



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR

FACULTAD DE INGENIERÍA

PLAN DE TITULACIÓN

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE:

MAGÍSTER EN INGENIERÍA CIVIL CON MENCIÓN EN ESTRUCTURAS

SISMORRESISTENTES

TEMA:

**“APLICACIÓN INTERACTIVA PARA EL ANÁLISIS SIMPLIFICADO DE
AMORTIGUADORES DE MASA SINTONIZADA EN EDIFICIOS DE CORTE (2D)”**

AUTORES:

ING. FÉLIX PATRICIO NAVIA GARCÍA

ING. BRYAN DAVID GUZMÁN RUANO

TUTOR:

ING. CARLOS ANDRÉS CELI SÁNCHEZ. MGTR.

QUITO, FEBRERO 2026

RESUMEN

El programa desarrollado constituye una herramienta orientada a evaluar la respuesta dinámica de sistemas estructurales simplificados (2D) que son equipados con Amortiguador de Masa Sintonizada (AMS) bajo excitaciones dinámicas, mediante análisis tiempo historia lineal (registros escalados a un peligro sísmico de 43 años).

El aplicativo permite cuantificar los parámetros óptimos del AMS (masa, rigidez), lo que contribuye a valorar la efectividad en el control de vibraciones. Adicionalmente, la herramienta permite la visualización gráfica de resultados, facilitando la interpretación y su aplicación en el contexto académico y de investigación.

Dentro de este documento se ofrece la guía de usuario para su uso, además de mostrar la validación de resultados obtenidos en ETABS.

PALABRAS CLAVE: AMS, DINÁMICA, MODAL, PYTHON, RIGIDEZ.

ABSTRACT

The developed program constitutes a tool aimed at evaluating the dynamic response of simplified (2D) structural systems equipped with a Tuned Mass Damper (TMD) under dynamic excitations, through linear time-history analysis (records scaled to a seismic hazard of 43 years).

The application allows quantifying the optimal TMD parameters (mass, stiffness), which contributes to assessing its effectiveness in vibration control. Additionally, the tool enables graphical visualization of results, facilitating interpretation and its application in academic and research contexts.

Within this document, a user guide for its use is provided, in addition to showing the validation of results obtained in ETABS.

KEY WORDS: DYNAMIC, MODAL, PYTHON, STIFFNESS, TMD

DEDICATORIA

En este momento tan importante de mi vida, quiero dedicar este trabajo a las personas que han sido mi mayor apoyo en todo el camino. A mis queridos padres, Franklin y Elvia, gracias de corazón por su amor, su paciencia y por estar siempre a mi lado. Todo lo que he logrado hasta hoy ha sido posible gracias a ustedes, a su esfuerzo, a sus consejos y a la confianza que siempre depositaron en mí. Han sido mi ejemplo, mi motivación y mi fuerza en los momentos difíciles.

Al terminar esta etapa, quiero también reconocer a mi familia, porque cada paso que he dado no ha sido solo mío, sino el resultado del cariño, el respaldo y los valores que me han brindado. Este logro representa no solo un esfuerzo personal, sino todo lo que ustedes han sembrado en mí a lo largo de los años.

Gracias, papás, Franklin y Elvia, por ser el pilar fundamental de mi vida. Su amor y apoyo han sido el motor que me ha impulsado a seguir adelante y a no rendirme. Esta dedicatoria es una pequeña muestra de mi gratitud y agradezco a Dios por la bendición de tenerlos siempre conmigo.

Bryan David Guzmán Ruano

DEDICATORIA

Le dedico este trabajo en primer lugar a Dios, por ponerme buenas personas a lo largo de mi vida que han puesto su grano de arena en mí y ha formado la persona que soy. A mi esposa Jhoany que ha estado junto a mí en cada paso y me ha dado su amor, alegría y confianza para lograr este objetivo. A mi Padres, Augusto y Cecilia, gracias por brindarme siempre el apoyo a lo largo de mi vida, demostrando su amor por verme crecer. A mis Hermano Cesar David y Cesar Augusto, por siempre estar junto a mí, así sea a la distancia.

Félix Patricio Navia García.

AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mi sincero agradecimiento a la Pontificia Universidad Católica del Ecuador, institución que me ha permitido continuar mi formación académica y crecer tanto a nivel profesional como personal. Ha sido un honor formar parte de esta comunidad, donde he tenido la oportunidad de fortalecer mis conocimientos y enfrentar nuevos retos que han enriquecido mi trayectoria.

Agradezco de manera especial a los docentes que, con su experiencia, compromiso y vocación, contribuyeron significativamente a mi proceso de aprendizaje. Sus enseñanzas, consejos y reflexiones han sido fundamentales en mi desarrollo y en la consolidación de mis capacidades.

Deseo expresar un agradecimiento muy especial a mi tutor, el Ing. Carlos Celi, por su apoyo, orientación y disposición durante el desarrollo de este trabajo. Su guía, paciencia y valiosos aportes fueron esenciales en cada etapa de la investigación. Gracias por compartir su conocimiento, por sus observaciones y por su constante acompañamiento académico.

Bryan David Guzmán Ruano

AGRADECIMIENTO

Mi sincero agradecimiento a la Pontifica Universidad Católica del Ecuador, por ser la vía para conocer a excelentes profesores que contribuyeron en mí, con su conocimiento y las ansias de investigar más, para aprender más, no hay mejor regalo que el de la curiosidad.

Gracias el Ing. Carlos Celi, por permitirnos estar bajo su tutoría, mostrando su conocimiento en todo momento y dejándonos como enseñanza que el rigor es la clave del éxito profesional.

A todos mis compañeros de Trabajo, por darme su apoyo para poder culminar esta etapa académica.

Félix Patricio Navia García.

INDICE DE CONTENIDOS

1. INTRODUCCION.....	15
1.1. JUSTIFICACIÓN	15
1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	15
1.3. OBJETIVOS	16
1.3.1 OBJETIVO GENERAL	16
1.3.2 OBJETIVO ESPECIFICO	16
1.4. ALCANCE.....	17
2. MARCO TEORICO	18
2.1. DINAMICA ESTRUCTURAL DE EDIFICACIONES	18
2.2. MARCO CONCEPTUAL	18
2.2.1 ANÁLISIS LINEAL DINÁMICO.....	18
2.2.2 MÉTODO DE BETA DE NEWMARK	18
2.2.3 AMORTIGUADOR DE MASA SINTONIZADA	19
2.2.4 MÓDULO DE ELASTICIDAD	19
2.2.5 COEFICIENTE DE POISSON	19
2.2.6 TEORIA DE VIGAS BERNOULLI-EULER	20
2.2.7 TEORIA DE VIGAS TIMOSHENKO.....	20
2.2.8 VALORES Y VECTORES PROPIOS	21
2.2.9 SOFTWARE DE ANÁLISIS PYTHON	22
2.2.10 NUMPY	22

2.2.11	SCIPY.....	22
2.2.12	MATPLOTLIB.....	22
2.2.13	STREAMLIT	22
2.2.14	GITHUB.....	22
3.	METODOLOGÍA DE MODELACIÓN Y ANÁLISIS.....	24
3.1.	MODELACIÓN DE EDIFICIOS DE CORTE 2D	24
3.1.1	CONSTRUCCIÓN DE LA GEOMETRÍA INICIAL	24
3.1.2	MATRICES DE MASA, RIGIDEZ Y AMORTIGUAMIENTO	24
3.1.2.1	MATRIZ DE MASA	25
3.1.2.2	MATRIZ DE RIGIDEZ	25
3.1.2.3	MATRIZ DE AMORTIGUAMIENTO.....	26
3.2.	MODELACIÓN DE PROPIEDADES DEL AMORTIGUADOR DE MASA SINTONIZADA	27
3.2.1	INTEGRACION DEL AMS AL SISTEMA ESTRUCTURAL.....	29
3.2.1.1	INTEGRACIÓN DE LA MASA DEL AMS	29
3.2.1.2	INTEGRACION DEL LA RIGIDEZ DEL AMS	29
3.2.1.3	INTEGRACION DEL AMORTIGUAMIENTO DEL AMS.....	30
3.3.	CÁLCULO DE LA RESPUESTA TIEMPO-HISTORIA EN SISTEMAS DE MULTIPLES GRADOS DE LIBERTAD	31
3.4.	PARÁMETROS OPTIMOS DE AMS PARA UN REGISTRO SISMICO EN SISTEMAS LINEALES	33

3.4.1	SISTEMAS LINEALES DE DOS GRADOS DE LIBERTAD ANTE FUERZA ARMONICA.....	33
3.4.2	SISTEMAS LINEALES DE MULTIPLES GRADOS DE LIBERTAD ANTE REGISTRO SISMICO.....	34
4.	PROCESAMIENTO DE SEÑALES DE REGISTROS SÍSMICOS	36
4.1.	SELECCIÓN DE REGISTRO SÍSMICO	36
4.2.	RUIDO EN SEÑALES DE REGISTROS SISMICOS	37
4.3.	TECNICAS DE FILTRADO DE SEÑALES	37
5.	DESARROLLO DE LA APLICACIÓN COMPUTACIONAL	40
5.1.	ARQUITECTURA DE LA APLICACIÓN	40
5.2.	IMPLEMENACIÓN DE ALGORIMOS DE PYTHON	41
5.3.	IMPLEMENTACIÓN DE LA APLICACIÓN EN STREAMLIT.....	42
5.3.1	SECCION DE INGRESO DE DATOS.....	42
5.3.2	SECCION RESULTADOS DE PROPIEDADES DINÁMICAS DE LA ESTRUCTURA	43
5.3.3	SECCION DE INGRESO DE REGISTRO SISMICO Y SU FILTRADO DE FRECUENCIAS	44
5.3.4	SECCION DE RESULTADOS	45
5.3.5	SECCION DE ANIMACIÓN DE ESTRUCTURA CON AMS Y SIN ESTE Y GRAFICO DE DERIVA MAXIMA.	46
6.	VALIDACION DE RESULTADOS	48
6.1.	VALIDACION DE PROPIEDADES DINAMICAS DE LA ESTRUCTURA	48

6.2.	VALIDACION DE RESPUESTA DE ANALISIS TIEMPO-HISTORIA.....	52
7.	DOCUMENTACIÓN Y REPRODUCIBILIDAD	57
7.1.	DOCUMENTACION DEL CÓDIGO	57
7.2.	REPRODUCIBILIDAD	57
7.2.1	REPOSITORIO	57
7.3.	GUIA DE USUARIO.....	57
7.3.1	INTRODUCCIÓN AL PROGRAMA.....	57
7.3.1.1	BARRA LATERAL PARA INGRESO DE DATOS.	58
7.3.1.2	PESTAÑA DATOS GENERALES.....	60
7.3.1.3	PESTAÑA DE REGISTRO SÍSMICO.....	60
7.3.1.4	PESTAÑA DE RESULTADOS	61
7.3.1.5	PESTAÑA ANIMACIÓN.....	63
8.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	64
8.1.	CONCLUSIONES	64
8.2.	RECOMENDACIONES.....	65

INDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1.	Modelo AMS Torre Taipéi 101.	28
Ilustración 2.	Modelo AMS Shinjuku Nomura Building	28
Ilustración 3.	Sistema de 2 grados de libertad, sin amortiguamiento. (Chopra, 2014).....	33

Ilustración 4. Filtros ideales comunes: (a) pasa baja en $\omega_c = \pi/2$ rad/s, (b) pasa alta en $\omega_c = \pi/2$ rad/s, (c) pasa banda en $\omega_l = \pi/4$ rad/s y $\omega_u = 3\pi/4$ rad/s, y (d) filtro de muesca en $\omega_c = \pi/2$ rad/s.(Mousa, 2020)	39
Ilustración 5. Flujo de trabajo de aplicación Interactiva.....	41
Ilustración 6. Sección de ingreso de datos de la estructura en STREAMLIT	43
Ilustración 7. Sección de propiedades dinámicas en STREAMLIT	43
Ilustración 8. Sección de Ingreso de registros Sísmicos STREAMLIT.....	44
Ilustración 9. Sección de filtro Pasabanda en STREAMLIT	45
Ilustración 10. Mapa de resultados con configuraciones de AMS en STREAMLIT.....	45
Ilustración 11. Sección de resultados óptimos del AMS y factor de reducción de deriva máxima en la estructura. STREAMLIT.....	46
Ilustración 12. Resultados óptimos del AMS para un grado de libertad. STREAMLIT	46
Ilustración 13. Sección de respuesta en el tiempo de estructura sin AMS y con AMS optimo. STREAMLIT	47
Ilustración 14. Respuesta de relaciones de derivas y aceleraciones absolutas de estructura con AMS y sin AMS. STREAMLIT	47
Ilustración 15. Ingreso de datos de la estructura. STREAMLIT	49
Ilustración 16. Modelo de edificio de Validación. a) izquierda representación gráfica de Aplicativo. b) derecha representación gráfica de modelo en ETABS.....	49
Ilustración 17. Supresión de efecto de deformaciones por cortante en ETABS	52
Ilustración 18. Registro sísmico RSN981 ingresado en ETABS	53
Ilustración 19. Registro sísmico RSN981 ingresado en Aplicativo STREAMLIT	53
Ilustración 20. Colocación de Link en ETABS con propiedades de AMS calculado en aplicativo STREAMLIT	55
Ilustración 21. Pesos colocados en ETABS como carga puntual. (Validación de resultados) .	55

Ilustración 22. Izquierda Superior. Derivas de piso con ETABS sin AMS; Derecha superior. Derivas de piso con ETABS con AMS; Izquierda Inferior. Derivas de piso del Aplicativo sin AMS; Derecha Inferior. Derivas de piso del Aplicativo con AMS.....	56
Ilustración 23. Banda de ingreso de datos de la estructura	59
Ilustración 24. Sección de ingreso de registro sísmico, formato .AT2	61
Ilustración 25. Selección de banda de frecuencias para análisis dinámico.....	61
Ilustración 26. Resultados de análisis.	62
Ilustración 27. Animación de resultados y grafico de Derivas relativas máximas y aceleraciones absolutas máximas de los pisos.	63

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Método de Beta de Newmark, un grado de libertad.....	31
Tabla 2. Método de Beta de Newmark, múltiples grados de libertad	32
Tabla 3. Parámetros de Análisis para validar, en aplicativo en STREAMLIT y ETABS	48
Tabla 4.Resultado exportado CSV de propiedades dinámicas de la estructura. STREAMLIT	50
Tabla 5.Resultados de propiedades dinámicas exportados de ETABS	51
Tabla 6. Parámetros Calculados para el AMS. (Validación de resultados).....	54
Tabla 7. Error relativo entre máximas derivas de piso modelo ETABS-Aplicativo (Validación de Resultados).....	56

INDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Módulo de Elasticidad	19
---	----

Ecuación 2. Coeficiente de Poisson	19
Ecuación 3. Relación de Bernoulli-Euler.....	20
Ecuación 4. Compatibilidad por Cortante (Timoshenko) causado por la carga externa.....	20
Ecuación 5. Compatibilidad por momento causado por el cortante (Timoshenko).....	20
Ecuación 6. Definición de Valor y vector Propio	21
Ecuación 7. Valor y vector propio de la ecuación de movimiento no amortiguado en vibración libre.	21
Ecuación 8. Ecuación de movimiento de un sistema de múltiples grados de libertad.....	24
Ecuación 9. Grados de libertad activos e inactivos por fuerza externa	26
Ecuación 10. Matriz de Condensación de grados de libertad	26
Ecuación 11. Matriz de amortiguamiento global.....	27
Ecuación 12. Submatrices de rigidez de edificio de corte, separando último piso.....	29
Ecuación 13. Matriz de rigidez del dispositivo AMS	29
Ecuación 14. Matriz de rigidez de la estructura acoplada con AMS	29
Ecuación 15. Acople de matrices en interacción Suelo-Estructura (Chopra, 2014).....	30
Ecuación 16. Matriz de amortiguamiento de la estructura acoplada con AMS	30
Ecuación 17. Amplitud de relación de respuesta ante excitación Armónica de función Seno respecto a masa 1	33
Ecuación 18. Amplitud de relación de respuesta ante excitación Armónica de función Seno respecto a la masa 2	33
Ecuación 19. Expresiones de frecuencias independientes y relación de masa, para sistema de masa sintonizada 2 gdl.	34
Ecuación 20. Amortiguamiento calculado (Validación de resultados)	55

CAPITULO I

1. INTRODUCCION

1.1. JUSTIFICACIÓN

Tradicionalmente, el control de la respuesta de las edificaciones altas se aborda mediante el incremento de la rigidez, sin embargo, estas soluciones pueden generar aumento significativo de costos, peso estructural e incremento de fuerzas internas. En este sentido, los sistemas de disipación de energía nacen como una alternativa moderna para controlar vibraciones sin necesidad de sobredimensionar los elementos estructurales.

