

Laboratorio #3: Vibración libre y forzada en sistemas de MGD

*Fundamentos de Dinámica Estructural
Escuela de Ingeniería Civil y Geomática
Universidad del Valle
Santiago Martínez, Julian D. Calonge y Daniel Gómez PhD*

Introducción

En el estudio de la dinámica estructural, los sistemas con múltiples grados de libertad (MGDL) representan una parte esencial del análisis y diseño de estructuras complejas como edificios y puentes. Estos sistemas, debido a su naturaleza, requieren una comprensión profunda de cómo responden a diferentes excitaciones dinámicas.

Dentro de esta práctica de laboratorio, se introduce un software diseñado para simular un ensayo de vibración forzada real. Esta herramienta permite la configuración de experimentos específicos y la obtención de registros que posteriormente pueden ser analizados para extraer las propiedades dinámicas de un sistema.

Objetivo general: Profundizar en el análisis y comprensión de sistemas de MGD, aplicando en el laboratorio los conceptos teóricos adquiridos, enfocándose particularmente en pórticos de dos y tres pisos instrumentados para medir aceleraciones y desplazamientos tanto en el centro como en los laterales de las losas.

Normas para la entrega de informes

- Debe entregar un informe de laboratorio (tipo artículo científico) donde se desarrolle de manera completa y concisa las actividades propuestas. El informe debe tener una adecuada presentación, puntuación y ortografía. El documento debe tener una extensión máxima de 5 páginas.
- El laboratorio debe realizarse en grupos de **cuatro personas**. El informe debe entregarse dentro del plazo establecido. No se aceptarán informes una vez que el plazo haya vencido.
- La presencia de errores en la presentación puede resultar en una penalización en la nota obtenida en el laboratorio. Se recomienda revisar y corregir cuidadosamente la redacción del informe.
- Todos los archivos solicitados en el informe, ya sea en formato .m, .doc, .pdf u otros, deben ser colocados en la ubicación especificada en el classroom, correspondiente al laboratorio en cuestión.
- No se recibirán informes de laboratorio ni archivos relacionados que sean enviados por correo electrónico.

Ensayo No. 1: Prueba de vibración forzada mediante herramienta computacional

En esta sección, se llevará a cabo la evaluación de la respuesta dinámica de sistemas de múltiples grados de libertad sujetos a diferentes cargas armónicas utilizando un software que simula un laboratorio real (<https://santiagosandovaluv.github.io/T1/MGDL>). Para realizar este análisis, el laboratorio virtual dispone de una interfaz gráfica amigable e intuitiva que facilita al usuario la modelación de diversos sistemas dinámicos de manera rápida y sencilla. A través de este enfoque, se obtienen datos completos de aceleración y desplazamientos totales durante toda la duración del experimento. Estas pruebas posibilitan la representación gráfica del comportamiento de sistemas dinámicos y suministran datos esenciales para llevar a cabo un análisis dinámico que permita caracterizar el sistema de estudio.

Objetivo específico: Caracterizar experimentalmente las propiedades dinámicas de un modelo de MGDL a partir de un ensayo de vibración forzada.

Modelo experimental

Un modelo de MGDL es una representación matemática de un sistema estructural que tiene más de un grado de libertad, es decir, más de una coordenada necesaria para describir completamente su estado cinemático. Este modelo es esencial para comprender y analizar la dinámica de sistemas estructurales complejos. La Fig. 1 ilustra este concepto.

