piso 92, sostenida por 4 grupos de cables, 8 pistones hidráulicos de 2 metros de largo que disipan la energía por calor. Algunos sistemas instalados por la empresa GERB se enlistan en la Tabla 3.

Tabla 3. Lista de Sistemas MSR en el mundo (GERB, 2015).

País	Proyecto	Masa Oscilante (kg)	Frecuencia (Hz)	Año
Alemania	Dresde, forjado de terrazas	8 x 5000	2.40	2003
	Karlsruhe, estructura de edificio	24 x (250-500)	2.80-3.00	1998
Australia	Brisbane, pasarela peatonal	3 x 3000	1.80	2009
Austria	Wernstein, pasarela peatonal	6 x 700	1.20	2006
Bélgica	Parque eólico Offshore, Belwind.	2000	0.35	2010
Brasil	REFAB 2, chimenea	2 x 5000	0.70	2003
Canadá	Toronto, calería de arte	2 x 5000	3.50	2008
China	Shangai, pasarela Aeropuerto Podong	92 x 750	2.30	2007
	Hangzhou, torre del puente de la bahía	100000	0.30	2009
EEUU	Buffalo, centro cívico	4 x 500	4.00	2011
	Nueva Cork, escalera, 200 West Street	2 x 250	3.00	2008
Emiratos Árabes	Abu Dhabi, pasarela peatonal	2 x 750	3.50	2010
	Duba, estructura, Burj Al Arab.	11 x 5000	0.80 - 2.00	2009
	Duba, antena, torre Al Mas	4 x 2000	0.45-0.6/2.10 - 2.80	2008
	Duba, antena, torre Emiratos	6 x 1200	0.90	1999
Hungría	Budapest, torre refinería	16000	0.40	2005
Japón	Ube, Chimenea	24 x 700	11.00	2000
México	Guadalajara, tribuna Teatro Diana	8 x 2500	2.90	2005
Noruega	Bergen, forjado gimnasio	2 x 2000	3.80	2003
Qatar	Doha, Torre Aspire	140000	0.16 - 0.23	2006
	Inverness, puente Kessock	3 x (850 - 2100)	0.50	1989
Reino Unido	Londres, torre ArcelorMittal Orbit	40 000	0.31+0.42	2012
	Newport, puente USK	18 x (800-1200)	0.80-2.20	2001
Suiza	Rümiang, pasarela peatonal	1000	2.00	1992

Por otra parte, en México existe una gran cantidad de edificaciones que pudieron haber sido concebidas con sistemas de MSR en el diseño, esto hubiera resultado en una posible mejora del comportamiento de los sistemas ante estados de servicio o de colapso o en la reducción del tamaño de las secciones hasta la eliminación de elementos completos, esto se puede ver en la Tabla 4.

Tabla 4. Edificios altos en México (Espinosa Méndez, Pozos Estrada, & Gómez Martínez, 2011).

Edificio	Altura	Ubicación	Inicio de Construcción
Torre Nacional	350	Zapopan, Jalisco	2005
Torre Reforma	244	México, CDMX.	2008
Torre City Santa Fe II	235	México, CDMX.	2008
Torre Mayor	230	México, CDMX.	2003
Torre Bancomer	225	México, CDMX.	2009
Torre Pemex	214	México, CDMX.	1980
Torre Riu Guadalajara	214	Guadalajara, Jalisco	2009
Torres M	208	Monterrey, Nuevo León	2008
WTC Ciudad de México	207	México, CDMX.	1972
Torre Punta Reforma	204	México, CDMX.	2008
Torre Altus A.C	200	México, CDMX.	1998

### Parámetros de diseño

Ya se han mencionado varios ejemplos de sus aplicaciones, las ventajas que se tienen en estos sistemas y algunas otras soluciones que pueden plantearse a la par de esta, ahora toca resaltar los avances en su diseño y el entendimiento de su comportamiento. Se han realizado investigaciones sobre el comportamiento de estos sistemas y su interacción con la estructura principal ante distintas excitaciones, éstas han sido modeladas tomando como señal del viento el ruido blanco Gaussiano (Kwok & Samali, 1995) , Kwok trabajó con masas sólidas resonantes pasivas y activas.

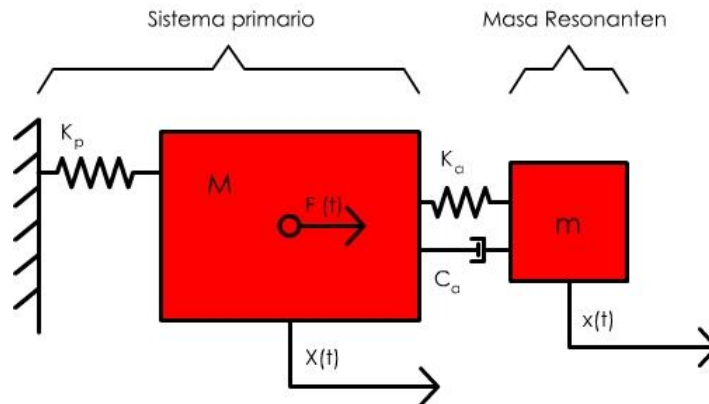


Figura 4. Sistema de dos grados de libertad, representación de una MSR y el sistema principal (Beards, 1996).

El comportamiento del sistema estructura-MSR es modelado como un sistema de dos grados de libertad como se puede ver en la Figura 4, en donde el comportamiento de cada masa puede ser descrito de la siguiente forma:

$$M\ddot{X}(t) = -K_p X(t) - k_a(X(t) - x(t)) + F(t) - c_a(\dot{X}(t) - \dot{x}(t)) \quad (3)$$

$$m\ddot{x}(t) = k_a(X(t) - x(t)) + c_a(\dot{X}(t) - \dot{x}(t)) \quad (4)$$

En este caso sólo se considera la amortiguación propia del sistema amortiguador y no contempla la que pudiera tener el sistema modal principal, en la práctica se acepta que se tiene amortiguación en ambos componentes del sistema. Cuando la excitación externa tiene la forma de una función armónica se pueden trazar las siguientes gráficas, en donde se aprecia la amplificación de la respuesta en las frecuencias resonantes, esto al variar el valor de la amortiguación.

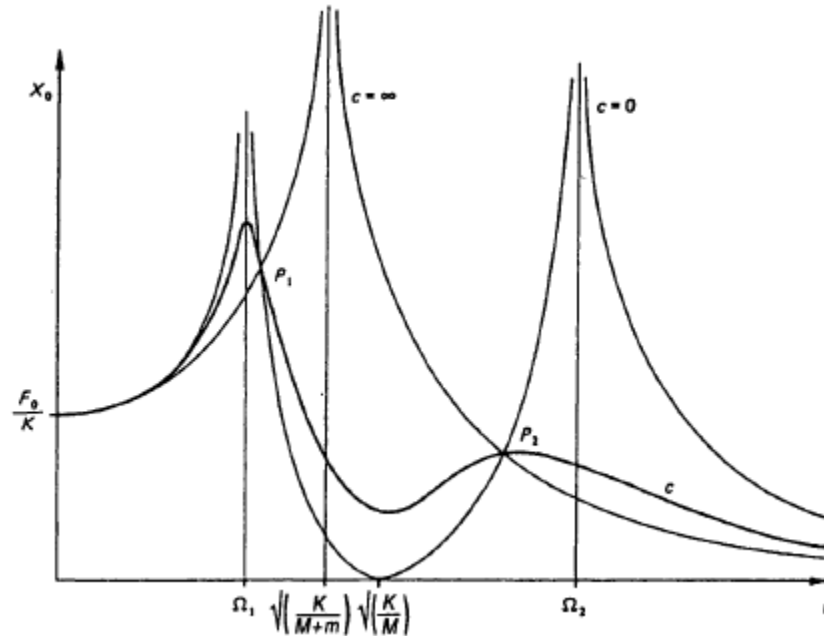


Figura 5. Efecto de una MSR en la respuesta del sistema. Se observan 3 distintos comportamientos para distintos valores críticos de amortiguación en el sistema disipado, los casos frontera cuando los valores son nulos o infinito y un valor intermedio arbitrario. Se puede ver como los valores extremos presentan mayores disminuciones en ciertas frecuencias, pero una respuesta indeterminada en otra frecuencia, el valor intermedio  $c$  presenta un comportamiento intermedio entre los dos valores frontera. (Beards, 1996)

El comportamiento de sistemas estructurales con tres valores distintos de amortiguamiento en función de la frecuencia de la carga armónica cuando una MSR es empleada se puede ver en la Figura 5. Cuando el amortiguamiento es cero, el desplazamiento es nulo en la frecuencia natural del sistema principal. Se generan dos nuevas frecuencias críticas, en estas los desplazamientos son infinitos o indeterminados, estas son:

$$\left(\frac{\Omega_1}{\omega}\right)^2 = \left(1 + \frac{\mu}{2}\right) - \sqrt{\left(\mu + \frac{\mu^2}{2}\right)} \quad (5)$$

$$\left(\frac{\Omega_2}{\omega}\right)^2 = \left(1 + \frac{\mu}{2}\right) + \sqrt{\left(\mu + \frac{\mu^2}{2}\right)} \quad (6)$$

$$\mu = \frac{m}{M} \quad (7)$$

Donde  $\mu$  es la relación de masas entre la masa de la MSR y la estructura (la masa de la estructura es el valor de la masa modal del modo estudiado). Las dos nuevas frecuencias naturales de los dos modos de vibración pueden ser obtenidas con las expresiones anteriores. Cuando se tiene un amortiguamiento infinito, se tiende a una frecuencia crítica, que se pudiera interpretar como la



frecuencia de un sistema de un solo grado de libertad, pero con la suma de las masas, por lo tanto, se puede esperar un comportamiento resonante y por lo tanto una respuesta indeterminada en esa frecuencia natural. En medio de estos valores se tienen comportamientos que no logran hacer cero los desplazamientos, pero que no generan respuestas indeterminadas (Beards, 1996). Se han realizado estudios paramétricos para obtener los valores óptimos que puedan representar eficiencias importantes. Algunos trabajos son como los realizados por Den Hartog (1956), donde se proponen valores cuadráticos de relación de amortiguación en estructuras.

$$\zeta_{opt}^2 = \frac{3}{8} \frac{\mu}{1 + \mu} \quad (8)$$

De igual forma se llegó a una relación óptima entre la frecuencia natural del sistema principal y del sistema amortiguador ( $\gamma$ ) la cual está en función de la relación de masas (Den Hartog, 1956). Considerando lo propuesto por Den Hartog, el incremento en la relación de amortiguación de la estructura principal estaría dado por:

$$\Delta \xi_{eq} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\mu/2}{1 + \mu/2}} \quad (9)$$

$$\gamma_{opt} = \frac{1}{1 + \mu} \quad (10)$$

$$\gamma_{opt} = \frac{1}{1 + \mu} \sqrt{1 - \mu/2} \quad (11)$$

Posteriormente al planteamiento de Den Hartog, se planteó otra modelación de la relación óptima de frecuencias, pero considerando su interacción con sistemas de múltiples grados de libertad, la cual se presenta como la expresión número (11), además propone una expresión para la amortiguación óptima (Warburton, 1982)

$$\zeta_{opt}^2 = \sqrt{\frac{\mu(1 - \mu/4)}{4(1 + \mu)(1 - \mu/2)}} \quad (12)$$

Más recientemente se ha llegado, mediante un estudio analítico de la ecuación de equilibrio de fuerzas, a definir el amortiguamiento óptimo como:

$$\zeta_{opt}^2 = \frac{1}{2} \frac{\mu}{1 + \mu} \quad (13)$$

La expresión ( 13 ) emplea un factor de  $\frac{1}{2}$  a diferencia de la ecuación ( 8 ), al aceptar este valor en el diseño con una relación de masa  $\mu = 0.05$  y relación entre la frecuencia natural de la MSR a la frecuencia natural del modo a trabajar propuesta por Den Hartog en 1956, se puede alcanzar un amortiguamiento estructural de  $\zeta_s \cong 0.077$ , valor que se considera suficiente para eliminar la mayoría de los problemas de vibración. Al considerar este valor y al comparar los resultados que se obtendrían con el amortiguamiento óptimo clásico se pudo llegar a una gráfica como la mostrada en la Figura 6 (Krenk & Høgsberg, 2012).

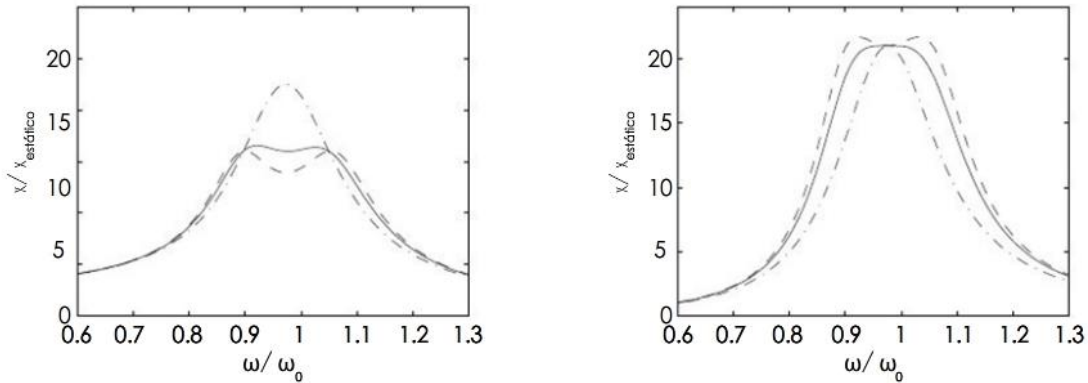


Figura 6. Amplitud relativa: a) movimiento estructural  $x_0$ , b) movimiento relativo del amortiguador  $x_D$ . (Krenk & Høgsberg, 2012)

En la Figura 6 se puede observar que el comportamiento presenta una sección más “plana”, en donde tienden a ser iguales los tres desplazamientos críticos, el generado en la frecuencia sintonizada y los presentados en las dos nuevas frecuencias naturales. Aunque este valor considera que la excitación se puede representar como una función armónica simple dado que la deducción matemática está en función de una sola frecuencia excitante. Por otro lado, se ha mencionado que el valor de la masa del amortiguador debe oscilar entre 0.25% y 0.75% de la masa total de la edificación o entre 1% y 2% de la masa modal (Kareem, Bernardini, & Spence, 2013).

Por otro lado, se han realizado estudios de optimización utilizando *Shuffled Complex Evolution (SCE)*, a partir de los cuales se han obtenido resultados menores a los propuestos por Den Hartog y otros investigadores. Proponiendo una función costo como la suma de la aceleración y el desplazamiento multiplicados por factores de existencia (1,0) para optimizar  $\zeta_{opt}$  y  $\frac{\Omega_n}{\Omega_D}$ ; en este trabajo se hace mención sobre la baja influencia que la variable  $\mu$  sobre la respuesta, por lo que no es tomada en cuenta con la misma importancia que los parámetros antes mencionados, esta decisión fue justificada con estudios previos de otros investigadores. Considerando cargas armónicas simples. Una vez obtenidos los parámetros óptimos, se realizaron modelos sometidos a señales sísmicas. Se descubrió que los valores óptimos variaron en función de la respuesta que se desea minimizar (aceleración y desplazamiento), para el caso de la relación de frecuencias ( $Rf$ ) en 3% y el  $\zeta_{opt}$  un 10% (Hessamoddin Meshkat & Hashem, 2014).

Iemura (1994) propone un procedimiento de diseño para una MSR. Los pasos básicos para cuando se tienen edificios flexibles, con bajo amortiguamiento puede ser descrito por los siguientes pasos. Primero se deben identificar las propiedades dinámicas de la estructura principal, tales como frecuencias naturales, masas vibratorias, relación de amortiguación para el modo específico a ser controlado por la MSR, se debe determinar el aumento de la relación de amortiguación que se desea proporcionada por la MSR y se debe asumir una relación de masas ( $\mu$ ) apropiada. El siguiente paso sería calcular los valores óptimos de la relación de frecuencias entre los sistemas y la relación de amortiguación de la MSR en función de  $\mu$ . Se necesitan determinar la rigidez y el coeficiente de amortiguación de la MSR y tener una estimación de los desplazamientos máximos que presentaría la MSR, en caso de que estos valores no sean apropiados es necesario regresar al paso número 3. Con toda la información anterior es posible seguir con el diseño del sistema mecánico de la MSR con los parámetros seleccionados, se debe incluir el método de como ajustar los parámetros  $\xi$  y  $\omega$  de la MSR. Finalmente se debe seguir con la verificación del comportamiento con estudios

experimentales para poder realizar la instalación de la MSR en la estructura principal. Durante su vida útil se debe mantener un monitoreo y ajuste de los parámetros  $\xi$  y  $\omega$  en sitio de la MSR.

De igual manera se recomienda que se consideren los siguientes escenarios. Si el modo de vibración de la estructura que es controlado por la MSR tiene otro modo de vibración cercano, se debe modelar como un sistema con 3 o más grados de libertad y se debe obtener la MSR óptima. Múltiples MSR con frecuencia alrededor del periodo de la estructura tiene efectos de robustez en la sincronización. Si el desplazamiento de la MSR es demasiado grande, es necesario el uso de mayor masa o mayor amortiguamiento, lo que no siempre lleva a poder emplear los parámetros óptimos de una MSR. De manera adicional es importante limitar el campo de desplazamiento que las masas pueden desplazarse, esto cuando se presentan grandes cargas o estados últimos de diseño, una forma de realizar esto es con el uso de amortiguadores hidráulicos no lineales, con esto los desplazamientos son reducidos ante cargas de gran magnitud. Como una segunda línea de defensa la masa puede ser rodeada con el uso de búfers hidráulicos (Tamura Y. , 2006).

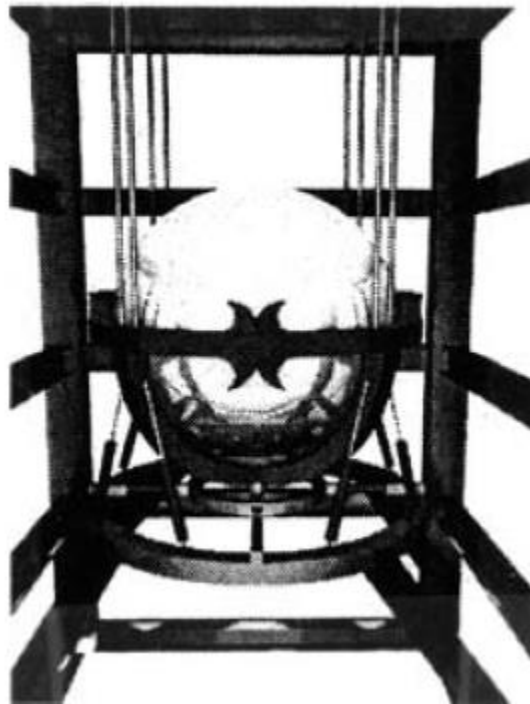


Figura 7. Sistema de péndulo en Taipei Financial Center (Bungale & Martin, 2005).