En el Ecuador actualmente se está incursionado en construcciones de edificios en altura, lo que conlleva a los ingenieros a buscar soluciones que permitan solventar la disipación la energía de los eventos sísmicos. Los Amortiguadores de Masa Sintonizada (AMS) es una alternativa de sistemas de disipación de energía, muy útil para sistemas esbeltos y flexibles, el estudio aplicado al análisis lineal mostrará los beneficios que se tendría frente a una estructura sin este sistema.

1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La ausencia de lineamientos normativos limita la difusión y aplicación de nuevas tecnologías en el país y genera un desconocimiento por falta de herramientas accesibles que permitan a profesionales y estudiantes evaluar la efectividad de estos sistemas de disipación de energía de manera práctica, si bien existen softwares comerciales que permiten simular estos dispositivos, su costo y complejidad dificultan su uso en ámbitos académicos.

Por lo tanto, se plantea el desarrollo de una aplicación interactiva en Python que, mediante modelos simplificados de edificios de cortante en 2D, permita analizar la respuesta dinámica de estructuras con y sin AMS.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1 OBJETIVO GENERAL

El objetivo de este trabajo es desarrollar una aplicación interactiva utilizando Python que facilite el diseño y análisis de amortiguadores sintonizados (AMS) para estructuras. La aplicación permitirá a los usuarios introducir parámetros estructurales y de amortiguamiento, y calcular la respuesta dinámica de la estructura con y sin la implementación del AMS. Además, la aplicación visualizará la respuesta en el dominio del tiempo y la frecuencia, ayudando a entender la efectividad del AMS en la reducción de vibraciones.

1.3.2 OBJETIVO ESPECIFICO

- Revisar y resumir la teoría de amortiguadores de masa sintonizada (AMS).
- Generar algoritmos para modelar estructuras simples en (2D).
- Generar algoritmos para modelar el amortiguador de masas sintonizada en la estructura simple en (2D)
- Generar algoritmos para calcular la respuesta de sistemas discretos elásticos de un grado de libertad (SDOF) y múltiples grados de libertad (MDOF) en el dominio del tiempo ante excitaciones no armónicas, no periódicas en estructuras con y sin AMS.
- Implementar técnicas de filtrado de señales para eliminar ruido en los registros.
- Calcular la respuesta tiempo historia de sistemas discretos elásticos de un grado de libertad (SDOF) y múltiples grados de libertad (MDOF) en el dominio del tiempo ante excitaciones no armónicas, no periódicas en estructuras con y sin AMS.
- Ajustar y mejorar los algoritmos basados en la retroalimentación obtenida de pruebas y validaciones.
- Comparar los resultados obtenidos con la aplicación con estudios de casos simplificados (validación).

- Diseñar una interfaz gráfica de usuario (GUI) que permita la entrada de datos alfanuméricos para el ingreso de parámetros básicos estructurales y de amortiguamiento.
- Desarrollar una aplicación web con base Streamlit, para consolidar los algoritmos implementados.
- Elaborar una guía detallada en GitHub que explique el uso de la aplicación, incluyendo ejemplos prácticos.
- Documentar el código y los métodos utilizados para desarrollar la aplicación, asegurando la reproducibilidad y comprensión del proyecto.

1.4. ALCANCE

El proyecto se centra en el desarrollo de una aplicación interactiva que permita a los usuarios analizar amortiguadores de masa sintonizados en estructuras discretas elásticas simplificadas (SDOF y MDOF). La aplicación incluirá una interfaz gráfica de usuario para la entrada de parámetros y la visualización de resultados, pero no abarcará estructuras complejas ni integraciones con software de análisis estructural de terceros. La validación se realizará comparando los resultados con estudios de caso simplificados.

CAPITULO II

2. MARCO TEORICO

2.1. DINAMICA ESTRUCTURAL DE EDIFICACIONES

La dinámica estructural estudia el comportamiento de las edificaciones sometida a acciones variables en el tiempo, tales como sismos, vientos, vibraciones por maquinas e inclusive explosiones. A diferencia del análisis estático, al análisis dinámico toma en cuenta la variación del amortiguamiento y la variación en el tiempo de las fuerzas externas.

El estudio de la dinámica estructural permite evaluar con mayor precisión los desplazamientos máximos, derivas, aceleraciones absolutas, las cuales están relacionados con el daño estructural y no estructural.

2.2. MARCO CONCEPTUAL

2.2.1 ANÁLISIS LINEAL DINÁMICO

Un análisis lineal dinámico es la representación tiempo-historia de un sistema dinámico de uno o más grados de libertad, compuesto de masa, rigidez y amortiguamiento, que no pierde sus propiedades mecánicas a través del tiempo, este determina la respuesta del sistema con un comportamiento totalmente Elástico.

2.2.2 MÉTODO DE BETA DE NEWMARK

Familia de métodos paso a paso en el tiempo, consiste en la integración numérica simplificada para encontrar la respuesta de la ecuación de movimiento, en el cual se ingresa dos parámetros (β y γ) el cual controla la interpolación temporal y condiciona la estabilidad del cálculo.([Chopra, 2014](#))

2.2.3 AMORTIGUADOR DE MASA SINTONIZADA

El Amortiguador de masa sintonizada (AMS) es un dispositivo que consiste en una masa, un resorte y un amortiguador que es agregado a una estructura con el fin de reducir la respuesta dinámica de la estructura. La frecuencia del amortiguador es sintonizada a una particular frecuencia estructural para cuando la frecuencia sea excitada, el amortiguador resonará fuera de la fase con el movimiento de la estructura. (Connor & Laflamme, 2014)

2.2.4 MÓDULO DE ELASTICIDAD

El módulo de elasticidad en análisis dinámico de estructuras es un parámetro fundamental que describe el comportamiento de un material ante sollicitaciones, transformándolo a deformaciones. Este parámetro combinándolo con la geometría de un elemento, describe por completo el comportamiento de un elemento estructural.

Los módulos de elasticidad de los materiales usado comúnmente en el ámbito de la ingeniería civil Estructural se encuentran normados mediante los códigos de diseño de cada País.

La selección de módulo de elasticidad influye directamente en la respuesta de una estructura.

El módulo de Elasticidad se define de la siguiente manera:

Ecuación 1. Módulo de Elasticidad

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

2.2.5 COEFICIENTE DE POISSON

El coeficiente de Poisson describe como un material se deforme por cargas aplicadas indirectamente. Este valor se lo obtiene mediante análisis de laboratorio, midiendo transversalmente a un cilindro en compresión.

Ecuación 2. Coeficiente de Poisson

$$\mu = \frac{\varepsilon_{Transversal}}{\varepsilon_{Longitudinal}}$$

Este parámetro permite agregar las deformaciones por cortante al sistema.

2.2.6 TEORIA DE VIGAS BERNOULLI-EULER

La teoría de viga de Bernoulli-Euler es una simplificación física que relaciona las cargas con las deflexiones, asumiendo que la sección antes de la deformación es plana y posterior a la deformación sigue siendo plana. La relación se encuentra dada por:

Ecuación 3. Relación de Bernoulli-Euler

$$\frac{d^2}{dx^2} \left(EI \frac{d^2 w}{dx^2} \right) = q$$

Donde:

E es el módulo de elasticidad del Material

I es la Inercia de la sección

w es la deformación en cualquier punto “x”

q es la carga distribuida en el mismo punto de evaluación de “x”

2.2.7 TEORIA DE VIGAS TIMOSHENKO

La teoría de Viga Timoshenko agrega a la Teoría de vigas Bernoulli Euler, las deformaciones por cortante causadas por las cargas externas, volviendo al sistema más flexible, además de presentar de otra forma la deformación de los elementos. La relación se encuentra dada por:

Ecuación 4. Compatibilidad por Cortante (Timoshenko) causado por la carga externa

$$\frac{d}{dx} \left[G * A * \left(\frac{dw}{dx} - \alpha_o \right) \right] + q = 0$$

Ecuación 5. Compatibilidad por momento causado por el cortante (Timoshenko)

$$\frac{d}{dx} \left[E * I * \frac{d\alpha_o}{dx} \right] + G * A * \left(\frac{dw}{dx} - \alpha_o \right) = 0$$

Donde:

E es el módulo de elasticidad del Material

G es el módulo de corte del material.

A es el área de la sección transversal

I es la Inercia de la sección

w es la deformación en cualquier punto “x”

q es la carga distribuida en el mismo punto de evaluación de “x”

α_o es la rotación por flexión pura en “x”

2.2.8 VALORES Y VECTORES PROPIOS

Es una operación algebraica en el cual se obtiene de una matriz de A el vector con el cual multiplicándolo únicamente se escala este mismo vector.

Ecuación 6. Definición de Valor y vector Propio

$$Av = \lambda v$$

En dinámica estructural permite encontrar las frecuencias angulares de una estructura asociados con sus formar de Vibrar.

Ecuación 7. Valor y vector propio de la ecuación de movimiento no amortiguado en vibración libre.

$$(K - \omega * M)\emptyset = 0$$

K es la matriz de rigidez del sistema discreto.

M es la matriz de Masa del Sistema Discreto

ω son las frecuencias angulares del sistema en vibración libre

$\emptyset$ formas modales asociadas a las frecuencias angulares.

2.2.9 SOFTWARE DE ANÁLISIS PYTHON

Python es un lenguaje de programación conocido como OpenSource (Código Abierto), que destaca por su versatilidad y amplia aplicabilidad en el análisis de datos gracias a las diversas librerías disponibles para los usuarios. Una de sus principales ventajas, es la facilidad de adquisición debido a que es gratuito, lo que facilita a aplicabilidad en los ámbitos académicos, científicos e industriales.

2.2.10 NUMPY

Es una biblioteca de Python, cuyo aporte radica en el manejo de arreglos multidimensionales y en la implementación de operaciones matemáticas. ([NumPy](#), n.d.)

2.2.11 SCIPY

Es una biblioteca de Python, que contiene módulos que permiten la aplicación de procesamiento de señales, aplicación de estadística, entre otras, aplicada al campo de problemas científicos y de ingeniería. ([Signal Processing \(Scipy.Signal\) — SciPy v1.16.1 Manual](#), n.d.)

2.2.12 MATPLOTLIB

Es una biblioteca de Python, orientada a la generación de gráficos, permite la interpretación visual de los resultados. ([Matplotlib — Visualization with Python](#), n.d.)

2.2.13 STREAMLIT

Herramienta de Python que permite transformar scripts en Python, en interfases gráficas intuitivas con formato Web ([Streamlit Documentation](#), n.d.)

2.2.14 GITHUB

Es una plataforma en línea que permite el control de versiones de los códigos, además de permitir almacenar, gestionar y compartir proyectos de programación de manera

colaborativa.(*GitHub · Build and Ship Software on a Single, Collaborative Platform · GitHub*,
n.d.)

CAPITULO III

3. METODOLOGÍA DE MODELACIÓN Y ANÁLISIS

3.1. MODELACIÓN DE EDIFICIOS DE CORTE 2D

3.1.1 CONSTRUCCIÓN DE LA GEOMETRÍA INICIAL

Para la formulación del modelo estructural del edificio de corte 2D y representar el comportamiento dinámico en edificios, es primordial conocer de antemano los grados de libertad de cada intersección de elementos en el edificio conocidos como “nudos”. Cada nudo representa el vínculo de las fuerzas externas con las internas del sistema estructural. De igual manera, constituye la representación geométrica de la posición de los grados de libertad los cuales nos da a notar como se puede desplazar o rotar dicho nudo y como la “deformación” interactúa con otros nudos. Una vez definidos la posición de los grados de libertad de la estructura se procede a realizar el ensamblaje del aporte de rigidez que tiene cada elemento sobre un nudo, tomando en cuenta su longitud, geometría seccional, material. Cada aporte de cada elemento completa el sistema estructural.

3.1.2 MATRICES DE MASA, RIGIDEZ Y AMORTIGUAMIENTO

Para la representación de un sistema en movimiento debemos pensar en la ecuación básica de la dinámica.

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = F_{ext}$$

Ecuación 8. Ecuación de movimiento de un sistema de múltiples grados de libertad

Donde:

M es la masa del sistema

C es el amortiguamiento del sistema

K es la rigidez del sistema

F_{ext} es la fuerza de excitación externa

Esta ecuación toma en cuenta tres conceptos básicos para la dinámica que es la masa, geometría y material.

3.1.2.1 MATRIZ DE MASA

La matriz de masa constituye el aporte inercial del sistema dinámico que se opone al movimiento. Su cálculo corresponde a la suma de la totalidad de masa de un piso tomando en cuenta lo que comúnmente denominamos cargas muertas y cargas vivas. Hay que tomar en consideración que para el sistema estructural que formamos, las masas no interactúan entre sí, lo hacen las fuerzas que estas provocan por su movimiento en el sistema. Por tal motivo la matriz de masa es diagonal y ordenada de acuerdo con la numeración de los grados de libertad.

3.1.2.2 MATRIZ DE RIGIDEZ

La matriz de rigidez es la representación de la geometría y material del sistema estructural, en ella se plasma el vínculo de las fuerzas externas hacia las fuerzas internas, dando la información necesaria para conocer su comportamiento ante estas solicitaciones.