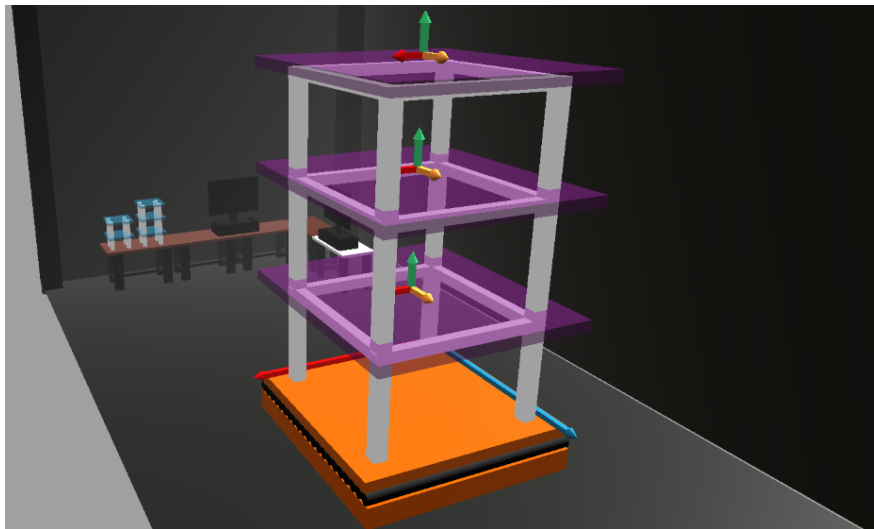


Figura 1: Elemento estructural empotrada en la base y con masas concentradas en el centroide de cada piso.

Instrumentación

En la parte superior e inferior de la estructura, se deben instalar acelerómetros sísmicos en la dirección del movimiento. La señal registrada por estos acelerómetros se acondiciona y se transmite a través de un cable coaxial hacia un bloque de procesamiento. La señal acondicionada se envía a una tarjeta de adquisición a una frecuencia de muestreo específica. Para medir el desplazamiento relativo, se utiliza un sensor láser ubicado en la masa de la estructura. Esta configuración puede observarse en la Fig. 2.

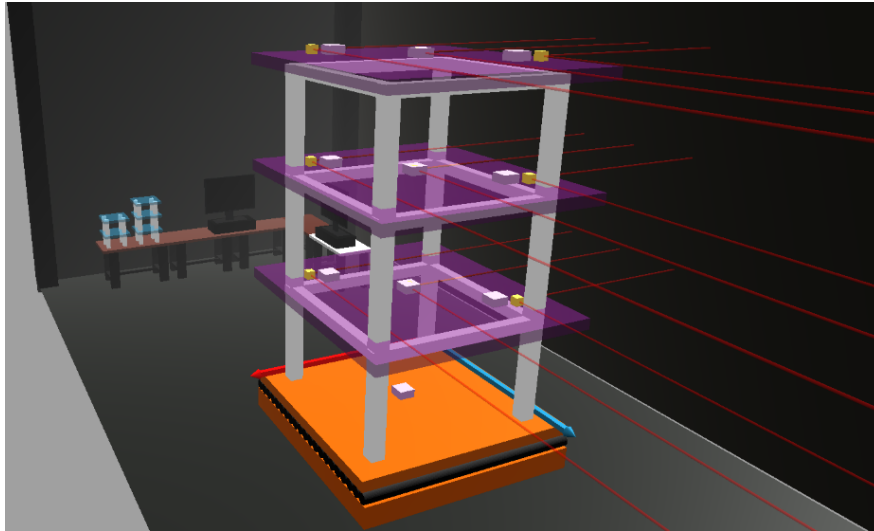


Figura 2: Montaje del ensayo a excitación armónica en la base con sensores.

Procedimiento

El estudiante realizará la identificación experimental de un sistema dinámico de MGD. Para ello, deberá definir las propiedades de los elementos que componen el sistema estructural. Posteriormente, establecerá un rango de frecuencias, duración y amplitud para llevar a cabo un barrido de frecuencias en la base de la estructura. La respuesta de la estructura se medirá utilizando acelerómetros y sensores de desplazamiento láser. Durante el ensayo, se podrá visualizar la respuesta del sistema en términos de aceleración y desplazamiento.

Actividades

1. Se analizará un pórtico de tres pisos. En la sección del software correspondiente a la definición de las propiedades del sistema, asigne una masa de 7000 Kg/m^3 y un espesor de losa t de 0.12 m . Las columnas y vigas deben tener secciones de $25 \times 25 \text{ cm}$ y módulos de elasticidad de 30 MPa , excepto las **dos columnas** que están sobre la línea azul de la Fig 2, las cuales deben tener secciones de $20 \times 20 \text{ cm}$ en toda su longitud. Para la definición del amortiguamiento, **cada grupo debe enviar un correo con los integrantes para que se les asigne un caso.**

Nota: Tenga en cuenta que el sistema puede idealizarse con masas concentradas en el centroide de las losas de $1 \times 1.5 \text{ m}$, ubicado en la coordenada **(0.5, 0.5)**. El sistema está empotrado en la base, y todos los elementos del marco, es decir, columnas y vigas, tienen una longitud de 1 metro . Las demás propiedades de los elementos pueden definirse en el menú de propiedades del sistema.