El desempeño de estos sistemas en edificios altos en Japón es muy bueno en casi todos los efectos inducidos por el viento u otros eventos dinámicos, especialmente para sismos muy fuertes, como resultado, la urgencia de instalar AMD's o HMD's en los años 90 parecía una opción popular. Considerando los costos de mantenimiento, así como su eficiencia, SD son los dispositivos más socorridos en Japón debido a su desempeño ante sismos fuertes. VFDs y VED son también muy usados para los dos tipos de excitaciones. La combinación de distintos tipos de dispositivos puede lograr diseños eficientes apuntando a la especialización de ambos dispositivos de amortiguación, incrementando la confiabilidad y lo robusto de los dispositivos amortiguantes (Tamura Y. , 2006).

**Tabla 5. Desempeño de dispositivos amortiguantes. Muy Bueno (MB) Bueno (B) (después de Shibuya, 2001)**

Amortiguador			Aportación Sísmica Fuerte	Aportación Sísmica Media	Viento	Costo	Mantenimiento
Amortiguador de acero		<b>(SD)</b>	MB	B		MB	MB
Amortiguador de aceite	Pasivo	<b>(OD)</b>	B	B	MB	B	
	Semi-activo	<b>(AOD)</b>	B	MB	MB		
Amortiguador Viscoso (Fluido)		<b>(VFD)</b>	B	MB	MB	B	B
Amortiguador Visco-elástico		<b>(VED)</b>	B	MB	MB	B	B
Masa Sólida Resonante	Pasiva	<b>(TMD)</b>			B	B	
	Activa	<b>(AMD)</b>			MB		

### Normatividad de aceleraciones y generación de señales de viento

Alrededor del mundo se han desarrollado criterios para limitar las aceleraciones que pueden presentar los edificios debido a excitaciones, con el fin de mantener una sensación de seguridad en las personas que se encuentran en las edificaciones a lo largo de la vida útil.

#### ISO 10137 (2007)

Esta especificación considera el parámetro de control el comportamiento medido bajo las condiciones del día a día con respecto a la respuesta humana a movimientos ordinarios de edificios y aceleraciones horizontales, considerando un año como período de retorno, para la evaluación de la habitabilidad de un inmueble estudiado.

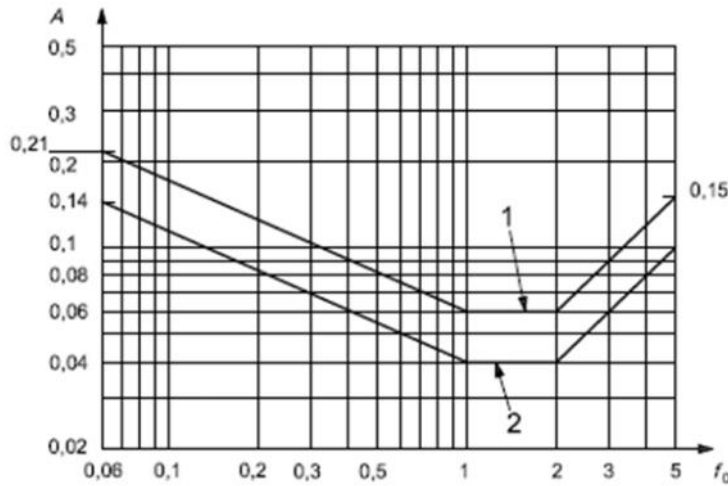
Otro período de retorno puede ser adoptado, tomando en consideración movimientos más severos durante tormentas y huracanes que pueden ocurrir en intervalos de varios años o décadas. Para esto, se pueden considerar factores. Esta guía de diseño aplica en edificios regulares de uso comercial y residencial (Standardization, 2007).

#### Evaluación de curvas para movimientos aceptables horizontales.

La curva de evaluación para el movimiento horizontal de oficinas, es especificada para el pico esperado en la primera frecuencia natural, en la dirección de la dimensión principal (normalmente, paralela y transversal al viento) y en la dimensión de torsión, esto después de la examinación de datos de distintos edificios. Para el caso de residencias el valor sería 2/3 del valor obtenido en oficinas. Esta curva es cercana al 90% a la percepción de probabilidad.

#### Criterios

El pico de aceleraciones del piso estudiado, con un año de período de retorno en una dirección estructural de la construcción se da en la Figura 8, en donde  $f_0$  es la primera frecuencia natural en la dirección estructural de la edificación (o de torsión). La aceleración torsional es equivalente a la de translación definida como  $r \times A_\theta(t)$  en donde  $r$  es la distancia del centro de torsión al punto objetivo de  $A_\theta(t)$ , la aceleración angular de la vibración torsional. En situaciones más complejas, puede ser requerida una combinación lineal (Standardization, 2007).



**Key**  
 A aceleración pico, m/s<sup>2</sup>  
 f<sub>0</sub> frecuencia natural del primer modo en una dirección estructural de un edificio y en torsión, Hz  
 1 Offices  
 2 Residences

**Figura 8. Curva de evaluación de vibraciones inducidas por el viento en edificios para direcciones horizontales para un año de período de retorno (Standardization, 2007)**

#### NBCC – 2005

Históricamente, las ecuaciones (14) y (15) han sido usadas con una buena aceptación en 10 años con límites de aceleración de 1% y 3% de la aceleración de la gravedad (10-30 mg), para la evaluación de edificios altos.

$$a_w = f_n^2 W g_p \sqrt{W D} \left( \frac{a_r}{\rho_B g \sqrt{\beta_W}} \right) \quad (14)$$

$$a_D = 4\pi^2 f_n^2 g_p \sqrt{\frac{K_s F \Delta}{C_{eH} \beta_D C_g}} \quad (15)$$

Donde W y D son las dimensiones perpendiculares y paralelas al viento en metros respectivamente,  $a_w$  y  $a_D$  son las aceleraciones perpendicular y paralela al viento en m/s<sup>2</sup>,  $a_r$  es  $78.5 \times 10^{-3} [V_H / (f_n W \sqrt{\beta_W})]^{3.3}$ ,  $\rho_B$  es la densidad media de la edificación en kg/m<sup>3</sup>,  $\beta_W$  y  $\beta_D$  son las fracciones de la amortiguación crítica para cada dirección,  $f_n$  es la frecuencia natural de la dirección estudiada en Hz,  $\Delta$  es la deformación máxima generada por ese perfil de viento en m, g es la magnitud de la gravedad en m/s<sup>2</sup>.

En norte américa en el periodo de 1975 a 2000, muchos de los edificios que fueron estudiados mediante el uso de un túnel de viento, fueron diseñados para un pico de 10 años con un rango de 1.5% y 2.5% de la gravedad. El menor de este rango fue generalmente aplicado a edificios residenciales y el mayor para torres de oficinas. Otro criterio ha sido publicado, este depende del menor período natural. El criterio ISO puede ser expresado como un pico de aceleración para cada 5 años cada 5 años, ésta es  $0.928f$  donde f es la menor frecuencia natural en Hz (Canada, 1995).

Teniendo las ecuaciones relativamente sensibles a la frecuencia natural y para la rigidez correspondiente, estas propiedades deben ser determinadas usando métodos rigurosos y las fórmulas aproximadas deben ser usadas con cuidado (Canada, 1995).

#### AIJ-2004

Después de la publicación de las AIJ-Guidelines (1991) se condujo a una serie de experimentos e investigaciones en los límites de percepción humana. El borrador del AIJ, que está basado en esta información, consiste en 3 partes. Vibración vertical humano-maquina, Vibración inducida por el tráfico vertical y Aceleraciones horizontales inducidas por el viento. Se han hecho estudios para frecuencias mayores a 5Hz estudiando problemas de vibración inducida por el viento, en edificios bajos de madera y edificios de residenciales de acero. Se presenta una gráfica con 5 curvas, las cuales representan el porcentaje de gente que puede percibir la vibración. Se usan las curvas H-2 y H-3 como nivel estándar para edificios residenciales y oficinas, respectivamente (Tamura Y. , 2006).

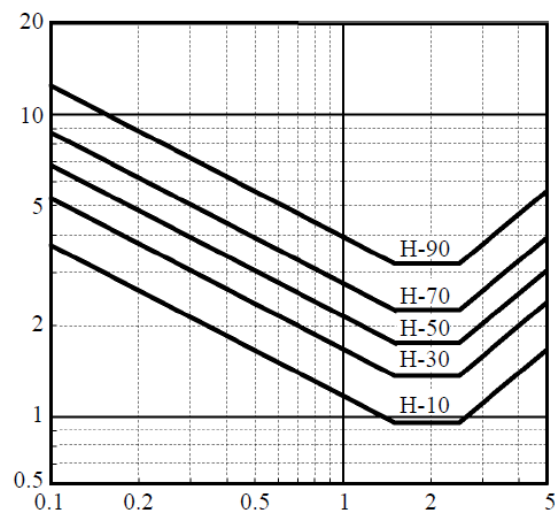


Figura 9. Aceleración máxima anual, del borrador de AIJ-Guidelines-2004 (Tamura Y. , 2006)

Basados en resultados, las recomendaciones para el diseño relaciones de amortiguación para el nivel de habitabilidad y nivel de seguridad. La amplitud de la vibración de la habitabilidad fue ajustada a una curva H – 3 y la seguridad fue colocada con un límite superior de  $x_H/H = 2 \times 10^{-5}$  de las fórmulas (1) y (2). La frecuencia natural fue estimada por una altura predefinida. El valor de la amortiguación calculado con las ecuaciones propuestas fue hecho para genera la tabla siguiente con valores estándar. Considerando la dispersión en edificios a escala real alrededor de una regresión lineal, es recomendado usar un 80% de los valores estándar para diseños estructurales, los cuales corresponden a los valores recomendados para habitabilidad (Tamura Y. , 2006). De manera gráfica los límites se presentan en la Figura 9.

#### NTC-2004

El reglamento de construcción en el capítulo dedicado al viento menciona que, en edificios altos, es requerido que se verifique que las aceleraciones debido a empujes dinámicos no sobrepasen 0.04g, esto en su apartado número 5, propone una expresión para el cálculo de empujes dinámicos, el valor máximo es independiente de la frecuencia por lo que se puede considerar constante. Además, en la sección de estructuras de acero en su apartado 7.3 menciona que la sensibilidad de una

persona es mayor cuando la frecuencia se encuentra entre 2 y 8 Hz, para una aceleración del orden de 0.005g, aunque estos valores son para sistemas de piso (dirección vertical).

## Metodología

El procedimiento que se utilizó para la obtención de los parámetros de diseño óptimos consistió en un barrido bidimensional sobre los parámetros de diseño más influyentes, esto se realizó mediante la utilización de un algoritmo de búsqueda tipo malla. Los parámetros que se consideraron en la construcción de dicha malla fueron la relación entre la frecuencia modal  $n$  y la frecuencia del sistema disipador ( $R_f$ ) como primera variable y la relación entre la amortiguación de la estructura y amortiguación del amortiguador ( $R_c$ ) como la segunda variable.

$$R_c = \frac{C_a}{C_e} \quad (16)$$

$$R_f = \frac{f_a}{f_e} \quad (17)$$

De donde los subíndices  $a$  indican que son parámetros pertenecientes al amortiguador (MRS) y  $e$  para cuando pertenece a la estructura principal. Con la información obtenida del análisis modal, expresiones básicas de la modelación del comportamiento mecánico de un sistema (Chopra A. , 2014) y las expresiones ( 7 ), ( 16 ) y ( 17 ) es posible realizar la modelación de todo el sistema de disipación energética sólo agregando las variables de la iteración correspondiente:

$$Rc_j = j\Delta_{Rc} \quad (18)$$

$$Rf_i = i\Delta_{Rf} \quad (19)$$

Para cada iteración se calcularon los parámetros de las expresiones ( 18 ) y ( 19 ) y con estos valores es posible obtener un sistema amortiguador en cada paso del análisis matricial con la intención de encontrar la pareja de valores que presente un comportamiento óptimo. Dicho de otra manera, se utilizaron las propiedades modales de la estructura para los parámetros que se asignarán a la MSR, para esto primero es necesario establecer la relación de frecuencias frecuencia del sistema disipador ( $R_f$ ) y la relación de amortiguación ( $R_c$ ), estos son los valores a optimizar.

El valor de la relación de masas ( $\mu$ ) fue tomado como constante para este estudio, su magnitud fue tomada igual a 0.05. La elección de estos valores se basó en los resultados obtenidos por Hessamoddin Meshkat al estudiar el comportamiento del factor de magnificación de aceleración dinámica donde a partir del valor 0.05 no se tiene una disminución tan marcada como en los valores inferiores a este (Hessamoddin Meshkat & Hashem, 2014). Esto se puede ver en la Figura 10.



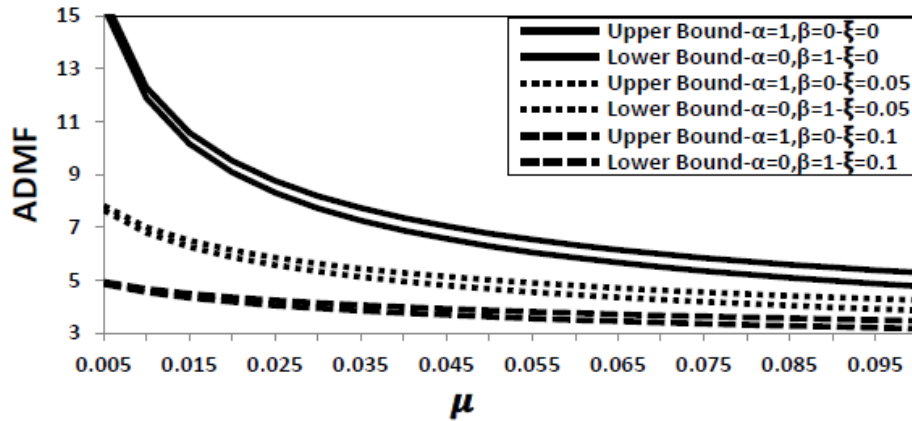


Figura 10. Los resultados de Meshkat muestra el comportamiento del factor de magnificación de aceleración dinámica (ADMF) (Hessamoddin Meshkat & Hashem, 2014).

Para poder realizar este proceso, el primero de los pasos fue el de la realización de un modelo de estructuración regular de marcos de acero con contravientos concéntricos de 50 pisos (200 metros) y una planta cuadrada de 40 metros por lado. Realizando métodos aproximados propuestos por las normativas canadienses se obtuvo que este edificio tendría valores de aceleraciones superiores a las máximas toleradas en distintas normativas. Más detalles de la estructuración propuesta, el proceso de diseño, las consideraciones tomadas en este proceso, así como las evaluaciones de estados de servicio y falla se presentan en el **Anexo B**, La modelación en el proceso de diseño fue realizada con la ayuda del programa de análisis estructural ETABS.

El edificio fue modelado de nueva cuenta, pero ahora mediante el software de ingeniería asistida Ansys, en el **Anexo C** se presenta el proceso de construcción de este modelo en el programa Ansys APDL. El viento fue representado con fuerzas dinámicas, la distribución de estas, las cuales son representadas por señales, para el estudio transversal de desplazamientos fue de 5 señales por nivel, una en cada una de las intersecciones de columnas con vigas principales en cada una de los pisos. Las señales generadas fueron obtenidas utilizando las coordenadas de los puntos de aplicación de cada una de las señales. Se eligieron 9 nodos para analizar, estos se encuentran en el último piso de la edificación y su localización en plata se presenta a continuación.

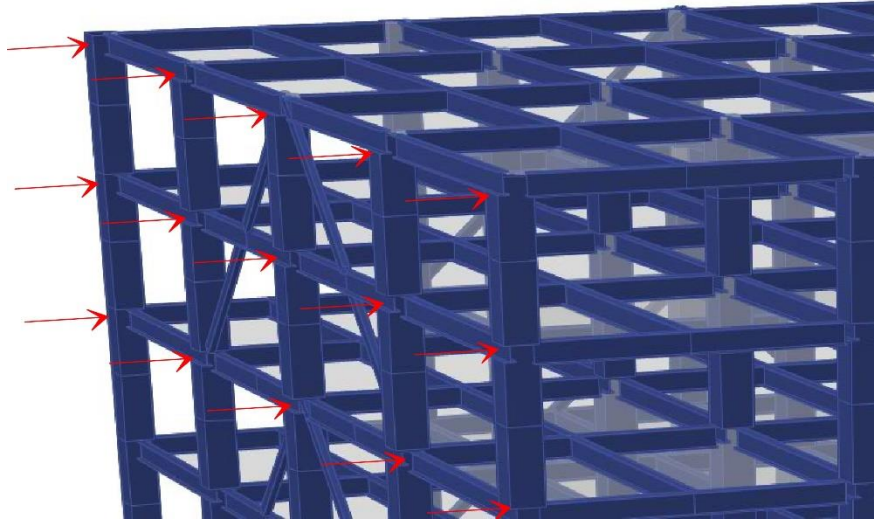


Figura 11. Fuerzas puntuales esquemáticas en nodos.

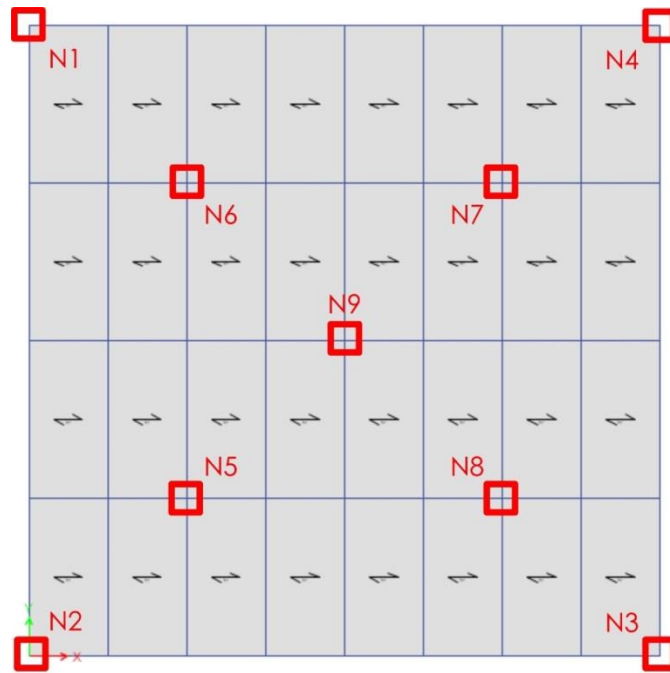


Figura 12. Localización en planta de nodos estudiados.

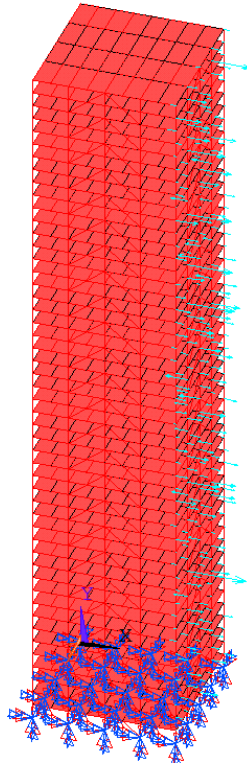


Figura 13. Modelo construido en el programa Ansys APDL con las señales aplicadas en los nodos

En las Figuras 11, 12 y 13 se presenta el modelo durante su proceso de construcción en distintos softwares de ingeniería asistida. Aunque la planta de la estructura no sufrió variaciones a lo largo de los 50 pisos en el modelo inicial base, cuando se construyó el modelo final, la planta sufrió un cambio cuando se le colocó el sistema de la MSR, esto debido al volumen necesario que se necesita para albergar la cantidad de masa calculada. Se despejó un espacio de 20x20 m en planta con una altura libre de 8 metros en la planta número 47 (188m), la cual es la altura en donde reposaría el centro geométrico de la masa en su posición inicial, las otras dos coordenadas del centro geométrico de la masa coincidieron con el centro geométrico de la planta.