Tomando en cuenta que para resolver la ecuación de movimiento descrita en la ecuación (8), debemos considerar grados de libertad consistentes al número de masas que tenemos simplificadas por piso, para ello aplicamos la condensación de la matriz de rigidez del sistema, con el fin de compactar el aporte de rigidez lateral de los grados de libertad, a uno por piso de igual manera. Para ello debemos realizar una selección de los grados de libertad de interés en dirección al movimiento del sistema dinámico, consistente a las fuerzas externas que ocurrirá lateralmente e igualar el desplazamiento de los grados de libertad lateral de cada piso para que exista una primera simplificación. Estos convenientemente se numerarán primero y posterior los otros grados de libertad que no interactúan directamente con la masa.

$$\begin{bmatrix} k_{aa} & k_{ab} \\ k_{ba} & k_{bb} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \Delta_a \\ \Delta_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{ext} \\ 0 \end{bmatrix}$$

Ecuación 9. Grados de libertad activos e inactivos por fuerza externa

Donde:

k_{aa} es la submatriz de rigidez con los grados de libertad excitados por la fuerza externa

k_{ba} y k_{ab} son la submatrices de rigidez que acopla los grados de libertad con aporte puro y los que no aportan con la excitación de la fuerza externa (transmisión de fuerzas).

k_{bb} es la submatriz de rigidez que no es sometida a fuerza externa.

Δ_a y Δ_b son los desplazamientos respectivos de los grados de libertad considerados.

Operando las submatrices se obtiene:

$$K_{condensada} = k_{aa} - k_{ab} * (k_{bb}^{-1}) * k_{ba}$$

Ecuación 10. Matriz de Condensación de grados de libertad

3.1.2.3 MATRIZ DE AMORTIGUAMIENTO

El amortiguamiento es la fuerza resistente al movimiento relacionada a la velocidad de movimiento. El amortiguamiento en estructuras representa todo lo que no podemos asociar a una variable en específica con exactitud, pero presenta para las estructuras una disipación de energía.

De acuerdo con (Chopra, 2014) tenemos las siguientes formas de definir el amortiguamiento de la estructura:

1. Amortiguamiento de Rayleigh
2. Amortiguamiento de Caughey
3. Superposición de matrices de amortiguamiento modal

Como fin del presente estudio se toma como base para el análisis de la dinámica analizada, la Superposición de matrices de amortiguamiento modal, la cual nos permite establecer para las

ecuaciones desacopladas de movimiento un mismo amortiguamiento, la cual se acoplan mediante los vectores propios o formas modales de la estructura, de la siguiente forma:

$$C = [\Phi^T]^{-1} [c] [\Phi]^{-1}$$

Ecuación 11. Matriz de amortiguamiento global

Donde:

$[c]$ Es la matriz diagonal de amortiguamiento modal y su diagonal $c_i = 2\xi_i m_i \omega_i$

Φ Es la matriz de las formas modales de la estructura

El lector debe tomar en consideración que en el presente documento las matrices acopladas se presentan con mayúsculas y las desacopladas con minúsculas para su mayor comprensión.

Por estandarización normativa se considera que cada valor de ξ_i es 0.05 en el presente documento.

3.2. MODELACIÓN DE PROPIEDADES DEL AMORTIGUADOR DE MASA SINTONIZADA

Para la modelación de las propiedades del amortiguador de masa sintonizada debemos realizar el acoplamiento de un sistema adicional al Edificio de Corte 2D, el dispositivo únicamente interactúa con grados de libertad laterales específicos y aquello depende de cómo de vaya a construirse el sistema adicional de amortiguación. Un claro ejemplo es el dispositivo colocado en la Torre Taipéi 101, este dispositivo concentra su fuerza restitutiva en un piso diferente al de las fuerzas disipativas.

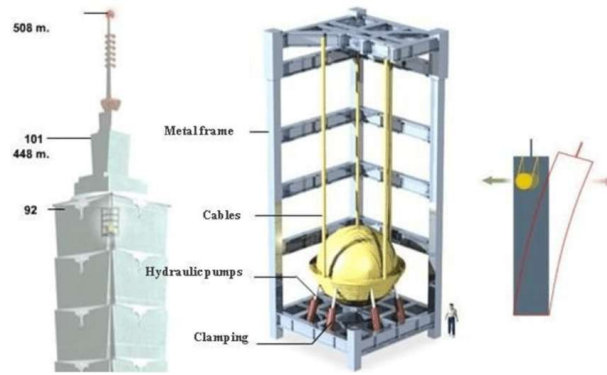


Ilustración 1. Modelo AMS Torre Taipéi 101.

(Damper in Taipei 101 Building. | Download Scientific Diagram, n.d.)

Otros sistemas son los que consideran al AMS en un solo piso ofreciendo rigidez y amortiguamiento a este. Para el presente trabajo, en la física del problema se considera esta única posibilidad, con el fin de verificar el beneficio de estos dispositivos en edificios de altura como modelo simplificado.



Ilustración 2. Modelo AMS Shinjuku Nomura Building

(Introducing Tuned Mass Dampers | January 2017 | Highlighting Japan, n.d.)

3.2.1 INTEGRACION DEL AMS AL SISTEMA ESTRUCTURAL

3.2.1.1 INTEGRACIÓN DE LA MASA DEL AMS

Para la integración al modelo, se agrega una masa adicional al Edificio de Corte 2D, es decir pasa de una dimensión N a N+1, esta masa debe tener un peso representativo que permita al sistema disipar la energía eficientemente de acuerdo con el contenido frecuencial de una zona en particular y a los periodos de las formas de vibrar de la estructura, todo esto sin mayorar el peso excesivamente ya que esto sería inviable construirlo. En este documento se presenta la variabilidad de 0.5% al 6% de la masa de la Estructura.

3.2.1.2 INTEGRACION DEL LA RIGIDEZ DEL AMS

Como se mencionaba previamente, la rigidez interactúa con grados de libertad específicos, por lo que el acoplamiento del dispositivo para nuestro caso se infiere de la siguiente manera expresándolo en submatrices:

$$K_{estructura} = \begin{bmatrix} k_{xx(n-1)(n-1)} & k_{xy(n-1)x1} \\ k_{yx1x(n-1)} & k_{yy1x1} \end{bmatrix}$$

Ecuación 12. Submatrices de rigidez de edificio de corte, separando último piso.

$$K_{AMS} = \begin{bmatrix} k_{AMS} & -k_{AMS} \\ -k_{AMS} & k_{AMS} \end{bmatrix}$$

Ecuación 13. Matriz de rigidez del dispositivo AMS

Acoplándolas resulta:

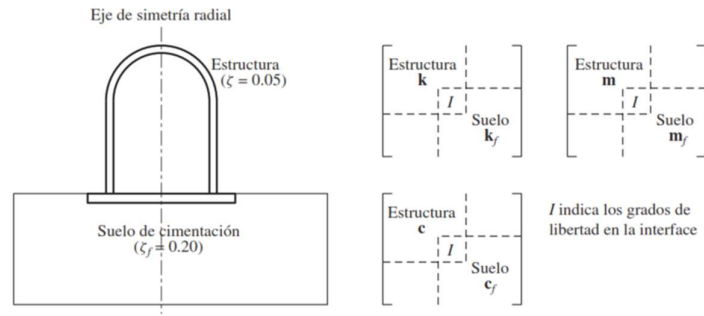
$$K_{estructura + AMS} = \begin{bmatrix} k_{xx(n-1)(n-1)} & k_{xy(n-1)x1} & 0_{(n-1)x1} \\ k_{yx1x(n-1)} & k_{yy1x1} + k_{AMS} & -k_{AMS} \\ 0_{1x(n-1)} & -k_{AMS} & k_{AMS} \end{bmatrix}$$

Ecuación 14. Matriz de rigidez de la estructura acoplada con AMS

En esta formulación se da a notar que el AMS interactúa únicamente con el último piso.

3.2.1.3 INTEGRACION DEL AMORTIGUAMIENTO DEL AMS

De manera similar que la matriz de rigidez, el amortiguamiento se debe acoplar al sistema. De acuerdo con la literatura se lo denomina Amortiguamiento no Clásico (Chopra, 2014), por la razón de que el amortiguamiento es externo al sistema estructural y no puede ser capturado por medio de las metodologías de cálculo de amortiguamiento antes descritos, ya que no interactúan con todos los grados de libertad de la estructura. Un ejemplo de este caso es la interacción Suelo-Estructura, en el cual se acopla el suelo con los grados de libertad en la interfaz de la estructura. De manera gráfica como se muestra a continuación:



Ecuación 15. Acople de matrices en interacción Suelo-Estructura (Chopra, 2014)

Entonces para el sistema acoplado con AMS, queda expresado de la siguiente manera.

$$C_{estructura + AMS} = \begin{bmatrix} c_{xx(n-1)(n-1)} & c_{xy(n-1)x1} & 0_{(n-1)x1} \\ c_{yx1x(n-1)} & c_{yy1x1} + c_{AMS} & -c_{AMS} \\ 0_{1x(n-1)} & -c_{AMS} & c_{AMS} \end{bmatrix}$$

Ecuación 16. Matriz de amortiguamiento de la estructura acoplada con AMS

Para el presente estudio se preestableció la relación de amortiguamiento del AMS $\xi_{AMS} = 0.05$.

3.3. CÁLCULO DE LA RESPUESTA TIEMPO-HISTORIA EN SISTEMAS DE MULTIPLES GRADOS DE LIBERTAD

Una vez obtenido los parámetros dinámicos del sistema, el método usado para el cálculo de la respuesta de una estructura de N grados de libertad, es el método de Newmark para sistemas Lineales. Conforme al Documento (Chopra, 2014) para un sistema de 1 grado de libertad tenemos las siguientes ecuaciones:

1.0 CALCULOS INICIALES
$\ddot{u}_0 = \frac{p_0 - c \dot{u}_0 - k u_0}{m}$ $a_1 = \frac{1}{\beta(\Delta t)^2} m + \frac{\gamma}{\beta \Delta t} c$ $a_2 = \frac{1}{\beta \Delta t} m + \left(\frac{\gamma}{\beta} - 1 \right) c$ $a_3 = \left(\frac{1}{2\beta} - 1 \right) m + \Delta t \left(\frac{\gamma}{2\beta} - 1 \right) c$ $\hat{k} = k + a_1$
2.0 CÁLCULOS PARA CADA PASO DE TIEMPO
$\hat{p}_{i+1} = p_{i+1} + a_1 u_i + a_2 \dot{u}_i + a_3 \ddot{u}_i$ $u_{i+1} = \frac{\hat{p}_{i+1}}{\hat{k}}$ $\dot{u}_{i+1} = \frac{\gamma}{\beta \Delta t} (u_{i+1} - u_i) + \left(1 - \frac{\gamma}{\beta} \right) \dot{u}_i + \Delta t \left(1 - \frac{\gamma}{2\beta} \right) \ddot{u}_i$ $\ddot{u}_{i+1} = \frac{1}{\beta(\Delta t)^2} (u_{i+1} - u_i) - \frac{1}{\beta \Delta t} \dot{u}_i - \left(\frac{1}{2\beta} - 1 \right) \ddot{u}_i$

Tabla 1. Método de Beta de Newmark, un grado de libertad

Aprovechando las propiedades de los sistemas lineales, se presenta la siguiente formulación para la respuesta en los sistemas de múltiples grados de libertad:

1.0 CÁLCULOS INICIALES
$\ddot{u}_0 = M^{-1}(p_0 - C \dot{u}_0 - K u_0)$ $A_1 = \frac{1}{\beta(\Delta t)^2} M + \frac{\gamma}{\beta \Delta t} C$ $A_2 = \frac{1}{\beta \Delta t} M + \left(\frac{\gamma}{\beta} - 1\right) C$ $A_3 = \left(\frac{1}{2\beta} - 1\right) M + \Delta t \left(\frac{\gamma}{2\beta} - 1\right) C$ $\hat{K} = K + A_1$
2.0 CÁLCULOS PARA CADA PASO DE TIEMPO
$\hat{p}_{i+1} = p_{i+1} + A_1 u_i + A_2 \dot{u}_i + A_3 \ddot{u}_i$ $u_{i+1} = \hat{K}^{-1} \hat{p}_{i+1}$ $\dot{u}_{i+1} = \frac{\gamma}{\beta \Delta t} (u_{i+1} - u_i) + \left(1 - \frac{\gamma}{\beta}\right) \dot{u}_i + \Delta t \left(1 - \frac{\gamma}{2\beta}\right) \ddot{u}_i$ $\ddot{u}_{i+1} = \frac{1}{\beta(\Delta t)^2} (u_{i+1} - u_i) - \frac{1}{\beta \Delta t} \dot{u}_i - \left(\frac{1}{2\beta} - 1\right) \ddot{u}_i$

Nota: Letras mayúsculas denotan matrices y minúsculas vectores.

Tabla 2. Método de Beta de Newmark, múltiples grados de libertad

3.4. PARÁMETROS OPTIMOS DE AMS PARA UN REGISTRO SISMICO EN SISTEMAS LINEALES

3.4.1 SISTEMAS LINEALES DE DOS GRADOS DE LIBERTAD ANTE FUERZA ARMONICA

En la literatura de dinámica estructural, existen expresiones idealizadas de sistemas excitados bajo fuerzas externas con carácter de osciladores armónicos, con consideraciones supuestas del sistema estructural que facilitan llegar a expresiones que nos ayudan a entender cómo actúa. Una de estas consideraciones es que el sistema no posee amortiguamiento y la fuerza únicamente es aplicada en la masa principal.

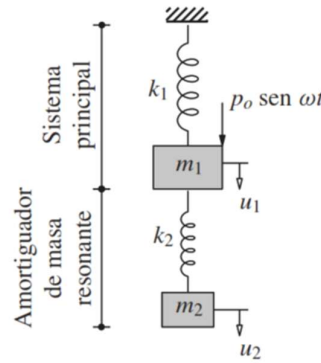


Ilustración 3. Sistema de 2 grados de libertad, sin amortiguamiento. (Chopra, 2014)

Estos supuestos nos permiten llegar a expresiones como las siguientes (Chopra, 2014):

$$\frac{u_{1o}}{u_{1est}} = \frac{1 - (\omega/\omega^*_2)^2}{[1 + \mu(\omega^*_2/\omega^*_1) - (\omega/\omega^*_1)^2][1 - (\omega/\omega^*_2)^2] - \mu(\omega^*_2/\omega^*_1)^2}$$

Ecuación 17. Amplitud de relación de respuesta ante excitación Armónica de función Seno respecto a masa 1

$$\frac{u_{2o}}{u_{1est}} = \frac{1}{[1 + \mu(\omega^*_2/\omega^*_1) - (\omega/\omega^*_1)^2][1 - (\omega/\omega^*_2)^2] - \mu(\omega^*_2/\omega^*_1)^2}$$

Ecuación 18. Amplitud de relación de respuesta ante excitación Armónica de función Seno respecto a la masa 2

$$\omega^*_1 = \sqrt{\frac{k_1}{m_1}} \quad \omega^*_2 = \sqrt{\frac{k_2}{m_2}} \quad \mu = \frac{m_2}{m_1}$$

En la práctica estos casos no se dan, sin embargo, permite entender que variables intervienen y como abordar el problema de múltiples grados de libertad.