Ansys APDL utiliza el método de integración en el tiempo de Newmark para resolver las ecuaciones del equilibrio dinámico de la estructura ante el embate de las fuerzas que serán representadas con señales sintéticas, con el fin de llegar a la combinación óptima de parámetros de diseño. El modelo de amortiguación que emplea el programa es el propuesto por Rayleigh.

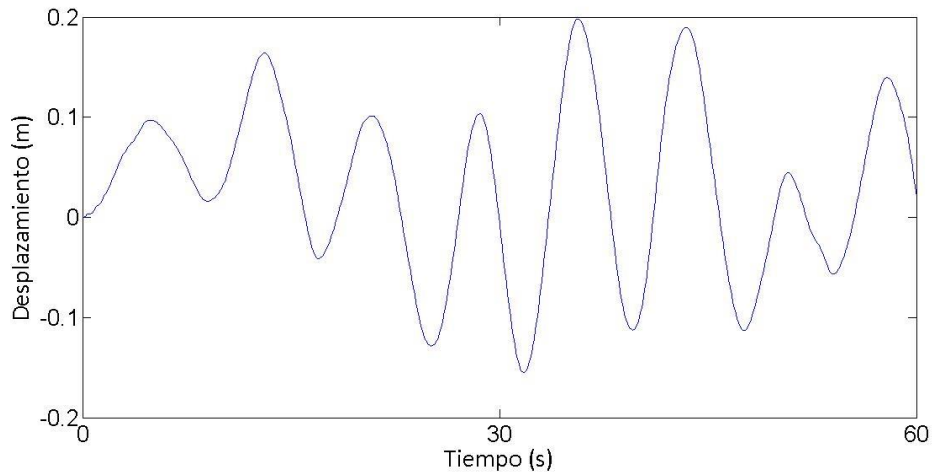


Figura 14. Respuesta de desplazamiento neta, archivo de salida del programa Ansys APDL

Se utilizaron archivos de texto, en los cuales se escribieron líneas de comandos para la ejecución de los análisis de manera secuencial y automatizada. Estos comandos indican al programa la creación de todos los elementos que componen la estructura, cuales son las posiciones nodales de los puntos clave, los tipos de elementos que se utilizarán, la construcción de estos y sus propiedades como, posición, material, sección, condiciones de frontera, simplificaciones de modelación y demás características que dictarán su comportamiento, la ubicación de las fuerzas puntuales, las cuales serán representadas por señales y condiciones de apoyo de la edificación. El código finaliza con la realización de los análisis modales y transitorios, así como la especificación de los archivos de salida. La construcción este código, así como los comandos utilizados puede ser consultada en el **Anexo A**. Una señal de respuesta tipo se puede ver en la Figura 14.

Con la ayuda del software matemático matricial MATLAB y los símbolos del sistema del sistema operativo (CMD), se realizó un código que generaría cíclicamente archivos con líneas de comandos de modelado con una relación de frecuencias  $Rf_j$  y amortiguación de la MSR  $Rc_i$ . De las aceleraciones y desplazamientos de salida se obtuvieron valores máximos, para los 9 nodos de la planta más elevada de la estructura, para una relación de frecuencias  $j$  y un valor de amortiguación  $i$ . Se realizó el estudio con 10 señales de 600 datos cada una, estas representan señales de 1 minuto de duración, de cada grupo de señales se obtuvo el valor máximo esperado. Con los 10 valores pertenecientes a los 10 grupos de señales se llegaron a valores promedio por nodo, estos valores serían los valores máximos promedio, se obtuvieron valores de aceleraciones y desplazamientos con los que se formó la matriz  $M_n(j,i)$ , donde  $n$  es el número del nodo estudiado.

Se realizó un primero análisis, en este no se contó con la MSR, los valores máximos esperados obtenidos fueron considerados como los valores base, los cuales se colocaron en una matriz  $M_nB$ , la cual tendrá una función comparativa. Estos valores son únicos por nodo y no depende de las iteraciones  $j$  e  $i$  pues estas sólo afectan a las propiedades de la MSR. Estos valores se utilizaron para obtener el porcentaje de disminución, que se encontraba en cada combinación de parámetros, dado por:

$$E_n(j,i) = 1 - \frac{M_n(j,i)}{M_nB(j,i)} \quad (20)$$

En la matriz  $E_n(j,i)$  se encuentra el porcentaje de disminución de las respuestas para cada pareja de valores, se construyó una matriz para los desplazamientos y otra para aceleraciones por nodo.

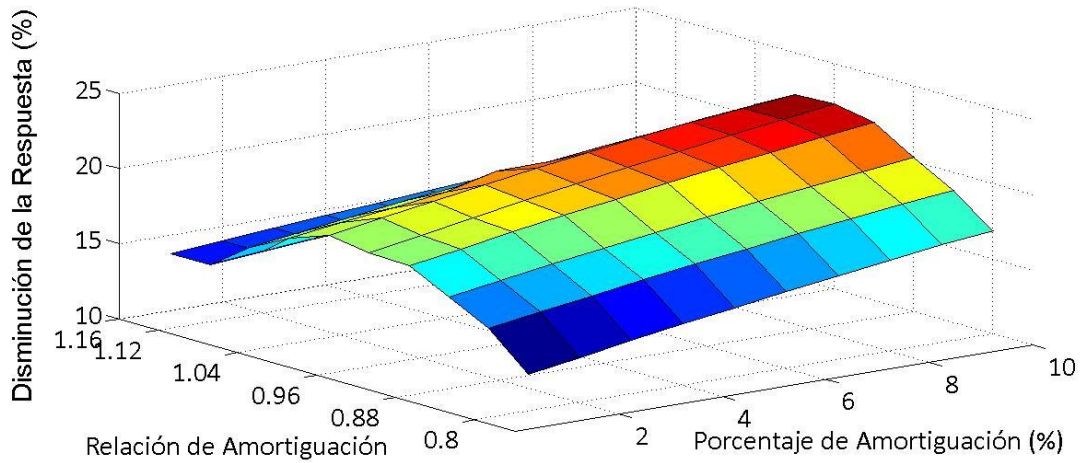


Figura 15. Superficie de disminución de respuesta para el nodo 9 para su respuesta de desplazamiento

La construcción de la malla en el eje de la relación de frecuencias con un valor inicial de 0.8 ( $Rf_j$ ), con incremento de 0.04 ( $dRf$ ) hasta alcanzar un valor tope de 1.2. El eje perpendicular fue construido con variación del coeficiente ( $Rc_i$ ), este valor fue de 0.01 hasta 0.1 con incremento de 0.01 ( $dRc$ ), a manera de ejemplo se presenta una de las superficies encontradas en la Figura 15, en la Figura 16 se presenta de manera conceptual el proceso planteado.

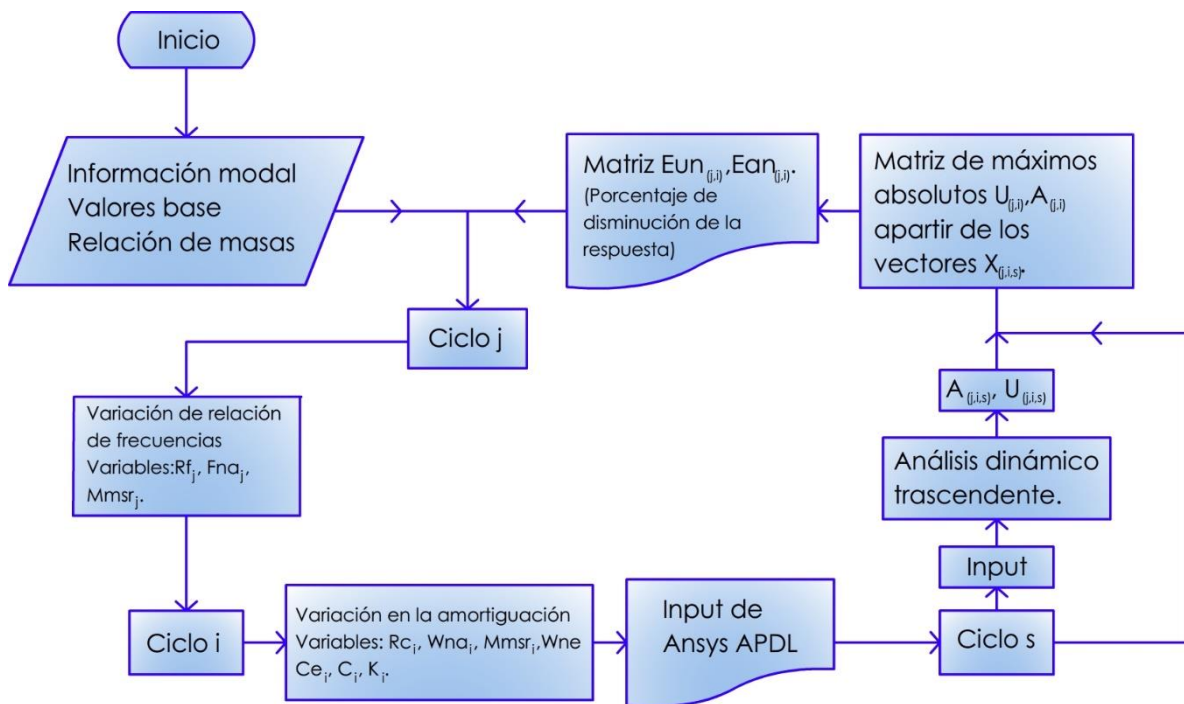


Figura 16. Diagrama del proceso de la metodología

Las fuerzas de viento se presentarán como una historia en el tiempo, estas tendrán una duración de 1 min y tendrán 600 datos cada una. La forma general de la señal es la siguiente.

$$F_D(z, t) = \frac{1}{2} \rho A C_D (V(z) + v(z, t)) \quad (21)$$

De donde  $\rho$  es la densidad del aire, esta toma un valor de  $1.23 \text{ Kg/m}^3$ ,  $A$  es el área de afectación perpendicular al viento,  $C_D$  es el coeficiente de arrastre y tiene una magnitud de 1.3,  $V(z)$  es la velocidad media a una altura  $z$  y  $v(z, t)$  es la turbulencia la cual varía en función de la altura de referencia y el tiempo. Las señales de la turbulencia se generaron con el método ARMA, el espectro que se utilizará es el propuesto por Kaimal debido a que este considera la variación de la altura en su formulación. La duración de la señal fue de 60 s (1 min, T) y se discretizó con un incremento de tiempo de 0.1 s.

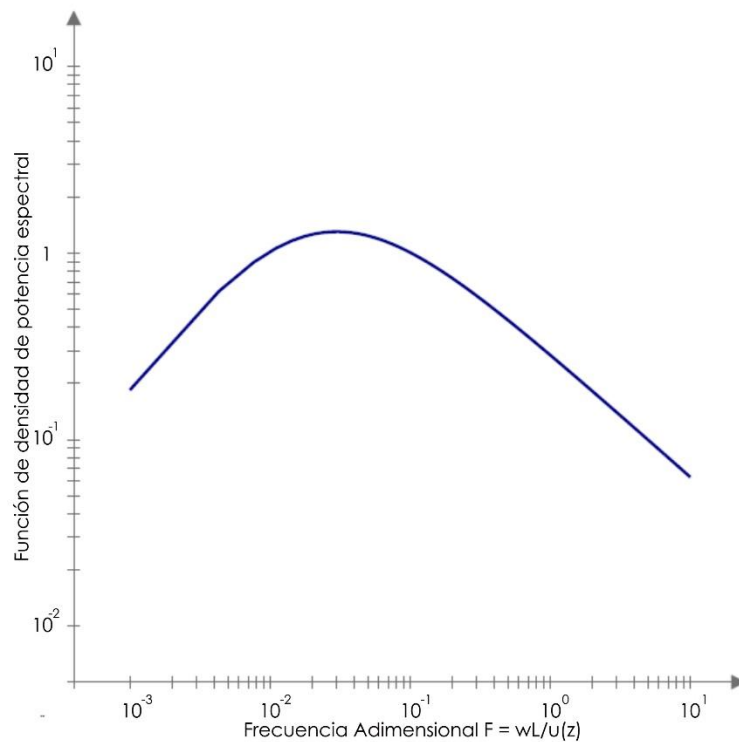


Figura 17. Función de Densidad de Potencia Espectral propuesta por Kaimal

Con los resultados de la primera ronda de análisis se graficará la superficie para identificar si existe la necesidad de estudiar un área más amplia y/o realizar un cambio en la malla en alguna zona de la superficie de interés. La elección de los parámetros óptimos será para la pareja de datos que presente el mayor porcentaje de disminución de la respuesta, estos valores son los obtenidos en la matriz  $E_n(j, i)$ .

## Resultados

Una vez realizado el primer proceso de análisis descrito en el capítulo anterior, se obtuvieron las respuestas a lo largo del tiempo de los 9 nodos estudiados, toda la información se concentró en matrices de 10 x 10, que contienen los porcentajes de disminución de las respuestas en el área limitada por los valores frontera de las variables estudiadas ( $Rf_j, Rc_i$ ).

Estudiando el comportamiento que se tiene a lo largo del eje asociado a la relación de frecuencias ( $Rf$ ) es posible observar que se llega a un máximo en el rango de estudio debido al cambio de signo en la pendiente, este se presenta entre los valores 0.92 y 1.00. El intervalo en el que se encontraba el valor máximo de disminución de frecuencias sufrió una variación entre nodo y nodo, todos quedaron acotados entre 0.88 y 1.04.

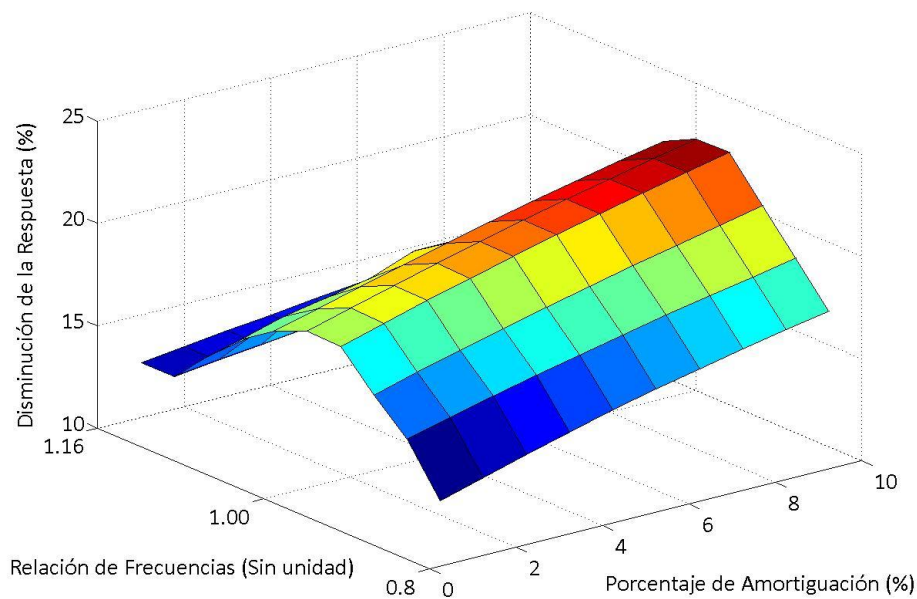


Figura 18. Superficie generada de la matriz con los porcentajes de disminución en la respuesta (aceleraciones) del Nodo 5



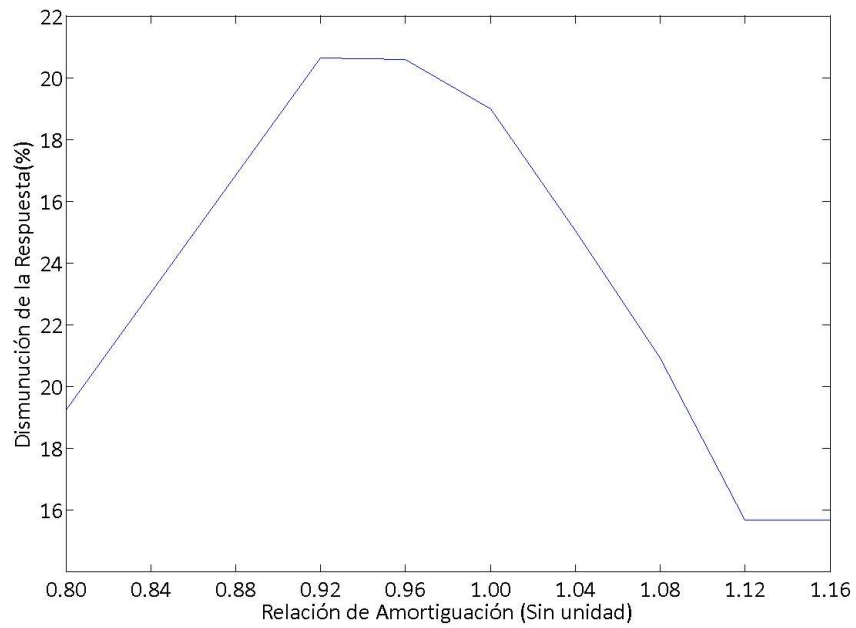


Figura 19. Curva de la disminución de la respuesta (desplazamientos) para el Nodo 5 cuando el valor de la amortiguación del sistema disipador es el 10% del valor de la amortiguación del sistema principal

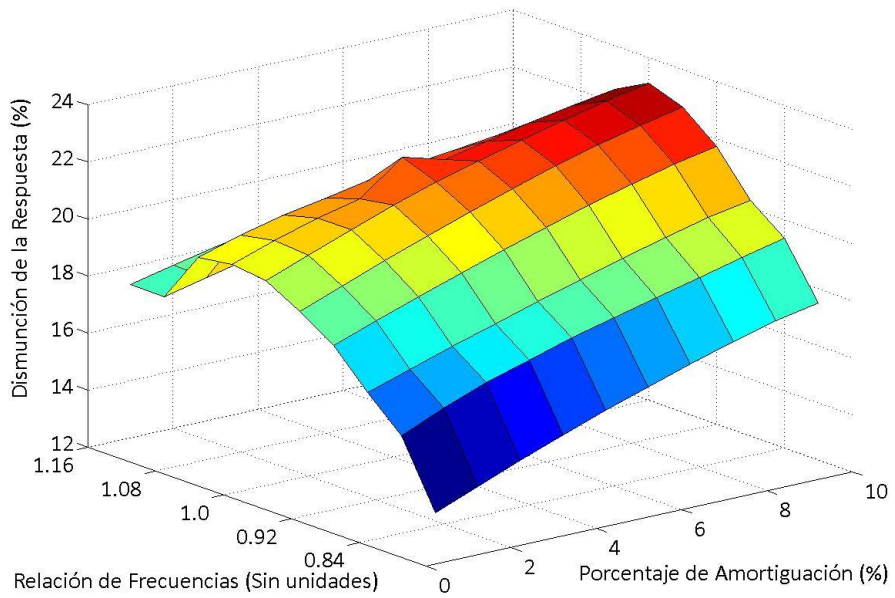
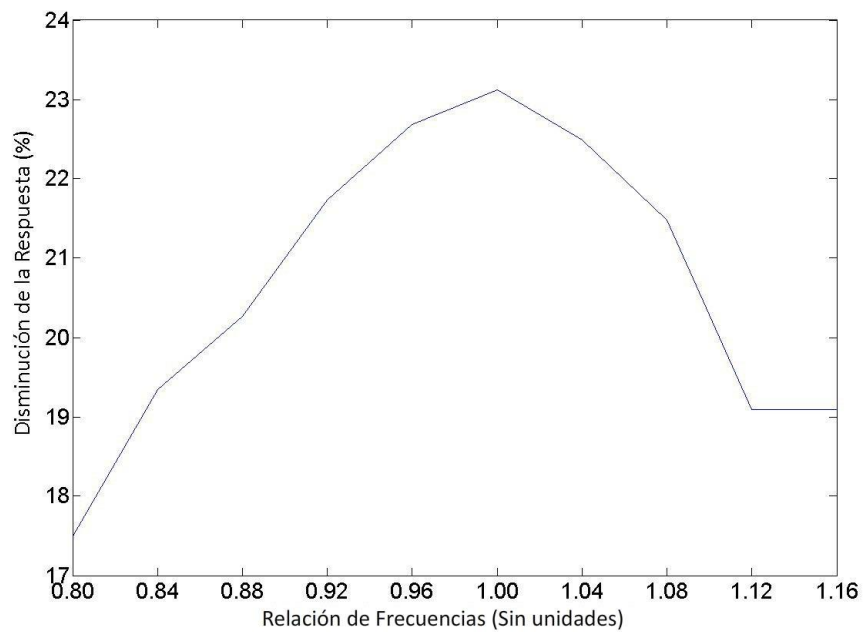


Figura 20. Superficie generada de la matriz con los porcentajes de disminución en la respuesta (desplazamiento) del Nodo 1





**Figura 21. Curva de la disminución de la respuesta (desplazamientos) para el Nodo 1 cuando el valor de la amortiguación del sistema disipador es el 10% del valor de la amortiguación del sistema principal**

El comportamiento que se presenta a lo largo del eje relacionado la cantidad de la amortiguación, la cual es un porcentaje de la amortiguación estructural en el modo, es creciente en eficiencia y no se llega a ningún valor máximo en el rango de estudio. Se espera que al aumentar el valor de la amortiguación se presenten mayores disminuciones de la respuesta, aunque se presenta una ligera disminución en la pendiente.