3.4.2 SISTEMAS LINEALES DE MULTIPLES GRADOS DE LIBERTAD ANTE REGISTRO SISMICO

Para abordar el problema de múltiples grados de libertad debemos analizar lo siguiente en base a las ecuaciones establecidas en el numeral anterior:

1. La amplitud de relación de respuesta es invariable ante el escalamiento del registro, ya que se expresa como relación de un sistema con AMS y otro sin este, por lo tanto, la escala no aporta en el análisis de parámetros del dispositivo.
2. El contenido frecuencial del registro afecta la amplitud de relación de respuesta, por lo que es importante hacer una correcta selección de registro sísmicos bajo la naturaleza de ubicación de la estructura.
3. Así como la relación de respuesta de 2 grados de libertad (1 grado de la estructura + 1 grado del AMS) está dada en relación de los desplazamientos, para múltiples grados de libertad se puede dar para la relación de derivas de la estructura (asociada al daño). Por lo tanto, al tener respuestas distintas por piso, se buscará la combinación de parámetros que dé el menor valor de deriva relativa de todo el edificio con AMS en comparación con la respuesta de deriva máxima de la estructura sin AMS bajo el mismo registro sísmico. En este sentido son variables: la masa, amortiguamiento y la rigidez del sistema independiente del AMS.
4. Existirá una combinación óptima de frecuencia del AMS que se sintonice con una de las frecuencias de los modos de vibrar de la estructura. En todos los casos no se sintonizará con una misma frecuencia de la estructura, ya que dependerá del contenido frecuencial del registro sísmico.

Como se ha explicado anteriormente, a diferencia de las consideraciones de los sistemas de 2 grados de libertad con fuerzas armónicas (física simplificada), para este caso se considera todas las variables que tiene la estructura, sin embargo, para el análisis del siguiente trabajo se estipula rangos de parámetros con lo que se trabajará predefinidamente.

- Masa del AMS (0.5% al 6%)
- Frecuencia Angular AMS (Frecuencias angulares que contribuyen con el 90% de participación modal de la Estructura sin TMD)
- Amortiguamiento AMS ($\xi=0.05$)

CAPITULO IV

4. PROCESAMIENTO DE SEÑALES DE REGISTROS SÍSMICOS

4.1. SELECCIÓN DE REGISTRO SÍSMICO

Dado que en el presente documento analizamos un dispositivo que depende del contenido frecuencial de los registros sísmicos y de las características dinámicas del edificio en análisis en el rango lineal, se pensaría en considerar que para la selección del registro sísmico se debe proceder con el Capítulo 12 del ASCE 7-22 (SEISMIC DESIGN REQUIREMENTS FOR BUILDING STRUCTURES), numeral 12.9 LINEAR DYNAMIC ANALYSIS, 12.9.2.3 GROUND MOTION SELECTION AND MODIFICATION, en el cual menciona que debemos considerar no menos de 3 registros que pueden ser artificiales o registros de evento sísmicos, cuyo espectro direccional no pueden ser inferiores o superiores al 10% del espectro objetivo, dentro de los periodos de $0.8T_{lower}$ a $1.2T_{upper}$.

Sin embargo, al ser el AMS un dispositivo que brinda amortiguamiento al sistema, se debe tomar en cuenta el Capítulo 18 (SEISMIC DESIGN REQUIREMENTS FOR STRUCTURES WITH DAMPING SYSTEMS) el cual menciona en el apartado 18.2.2.2 (GROUND MOTIONS FOR RESPONSE HISTORY ANALYSIS), se aplique lo expuesto en el capítulo 16 (NON LINEAR RESPONSE HISTORY ANALYSIS) en su sección 16.2 (GROUND MOTIONS). Este capítulo nos enmarca que el rango de periodo para escalar un registro o modificarlo (Matching), en donde su límite superior es 2 veces el periodo fundamental y su límite inferior el periodo necesario que acumula el 90% de la participación de masas, pero no menor al 20% del menor primer periodo direccional (en estructuras sin irregularidades torsionales, casi siempre el segundo modo de la estructura).

Adicionalmente este capítulo menciona que deben existir no menos de 11 registros para cada espectro objetivo para su correcto análisis. ([ASCE, 2022](#))

Para este caso de análisis, el espectro objetivo para análisis lineal debe ser de uno con periodo de retorno de 43 años, esto permitirá seleccionar los registros que sean consistentes con el peligro seleccionado, además de evaluar que el contenido frecuencial de estos registros sea similar y causen respuestas similares en el rango lineal.

Como se explicaba con anterioridad, la escala no afecta al análisis de un AMS optimo (en análisis lineal), sin embargo, permite seleccionar registros consistentes con el sitio de evaluación de la estructura y obtener una respuesta estructural acorde a la realidad del problema.

4.2. RUIDO EN SEÑALES DE REGISTROS SISMICOS

Usualmente como ingenieros estamos involucrados a trabajar con señales sísmicas, sin embargo, no realizamos un análisis del contenido frecuencial de los registros con los que trabajamos. Todo equipo de medición tiene un rango de operación, fuera de este, debemos tratarla. El caminar de una persona, el sonido de las aves, el pitido de un vehículo puede alterar la señal receptada por la sensibilidad del equipo, es por esto que debemos seleccionar el rango de frecuencias con las que se trabajarán.

4.3. TECNICAS DE FILTRADO DE SEÑALES

De acuerdo con ([Mousa, 2020](#)) podemos tener señales análogas y digitales las que pueden ser filtradas. Para el caso de este estudio, la información existente que se encuentra en base de datos son las señales digitales, con las cuales se trabajaran.

Los filtros típicos que son usados al filtrar señales sísmicas son las siguientes:

1. Filtro Pasa Baja

$$H_d(\omega) = \begin{cases} 1, & |\omega| \leq \omega_c \\ 0, & \omega_c < |\omega| \end{cases}$$

2. Filtro Pasa Alta

$$H_d(\omega) = \begin{cases} 1, & \omega_c < |\omega| \\ 0, & |\omega| \leq \omega_c \end{cases}$$

3. Filtro Pasa Banda

$$H_d(\omega) = \begin{cases} 1, & \omega_l \leq |\omega| \leq \omega_u \\ 0, & \text{en otro caso} \end{cases}$$

4. Filtro de Muesca

$$H_d(\omega) = \begin{cases} 0, & \omega = \omega_c \\ 1, & \text{en otro caso} \end{cases}$$

A continuación, se muestra las funciones de filtrado de a acuerdo con [\(Mousa, 2020\)](#)

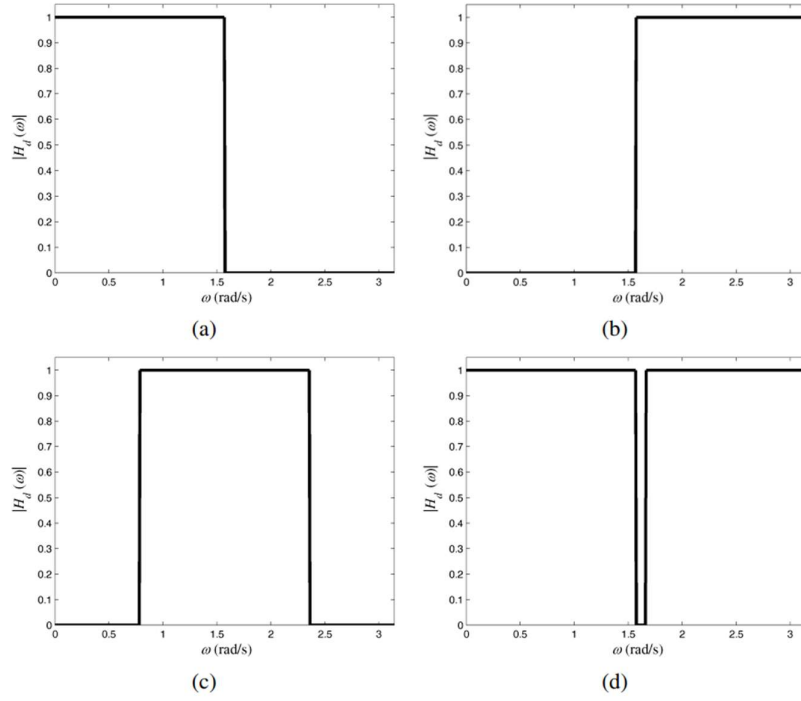


Ilustración 4. Filtros ideales comunes: (a) pasa baja en $\omega_c = \pi/2$ rad/s, (b) pasa alta en $\omega_c = \pi/2$ rad/s, (c) pasa banda en $\omega_l = \pi/4$ rad/s y $\omega_u = 3\pi/4$ rad/s, y (d) filtro de muesca en $\omega_c = \pi/2$ rad/s. (Mousa, 2020)

El correcto filtrado de señales juega un papel importante en la respuesta final de la estructura. Como fin de este documento se implementará el Filtro Pasabanda, con el cual el usuario de la aplicación deberá conocer en que rangos de frecuencias el dispositivo de medición tomó lectura.

CAPITULO V

5. DESARROLLO DE LA APLICACIÓN COMPUTACIONAL

El presente capítulo presenta a la implementación computacional de algoritmos construidos, cuyo objetivo es el análisis de la respuesta dinámica estructural simplificada para la implementación de amortiguadores de masa sintonizada mediante el cálculo de parámetros óptimos de (masa, frecuencia), además de, el diseño de interfaz gráfica y la visualización de resultados tanto en el dominio del tiempo como el de la frecuencia.

5.1. ARQUITECTURA DE LA APLICACIÓN

La aplicación están construida sobre lenguaje Python con interfaz gráfica STREAMLIT, la cual fue ordenada bajo el siguiente Flujo de trabajo:



Ilustración 5. Flujo de trabajo de aplicación Interactiva

5.2. IMPLEMENACIÓN DE ALGORIMOS DE PYTHON

Para la implementación de algoritmos en Python, la totalidad del código se lo separa en cuatro módulos para trabajar en una forma ordenada, además de separar los códigos que se deben de ejecutar varias veces.

1. Módulo de rigidez local de elementos
2. Módulo de ensamblaje de rigidez de elementos, propiedades dinámicas de la estructura, amortiguamiento de estructura sin AMS, extracción de datos archivo de registro sísmico.

3. Módulo de funciones de cálculo iterativos, mediante la implementación de NUMBA para optimización de tiempo.

4. Módulo visual: Ingreso de datos, visualización de datos de partida de la estructura sin TMD, ingreso de archivo de registro sísmico y visualización de resultados.

5.3. IMPLEMENTACIÓN DE LA APLICACIÓN EN STREAMLIT

A continuación, se muestra con más detalle la implantación de la aplicación en STREAMLIT.

5.3.1 SECCION DE INGRESO DE DATOS

En esta sección se ingresará la información base de análisis de la estructura, como es:

- CONSIDERACION DE DEFORMACION POR CORTANTE
- GEOMETRIA DEL PORTICO
 - NUMERO DE VANOS
 - DISTANCIA ENTRE VANOS
 - NUMERO DE PISOS
 - ALTURA DE PISOS
- DATOS SECCIONALES DE LA ESTRUCTURA
 - LARGO Y ANCHO COLUMNAS Y VIGAS PRISMATICAS POR PISO
- MÓDULO DE ELASTICIDAD GENERAL DEL MATERIAL DE LOS ELEMENTOS ESTRUCTURALES
- PESOS EQUIVALENTES POR PISO

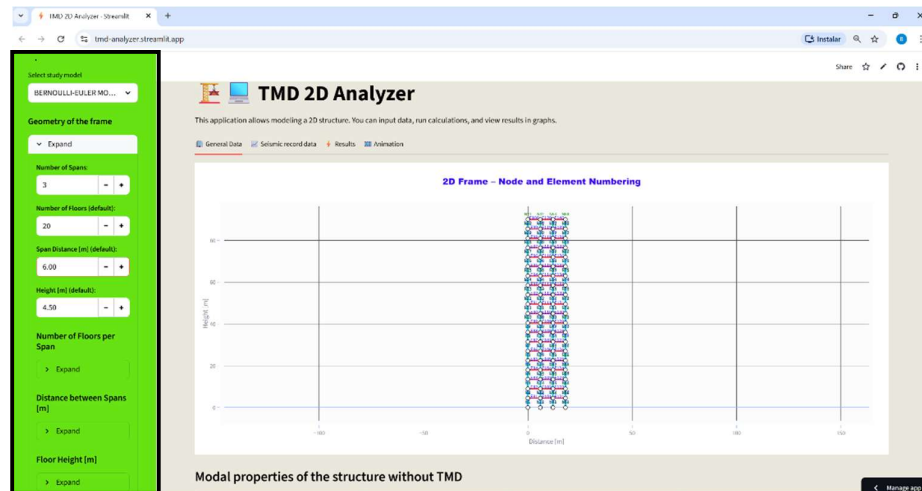


Ilustración 6. Sección de ingreso de datos de la estructura en STREAMLIT

5.3.2 SECCION RESULTADOS DE PROPIEDADES DINÁMICAS DE LA ESTRUCTURA

En esta sección se visualizará las frecuencias angulares de la estructura, el porcentaje de la participación de la masa para cada modo.

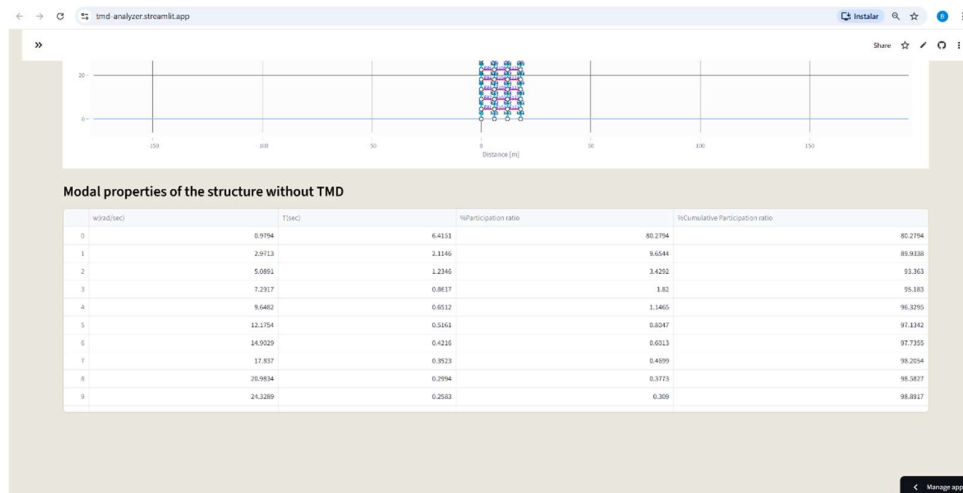


Ilustración 7. Sección de propiedades dinámicas en STREAMLIT

5.3.3 SECCION DE INGRESO DE REGISTRO SISMICO Y SU FILTRADO DE FRECUENCIAS

En esta sección se ingresa el registro sísmico con el que deseamos realizar el análisis de la estructura, en formato .AT2 (formato que usa el PEER), el código automáticamente detectará los pasos de tiempo Δt expresado dentro del archivo, con el cual graficará el registro sísmico y calculará el espectro de amplitud en el dominio de las frecuencias mediante la transformada discreta de Fourier, del cual el usuario definirá median filtro Pasa banda, con que frecuencias del registro trabajará. Finalmente, de las frecuencias seleccionados se aplicará la transformada inversa y se obtendrá el registro filtrado.

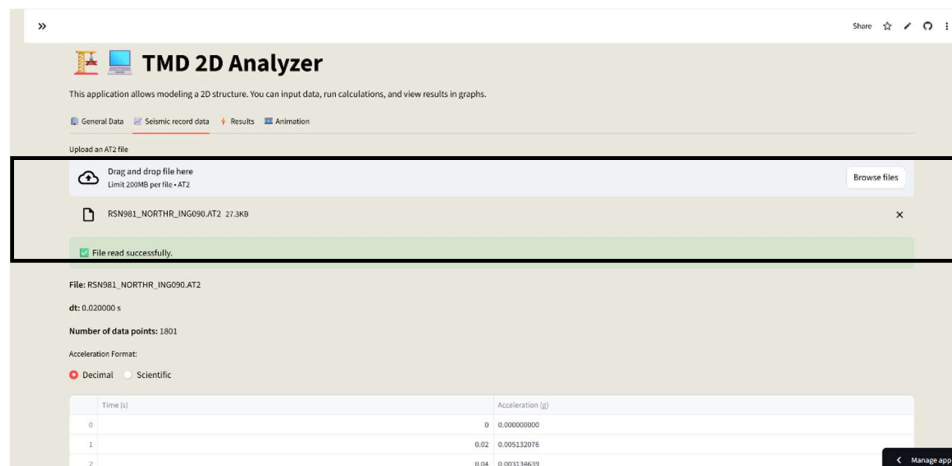


Ilustración 8. Sección de Ingreso de registros Sísmicos STREAMLIT

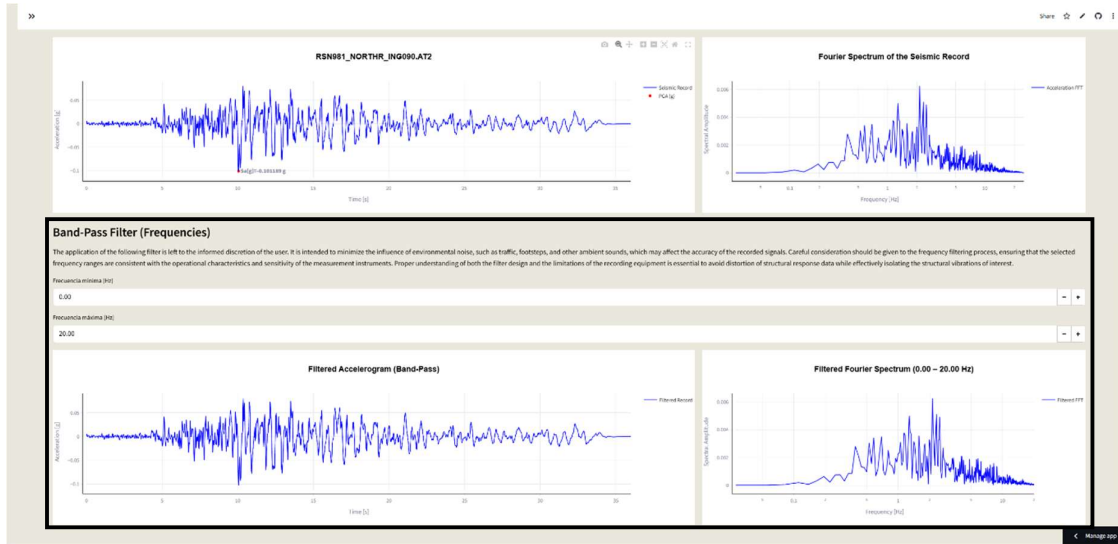


Ilustración 9. Sección de filtro Pasabanda en STREAMLIT

5.3.4 SECCION DE RESULTADOS

En esta sección el usuario podrá ejecutar el aplicativo y obtener los resultados de parámetros óptimos del AMS, el programa la información de la masa optima del dispositivo y a qué modo de vibrar se debe sintonizar para obtener los mejores resultados. Como resultado se obtendrá un mapa de calor de las configuraciones analizadas por la aplicación y ubicando sus parámetros óptimos.

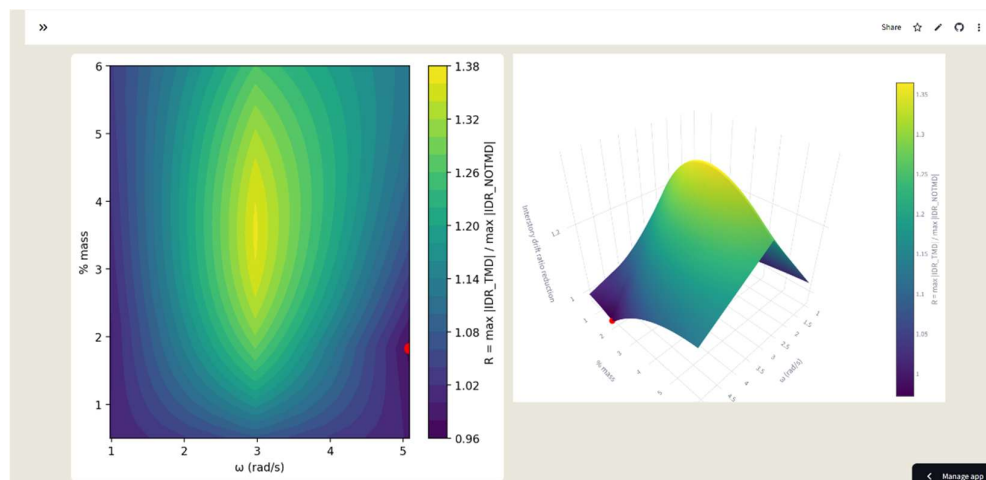


Ilustración 10. Mapa de resultados con configuraciones de AMS en STREAMLIT

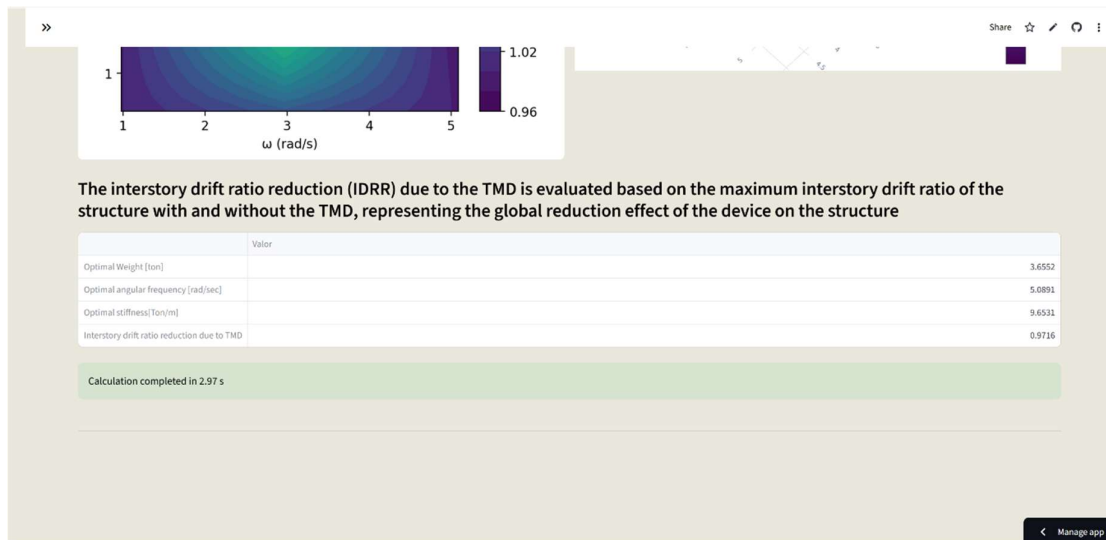


Ilustración 11. Sección de resultados óptimos del AMS y factor de reducción de deriva máxima en la estructura. STREAMLIT

Para el caso de un grado de libertad, se mostrará una gráfica 2D mostrando la masa óptima para el registro sísmico.

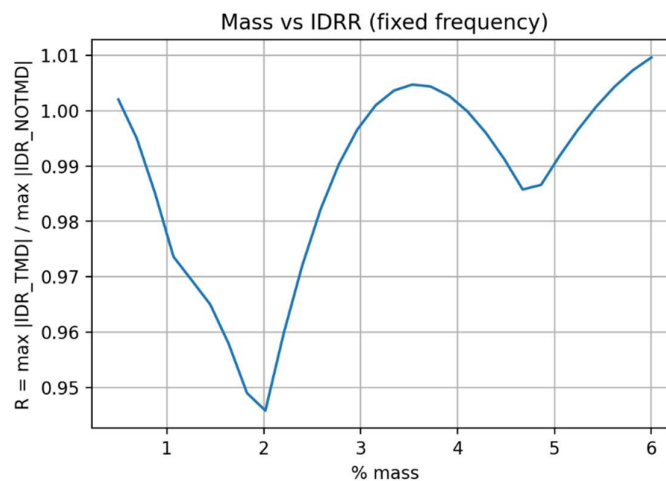


Ilustración 12. Resultados óptimos del AMS para un grado de libertad. STREAMLIT

5.3.5 SECCION DE ANIMACIÓN DE ESTRUCTURA CON AMS Y SIN ESTE Y GRAFICO DE DERIVA MAXIMA.

En la presente sección se encontrará información referente a animaciones interactivas que permiten observar y entender el beneficio de que tiene el AMS sobre la estructura.

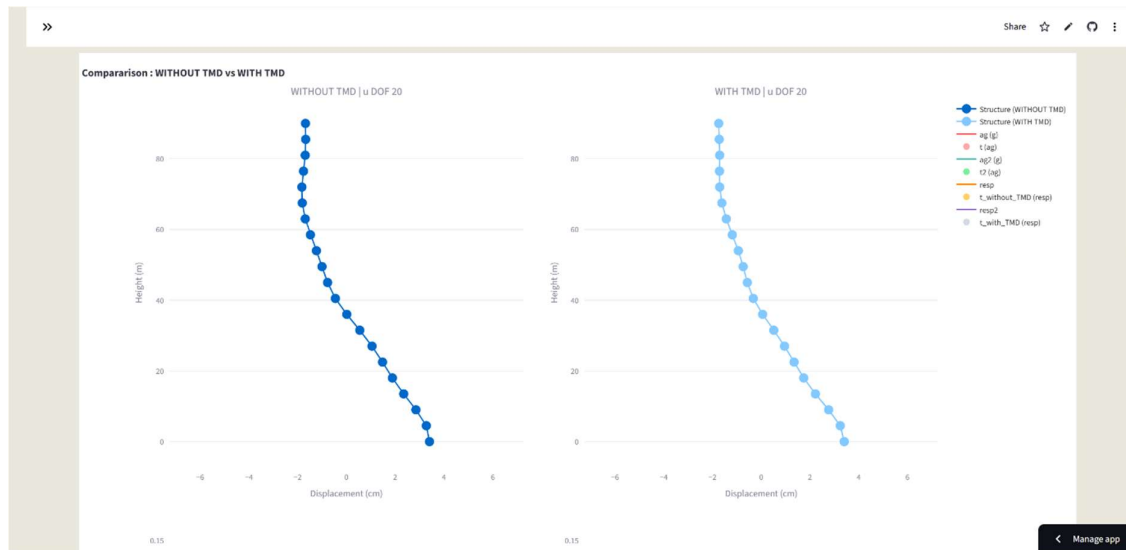
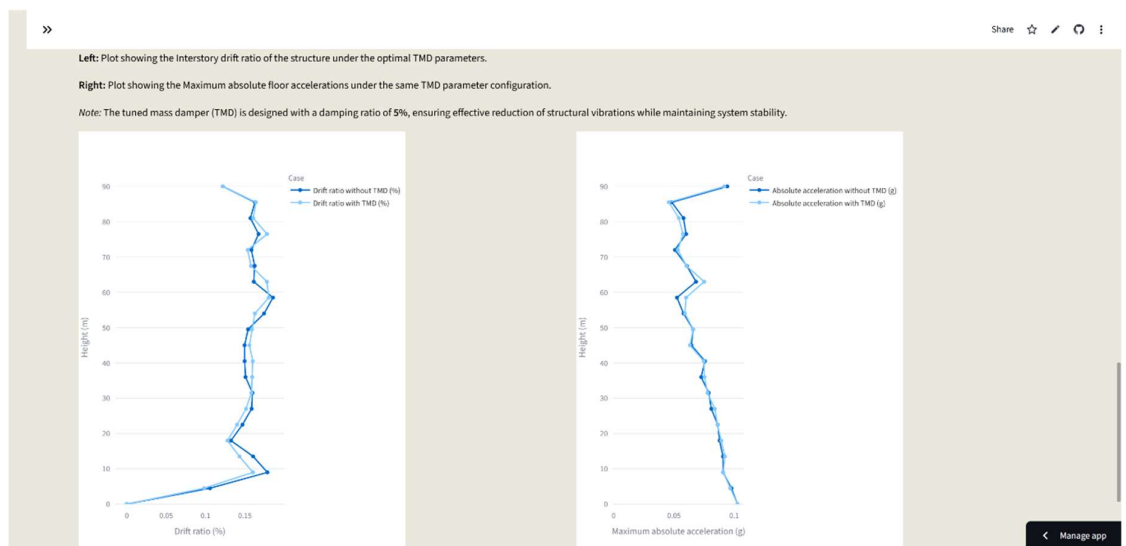


Ilustración 13. Sección de respuesta en el tiempo de estructura sin AMS y con AMS optimo. STREAMLIT



CAPITULO VI

6. VALIDACION DE RESULTADOS

Para la validación de los resultados se realizará un modelo en el aplicativo realizado, el cual será contrastado con resultados del software ETABS bajo las mismas consideraciones de análisis.

Para ello vamos a modelar la siguiente estructura:

Tabla 3. Parámetros de Análisis para validar, en aplicativo en STREAMLIT y ETABS

CONSIDERACION DE ANALISIS	VALOR
Consideración de deformación por corte	NO
Número de Pisos	35
Altura de piso	4.50m
Vanos	3
Distancia de Vanos	6.0m
Módulo de Elasticidad	21500.00 MPa
Sección de Columna	80x80cm
Sección de Viga	30x70cm
Peso reactivo por cada Piso	20 ton

6.1. VALIDACION DE PROPIEDADES DINAMICAS DE LA ESTRUCTURA

Como paso inicial para realizar la validación de resultados de la estructura compararemos los resultados de los periodos de las formas de vibrar y la participación de Masa de cada modo, con lo que validaremos el correcto ensamblaje de la Matriz de Rigidez de la estructura y la correcta asignación de las masas.