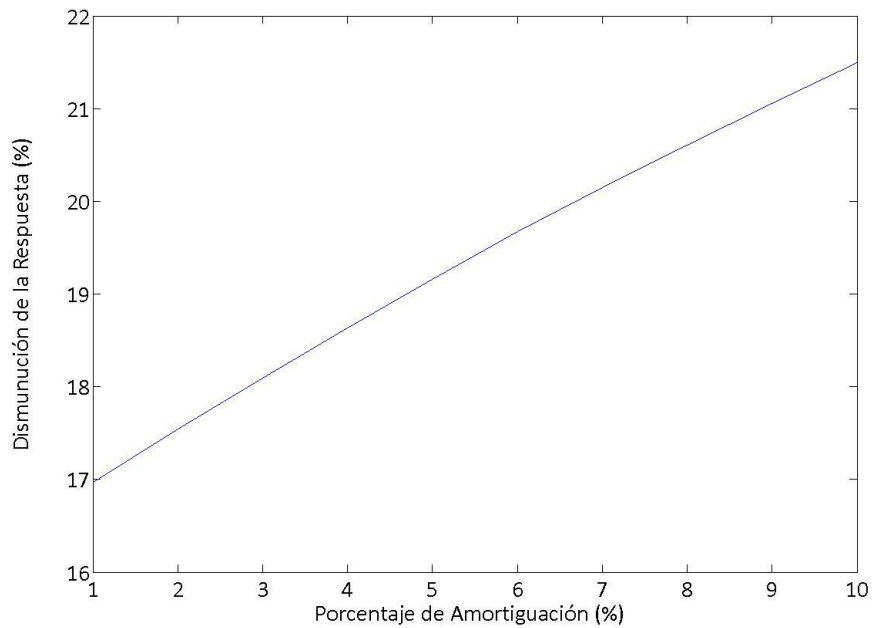


Figura 22. Curva de la disminución de la respuesta (desplazamientos) para el Nodo 5 cuando la relación de las frecuencias es de 1.00

Se realizó un segundo grupo de análisis con los mismos valores diferenciales de incrementos sobre el eje relacionado a la amortiguación de la MSR, esta vez se tomó como valor final el 15% de la amortiguación de la estructura.

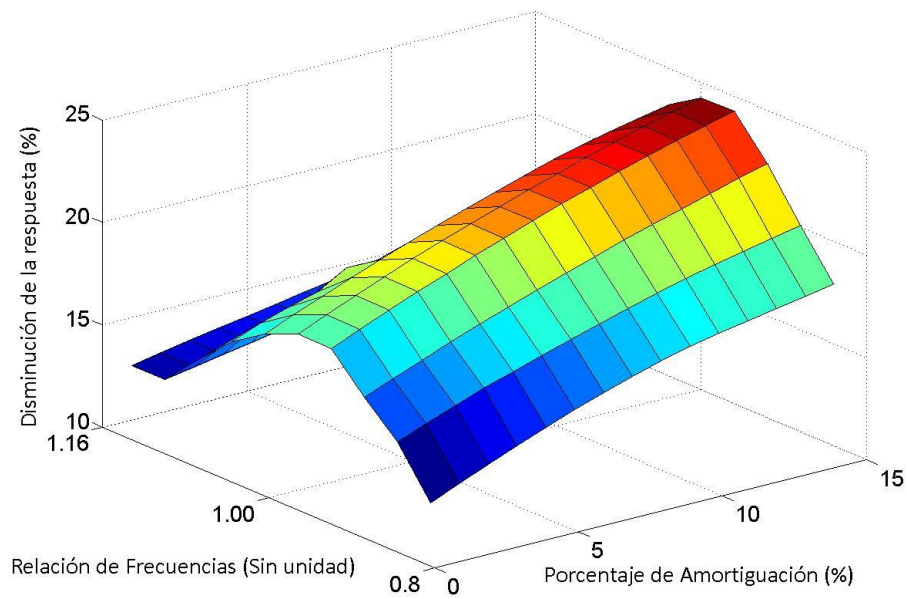


Figura 23. Superficie generada de la matriz con los porcentajes de disminución en la respuesta (desplazamiento) del Nodo 5

Se realizó una matriz utilizando la media aritmética de las respuestas estudiadas en los 9 nodos, se llegó a la siguiente superficie.

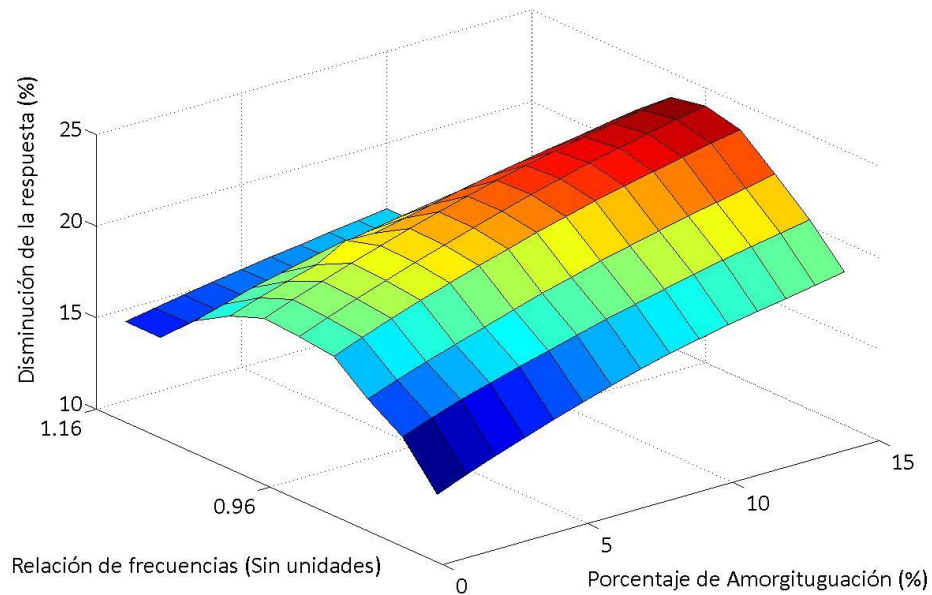


Figura 24. Respuesta promedio del comportamiento de los 9 nodos para las matrices de 10x15

El comportamiento de la superficie cuando existía una variación de la amortiguación asociada al sistema se comportó de la siguiente manera.

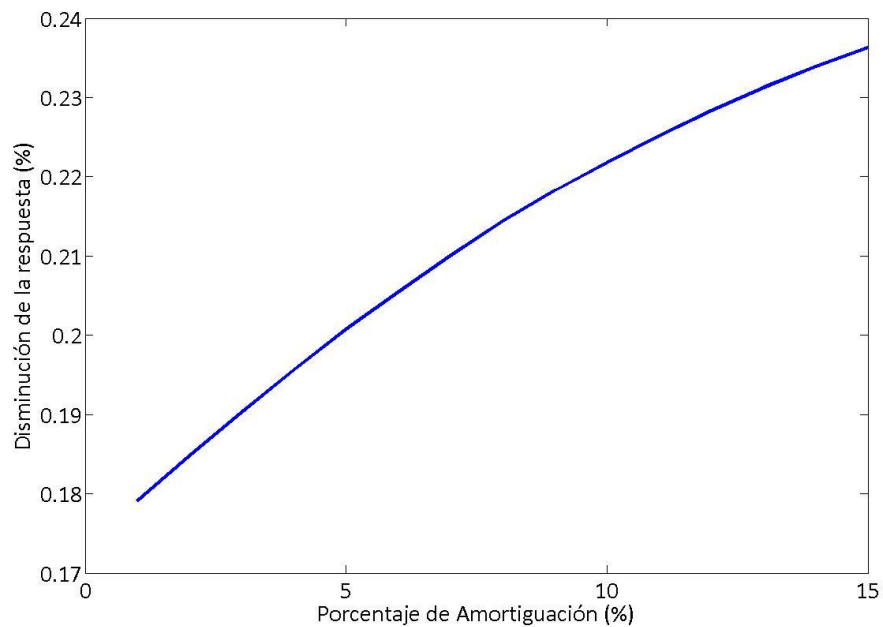


Figura 25. Comportamiento de la superficie en el eje Rc de la respuesta promedio

## Discusión

### Valores Óptimos

Las matrices resultantes muestran superficies en las que el comportamiento del porcentaje de disminución de la respuesta a lo largo del eje del amortiguamiento de la MSR es creciente aún, pero con pendientes decrecientes.

El comportamiento encontrado sobre el eje de la relación de frecuencias presenta una mayor eficiencia (mayor disminución de la respuesta) cuando la relación de las frecuencias es cercana a la unidad. Se encontró un punto de inflexión sobre el eje relacionado a la relación de frecuencias ( $R_f$ ), el valor en el cual se presentaba este punto variaba de nodo a nodo, este se encontraba entre 1.04 y 0.92, cuando se realizó la primera iteración. El siguiente paso fue la obtención de una matriz con las 9 matrices obtenidas en los procesos de análisis, una por nodo, realizando una media aritmética de las respuestas de los 9 nodos. Esto se presenta en las Figuras 26 y 27.

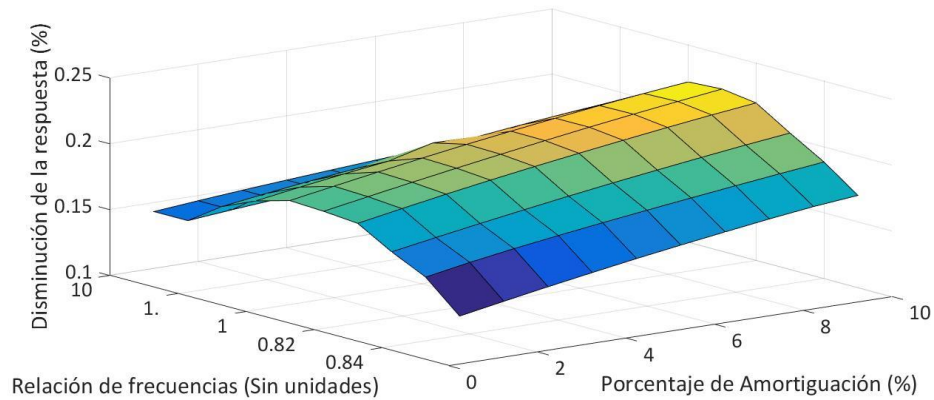


Figura 26. Superficie generada de la matriz con los porcentajes de disminución en la respuesta (desplazamiento) promedio de los 9 nodos estudiados

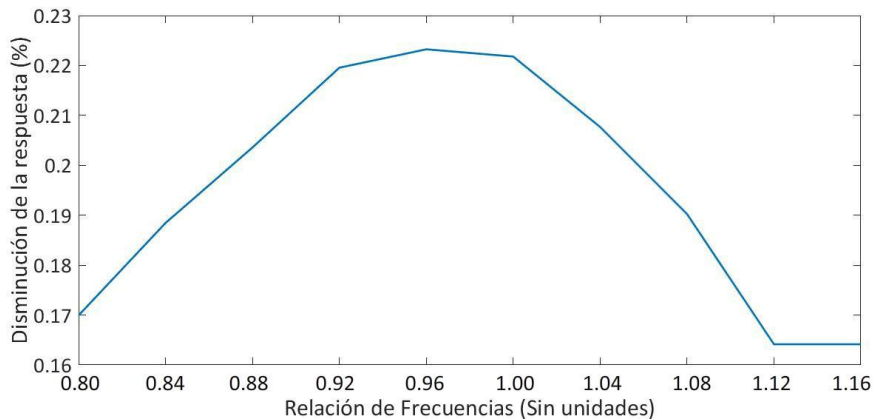


Figura 27. Comportamiento promedio de las respuestas en los 9 nodos cuando se tiene 5% de la amortiguación del sistema principal

Gráficamente es posible observar que la respuesta promedio presenta un valor máximo sobre una relación de frecuencias de 0.96. Comparando este valor con lo presentado por Den Hartog, sustituyendo los valores en la expresión ( 9 ) se llega a un valor 0.9523 para el caso en el que la  $\mu$  toma un valor de 0.05.

$$\Delta\xi_{eq} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{0.05/2}{1 + 0.05/2}} = 0.078 \quad (22)$$

El mayor porcentaje de disfunción de la respuesta que se encontró fue de 30%, cuando se tuvo una relación de frecuencias de 0.96 y la amortiguación del sistema disipador fue de 28% del valor de la amortiguación propia del sistema principal, aunque es importante considerar que se alcanza un 30% de reducción de la respuesta desde que se tiene una amortiguación en el sistema amortiguador del 15% del encontrado en la estructura principal, esto representa una disminución del 41% del modo estudiado, conociendo el factor de participación de dicho modo (0.710).

### Consideraciones completarias de diseño

La masa del sistema amortiguador (m) presentó un desplazamiento máximo total de 0.35 m, para un desplazamiento máximo de la estructura de 0.15 m, por lo que el desplazamiento adicional que presentó la MSR fue de 0.20 m.

$$U_{D Libre} = U_{D Total} - U_{Est} = 0.20 m \quad (23)$$

Debido a que las cargas actuantes son cargas de servicio, las magnitudes de diseño son menores a las que se presentarían ante un estado de cargas accidentales, al considerar estos fenómenos y tener un período de retorno mayor, las magnitudes de las fuerzas actuantes aumentan. Durante el proceso de análisis y diseño, de la edificación usada en el presente trabajo, se encontró que el desplazamiento máximo estimado en la estructura principal fue de 0.40 m cuando se revisó su comportamiento ante fuerzas eólicas, calculadas con un período de retorno de 200 años, en un análisis estático. Sabiendo que todos los elementos estructurales de la edificación se mantuvieron en su rango elástico ante las fuerzas de viento consideradas en la revisión por falla, es posible llegar a estimación del desplazamiento que presentaría la MSR ante estas condiciones.

$$U_{D T=200} = \left[ \frac{U_{D Libre}}{U_{Est}} \right] U_{Est T=200} = 0.940 m \quad (24)$$

Debido a esto, es importante considerar que, aunque los desplazamientos que se pueden presentar ante condiciones de carga referentes a revisiones por servicio, los desplazamientos ante eventos no ocasionales deben ser considerados en el diseño. La magnitud de la relación entre  $U_{D Libre}$  y  $U_{Est}$  fue de 2.29. Esta sería la relación que se pudiera emplear para la estimación de los desplazamientos máximos de las masas.

Como se mencionó, para poder representar fielmente la estructura cuando se decide colocar un sistema disipador, se consideró el volumen que ocuparía el sistema disipador, para esto se supuso que la masa sólida sería de acero, con esto se obtuvo un volumen necesario, asumiendo que la forma del elemento disipador fuese esférica.

$$r_D = \sqrt[3]{\frac{3(m/\gamma_s)}{4\pi}} = 3.9 \text{ m} \quad (25)$$

Es posible ver que el volumen ocuparía 8 metros en sus 3 direcciones volumétricas principales, considerando que su desplazamiento máximo en cada dirección puede llegar a ser aproximadamente 1 metro en cada sentido de sus 2 direcciones en planta, se puede llegar a necesitar 10 metros libres en cada dirección de acción que puedan presentar estos sistemas, esto bajo la consigna de que los sistemas que brinden la rigidez y la amortiguación mantengan un comportamiento lineal para este tipo de acciones, como se comentó anteriormente esto puede ser controlado con amortiguadores no lineales.

### Aceleraciones esperadas

De acuerdo a los procedimientos propuestos por la NBCC, se pudo estimar que las aceleraciones paralelas al flujo del viento estarían cercanas a una magnitud de 11.25 mg. Considerando que las magnitudes de las aceleraciones que se encontraron en el nodo 9 fueron de 13.97 mg cuando no se empleó el uso del sistema amortiguador, es posible mencionar que este procedimiento de aproximación es bastante preciso, por lo que puede ser empleado de manera confiable.

Comparando los resultados con lo presentado por Den Hartog, sustituyendo los valores en la expresión (9) se llega a un valor 0.9523 para el caso en el presente caso en que la  $\mu$  se ha tomado con un valor de 0.05.

$$\Delta\xi_{eq} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{0.05/2}{1 + 0.05/2}} = 0.078 \quad (26)$$

Se puede obtener el aumento de amortiguación equivalente, el cual toma un valor de 7.8%. Considerando que la estructura fue modelada considerando 0.01 como amortiguación relativa ( $\xi$ ), la amortiguación teórica que se tendría en la estructura pasaría de 0.01 a 0.088. Por otro lado, utilizando las expresiones (14) y (15) presentadas por la NBCC de manera inversa, se puede llegar a un incremento  $\Delta\xi_{eq}$  tal que se presente una disminución de la respuesta de aceleración en la dirección paralela al viento cercana al 30%, de esta manera se puede llegar a un incremento equivalente de la amortiguación relativa de 0.035, menor al valor que se empleó en el modelo para obtener ese porcentaje de disminución (7.8% de acuerdo a Den Hartog) por lo que no recomiendo la interacción de la expresión (9) con las expresiones (14) y (15).