Options

Select study model

BERNOULLI-EULER MODEL (WITHOUT RIGID END Z...

Geometry of the frame

Expand

Number of Spans:

3

Number of Floors (default):

35

Span Distance [m] (default):

6.00

Height [m] (default):

4.50

Sectional Data of the Structure (General)

Expand

Base Column [m]: (All floors):

0.80

Column Height [m]: (All floors):

0.80

Base Beam [m]: (All floors):

0.30

Beam Height [m]: (All floors):

0.70

Sectional Data by Floor

Expand

Tabla de Secciones por Piso

	Piso	Base Columna(m)	Altura Columna(m)	Base
0	1	0.8	0.8	
1	2	0.8	0.8	
2	3	0.8	0.8	
3	4	0.8	0.8	
4	5	0.8	0.8	
5	6	0.8	0.8	
6	7	0.8	0.8	

Material of the structure (general)

Expand

Elasticity Modulus

Poisson's Ratio

(MPa)

==

21500.00

0.20

Weights of the Floors (general)

Expand

Weight [Tonf]: (All floors):

20.00

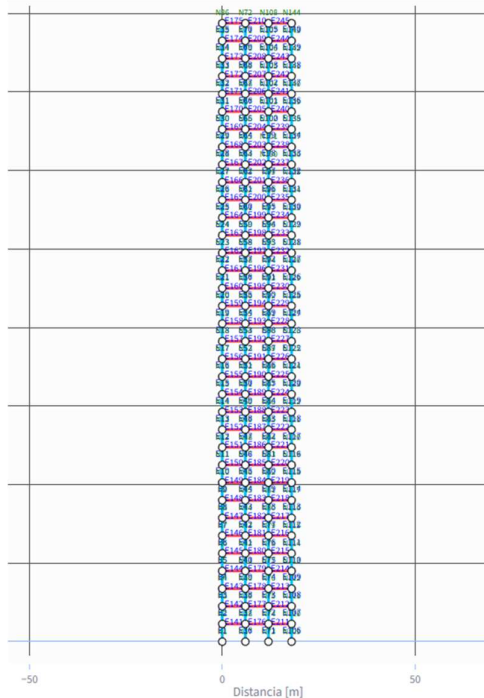
Weight per floor

Expand

Ilustración 15. Ingreso de datos de la estructura. STREAMLIT

Modelo de aplicativo

Pórtico 2D - Numeración de Nodos y Elementos



Modelo ETABS



Ilustración 16. Modelo de edificio de Validación. a) izquierda representación gráfica de Aplicativo. b) derecha representación gráfica de modelo en ETABS

Tabla 4.Resultado exportado CSV de propiedades dinámicas de la estructura. STREAMLIT

w(rad/seg)	T(seg)	%Participación	%Participación Acumulada
1.831011271	3.431538302	75.29176032	75.29176032
5.840676111	1.075763351	13.59989975	88.89166007
10.77676072	0.583030975	3.685034292	92.57669436
15.51620891	0.40494333	1.872962155	94.44965652
20.52518135	0.306120818	1.124800746	95.57445726
25.71933136	0.244298159	0.776936094	96.35139336
31.25325271	0.201041004	0.570231459	96.92162481
37.10455996	0.169337281	0.444725171	97.36634999
43.35945567	0.144909229	0.35715528	97.72350527
50.00915021	0.125640713	0.296297637	98.0198029
57.10674604	0.110025273	0.249804968	98.26960787
64.64423653	0.097196373	0.214691813	98.48429968
72.65223515	0.086483028	0.18629602	98.6705957
81.11813463	0.077457221	0.163613417	98.83420912
90.05399413	0.069771312	0.144554784	98.9787639
99.4390438	0.063186301	0.128704378	99.10746828
109.2675417	0.057502761	0.115008515	99.2224768
119.5068763	0.052575931	0.103254556	99.32573135
130.1318815	0.048283213	0.092860386	99.41859174
141.0934727	0.044532076	0.083692497	99.50228424
152.3434123	0.041243564	0.075403161	99.5776874
163.8104597	0.038356435	0.067893012	99.64558041
175.4183429	0.035818291	0.060939004	99.70651941
187.0677721	0.033587749	0.054459027	99.76097844
198.6498562	0.031629448	0.048302704	99.80928114
210.0334235	0.029915169	0.042403493	99.85168464
221.0760258	0.028420926	0.036665909	99.88835055
231.6168472	0.027127497	0.031054621	99.91940517
241.4873348	0.026018695	0.025542604	99.94494777
250.5101223	0.025081563	0.020166566	99.96511434
258.5104414	0.024305344	0.015011733	99.98012607
265.3202223	0.023681517	0.010241793	99.99036786
270.789253	0.02320323	0.00608573	99.99645359
274.7912107	0.022865307	0.002821801	99.9992754
277.2315646	0.022664033	0.000724605	100

Tabla 5.Resultados de propiedades dinámicas exportados de ETABS

TABLE: Modal Participating Mass Ratios				
Case	Mode	Period sec	UX	SumUX
Modal	1	3.432	0.7529	0.7529
Modal	2	1.076	0.136	0.8889
Modal	3	0.583	0.0369	0.9258
Modal	4	0.405	0.0187	0.9445
Modal	5	0.306	0.0112	0.9557
Modal	6	0.244	0.0078	0.9635
Modal	7	0.201	0.0057	0.9692
Modal	8	0.169	0.0044	0.9737
Modal	9	0.145	0.0036	0.9772
Modal	10	0.126	0.003	0.9802
Modal	11	0.11	0.0025	0.9827
Modal	12	0.097	0.0021	0.9848
Modal	13	0.086	0.0019	0.9867
Modal	14	0.077	0.0016	0.9883
Modal	15	0.07	0.0014	0.9898
Modal	16	0.063	0.0013	0.9911
Modal	17	0.058	0.0012	0.9922
Modal	18	0.053	0.001	0.9933
Modal	19	0.048	0.0009	0.9942
Modal	20	0.045	0.0008	0.995
Modal	21	0.041	0.0008	0.9958
Modal	22	0.038	0.0007	0.9965
Modal	23	0.036	0.0006	0.9971
Modal	24	0.034	0.0005	0.9976
Modal	25	0.032	0.0005	0.9981
Modal	26	0.03	0.0004	0.9985
Modal	27	0.028	0.0004	0.9989
Modal	28	0.027	0.0003	0.9992
Modal	29	0.026	0.0003	0.9994
Modal	30	0.025	0.0002	0.9997
Modal	31	0.024	0.0002	0.9998
Modal	32	0.024	0.0001	0.9999
Modal	33	0.023	0.0001	1
Modal	34	0.023	0.00002822	1
Modal	35	0.023	0.000007246	1

Como se observa en las dos tablas anteriores se obtiene el mismo resultado, bajo las mismas consideraciones de análisis. Se debe tomar en cuenta que el aplicativo no toma en consideración las zonas rígidas, por lo que se tuvo que corregir este efecto en ETABS, además que se está tomando en cuenta que las deformaciones por corte no afectan al sistema.

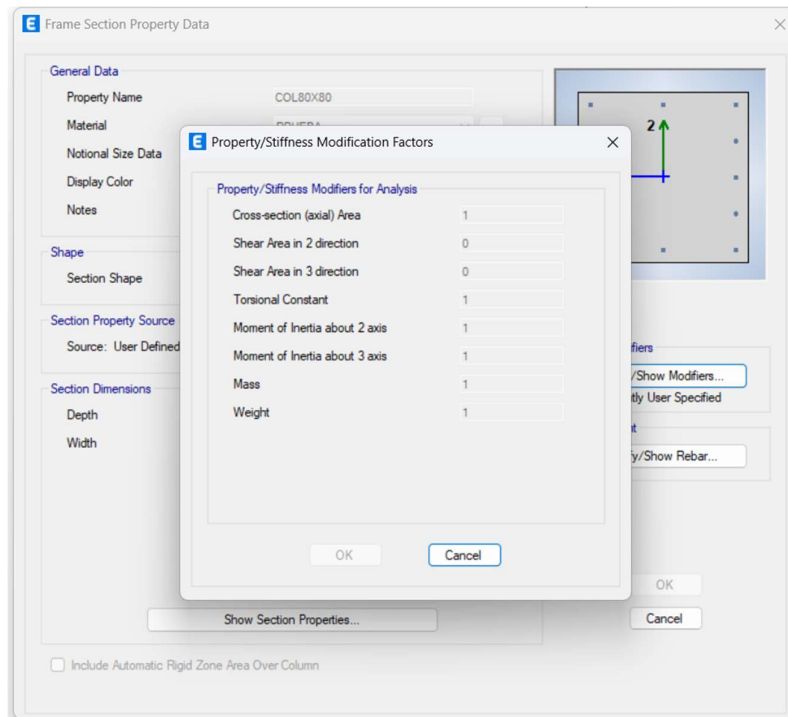


Ilustración 17. Supresión de efecto de deformaciones por cortante en ETABS

6.2. VALIDACION DE RESPUESTA DE ANALISIS TIEMPO-HISTORIA

Para la validación de la respuesta tiempo-historia, se va a realizar la comparación de resultado bajo el mismo registro sísmico y tomando en consideración la colocación del AMS y sin este, además, en este caso específico no se realizará el filtrado de frecuencias para trabar con el mismo Archivo .AT2 en ETABS.

La validación se la realizará con el Registro Sísmico de RSN981 (Northridge-01, 1/17/1994, Inglewood - Union Oil), que se lo tomó aleatoriamente para la verificación de resultados.

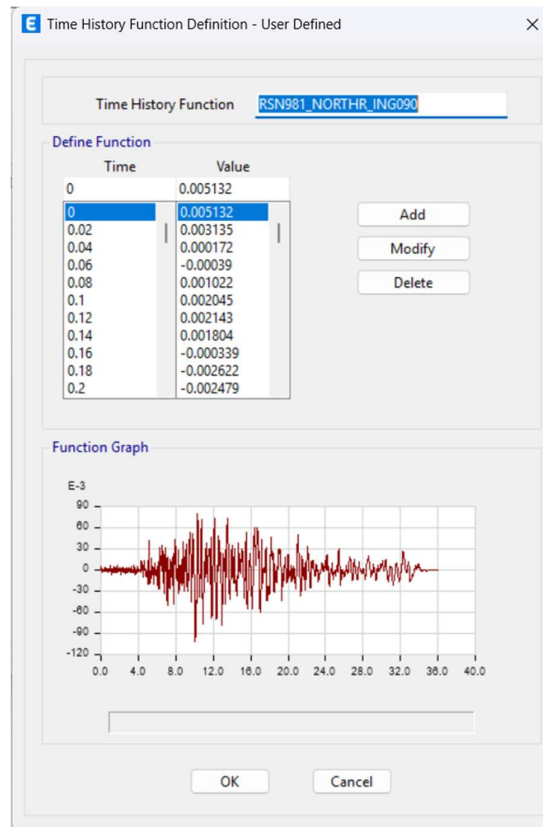


Ilustración 18. Registro sísmico RSN981 ingresado en ETABS

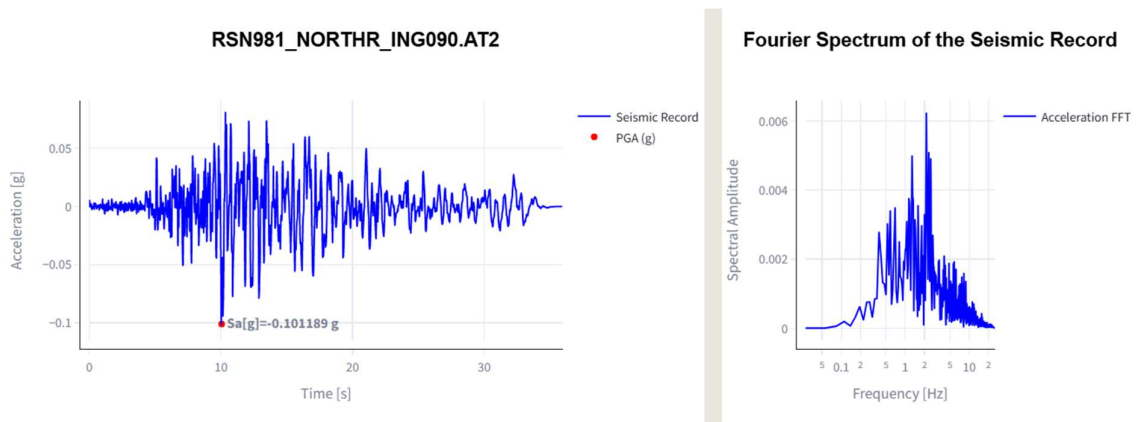


Ilustración 19. Registro sísmico RSN981 ingresado en Aplicativo STREAMLIT

Como resultado del análisis de la aplicación en STREAMLIT para el registro sísmico seleccionado, obtenemos la siguiente respuesta de optimización de los parámetros de AMS.

Tabla 6. Parámetros Calculados para el AMS. (Validación de resultados)

Peso óptimo (Ton)	22.0862
Frecuencia angular óptima (rad/seg)	5.8407
Rigidez del resorte óptimo (Ton/m)	76.8289
Reducción de la relación de deriva de entrepiso.	0.8276

Tales resultados se ingresarán en ETABS para la comprobación de correcto ensamblaje de matriz de rigidez y verificación de reducción de la Deriva de entrepiso por la inclusión del AMS.

Para la colocación del AMS en ETABS, se agregó un piso más al modelo, para que el software lo agregue como un grado de libertad adicional con masa individual a los pisos contiguos. Posterior a esto se asigna el elemento Link con las propiedades calculadas en la Aplicación para comparar resultados.

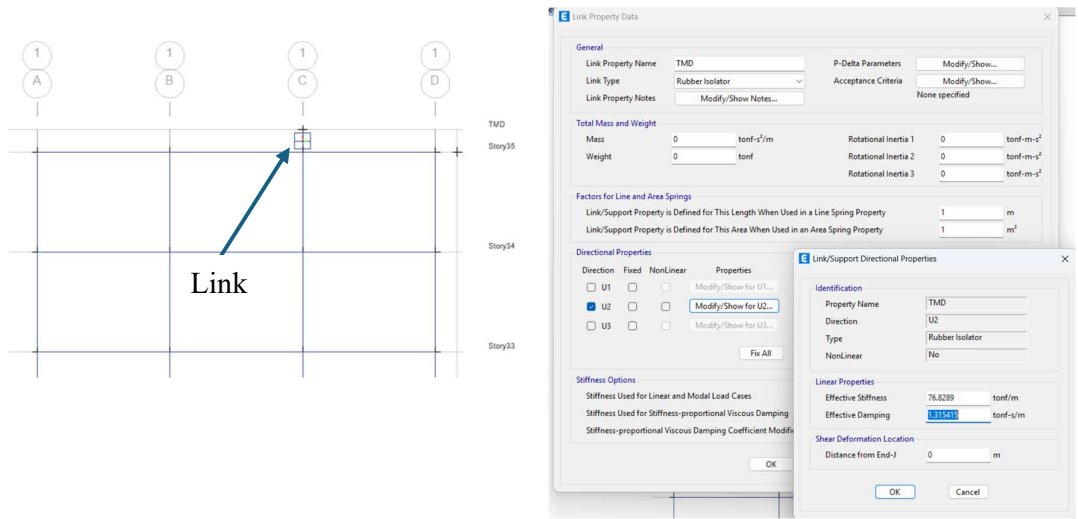


Ilustración 20. Colocación de Link en ETABS con propiedades de AMS calculado en aplicativo STREAMLIT

Se debe tomar en consideración que para la definición del amortiguamiento se debe usar la siguiente expresión.

$$C = 2\xi\omega m = 2 * 0.05 * 5.8407 \text{ rad/s} * \frac{22.0862 \text{ Ton}}{9.8067 \text{ m/s}^2} = 1.315415 \text{ Ton} - \text{s/m}$$

Ecuación 20. Amortiguamiento calculado (Validación de resultados)

Al tener la propiedad de (Lumped Mass) en ETABS, podemos agregar las masas en cualquier punto del piso. En este caso se agregó en unidades de Peso, para que el software automáticamente calcule las masas.

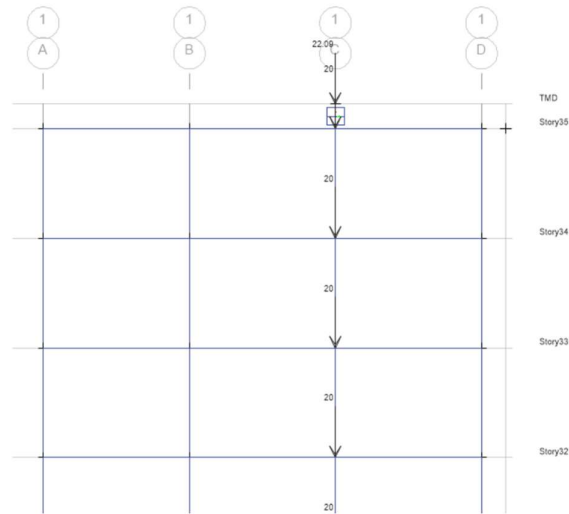


Ilustración 21. Pesos colocados en ETABS como carga puntual. (Validación de resultados)

Una vez colocada las propiedades en el ETABS, procedemos a realizar las comparaciones de los resultados.

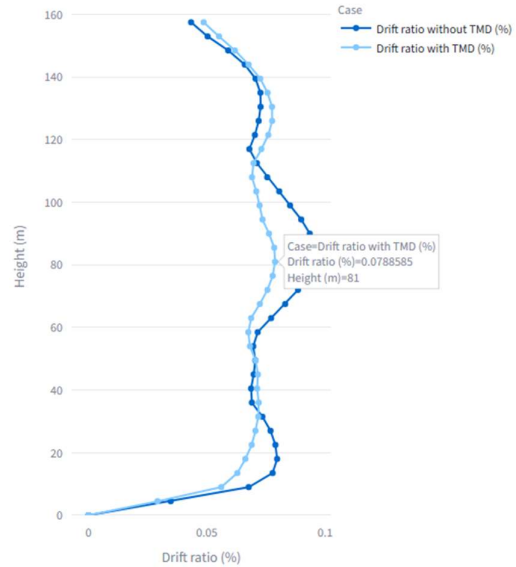
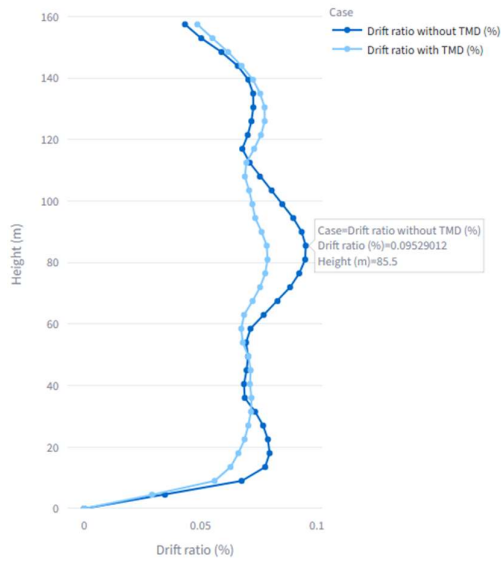
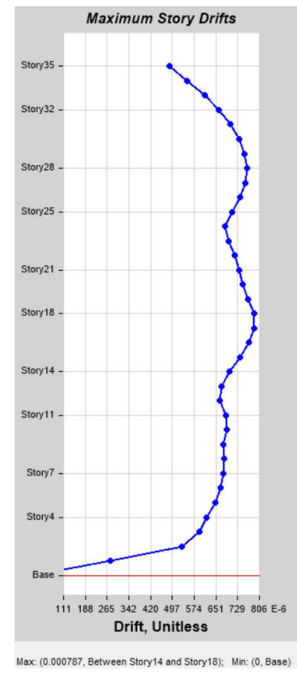
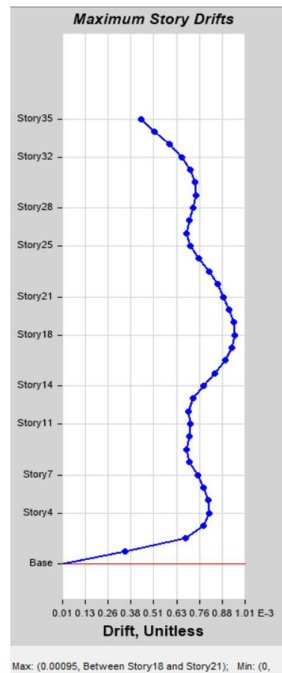


Ilustración 22. Izquierda Superior: Derivas de piso con ETABS sin AMS; Derecha superior: Derivas de piso con ETABS con AMS; Izquierda Inferior: Derivas de piso del Aplicativo sin AMS; Derecha Inferior: Derivas de piso del Aplicativo con AMS.

Tabla 7. Error relativo entre máximas derivas de piso modelo ETABS-Aplicativo (Validación de Resultados)

	MODELO SIN AMS	MODELO CON AMS
Máxima Deriva de piso ETABS	0.00095	0.000787
Máxima Deriva de piso Aplicativo	0.0009529	0.000788585
ERROR RESPECTO A ETABS%	0.3052%	0.2013%

CAPITULO VII

7. DOCUMENTACIÓN Y REPRODUCIBILIDAD

7.1. DOCUMENTACION DEL CÓDIGO

La documentación del código implica una de las actividades dentro de la elaboración del desarrollo de herramientas computacionales que crea valor a este, ya que permite que el usuario comprenda de forma clara la estructura de la programación, lo que facilita la interpretación del flujo de trabajo.

7.2. REPRODUCIBILIDAD

La reproducibilidad implica que el usuario pueda obtener el mismo código y que con los mismos datos de entrada, pueda obtener resultados equivalentes en las mismas condiciones. Para ello se han especificado librerías, versiones de desarrollo y dependencias necesarias para evitar ambigüedades técnicas. Esto incrementa la transparencia de trabajo y permite futuras mejoras de validaciones y extensiones del programa.

7.2.1 REPOSITORIO

El repositorio el código se encuentra albergado en <https://github.com/Dagu2104/TMD-Analyzer> en el cual el usuario podrá ver el código fuente para sus análisis. Para ejecutarlo podrá visualizarse en <https://tmd-analyzer.streamlit.app/>.

7.3. GUIA DE USUARIO

7.3.1 INTRODUCCIÓN AL PROGRAMA

TMD 2D Analyzer es un programa interactivo para la optimización de los parámetros dinámicos de un Amortiguador de Masa Sintonizada (TMD) utilizando un registro sísmico dado. No requiere instalación y se ejecuta a través de un enlace de Streamlit.

7.3.1.1 BARRA LATERAL PARA INGRESO DE DATOS.

La Barra lateral permite al usuario ingresar las características estructurales, como:

- Elegir la formulación de vigas (Euler–Bernoulli o Timoshenko).
- Distancia entre vanos, número de vanos, distancia entrepisos, número de pisos.
- Secciones de los miembros, características del material (Módulo de Elasticidad y coeficiente de Poisson)
- Pesos de los pisos.

Options

Select study model

BERNOULLI-EULER MODEL (WITHOUT RIGID ... ▼

BERNOULLI-EULER MODEL (WITHOUT RIGID EN...

B-E-TIMOSHENKO (WITHOUT RIGID END ZONES)

> Expand

Sectional Data of the Structure (General)

> Expand

Material of the structure (general)

> Expand

Weights of the Floors (general)

> Expand

Options

Select study model

BERNOULLI-EULER MODEL (WITHOUT RIGID ... ▼

Geometry of the frame

▼ Expand

Number of Spans:

3 - +

Number of Floors (default):

35 - +

Span Distance [m] (default):

6.00 - +

Height [m] (default):

4.50 - +

Options

Select study model

BERNOULLI-EULER MODEL (WITHOUT RIGID ... ▾

Geometry of the frame

> Expand

Sectional Data of the Structure (General)

▾ Expand

Base Column [m]: (All floors):

0.80 - +

Column Height [m]: (All floors):

0.80 - +

Base Beam [m]: (All floors):

0.30 - +

Beam Height [m]: (All floors):

0.70 - +

Options

Select study model

BERNOULLI-EULER MODEL (WITHOUT RIGID ... ▾

Geometry of the frame

> Expand

Sectional Data of the Structure (General)

> Expand

Material of the structure (general)

▾ Expand

Elasticity Modulus (MPa)	Poisson's Ratio
21500.00 - +	0.20

Options

Select study model

BERNOULLI-EULER MODEL (WITHOUT RIGID ... ▾

Geometry of the frame

> Expand

Sectional Data of the Structure (General)

> Expand

Material of the structure (general)

> Expand

Weights of the Floors (general)

▾ Expand

Weight [Tonf]: (All floors):

20.00 - +

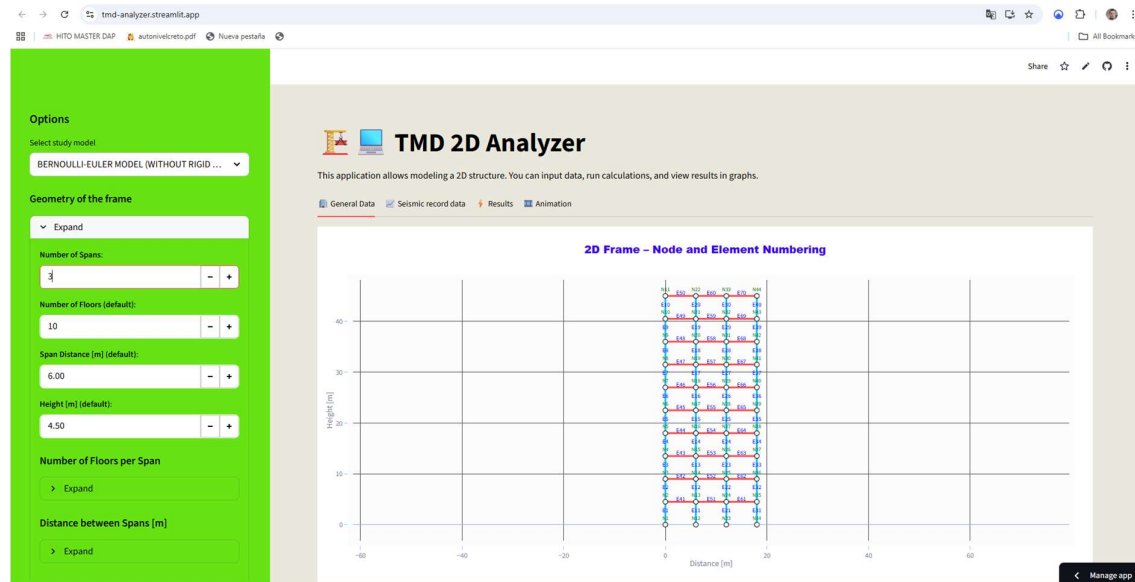
Weight per floor

> Expand

Ilustración 23. Banda de ingreso de datos de la estructura

7.3.1.2 PESTAÑA DATOS GENERALES

En la pestaña Datos Generales, se grafica la estructura completa y muestra sus propiedades dinámicas, como periodos naturales, frecuencias angulares, porcentajes de participación modal de masa y participación acumulada de masa.



7.3.1.3 PESTAÑA DE REGISTRO SÍSMICO

En la pestaña Datos de Registro Sísmico, el usuario debe cargar un registro en formato PEER, donde el programa detecta automáticamente el paso de tiempo (dt) y el número de datos (g), al cual automáticamente se agrega un punto inicial en $t = 0$ s con aceleración 0 g, por lo tanto, existirán $N+1$ datos, además, permite graficar tanto el registro original como el registro filtrado por rango de frecuencias definido por el usuario (Filtro-Pasabanda).