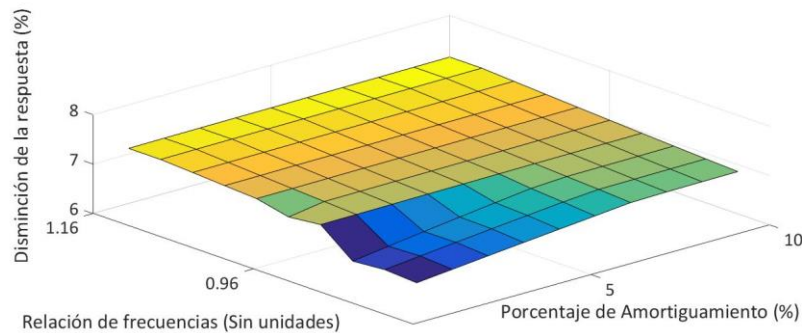
$$\Delta\xi_{eq} = \frac{K_S F [4\pi^2 f_{nD}^2 g_P \Delta]^2}{C_{eH} a_D^2 C_g^2} - \beta_D = 0.035 \quad (27)$$

Debido al alcance planteado inicialmente, las aceleraciones perpendiculares que presenta este método no podrán ser comparadas.

## Recomendaciones para futuros trabajos

Se recomienda realizar un estudio más detallado sobre el comportamiento del sistema amortiguador, ante variaciones en sus propiedades y sus naturalezas, esto, debido a que los valores propuestos por los distintos investigadores resultan en porcentajes muy altos (64%, 74% y 52% propuestos por Den Hartog, Krenk y Warburton respectivamente) y esa zona no fue cubierta por el presente trabajo.

Las respuestas de aceleración que se obtuvieron de los nodos no centrales fueron descartadas debido a que se presentaron resultados anómalos. Esto se pudo haber debido a errores en la modelación.



**Figura 28. Resultados en los nodos alejados del centro de la planta**

Debido a la geometría sugerida, principalmente en la conexión con la MSR, en la cual se concentró la transmisión de fuerzas hacia un solo nodo de la planta, lo que pudo haber resultado en un comportamiento local distinto al que se obtendría si se presentan distintos puntos de conexión con el sistema amortiguador. Se recomienda diseñar el sistema de conexión entre la masa sólida y la estructura de tal manera que logre distribuir de mejor manera su aportación inercial al sistema estructural principal, como se presenta en la Figura 28.

Aunque se han encontrado valores óptimos de diseño, estos deben ser verificados realizando estudios del comportamiento de estos sistemas ante respuestas torsionales, así como la optimización de sus parámetros propios como su excentricidad o forma de la trayectoria a seguir. Adicionalmente se recomienda estudiar con detalle la interacción entre la ecuación número (9) con el método de estimación de aceleraciones generadas por el viento presentado por la NBCC.

## Conclusiones

- La relación de frecuencias óptima para el modelo fue de 0.96, esto coincide con la expresión para el cálculo de un valor óptimo para los sistemas de amortiguación pasiva de masas sólidas presentada por Den Hartog.
- Se recomiendan la verificación de los desplazamientos de la masa sólida a lo largo de la vida útil de la edificación, se puede estimar como 2.5 veces el valor del desplazamiento máximo esperado en su parte más alta, para edificaciones regulares y que cumpla con los requisitos para el uso de una masa sólida resonante antes mencionados.
- No es recomendable el uso de los valores obtenidos mediante la expresión ( 9 ) en el método de estimación de aceleraciones generadas por el viento presentado por la NBCC con intención de conocer el incremento en amortiguación que otorgan las masas sólidas resonantes pasivas para fines de diseño.
- Utilizando los valores óptimos de diseño para los sistemas de masas sólidas resonantes pasivas se puede alcanzar una disminución de la respuesta en desplazamientos y aceleraciones de hasta un 30%.



## Referencias

- Ajeet, S., & Manish, S. (2007). Optimal Placement of Supplemental Dampers in Seismic Design of Structures. *JSEE Fall*, 125.
- Ansys. (2014). *Ansys Online Manuals Release 5.5*. Retrieved from ANSYS Commands Manual Topic Index: <http://www.ansys.stuba.sk/html/c-index.htm>
- Beards, C. (1996). *Structural Vibration: Analysis and damping*. Oxford: Butterworth Heinemann.
- Bungale, S. T., & Martin, J. &. (2005). *Wind and Earthquake Resistant Buildings. Structural Analysis and Design*. Los Angeles, California: Marcel Dekker.
- Canada, N. B. (1995). *Wind Loads and Effects*. Canada.
- CFE. (2008). *Manual de Diseño de Obras Civiles. Diseño por Viento*. México, Distrito Federal.
- Chopra, A. (2014). *Dinámica de Estructuras*. México: Pearson.
- Chopra, A. K. (2014). *Dinámica de Estructuras*. México: Pearson.
- Crandall, S. H. (2008). In Memoriam: Jacob Pieter Den Hartog. *Journal of Applied Mechanics*, 257.
- Den Hartog, J. P. (1956). *Mechanical Vibrations*. Dover, New York: McGrawHill.
- Espinosa Méndez, J. L., Pozos Estrada, A., & Gómez Martínez, R. (2011, Agosto). Uso de masas sólidas resonantes para controlar vibraciones inducidas por viento turbulento en edificios esbeltos. CDMX, México: Instituto de Ingeniería UNAM.
- Federal, G. O. (2004). *Normas Técnicas Complementarias*. México, Distrito Federal.
- GERB, A. (2015). Amortiguadores de Masas Sintonizadas (TMDs) para puentes, forados y estructuras de gran altura. Guadalajara, Jalisco, México: GERB.
- Gürgöze, M., & Müller, P. (1992). Optimal positioning of dampers in multi-body systems. *Journal of Sound and Vibration*, 517-530.
- Hessamoddin Meshkat, R., & Hashem, S. (2014). Optimum Parameters for Tuned Mass Damper Using Shuffled Complex (SCE) Algorithm. *Civil Engineering Infrastructures Journal*.
- Kareem, A., Bernardini, E., & Spence, S. M. (2013). Control of the Wind Induced Response of Structures. *Advanced Structural Wind Engineering*, 377.
- Krenk, S., & Høgsberg, J. (2012). Design of Multiple Tuned Mass Dampers on Flexible Structures.
- Kwok, K., & Samali, B. (1995). Performance of Tuned Mass Dampers under wind loads.
- MathWorks. (2016). *MathWorks*. Retrieved from MATLAB Documentation: <https://www.mathworks.com/help/matlab/ref>
- Meseguer Ruiz, J., & Saez Andrés, Á. (2001). *Aerodinámica Civil. Cargas de viento en las edificaciones*. Madrid, España: McGrawHill.

- Miller, E. (2012, Febrero 29). *PADT, Inc. – The Blog*. Retrieved from Starting ANSYS Products From the Command Line: <http://www.padtinc.com/blog/the-focus/starting-ansys-products-from-the-command-line>
- Orozco-Baute, M. A. (2015). *Comparación de la respuesta estructural de edificios altos ante viento turbulento y desprendimiento de vórtices*. Distrito Federal: Instituto de Ingeniería UNAM.
- Pourahmadi, M. (2001). *Foundations of time series analysis and predictions theory*. Illinois: Wiley-Interscience Publication.
- Said, E., & Vasant, M. (2014). Optimum Tuned Mass Damper for Wind and Earthquake Response Control of High-Rise Building. *Advances in Structural Engineering*, 1475-1487.
- Sinan Melih, N., & Gebrail, B. (n.d.). Multiple Response Optimization of Tuned Mass. *Recent Advances in Civil Engineering and Mechanics*, 115-119.
- Standardization, I. O. (2007). *ISO 10137: Bases for design of structures - Serviceability of buildings and walkways against vibrations*. ISO.
- Tamura, Y. (2006). Wind Resistant Design of Tall Buildings in Japan. *Wind Engineering Research Center*.
- Tamura, Y., Suda, K., & Sasaki, A. (2000). Damping in buildings for wind resistant design. *International Symposium on Wind and Structures for the 21st Century*, 115-130.
- Tamura, Y.; Sugauma, S. (1996). Evaluation of amplitude-dependent damping and natural frequency of buildings during strong winds. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 115-130.
- Warburton, G. B. (1982). *Optimum absorber parameters for various combinations of response and excitation parameters*.

## Software de Referencia

ANSYS APDL Release 13.00 (Academic version), 2010.

MATLAB R2011a (Academic version), 2011.

ETABS 2014 (Academic version), 2013.

## Anexo A: Método ARMA

El comportamiento dinámico de los sistemas estructurales, que se presentan en la metodología de este trabajo, están en función de la naturaleza de las señales que describirán las fuerzas que afectarán a los grados de libertad, esto otorga una gran importancia en el método utilizado para la creación de las señales en juego. Un método para la obtención de éstas es mediante el uso del método ARMA. El objetivo de este proceso de ajuste es el de usar la información que haya sido aceptada con anterioridad y crear un método empírico para seleccionar los órdenes  $p$  y  $q$  y estimar los parámetros necesarios para que el ajuste residual sea aproximadamente no correlacionado. Las variables necesarias para este método son un parámetro de auto regresión (AR) y una media móvil (MA), es justamente de estas variables que dan origen al nombre ARMA, en las cuales se consideran las variaciones que pudieran presentar en el tiempo ( $t$ ), aunque el método considera la variación que se presentaría entre varios puntos en el espacio ( $x, y, z$ ) (Pourahmadi, 2001).

Éste método es la combinación de un vector de ruido blanco gaussiano ( $\psi$ ), el cual no es más que una secuencia de datos aleatorios no correlacionados (Pourahmadi, 2001), con los coeficientes de autorregresión y media móvil denotados por  $[A_i]$  y  $[B_i]$  respectivamente. Todo esto debido a que se desea simular una porción del proceso estocástico estacionario. La expresión para poder componer una historia de velocidades del viento turbulento es (Orozco-Baute, 2015):

$$v_n(z, t) = \sum_{i=1}^p A_i K(t - i\Delta t) + \sum_{i=1}^q B_i \psi(t - i\Delta t) \quad (\text{A } 1)$$

Donde  $v_n(z, t)$  es un vector de velocidades normalizadas para cualquier tiempo  $\{t\}$  a una diferente altura  $z$ , con una media cero y varianza unitaria. El orden de la autorregresión y media móvil y media móvil están denotados por  $p$  y  $q$  respectivamente. La turbulencia puede ser representada mediante el uso de un proceso estocástico Gaussiano,  $k(x,y,z)$  sobre un espacio que considere tres dimensiones geométricas y una dimensión temporal  $\{t\}$ ;  $k(x,y,z)$  tiene una varianza unitaria, media cero y estacionario en el tiempo. Si se considera el espacio y el tiempo de una manera discreta se puede representar  $k(x,y,z)$  como un vector. En un modelo como este los componentes del vector son procesos para describir las posiciones en el espacio (Orozco-Baute, 2015).

Considerando que esta expresión contiene operaciones vectoriales, se denota el proceso vectorial como  $K(t) = \{k\{x,y,z\}\}_{x,y,z}$  y aceptando que el orden ( $q$ ) es el mismo, se puede ver el vector de la autorregresión y media móvil de la siguiente forma:

$$K(t) = \sum_{i=1}^p A_i K(t - i\Delta t) + \sum_{i=1}^q B_i \psi(t - i\Delta t) \quad (\text{A } 2)$$

De donde  $\psi(t)$  es el vector de ruido blanco en un instante  $t_i$ , donde se asume que ésta toma valores de  $i\Delta t$  ( $i$  es un número entero),  $A_i$  es la matriz de coeficientes de autorregresión y  $B_i$  la matriz de coeficientes de media móvil para el instante  $i$ .

Debido a que el vector de ruido blanco es de naturaleza Gaussiana, este es estacionario en el tiempo y de media cero, es un necesario que la covarianza tenga una estructura específica. Para esto se especifica un modelo para la matriz de correlación cruzada  $C_{k(t)}$  entre  $K(s)$  y  $K(s + t)$ . La matriz de correlación cruzada es dependiente del tiempo, pero no del espacio, con esto se puede aceptar

que el modelo es continuo. La matriz de correlación resultante para  $\{K(i\Delta t)\}_i$  será utilizada para determinar los coeficientes [Ai] y [Bi]. Considerando que  $K(t)$  tiene n componentes, la matriz de correlación cruzada se puede determinar y tendría la siguiente forma:

$$C_{k(t)} = \begin{bmatrix} P_{11}(t) & \cdots & P_{1n}(t) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{n1}(t) & \cdots & P_{nn}(t) \end{bmatrix} \quad (\text{A } 3)$$

De donde  $P_{ij}(t)$  es la correlación cruzada entre la n-ésima y la m-ésima posición en el espacio en el tiempo s y s+t. Respectivamente, para  $i, j = 1, 2, 3, \dots, n$ . Si  $(x_i, y_i, z_i)$  denota la i-ésima posición en el espacio, se puede aceptar la siguiente expresión:

$$P_{ij}(t) = \int_0^\infty \sqrt{S_i(f)S_j(f)} \text{coh}(y_i, x_i, y_j, z_j, f) \text{Cos}(2\pi f t d f) \quad (\text{A } 4)$$

De donde  $S_i(f)$  es la Función de Densidad de Potencia Espectral, en la posición  $i$ ; y  $\text{coh}(y_i, x_i, y_j, z_j, f)$  es la función de coherencia en la frecuencia n. El espectro que se utilizó en este trabajo fue el propuesto por Kaimal (1972), este considera el parámetro de la altura por lo que puede presentar espectros para cada valor de z que se desee evaluar.

$$\frac{fS(f, z)}{\sigma_v^2} = \frac{22z/V(z)}{(1 + 33fz/V(z))^2} \quad (\text{A } 5)$$

De donde  $V(z)$  es la variación media del viento con la altura, z es la altura de referencia y  $\sigma_v^2$  es la varianza del viento turbulento. Con la función de potencia, el siguiente paso necesario es el poder establecer la variación que se encuentra entre dos puntos separados una distancia en el espacio geométrico, para esto se emplea una función de coherencia, está fue propuesta por Davenport está tiene la siguiente configuración:

$$\text{coh}(y_i, x_i, y_j, z_j, f) = e^{[-a]} \quad (\text{A } 6)$$

$$a = \frac{f \left[ c_y^2 (z_i - z_j)^2 + c_z^2 (z_i - z_j)^2 \right]}{\left[ \frac{\bar{V}(z_i) + \bar{V}(z_j)}{2} \right]} \quad (\text{A } 7)$$

El efecto de la separación en las direcciones lateral (y) y vertical (z) se toman en cuenta con las constantes  $c_y$  y  $c_z$  respetivamente, la matriz de correlación C completa se forma por la combinación de las matrices de correlación cruzadas y está dado por:

$$C = \begin{bmatrix} C_K^T(0) & C_K^T(\Delta t) & C_K^T(2\Delta t) & \cdots & C_K^T((p-1)\Delta t) \\ C_K(\Delta t) & AC_K(0) & C_K(\Delta t) & \cdots & C_K((p-2)\Delta t) \\ C_K(2\Delta t) & C_K(2\Delta t) & C_K(0) & \cdots & C_K((p-3)\Delta t) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ C_K((p-1)\Delta t) & C_K((p-2)\Delta t) & C_K((p-3)\Delta t) & \cdots & C_K(0) \end{bmatrix} \quad (\text{A } 8)$$

De donde  $t$  toma valores de  $\Delta t, 2\Delta t, \dots, p\Delta t$  y  $p$  denota el número de puntos de tiempo. Para calcular las matrices de los coeficientes en  $K(t)$ , se utiliza  $C$ . Se calculan primero un grupo de matrices  $\widehat{A}_v$  para  $i=1, \dots, p$ . Posteriormente se aplica la descomposición de Cholesky.

$$B_0 B_0^T = \sum_{i=1}^{\infty} \widehat{A}_1 C_k(i\Delta t) \quad (\text{A 9})$$

Con la cual se obtiene una matriz triangular inferior llamado  $B_0$ . Con esto se logra armar una matriz  $D$  de la siguiente forma.

$$C_{\psi k}(0) = B_0 \quad (\text{A 10})$$

$$C_{\psi k}(-k\Delta t) + \sum_{i=1}^k \left( \widehat{A}_v C_{\psi k}((1-i)\Delta t) \right) = B_0 \quad (\text{A 11})$$

Para  $k=1, 2, \dots, q$ , notando que  $C_{\psi k} = 0$  para un intervalo de promediación positivo. Finalmente, los coeficientes de autorregresión y media móvil empleados son calculados. Es posible obtener las fuerzas producidas por el viento considerando su aportación estacionaria y su aportación turbulenta empleado la expresión (A12) (Orozco-Baute, 2015).

$$F_D(z, t) = \frac{1}{2} \rho A C_D (V(z) + v(z, t)) \quad (\text{A 12})$$

## Anexo B: Diseño estructural (E-Base)

### Características del edificio

Edificio urbano domiciliario, ubicado en una ubicación característica de la zona I, se restringieron las dimensiones de la planta a 40 metros y se deseó que la relación de esbeltez sea de 5. Los 200 metros de altura resultantes se desarrollarán con 50 pisos con una altura de entrepiso estructural de 4m.

### Reglamentos aplicados

Los procesos de diseño y análisis que se realizaron se llevaron a cabo bajo las Normas Técnicas Complementarias en su edición publicada en el año 2004. Para el caso de los cálculos de las acciones del viento, así como el comportamiento dinámico debido a este fenómeno se utilizó el Manual de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad. Las normas consideran que este tipo de edificios puede ser categorizado como parte del grupo B (se utilizará un factor de carga de 1.4 para las cargas de servicio). El estudio de las aceleraciones máximas probables fue realizado siguiendo las normativas "National Building Code of Canada".

### Sistema estructural seleccionado

El sistema estructural se conforma por marcos rígidos de acero y contravientos concéntricos. El sistema de piso está compuesto por vigas primarias y secundarias que dan soporte a una losa de concreto reforzado.

Los perfiles seleccionados para las vigas primarias y secundarias son perfiles IR, para el caso de las columnas y los contravientos se utilizaron perfiles tipo OR. Sus nombres comerciales, dimensiones y propiedades de las secciones presentadas fueron obtenidos del Manual de Construcción en Acero del IMCA en su volumen 5. Se propone una separación de columnas de 10 metros en ambas direcciones. En estos nodos se intersectarán las vigas primarias. En una de las dos direcciones en planta las vigas primarias son intersectadas por las vigas secundarias. Las losas trabajan en una dirección de 5 metros. El sistema de contravientos concéntricos se presenta con una configuración tal que se desarrolla en niveles en los dos claros centrales, resultando con una longitud aproximada de 12.8 m.

### Análisis de Cargas

Las **cargas gravitacionales** que se consideraron en el diseño del sistema de piso son las siguientes.

Tabla B6. Cargas gravitacionales

Descripción	Carga (kg/m <sup>2</sup> )		
	Tipo	W <sub>m</sub>	W <sub>a</sub>
Habitación (casa habitación, departamentos, viviendas)	Carga Viva	170	90
Carga viva transitoria	Sobrecarga Viva	150	-
Peso Muerto en Losas de Concreto	Sobrecarga Muerta	40	-
Muebles y otros	Carga Muerta	50	50
Losas de concreto (15cm)	Carga Muerta	360	350
Sistema de Vigas	Carga Muerta	120	120

En estas se presentan cargas vivas, cargas muertas y sobrecargas de diseño, se puede ver que se tienen dos tipos de cargas, por una parte, se encuentran las cargas medias y por otro lado las cargas accidentales, se utilizarán cada una de ellas de tal manera que se realicen las combinaciones que proponen las NTC-2004, las magnitudes y su descripción se presentan en la Tabla B1.