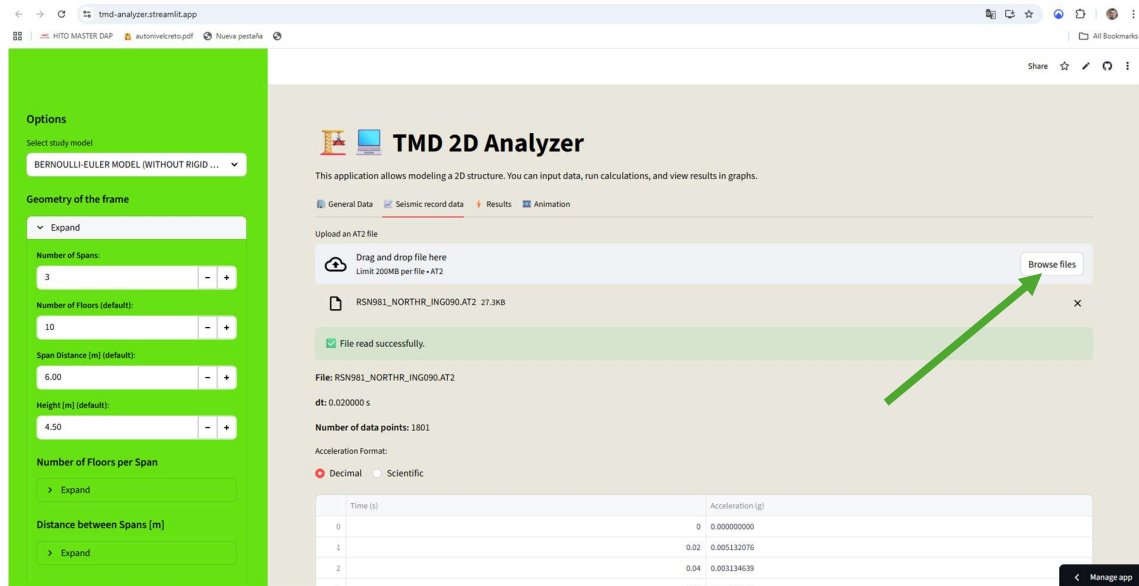


Ilustración 24. Sección de ingreso de registro sísmico, formato .AT2

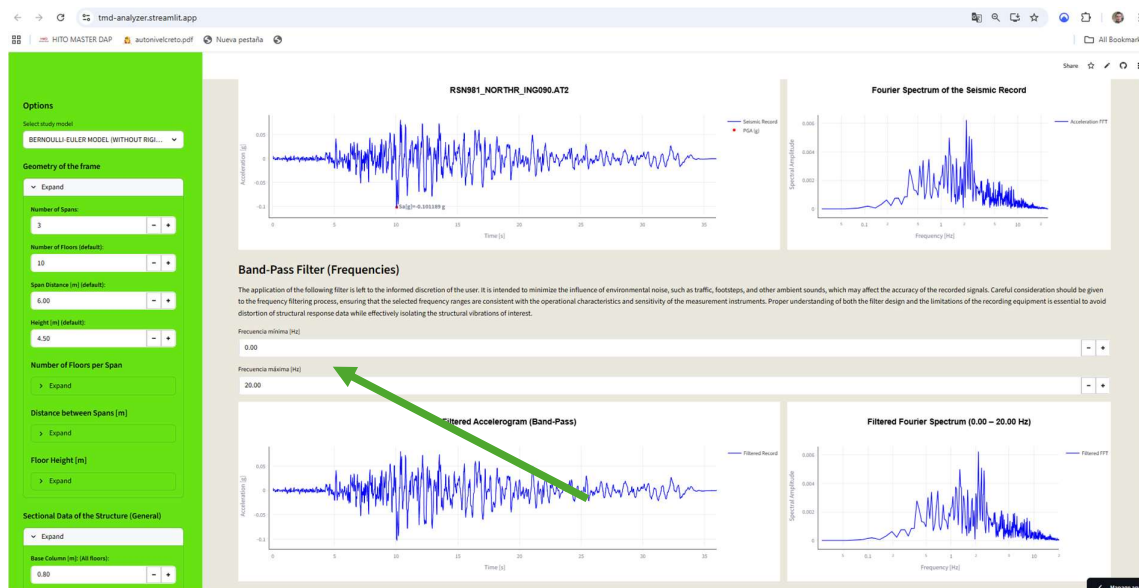


Ilustración 25. Selección de banda de frecuencias para análisis dinámico.

7.3.1.4 PESTAÑA DE RESULTADOS

En la pestaña Resultados, se muestran las frecuencias modales y las participaciones de masa de la estructura sin TMD, cuya suma acumulada de participaciones modales sea el inmediato superior al 90%.

Consecuentemente se generará dos gráficos de la nube de resultados de análisis con variaciones de masa y frecuencias modales de la estructura sin AMS (primer gráfico como mapa de calor y segundo gráfico Tridimensionalmente).

Por último, el usuario podrá observar los parámetros óptimos del AMS.

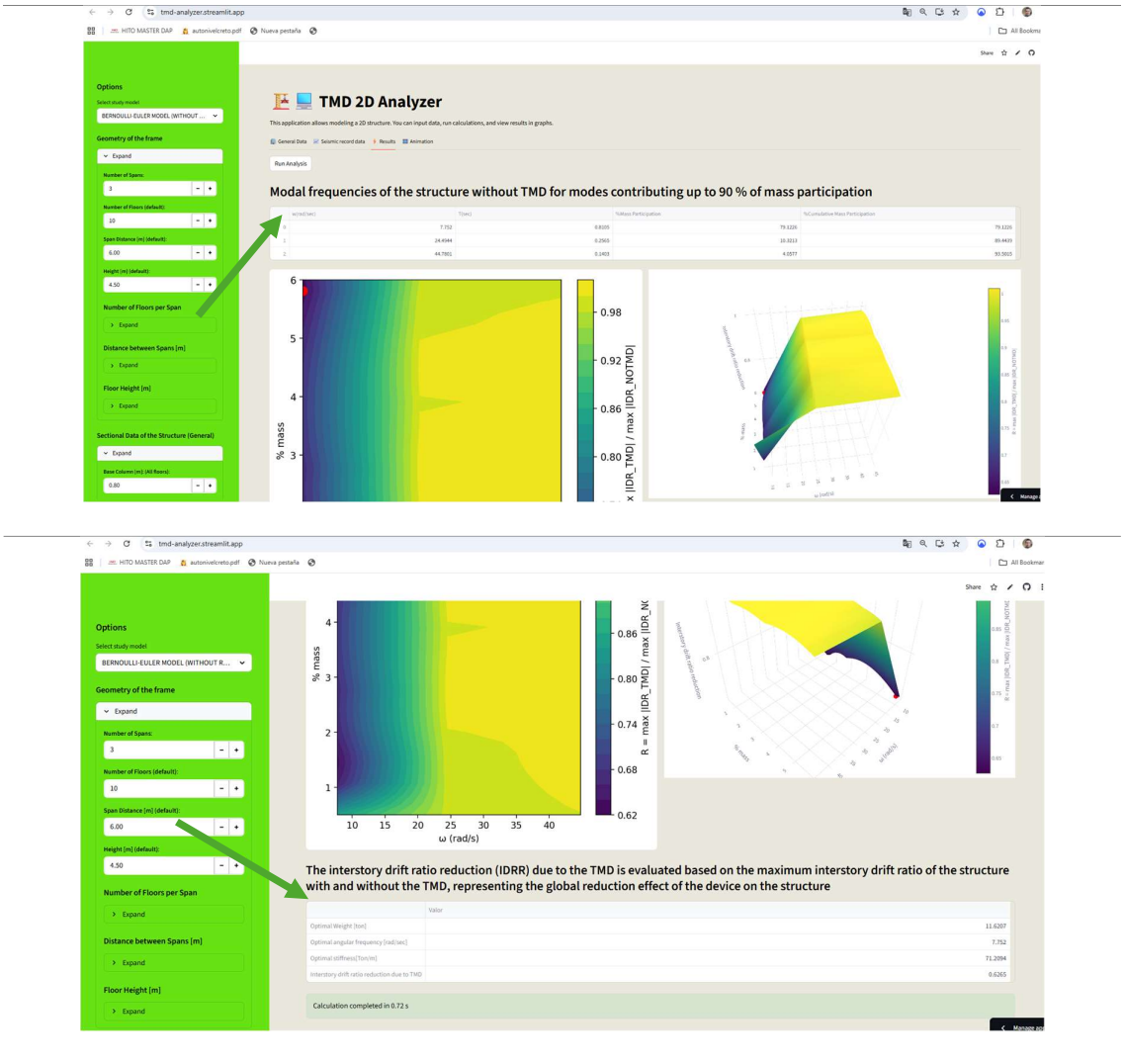


Ilustración 26. Resultados de análisis.

7.3.1.5 PESTAÑA ANIMACIÓN

En la pestaña Animación, el usuario puede observar la respuesta estructural con y sin AMS frente al registro sísmico y visualizar los gráficos de máximas derivas relativas de entre pisos y aceleraciones máximas absolutas de los pisos.

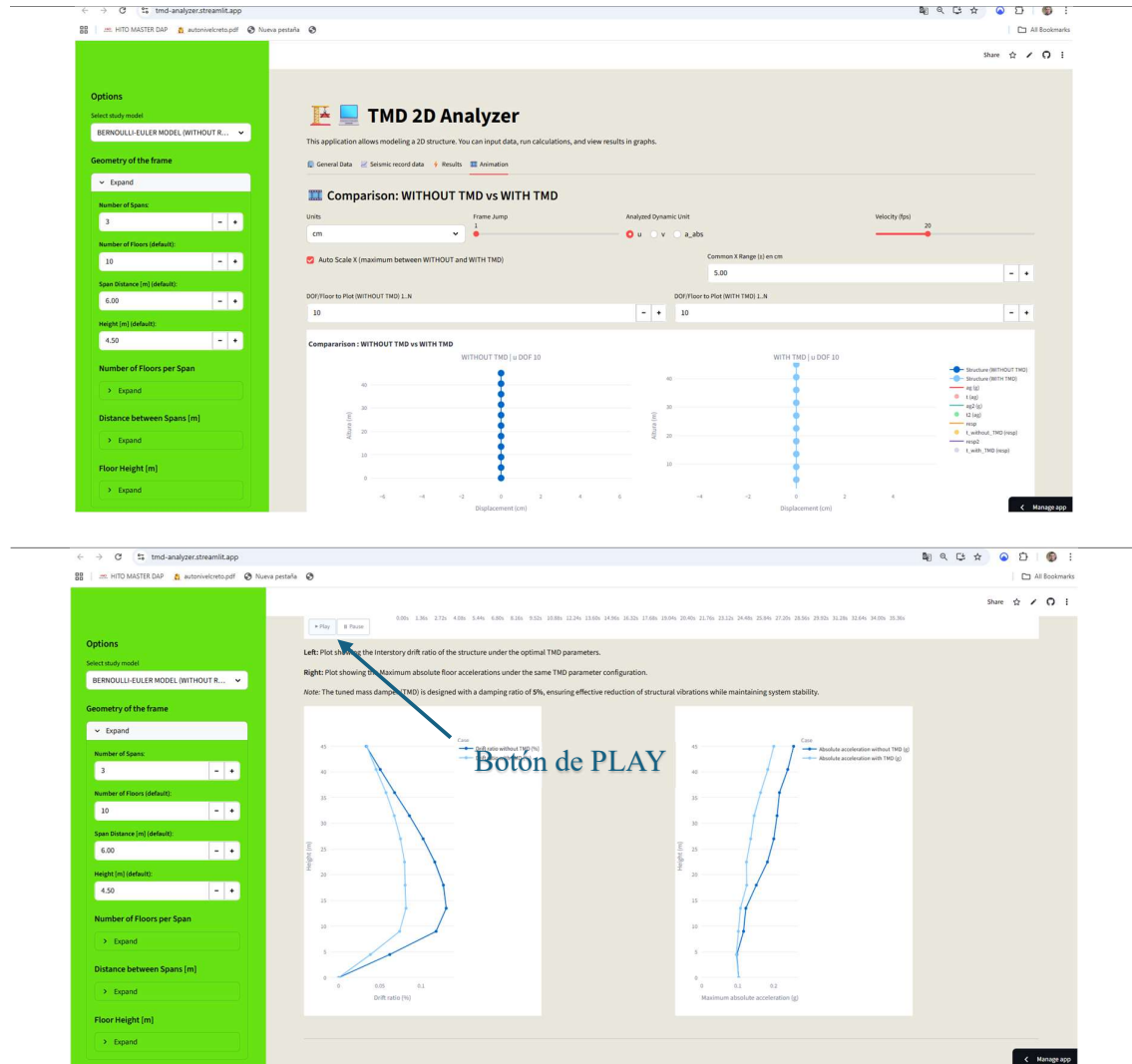


Ilustración 27. Animación de resultados y grafico de Derivas relativas máximas y aceleraciones absolutas máximas de los pisos.

CAPITULO VIII

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1. CONCLUSIONES

- Se realizó la revisión de la teoría fundamental de los AMS, abordando los principios de funcionamiento, formulación matemática y criterios de diseño. Este análisis permitió sentar la base teórica para el desarrollo de la Aplicación objetivo de este estudio, garantizando coherencia entre la teoría dinámica para un grado de libertad en múltiples grados de libertad.
- Se implementaron algoritmos mediante las formulaciones clásicas para obtener la respuesta de estructuras sin dispositivos.
- Se desarrollaron algoritmos que ensambla el AMS a la estructura. Este modelo permite considerar adecuadamente las propiedades individuales del dispositivo, permitiendo el análisis comparativo de repuestas.
- La implementación de algoritmos de Beta de Newmark para múltiples grados de libertad permitió obtener las respuestas de excitaciones no armónicas-no periódicas. Este algoritmo permitió evaluar el desempeño dinámico de las estructuras con y sin la implementación del AMS.
- Se implementó la técnica de filtrado de señales Pasa-banda, permitiendo al usuario elegir el rango de frecuencias del registro sísmico con el que se desea analizar la estructura.
- Se logró calcular y comparar la respuesta en el dominio del tiempo de sistemas de SDOF y MDOF, lo que demostró una reducción significativa en la amplitud de la respuesta en derivas relativas de la estructura, confirmando su efectividad como dispositivo pasivo de control de vibraciones.

- Los algoritmos implementados fueron ajustados y mejorados a partir de pruebas, asegurando su estabilidad numérica y precisión.
- Los resultados obtenidos fueron validados bajo la elección de un modelo estructural implementado en ETABS. Esta comparación permitió validar los modelos bajo las mismas condiciones, dando resultados prácticamente iguales, además de asegurar que se encontró los parámetros óptimos del AMS.
- Se diseñó una interfaz gráfica que facilita el ingreso de datos y la visualización de resultados, mejorando la interacción del usuario con la aplicación.
- Se desarrolló una aplicación web mediante STREAMLIT, el cual integra todos los algoritmos de análisis comentados en este documento.
- Se elaboró una guía en Github que explica el correcto uso del aplicativo. Esta documentación promueve la correcta comprensión del funcionamiento para el usuario.
- El código fuente ha sido comentado para que su correcta comprensión, lo que permite mejoras a futuro o implementación de otras extensiones.

8.2. RECOMENDACIONES

- Se recomienda ampliar la investigación para modelos estructurales tridimensionales, que permita la toma de decisión de colocación de AMS para la reducción de torsión en planta.
- Se recomienda ampliar la investigación para amortiguadores no lineales y comprobar que afectación tienen estos sobre la respuesta estructural.

BIBLIOGRAFÍA

Chopra, A. K. . (2014). *Dinámica de estructuras*. Pearson.

Connor, Jerome., & Laflamme, Simon. (2014). *Structural motion engineering*. Springer.
https://www.researchgate.net/publication/264310235_Structural_Motion_Engineering

Damper in Taipei 101 building. | Download Scientific Diagram. (n.d.). Retrieved January 27, 2026,
from https://www.researchgate.net/figure/Damper-in-Taipei-101-building_fig1_323577584

GitHub · Build and ship software on a single, collaborative platform · GitHub. (n.d.). Retrieved
September 6, 2025, from <https://github.com/>

Introducing Tuned Mass Dampers | January 2017 | Highlighting Japan. (n.d.). Retrieved January 28,
2026, from https://www.gov-online.go.jp/eng/publicity/book/hlj/html/201701/201701_03_en.html

Matplotlib — Visualization with Python. (n.d.). Retrieved September 6, 2025, from
<https://matplotlib.org/>

Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures : provisions. (2022).
American Society of Civil Engineers.

Mousa, W. A.-Hakim. (2020). *Advanced digital signal processing of seismic data*. Cambridge University
Press.

NumPy. (n.d.). Retrieved September 6, 2025, from <https://numpy.org/>

Signal processing (scipy.signal) — SciPy v1.16.1 Manual. (n.d.). Retrieved September 6, 2025, from
<https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/signal.html>

Streamlit documentation. (n.d.). Retrieved September 6, 2025, from <https://docs.streamlit.io/>