Los valores de las cargas se obtuvieron de las NTC en su volumen de Criterios y Acciones para el Diseño Estructural de las Edificaciones. Estas cargas serán colocadas sobre las losas que se presentan en la solución estructural. Los parámetros que se utilizaron en el análisis de cargas generadas por **eventos eólicos** son presentados en la Tabla B2.

Tabla B7. Parámetros para el diseño por viento

Característica aerodinámica (Pre-diseño)	Magnitud	Unidad
Velocidad Regional	140	Km/hr
Factor de Topografía	0.9	-
Factor de exposición local	0.79/1.26	-
Categoría del terreno	3	-
Exponente de variación de forma	0.156	-
Altura gradiente	390	m
Coefficiente de escala de rugosidad	0.881	-
Presión barométrica	554.6	mm de Hg
Temperatura ambiental	18	°C
Presión dinámica base	30.59	Kg/m <sup>2</sup>



Siguiendo las expresiones propuestas en el MOC (CFE, 2008) se calcularon las presiones de diseño para esto fue necesario conocer los coeficientes de reducción por áreas tributarias, los coeficientes de presión exterior, el **coeficiente de presión interior (0.0)**, así como los anchos tributarios para llegar las fuerzas que se colocarían en las vigas en cada uno de los entrepisos, estos valores pueden ser visualizados en las siguientes tablas:

**Tabla B8. Coeficientes de reducción por área**

**Viento en X (Kg/m<sup>2</sup>)**

	Lateral	Azotea	Sotavento	Barlovento
<b>Tipo</b>	0.80	0.80	0.80	0.80
<b>Último Piso</b>	0.80	-	0.80	0.80
<b>Cabeceros</b>	-	0.80	-	-

**Tabla B9. Coeficientes de presión exterior**

**Viento en X (Kg/m<sup>2</sup>)**

	Lateral	Azotea	Sotavento	Barlovento
<b>Tipo</b>	-0.65	-1.30	-0.50	0.80
<b>Último Piso</b>	-0.65	-	-0.50	0.80
<b>Cabeceros</b>	-	-1.30	-	-

**Tabla B10. Presiones Netas**

**Viento en X (Kg/m<sup>2</sup>)**

	Lateral	Azotea	Sotavento	Barlovento
<b>Tipo</b>	-0.02	-0.05	-0.01	0.05
<b>Último Piso</b>	-0.02	-	-0.01	0.05
<b>Cabeceros</b>	-	-0.05	-	-

**Tabla B11. Anchos Tributarios**

**Viento en X (Kg/m<sup>2</sup>)**

	Lateral	Azotea	Sotavento	Barlovento
<b>Tipo</b>	4.00	5.00	4.00	4.00
<b>Último Piso</b>	2.00	-	2.00	2.00
<b>Cabeceros</b>	-	2.50	-	-

Tabla B12. Fuerzas Distribuidas en Vigas

Viento en X (Ton/m<sup>2</sup>)

	Lateral	Azotea	Sotavento	Barlovento
<b>Tipo</b>	-0.15	-0.55	-0.08	0.49
<b>Último Piso</b>	-0.08	-	-0.04	0.24
<b>Cabeceros</b>	-	-0.27	-	-

Tabla B13. Cargas y coeficientes de presión exterior. La carga se distribuye sobre las vigas y se presentan como cargas longitudinales.

<b>h</b>	<b>Factor de Carga</b>	<b>Carga (Ton/m)</b>	<b>h</b>	<b>Factor de Carga</b>	<b>Carga (Ton/m)</b>
	Ce = 0.8	Carga		Ce = 0.8	Carga
<b>4</b>	0.07721697	0.30886786	<b>104</b>	0.12379123	0.49516492
<b>8</b>	0.07721697	0.30886786	<b>108</b>	0.12485537	0.49942149
<b>12</b>	0.07974958	0.31899832	<b>112</b>	0.12589273	0.50357094
<b>16</b>	0.08405063	0.3362025	<b>116</b>	0.12690491	0.50761964
<b>20</b>	0.08766303	0.3506521	<b>120</b>	0.12789335	0.51157339
<b>24</b>	0.09080708	0.36322833	<b>124</b>	0.12885937	0.51543748
<b>28</b>	0.0936085	0.37443399	<b>128</b>	0.12980419	0.51921674
<b>32</b>	0.09614652	0.38458607	<b>132</b>	0.1307289	0.5229156
<b>36</b>	0.09847469	0.39389874	<b>136</b>	0.13163453	0.52653812
<b>40</b>	0.10063105	0.40252421	<b>140</b>	0.13252201	0.53008806
<b>44</b>	0.10264374	0.41057494	<b>144</b>	0.13339222	0.53356889
<b>48</b>	0.10453417	0.41813669	<b>148</b>	0.13424595	0.53698382
<b>52</b>	0.10631911	0.42527645	<b>152</b>	0.13508395	0.54033582
<b>56</b>	0.10801192	0.4320477	<b>156</b>	0.13590692	0.54362767
<b>60</b>	0.10962347	0.43849387	<b>160</b>	0.13671549	0.54686195
<b>64</b>	0.11116269	0.44465077	<b>164</b>	0.13751027	0.55004107
<b>68</b>	0.11263708	0.45054832	<b>168</b>	0.13829182	0.55316728
<b>72</b>	0.11405294	0.45621178	<b>172</b>	0.13906067	0.55624269
<b>76</b>	0.11541568	0.4616627	<b>176</b>	0.13981732	0.55926928
<b>80</b>	0.11672992	0.46691966	<b>180</b>	0.14056223	0.56224891
<b>84</b>	0.11799969	0.47199876	<b>184</b>	0.14129583	0.56518333
<b>88</b>	0.11922852	0.47691407	<b>188</b>	0.14201854	0.56807417
<b>92</b>	0.12041949	0.48167797	<b>192</b>	0.14273075	0.57092301
<b>96</b>	0.12157536	0.48630143	<b>196</b>	0.14343282	0.5737313
<b>100</b>	0.12269854	0.49079417	<b>200</b>	0.14412511	0.28825021

El modelo de superposición modal fue recreado utilizando el modelo de la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados (SRSS). El modelo computacional realizó las combinaciones modales para llegar a obtener los elementos mecánicos que estas acciones realizarían en la edificación.

### Modelación del edificio

La modelación matemática de la estructura se realizó mediante la herramienta computacional ETABS. Se propusieron secciones iniciales las cuales fueron cambiadas a lo largo del proceso de diseño. En el presente anexo sólo se mostrarán las secciones resultantes del proceso de diseño, estas se presentan a continuación:

**Tabla B14. Elementos y secciones finales del diseño.**

<b>Elemento</b>	<b>Sección</b>
<b>Columna</b>	Cajón cuadrado 1 m y 1 1/2" de espesor
<b>Contraviento</b>	Cajón rectangular 30 cm por 20 cm y 3/4" de espesor
<b>Viga Primaria</b>	IR 21"x150.4 Kg/m
<b>Viga Secundaria</b>	IR 18"x 113.2 Kg/m
<b>Losa</b>	Losa maciza de 15 cm de peralte y varillas de #3@10cm

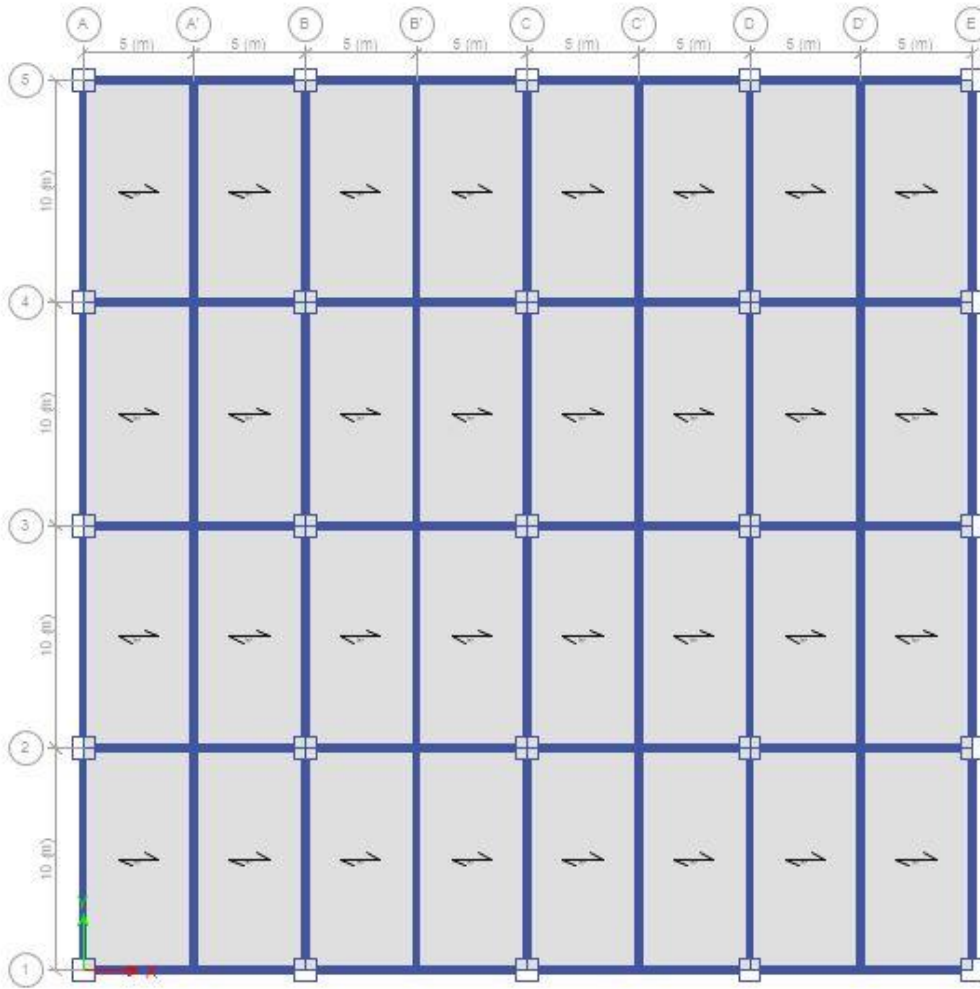


Figura B29. Planta tipo de la estructura.

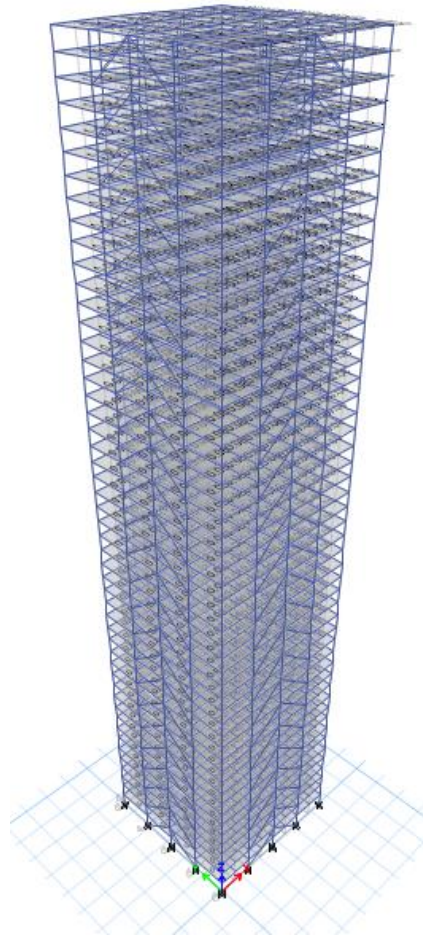


Figura B30. Vista isométrica del modelo reticular.

Del análisis estructural se pudieron obtener las siguientes propiedades dinámicas, éstas fueron obtenidas con las secciones finales del proceso de diseño, las formas modales así como sus factores de participación se presentan en la **Tabla B10**.

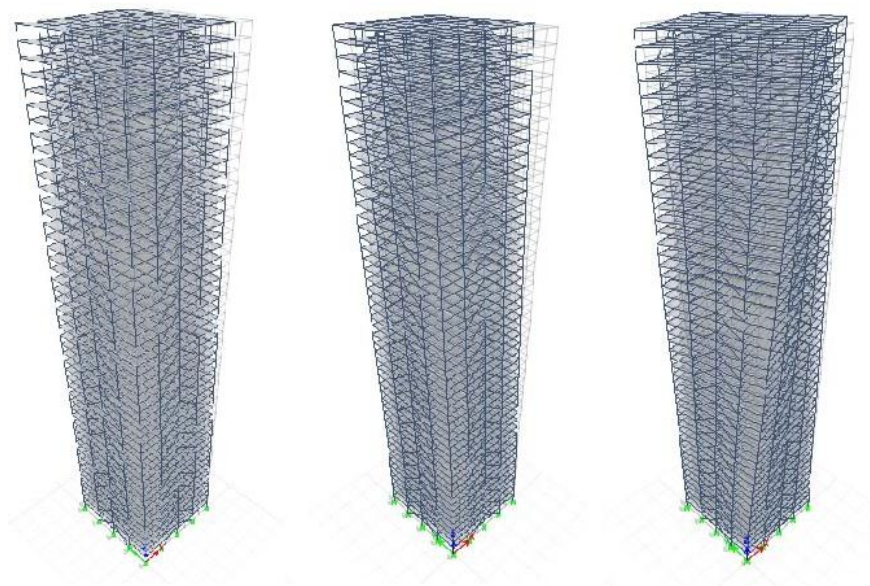


Figura B31. Primeros 3 Modos de vibración. Se presentan los primeros modos de translación en sus dos ejes principales y el primer modo de rotación.

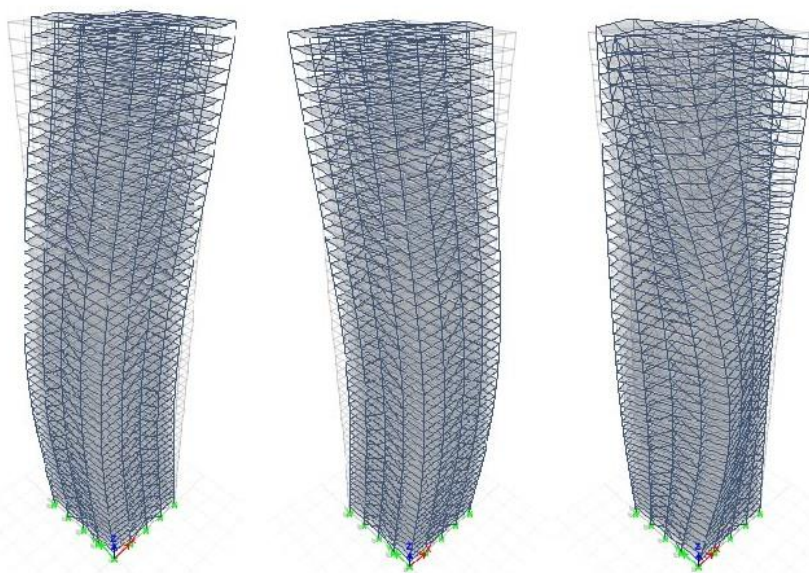


Figura B32. Primeros 3 Modos de vibración. Se presentan los segundos modos de translación en sus dos ejes principales y el segundo modo de rotación.

Se realizó un análisis modal una vez de obtuvieron las secciones finales de los elementos, así mismo se realizaron las asignaciones a las losas de las masas que se presentarán en los eventos de naturaleza accidental, así mismo se aceptó que las losas logran cumplir un comportamiento de diafragma por lo que se realizaron las asignaciones modales correspondientes.

Tabla B15. Períodos y factores de participación de los primeros 20 modos

CASE	MODO	PERÍODO	UX	UY	RZ	SUM UX	SUM UY	SUM RZ
		(s)						
MODAL	1	8.567	0.711	0	0	0.711	0	0
MODAL	2	8.559	0	0.7111	0	0.711	0.7111	0
MODAL	3	5.122	0	0	0.719	0.711	0.7111	0.719
MODAL	4	2.346	0.1579	0	0	0.8688	0.7111	0.719
MODAL	5	2.345	0	0.1578	0	0.8688	0.8689	0.719
MODAL	6	1.482	0	0	0.1524	0.8688	0.8689	0.8714
MODAL	7	1.189	0.0493	0	0	0.9181	0.8689	0.8714
MODAL	8	1.189	0	0.0492	0	0.9181	0.9181	0.8714
MODAL	9	0.789	0.0226	0	0	0.9406	0.9181	0.8714
MODAL	10	0.789	0	0.0226	0	0.9406	0.9407	0.8714
MODAL	11	0.765	0	0	0.0501	0.9406	0.9407	0.9215
MODAL	12	0.587	0.0126	0	0	0.9532	0.9407	0.9215
MODAL	13	0.587	0	0.0126	0	0.9532	0.9532	0.9215
MODAL	14	0.51	0	0	0.0226	0.9532	0.9532	0.9442
MODAL	15	0.466	0.0081	0	0	0.9613	0.9532	0.9442
MODAL	16	0.466	0	0.0081	0	0.9613	0.9613	0.9442
MODAL	17	0.385	0	0.0057	0	0.9613	0.9671	0.9442
MODAL	18	0.385	0.0057	0	0	0.9671	0.9671	0.9442
MODAL	19	0.382	0	0	0.0125	0.9671	0.9671	0.9566
MODAL	20	0.327	0	0.0043	0	0.9671	0.9713	0.9566

Las cargas sísmicas fueron calculadas utilizando el método de superposición modal considerando el tipo de suelo (Tipo 1). Debido a que el sistema estructural tiene contravientos concéntricos es posible utilizar un factor de comportamiento sísmico (Q) de 3, este sistema estructural, así como la distribución de planta fueron planteados de manera que se cumplen los requisitos 5.2 de las NTC para Diseño de Sismo (Federal, 2004).

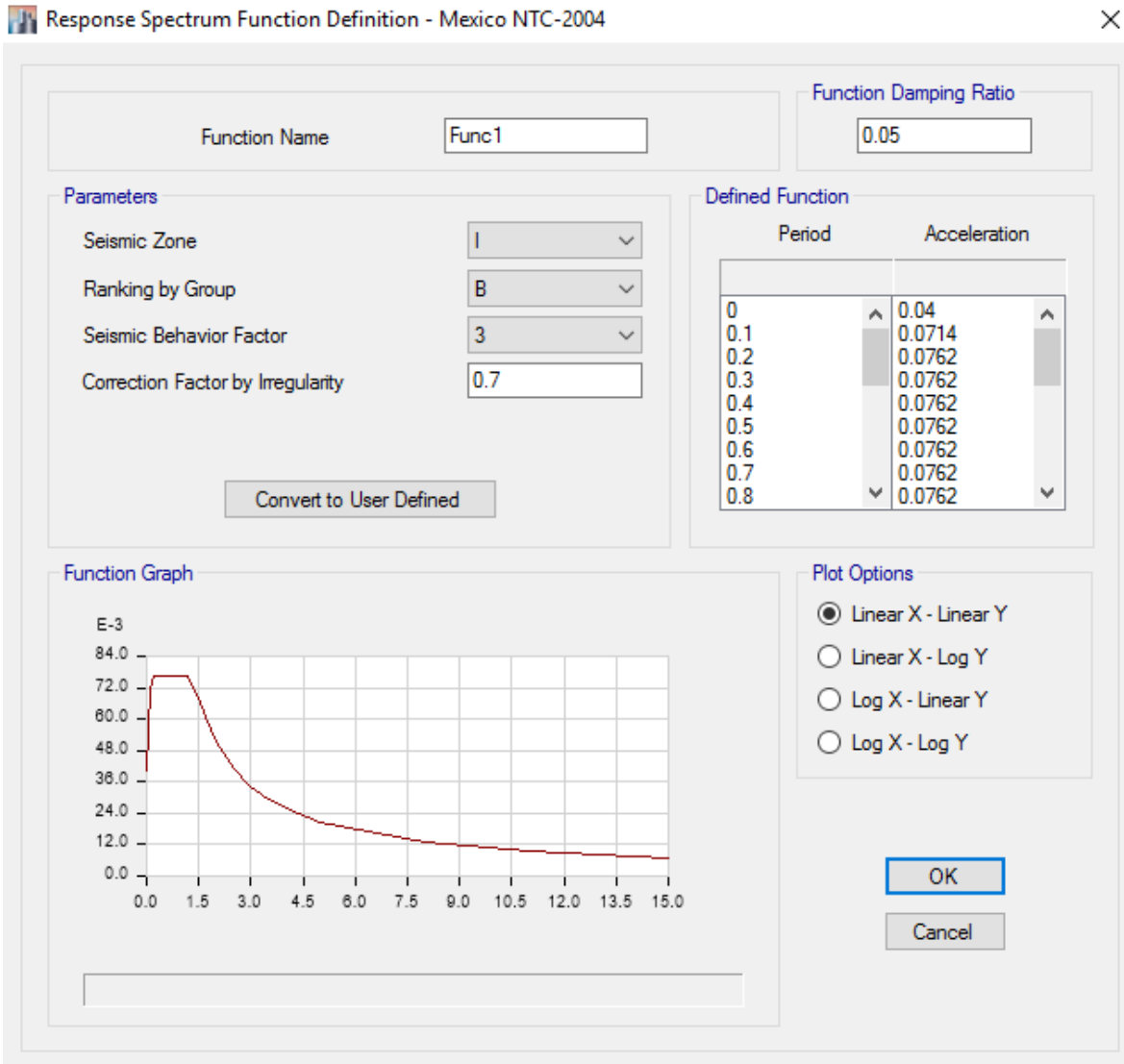


Figura B33. Parámetros seleccionados para el análisis modal-espectral efectuado por el programa de cómputo.

## Diseño estructural

El proceso de diseño se limitó a 4 elementos principales, las vigas primarias, las vigas secundarias, las columnas y los contravientos concéntricos. Por efectos de simplicidad se utilizaron perfiles comerciales laminados.

### Vigas.

Para realizar los análisis del comportamiento de los elementos viga se requirieron las siguientes propiedades de las secciones.



Tabla B16. Propiedades geométricas de la sección

Sección	Propiedad								
	A <sub>t</sub> (cm <sup>2</sup> )	I <sub>x</sub> (cm <sup>4</sup> )	I <sub>y</sub> (cm <sup>4</sup> )	S <sub>x</sub> (cm <sup>3</sup> )	S <sub>y</sub> (cm <sup>3</sup> )	Z <sub>x</sub> (cm <sup>3</sup> )	Z <sub>y</sub> (cm <sup>3</sup> )	J(cm <sup>3</sup> <sup>4</sup> )	C <sub>a</sub> (cm <sup>6</sup> )
21"	192.3	100729	10323	3720	660	4146	1011	217	7035640
18"	143.9	55359	6327	2393	452	2672	692	118	3141870

Con estas propiedades se pudo realizar el cálculo de los elementos mecánicos resistentes considerando las condiciones de carga, distribución de elementos mecánicos y características geométricas propias del elemento.

Al clasificar las secciones de acuerdo a la esbeltez local de las partes de la sección se llegó a que ambas secciones pueden ser catalogadas como secciones **Tipo 1**, por lo que se logran comportamientos plásticos adecuados para Factores de comportamiento sísmico de 3. Aunque las solicitaciones gravitacionales fueron consideradas bajo un diseño elástico. El diseño a flexión fue regido por las siguientes expresiones.

$$M_p = F_R Z_x F_y \quad (B 1)$$

$$M_y = F_R S_x F_y \quad (B 2)$$

Para ambos casos  $F_R$  se toma como el factor de resistencia, para la flexión se contempla un valor de **0.9**, de esta forma se puede llegar a la siguiente tabla comparativa, en la siguiente tabla se presentan las relaciones entre los elementos mecánicos y las resistencias últimas para distintas consideraciones.

Tabla B17. Eficiencia en vigas diseñadas.

Elemento	Flexión Elástica (%)	Resistencia Plástica (Ton x M)	Cortante (%)	Axial y Flexión (%)	Deflexión
IR 21"	82.54%	115.00	24.24%	84.90%	17.94%
IR 18"	51.27%	61.76	86.74%	63.10%	75.56%

### Contravientos.

El diseño de los contravientos fue bajo la premisa de obtener un tipo de comportamiento de un **elemento robusto**, esto se puede ver al saber que su relación de esbeltez global (83) es menor a la máxima tolerada (90). La relación de esbeltez local proporcionó una categorización de la sección **Tipo 1**, esto se obtuvo realizando la comparación entre la relación  $b/t$  que se tiene el valor máximo para el tipo de sección y la función que realiza en la estructura. La resistencia a la compresión se encuentra dada bajo las expresiones B3, B4.

$$\lambda_c = \frac{kL}{r\pi} \sqrt{\frac{F_y}{E}} \quad (B 3)$$

$$P_c = F_R A_T \begin{cases} (0.658^{\lambda_c^2}) F_y, & \lambda_c \leq 1.5 \\ (0.877/\lambda_c^2) F_y, & \lambda_c > 1.5 \end{cases} \quad (B 4)$$

Donde el **Factor de Resistencia** toma un valor de **0.85**, las propiedades de la sección se presentan en la tabla.

**Tabla B18. Propiedades geométricas de la sección**

Sección	Propiedad		
	A <sub>t</sub> (cm <sup>2</sup> )	r <sub>x</sub> (cm)	r <sub>y</sub> (cm)
<b>Primaria</b>	192	101100	10400
<b>Secundaria</b>	135	24800	8100

Conociendo la longitud del elemento (**6.40m**) se pudo llegar a la carga máxima resistente a compresión del elemento. La eficiencia de este elemento es de **84.50%**.

#### Columnas.

Para el cálculo del comportamiento de las columnas es importante considera que la ductilidad del sistema, esta se acepta de una magnitud de **3**. Los desplazamientos, distorsiones y demás deformaciones serán multiplicados por este valor para la obtención de dichos efectos en sus magnitudes reales. Las propiedades de la sección son las siguientes.

**Tabla B19. Propiedades geométricas de la sección**

Sección	Propiedad							
	A <sub>t</sub> (cm <sup>2</sup> )	I <sub>x</sub> (cm <sup>4</sup> )	I <sub>y</sub> (cm <sup>4</sup> )	S <sub>x</sub> (cm <sup>3</sup> )	S <sub>y</sub> (cm <sup>3</sup> )	Z <sub>x</sub> (cm <sup>3</sup> )	Z <sub>y</sub> (cm <sup>3</sup> )	J(cm <sup>3</sup> )
<b>1x3/2"</b>	1466	2264000	2264000	45280	45280	52900	52900	33909

**Tabla B20. Propiedades geométricas y parámetros de diseño de las NTC.**

Sección	Propiedad								
	T <sub>w</sub> (cm)	B <sub>w</sub> (cm)	C <sub>a</sub> (cm <sup>6</sup> )	N	K <sub>xy</sub>	λ	Q	P <sub>e2</sub> (KTON)	P <sub>se2</sub> (KTON)
<b>1x3/2"</b>	100	3.81	0	1.4	1	0.134	3	284.92	7123

A este elemento se le realizó la revisión de sus extremos y del elemento completo. La revisión de extremos se realizó con el uso de las expresiones B5 y B6.

$$B_2 = \frac{1}{1 - \left( \frac{P_{su}}{P_{se2}/Q} \right)} \quad (B 5)$$

$$M_{uo\left(\frac{x}{y}\right)\left(\frac{B}{A}\right)} = M_{tio\left(\frac{x}{y}\right)\left(\frac{B}{A}\right)} + B_2 M_{tp\left(\frac{x}{y}\right)\left(\frac{B}{A}\right)} \quad (B 6)$$

Realizando este procedimiento para los dos extremos y para las dos direcciones principales de la sección se puede realizar la revisión formalmente con la siguiente expresión.

$$\frac{P_u}{F_R P_y} + \left| \frac{0.85 M_{uo(x/y)(B/A)}}{F_R M_{px}} \right| + \left| \frac{0.8 M_{uo(y/x)(B/A)}}{F_R M_{py}} \right| \leq 1 \quad (B 7)$$

La revisión de la columna completa se realizó mediante un procedimiento semejante en el cual se tiene que calcular el valor de  $M_{uo(x/y)(B/A)}$  pero esta vez considerando los efectos de la variable  $B_1$  en el elemento a diseñar.

$$B_1 = \frac{1}{1 - \left( \frac{C}{F_R P_{e1}} \right)} \quad (B 8)$$

Donde C es el un valor en función de la configuración de momentos que afectan al elemento en sus dos extremos y el valor del  $M_m$  (Momento principal).

$$M_{uo(x/y)(B/A)} = B_1 \left( M_{tio(x/y)(B/A)} + B_2 M_{tp(x/y)(B/A)} \right) \quad (B 9)$$

Con estos valores se pueden obtener las relaciones de los momentos principales y el perpendicular a este, finalmente se realizar la revisión completa con la siguiente expresión, la cual es semejante a la utilizada en la revisión anterior.

$$\frac{P_u}{R_c} + \left| \frac{M_{uo(x/y)a}}{M_m} \right| + \left| \frac{M_{uo(y/x)a}}{F_R M_{p(y/x)}} \right| \leq 1 \quad (B 10)$$

Por se realizó la comparación entre las distorsiones de entrepiso que se presentan (estas fueron afectadas por el factor de Q para poder obtener las reales) así como los desplazamientos laterales debido a las condiciones que involucran eventos sísmicos. De igual forma se realizaron las evaluaciones para condiciones de viento, pero para este fenómeno se aceptó una ductilidad de 1 por lo que no se vieron afectadas las fuerzas ni los desplazamientos que se presentan debido a este tipo de fuerza.

En el caso del modelo utilizado en las iteraciones, este sufrió una modificación geométrica para poder presentar el volumen necesario para poder dar cabida a la masa del sistema disipador

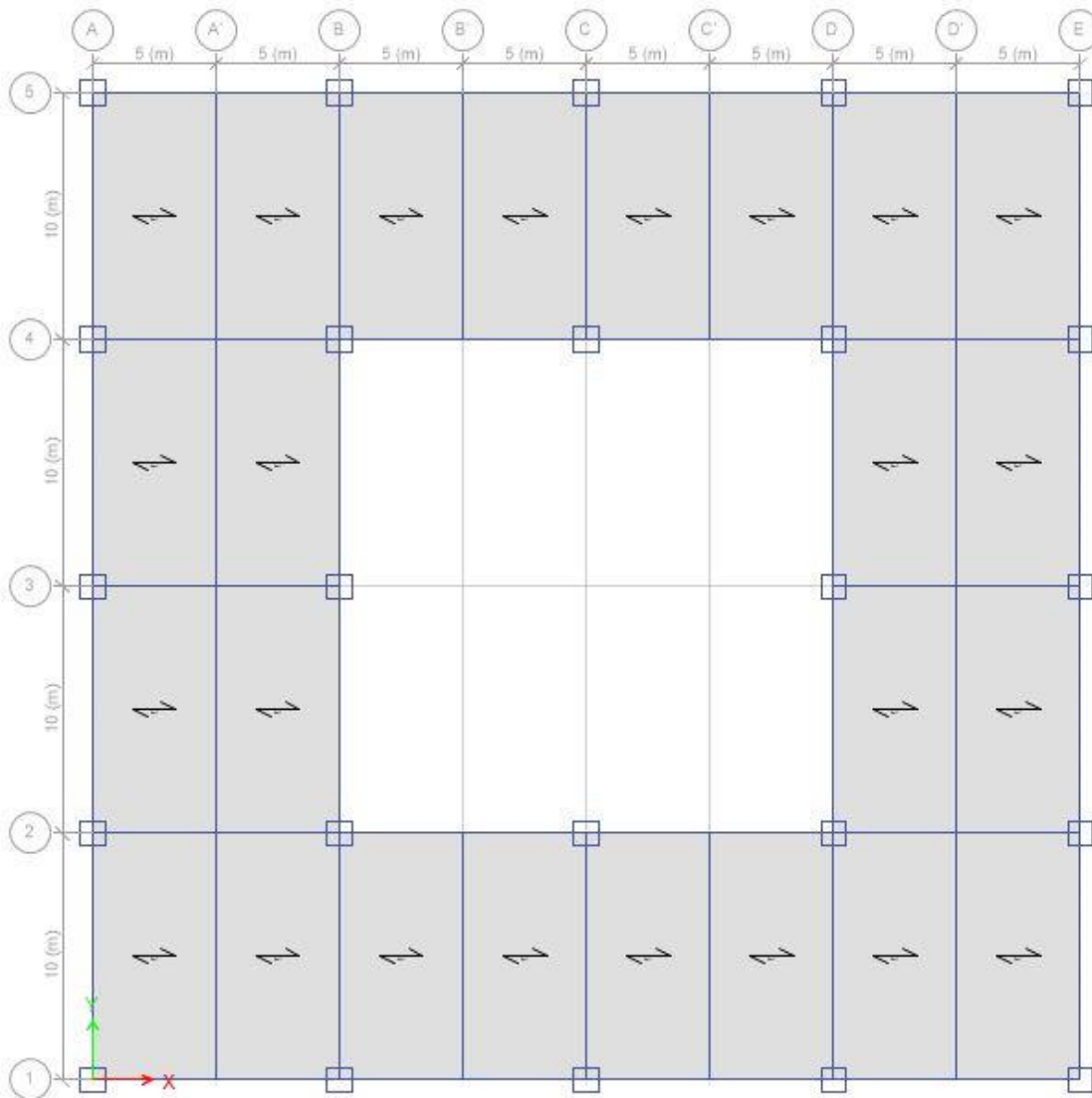


Figura B34. Planta adaptada para albergar a la MSR.

### Revisión del comportamiento dinámico ante cargas dinámicas de viento.

Conociendo las características dinámicas de la estructuración final, así como el comportamiento estático que puede presentar es posible obtener una aproximación de las aceleraciones máximas que se pueden esperar debido a cargas de viento.

Tabla B21. Parámetros para cálculo de aceleraciones.

Propiedad	$N_w(\text{Hz})$	$N_d(\text{Hz})$	$B_w(\text{cm}^4)$	$\beta_D(\text{Ns/m})$	S	F	$Z_1(\text{m})$	$N_1(-)$	$A_1(-)$	$C_e(-)$
Magnitud	0.117	0.117	0.015	0.015	0.1	0.31	200	0.5	20	2.5

Tabla B22. Parámetros para el cálculo de aceleraciones.

Propiedad					
	$\rho_B$ (Kg/m <sup>2</sup> )	$\Delta$ (m)	W(m)	D(m)	$V_h$ (m/s)
<b>Magnitud</b>	0.117	0.271	40	40	40.93

$$g_p = \sqrt{2\ln(3600N_D)} + \frac{1}{\sqrt{2\ln(3600N_D)}} \quad (\text{B 11})$$

El desplazamiento que se presenta con anterioridad es el que se presentaría a la altura H que se especifica, esta sería la velocidad  $V_h$ . El primer paso fue la obtención del factor pico, con la expresión B11, los siguientes valores que se calcularon fueron el valor experimental  $a_r$  y el factor ráfaga, estos valores se obtuvieron con las siguientes B12 y B13.

$$a_r = 0.0785 \left( \frac{V_h}{n_w \sqrt{WD}} \right)^{3.3} \quad (\text{B 12})$$

$$C_g = 1 + g_p \sqrt{\frac{K}{C_E} \left( B + \frac{SF}{\beta_D} \right)} \quad (\text{B 13})$$

Finalmente, con estos valores fue posible obtener las aceleraciones esperadas en las direcciones principales de estudio, las expresiones utilizadas para el caso paralelo y perpendicular respectivamente, para esto se utilizaron las expresiones B14 y B15 respectivamente.

$$a_w = f_{nW}^2 g_p \sqrt{WD} \frac{a_r}{\rho_B g \sqrt{\beta_w}} \quad (\text{B 14})$$

$$a_D = 4\pi^2 f_{nD}^2 g_p \sqrt{\frac{KSF}{C_E \beta_D} \frac{\Delta}{C_g}} \quad (\text{B 15})$$

Las aceleraciones máximas encontradas fueron de **11.25 mg** y **66.19 mg** para las direcciones paralelas y perpendiculares respectivamente.

## Anexo C: Uso de Ansys APDL y MathLab

### Amortiguación de Rayleigh

Ansys APDL utiliza el modelo propuesto por John William Strutt, 3er Barón Rayleigh como modelo de amortiguación para la simulación del déficit energético que se presenta en la estructura principal. Este modelo propone que la amortiguación es proporcional a la masa y a la rigidez

$$c = a_0 m + a_1 k \quad (\text{C } 28)$$

Donde  $a_0$  y  $a_1$  tienen como unidades  $s^{-1}$  y  $s$  respectivamente. La proporcionalidad con la rigidez se relaciona con la disipación energética derivada a la deformación que se presenta en el edificio, en caso contrario la proporcionalidad con la masa no se puede justificar de manera tan sencilla físicamente. La fracción de amortiguamiento que se presenta en el modo  $n$  del sistema se puede presentar como:

$$\zeta_n = \frac{a_0}{2} \frac{1}{\omega_n} + \frac{a_1}{2} \omega_n \quad (\text{C } 29)$$

Con la interacción de los modos  $i$  y  $j$  con sus fracciones de amortiguamiento, del sistema de ecuaciones que se establece con la interacción modal se puede llegar a los siguientes valores

$$a_0 = \zeta \frac{2\omega_i\omega_j}{\omega_j + \omega_i} \quad (\text{C } 30)$$

$$a_1 = \zeta \frac{2}{\omega_j + \omega_i} \quad (\text{C } 31)$$

La elección de los modos debe ser tal que los valores sean razonables para las fracciones de amortiguamiento en todos los modos que aportan de manera importante a la respuesta (Chopra A. , 2014).

### Ansys APDL

El algoritmo de malla que fue presentado en la metodología implica la realización de una cantidad importante de procesos analíticos, debido al tiempo de cómputo y a la necesidad de tener una libertad mayor el proceso de modelación se realizó en el programa de ingeniería asistida Ansys APDL. Se presentan a continuación los parámetros que se consideraron en el modelado de acuerdo a las disposiciones que puede ofrecer dicho programa.

La modelación geométrica, configuración del análisis y la escritura de los resultados se realizó mediante el uso de un archivo de texto, en este archivo se redactó un pseudocódigo. El pseudocódigo se estructura por espacios, todos los elementos son tomados como elementos tipo carácter exceptuando cuando un signo de exclamación terminal (!) se presenta, se toman el contenido subsiguiente como elementos tipo cadena. Para el uso del programa es necesario el uso de varios procesadores, cada uno de ellos es una "etapa" del análisis, sirven para poder dar validez a ciertos comandos o para que estos tengan ciertas variaciones u opciones específicas debidas al procesador seleccionado. El primero comando (*/Title*) se utiliza para indicar el nombre del proceso. El primer procesador que se introduce es */Prep7*, en este se presentan los parámetros de la creación del modelo. Cada uno de los comandos que se emplean se puede encontrar en la ayuda del programa, así como sus características y referencias teóricas.

```

/TITLE
/PREP7
!!      Análisis modal de edificio de 50 pisos.

```

Figura C35. Inicio de rutina

Los primeros comandos que se emplean son los de “Element Type” (ET) que se utilizan para declarar el uso de cierto tipo de elemento y asignándole un número de identificador, algunos de estos pueden tener “Key Options” (KOpt) que asignan alguna forma de comportamiento o limitan algunos parámetros. Se utilizarán elementos tipo *Beam4* para la modelación de barras (columnas, vigas primarias y secundarias y contravientos), elementos tipo *Shell28* para la modelación de las losas así como la asignación de la masas que se presentan de manera reglamentaria, elementos tipo *Mass21* para la asignación de la a utilizar en el sistema de la MSR y el elemento *Combin14* como el elemento que otorgue la rigidez y la amortiguación a la MSR.

```

!!      Se declaran los elementos utilizar
!!      Tipo de E.   Número      Elemento      KOpt(1)      KOpt(2)      KOpt(3)      KOpt(4)
ET      ,          1      ,      Beam4
!      ET      ,          2      ,      Shell181      ,      0
ET      ,          2      ,      Shell28      ,      0
ET      ,          3      ,      Mass21      ,      0      ,      0      ,      0
ET      ,          4      ,      Link180
ET      ,          5      ,      Combin14      ,      0      ,      0      ,      0

!!      Se declaran las constantes reales a utilizar
!!      C. Real     #          C1          C2          C3          C4          C5          C6
R      ,          1      ,      0.1466      ,      0.02264      ,      0.02264      ,      ,      ,      0
R      ,          2      ,      0.0192      ,      0.00101      ,      0.0001      ,      ,      ,      0
R      ,          3      ,      0.0176      ,      0.0002      ,      0.0001      ,      ,      ,      ,
R      ,          4      ,      0.15      ,      ,      210      ,      ,      ,      ,
R      ,          5      ,      2.3e6      ,      0      ,      0      ,      0      ,      0
R      ,          6      ,      1.447e6      ,      7.641e4

```

Figura C36. Estructura general del Pseudocódigo

El siguiente comando es el de “Real Constant” (R) en el que se presentan valores necesarios para poder caracterizar el comportamiento de los elementos que se han seleccionado. Dependiendo de la posición que presente cada magnitud es la variable a la que será asociada. Estas varían en función de cada elemento, las magnitudes de estos valores así como su justificación se presentan en el Anexo B.

```

!!      Propiedades de los Materiales

!!      Acero A50
!!      Material P.      Propiedad      #          Valor
MP      ,      Ex      ,      1      ,      2E+11
MP      ,      Prxy      ,      1      ,      0.3
MP      ,      Dens      ,      1      ,      7850

!!      Concreto F'c 250
MP      ,      Ex      ,      2      ,      69000000000
MP      ,      Prxy      ,      2      ,      0.3
MP      ,      Dens      ,      2      ,      2400

```

Figura C37. Materiales a utilizar

El siguiente comando utilizando es el de “Material Properties” (MP), con este se le asigna una propiedad a un material al que se le asigna un identificador y una magnitud. Las magnitudes no asignadas se tomarán como nulas. Se asignan las propiedades del módulo de elasticidad (Ex), la razón de proporcionalidad (Prxy) y la densidad del material (Dens) en unidades del Sistema

Internacional. Se finaliza el uso del procesador con el comando *Finish* y se mallan los elementos que se hayan declarado. Se emplea *D* para asignar los los grados de libertad a restringir para los nodos en los apoyos. Se utilizan *\*Dim,\*Vlen* y *\*VRead* para crear un vector, asignar su tamaño y para asignar los valores que se encuentren en un archivo de texto, el cual es introducido en este comando, respectivamente. Para poder realizar la lectura de los vectores, los cuales serán las fuerzas que se asignarán a los nodos. Estas señales fueron generadas mediante el uso del método ARMA, este proceso se explica en el Anexo A.

Ahora se inicia el siguiente procesador, este es */Sol* en el cual se realiza la configuración del análisis a realizar. En este trabajo se realizaron análisis transitorios, estos son realizados con el método de Newmark. Aquí se presentan los valores de la amortiguación general de todos los elementos estructurales (excepto los asignados a al elemento *Combn14*, de igual manera se introducen todos los parámetros necesarios para la realización del análisis como en número de pasos, subpasos, diferenciales de tiempo así como el control de las iteraciones.

Para la obtención de los resultados así como su proceso se emplea el procesador */Post1* el cual se utiliza junto los comandos *\*Get,\*CFopen,\*Vwrite* y *\*CFclos* para obtener los valores que se deseen extraer, este proceso se utilizó para la obtención de los desplazamientos. Para el caso de las aceleraciones fue necesario recurrir a los comandos que se encuentran en */Post26*, específicamente *Vget* y *Nsol.\*Get* es el responsable de llamar a los resultados del procesador */Solu*, *\*CFopen* abre el archivo que en donde se colocarán los valores extraídos, y *VWrite* se encarga de la escritura de estos en el archivo seleccionado y para cerrar el archivo este archivo, para finalizar se cierra el archivo abierto con *\*CFclos*. Este proceso se realiza 1 vez en cada iteración.

```

/POST26
NSOL,2,2,A,X
STORE,MERGE
*GET,size,VARI,,NSETS
*DIM,A1,array,size
VGET,A1(1),2
*CFOPEN,Rf1Am1-S1,txt,C:/Resultados/Registros/N1/,APPENED
*VWRITE,A1(1)
(6x,1e12.5)
*CFCLOSE

NSOL,3,1022,A,X
STORE,MERGE
*GET,size,VARI,,NSETS
*DIM,A2,array,size
VGET,A2(1),3
*CFOPEN,Rf1Am1-S1,txt,C:/Resultados/Registros/N2/,APPENED
*VWRITE,A2(1)

```

Figura C38. Escritura de archivos de salida

Para finalizar se regresa al procesador */Solu* para reiniciar los archivos temporales y los parámetros establecidos en el análisis. (Ansys, 2014)

```

/SOLU
ANTYPE,TRANS,REST
*ENDDO
SOLVE
FINISH

```

Figura C39. Reinicio del análisis.



## Programación en MATLAB

La función de MATLAB en este trabajo fue el de generar las rutinas o líneas de comandos de manera iterativa y programada.

El código crea de manera iterativa rutinas con 3 variables las cuales se controlan con 3 ciclos ( $j, i$  y  $s$ ). El primero ( $j$ ) controlara las variaciones que se tienen en la relación de frecuencias del sistema y el disipador energético, el segundo ( $i$ ) controla la variación en la relación de amortiguación del sistema y el disipador. El ciclo último ciclo ( $s$ ) se encarga de la elección del número de la señal a estudiar, estas señales fueron de 600 valores cada una y

Se utilizaron los comandos *mkdir()* para la creación de directorios que se utilizaron para los datos de entrada y los de salida. Para la creación de cada uno de estos archivos se utilizó *fopen()* y para la escritura de estos se utilizó *fprintf()*, además de que se anexaron los comandos  $\backslash r \backslash n$  con la intención de dar un formato específico y por último *fclose()* (MathWorks, 2016). Se utilizó el comando *cd()* para cambiar la ubicación del directorio y se ejecutó Ansys con la ayuda de *dos()* además se le dieron órdenes específicas al programa con  $-b -i$  los cuales indican que se inicie el programa en modalidad de líneas de comandos y que lea el archivo de entrada mencionado en la línea de código, es justamente este archivo el que varió para cada iteración  $j, i, s$  (Miller, 2012). Al finalizar cada análisis, por parte de Ansys, se utilizó el comando *delete()* para borrar los archivos generados con el fin de ahorrar capacidad almacenamiento, los resultados deseados se guardan en una carpeta, en ella se almacenan los registros de aceleración y desplazamiento de cada una de los análisis.

Para la obtención de los valores máximos se realizó una lectura de los archivos de salida con *fopen* y *fscanf*, para abrir el archivo deseado y leer los datos respetivamente, además se usó *max()* y *abs()* para que obtener los valores máximos absolutos, los cuales se promediarían para cada nodo e iteración  $j, i$ , de la misma manera se guardan los valores máximos de cada iteración. Para finalizar el proceso se obtuvo la relación o porcentaje de disminución de aceleración y se fue escribiendo una matriz de  $j$  por  $i$  elementos, esta resulta ser la matriz de análisis de optimización, para la escritura de los valores de la matriz obtenida en el proceso en un archivo de texto se utilizó el comando *save()* y se utilizó  $-ascii$  como formato. Los valores comparativos para cada nodo se realizaron de manera semejante, utilizando el proceso antes mencionado, pero en este caso no se incluyó la existencia del amortiguador, estos valores fueron declarados como valores de entrada del análisis de optimización (MathWorks, 2016).

## Ejemplo del código

A continuación, se presenta un ejemplo de la sintaxis usada para la creación de los archivos de entrada que se emplearon para la realización de los análisis con el programa de ingeniería asistida. Este código no se encuentra completo y ha sido simplificado por lo que no representa una rutina completa.

```
%% Universidad Nacional Autónoma de México
% Análisis de optimización
clc;
clear all;
%Path de la carpeta donde se guardarán los inputs
PathIn=strcat('C:/Resultados/Inputs/AnalisisIx/');
mkdir(PathIn);
%Path de la carpeta donde se guardan los valores máximos
%Desplazamientos
PathMxU=strcat('C:/Resultados/Max/U/');
mkdir(PathMxU);
%Aceleraciones
PathMxA=strcat('C:/Resultados/Max/A/');
mkdir(PathMxA);
%Path de Aceleraciones/Desplazamientos base
PathBase=strcat('C:/Resultados/Inputs/ValoresBase/');
mkdir(PathBase);
%Parámetros
%Masa Modal (Kg)
MM=40414753.74;
%Frecuencia natural del modo asociado a la estructura (Hz)
Fne=(1/7.7559);
%Relación de masas
Rm=0.05;
%Relación de amortiguamiento de la estructura (estructura de Acero)
ChiE=0.01;
%Etiquetas de los nodos
N1=616;
N10=616;
%Valores Base de comparación
%Desplazamientos máximos Base
M1Bu=0.2423290;
M9Bu=0.2347240;
%Aceleraciones máximas Base
M1Ba=0.1912070;
M9Ba=0.1371380;
% Path de la carpeta donde se guardan los registros por nodos (cambiar
los
% números del 1 al 9, cuando se tengan los nodos finales.
PathN1=strcat('C:/Resultados/Registros/N1/');
PathN9=strcat('C:/Resultados/Registros/N9/');
mkdir(PathN1);
mkdir(PathN9);
%Número de iteraciones j (Rf)
Nj=1;
%Número de iteraciones i (Amortiguación)
Ni=10;
%Número total de iteraciones
NTi=Nj*Ni;
for j=2:2;
```

```

%Variables de la iteración j
%Relación de frecuencias
Rf=0.96;
%Frecuencia del amortiguador
Fna=Rf*Fne;
%Valor de la M del sistema amortiguador
Mmsr=Rm*MM;
Pfm=strcat('-Rf', num2str(j));
%Inicia el ciclo para los i valores a estudiar de amortiguación
NumElmSV=600;
%Es necesario que no haya registros previos para esta combinación (debido
%a que sólo leerá los siguientes "NumELmSV" valores en el archivo de
%resultados
for i=1:10;
    %Parámetros de la iteración
    Rc=0.01*i;
    Wna=2*pi*Fna;
    Wne=2*pi*Fne;
    Ce=ChiE*2*MM*Wne;
    C=Rc*Ce;
    K=Wna^2*Mmsr;
    for s=1:10
        %Se borra el registro pasado
        %Se crean los nombres de las rutas de la iteración I
        AmDir=strcat('-Am', num2str(i));
        PlantName=strcat('\In', Pfm, AmDir, '-S', num2str(s), '.inp');
        MaxDesp=strcat('MaxRf', num2str(i));
        UbiPlant=strcat(PathIn, PlantName);
        %Se crea el input
        fid=fopen(UbiPlant, 'w');
    %Se crea el modelo
    fprintf(fid, '/CLEAR\r\n');
    fprintf(fid, '/TITLE, BASE III\r\n');
    fprintf(fid, '/PREP7\r\n');
    fprintf(fid, '\r\n');
    fprintf(fid, strcat('/CWD, ', PathIn, '\r\n'));
    fprintf(fid, '\r\n');
    %Elementos
    fprintf(fid, 'ET, 1, Beam4\r\n');
    fprintf(fid, 'ET, 2, Shell28, 0\r\n');
    fprintf(fid, 'ET, 3, Mass21, 0, 0, 0\r\n');
    fprintf(fid, 'ET, 4, Link180\r\n');
    fprintf(fid, 'ET, 5, Combin14, 0, 0, 0\r\n');
    fprintf(fid, '\r\n');
    %Constantes Reales
    fprintf(fid, 'R, 1, 0.1466, 0.02264, 0.02264, , , 0\r\n');
    fprintf(fid, 'R, 2, 0.0192, 0.00101, 0.0001, , , 0\r\n');
    fprintf(fid, 'R, 3, 0.0176, 0.0002, 0.0001, , , \r\n');
    fprintf(fid, 'R, 4, 0.15, , 210, , , \r\n');
    fprintf(fid, strcat('R, 5, ', num2str(Mmsr), ', 0, 0, 0, 0\r\n'));
    fprintf(fid, strcat('R, 6, ', num2str(K), ', ', num2str(C), '\r\n'));
    fprintf(fid, '\r\n');
    %Propiedades de los materiales
    fprintf(fid, 'MP, Ex, 1, 200000000000\r\n');
    fprintf(fid, 'MP, Prxy, 1, 0.3\r\n');
    fprintf(fid, 'MP, Dens, 1, 7850\r\n');
    fprintf(fid, '\r\n');

```

```

fprintf(fid, 'MP, Ex, 2, 69000000000\r\n');
fprintf(fid, 'MP, Prxy, 2, 0.3\r\n');
fprintf(fid, 'MP, Dens, 2, 2400\r\n');
fprintf(fid, '\r\n');
%Nodos, Keypoint
fprintf(fid, '/INPUT, N, txt\r\n');
fprintf(fid, '\r\n');
fprintf(fid, '/INPUT, K, txt\r\n');
fprintf(fid, '\r\n');
%Elementos reticulares
fprintf(fid, '/INPUT, Er, txt\r\n');
fprintf(fid, '\r\n');
%Elementos losa
fprintf(fid, '/INPUT, El, txt\r\n');
fprintf(fid, '\r\n');
%En esta rutina no debe estar presente la MSR
  %MSR (Rigidez/Amortiguación)
  fprintf(fid, 'Type, 5\r\n');
  fprintf(fid, 'Real, 6\r\n');
  fprintf(fid, 'Mat, 2\r\n');
  fprintf(fid, 'En, 9998, 616, 565\r\n');
  fprintf(fid, '\r\n');
  %MSR (Masa)
  fprintf(fid, 'Type, 3\r\n');
  fprintf(fid, 'Real, 5\r\n');
  fprintf(fid, 'Mat, 2\r\n');
  fprintf(fid, 'En, 9999, 616\r\n');
  fprintf(fid, '\r\n');
%Apoyos
fprintf(fid, '/INPUT, A, txt\r\n');
fprintf(fid, '\r\n');
%Declaración de señales
fprintf(fid, strcat('/INPUT, S, txt\r\n'));
fprintf(fid, '\r\n');
%Mallado de elementos
fprintf(fid, 'Mesh, all\r\n');
fprintf(fid, '\r\n');
%Configuración del método de solución
fprintf(fid, '/SOL\r\n');
fprintf(fid, 'ANTYPE, TRANS\r\n');
fprintf(fid, 'TRNOPT, FULL\r\n');
fprintf(fid, 'LUMPM, 1\r\n');
fprintf(fid, 'ALPHAD, 0.012431\r\n');
fprintf(fid, 'BETAD, 0.005746\r\n');
fprintf(fid, 'AUTOTS, ON\r\n');
fprintf(fid, 'OUTRES, ALL, LAST\r\n');
fprintf(fid, 'OUTRES, V, LAST\r\n');
fprintf(fid, 'OUTRES, A, LAST\r\n');
fprintf(fid, 'TIME, 0\r\n');
fprintf(fid, '\r\n');
%Aceleración de la gravedad
fprintf(fid, 'ACEL, 0, 9.81, 0\r\n');
fprintf(fid, '\r\n');
%Ciclo del análisis trascendente
fprintf(fid, strcat('*DO, I, ', num2str(600*(s-
1)+1), ', ', num2str(600*(s)), '\r\n'));
fprintf(fid, '\r\n');

```

```

%Señales
fprintf(fid, 'F,1274,FX,Vector1(I)\r\n');
fprintf(fid, 'F,1017,FX,Vector250(I)\r\n');
fprintf(fid, '\r\n');
fprintf(fid, 'KBC,1\r\n');
fprintf(fid, 'TIME,0.1*I\r\n');
fprintf(fid, 'DELTIM,0.1\r\n');
fprintf(fid, 'SOLVE\r\n');
fprintf(fid, '\r\n');
%Post-procesador (/Post1)
fprintf(fid, '/POST1\r\n');
%Desplazamientos del Nodo 1
fprintf(fid, strcat('*GET,Ux,NODE,', num2str(N1), ',U,X\r\n'));
fprintf(fid, strcat('*CFOPEN,Rf', num2str(j), 'Um', num2str(i), '-
S', num2str(s), ',txt', ',PathN1, ', APPENED\r\n'));
fprintf(fid, '*VWRITE,Ux\r\n');
fprintf(fid, '(1e12.5,3x)\r\n');
fprintf(fid, '*CFCLOSE\r\n');
fprintf(fid, '\r\n');
%Post-procesador (/Post26)
fprintf(fid, '/POST26\r\n');
%Aceperaciones del Nodo 1
fprintf(fid, strcat('NSOL,2,', num2str(N1), ',A,X\r\n'));
fprintf(fid, 'STORE,MERGE\r\n');
fprintf(fid, '*GET,size,VARI, NSETS\r\n');
fprintf(fid, '*DIM,A1,array,size\r\n');
fprintf(fid, 'VGET,A1(1),2\r\n');
fprintf(fid, strcat('*CFOPEN,Rf', num2str(j), 'Am', num2str(i), '-
S', num2str(s), ',txt', ',PathN1, ', APPENED\r\n'));
fprintf(fid, '*VWRITE,A1(1)\r\n');
fprintf(fid, '(6x,1e12.5)\r\n');
fprintf(fid, '*CFCLOSE\r\n');
fprintf(fid, '\r\n');
%Se reinicia el análisis
fprintf(fid, '/SOLU\r\n');
fprintf(fid, 'ANTYPE,TRANS,REST\r\n');
fprintf(fid, '*ENDDO\r\n');
fprintf(fid, 'SOLVE\r\n');
fprintf(fid, 'FINISH\r\n');
fclose(fid);
end
end
end

```