2. A continuación, elija un barrido de frecuencias como entrada al sistema, asignando una amplitud de $u_{go} = 0.02 \text{ m}$. Seleccione a su criterio un rango de frecuencias y la duración de la simulación basándose en el comportamiento esperado de la estructura. El barrido debe aplicarse con una combinación de $100\% E_{xx}$ y $100\% E_{yy}$. Luego, haga clic en el botón *Iniciar* y observe la respuesta en términos de aceleración y desplazamiento de la estructura.

- a) Construya una función de transferencia experimental (Diagrama de Bode) relacionando la salida de los sensores de desplazamiento con la entrada, utilizando la función

de MATLAB *tffestimate*. Debe generar tantas gráficas como crea conveniente. Con estas gráficas, determine las frecuencias naturales y las razones de amortiguamiento del sistema estructural utilizando ancho de banda. ¿Cuántas frecuencias logra identificar? Argumente su respuesta.

3. Realice un modelo analítico del pórtico de tres pisos en MATLAB y calcule las propiedades mecánicas y dinámicas del sistema.

- a) Reporte las matrices de rigidez, masa y amortiguamiento del sistema estructural completo, utilizando las razones de amortiguamiento modal obtenidas en el punto anterior.
- b) Calcule los modos de vibración y las frecuencias naturales. Determine el porcentaje de error entre las frecuencias calculadas de manera analítica y las encontradas experimentalmente.

4. Para la misma configuración estructural, realice en el laboratorio virtual y en su script de MATLAB un análisis del comportamiento del pórtico frente al sismo de El Centro. Considere que el sismo actúa con una combinación del 100 % E_{xx} + 30 % E_{yy} .

- a) Mediante un análisis cronológico (RHA), compare en una gráfica de desplazamiento vs. tiempo los desplazamientos en el centro de masa de cada piso obtenidos analíticamente en MATLAB con los obtenidos en el laboratorio virtual. Calcule el error entre los vectores de respuesta utilizando la función *goodnessOfFit* de MATLAB (Debe tener instalado el toolbox *System Identification*), así:

```

1
2 % fit = goodnessOfFit(x,xref,cost_func)
3
4 % x: Vector columna de respuesta del desplazamiento en el script de MATLAB
5 % xref: Vector columna de respuesta del desplazamiento del laboratorio virtual
6 % fit: Error en la comparacion (Puede tomar valores de 0 hasta Inf, donde 0 es una precision perfecta).
7
8 gof_1_x = goodnessOfFit(Desp_Piso1_x,Desp_Piso1_x_Lab_Virtual,'NMSE')
9 gof_1_y = goodnessOfFit(Desp_Piso1_y,Desp_Piso1_y_Lab_Virtual,'NMSE')
10
11 gof_2_x = goodnessOfFit(Desp_Piso2_x,Desp_Piso2_x_Lab_Virtual,'NMSE')
12 gof_2_y = goodnessOfFit(Desp_Piso2_y,Desp_Piso2_y_Lab_Virtual,'NMSE')
13
14 gof_3_x = goodnessOfFit(Desp_Piso3_x,Desp_Piso3_x_Lab_Virtual,'NMSE')
15 gof_3_y = goodnessOfFit(Desp_Piso3_y,Desp_Piso3_y_Lab_Virtual,'NMSE')
16
17 GOF = mean(gof_1_x,gof_1_y,gof_2_x,gof_2_y,gof_3_x,gof_3_y)

```

- b) Utilizando análisis espectral (RSA) y análisis cronológico (RHA), calcule los desplazamientos y derivas máximas por piso en los sentidos $x - x$ y $y - y$. Determine la sección de las columnas necesaria para que las derivas máximas del primer piso estén entre el 0.9 % y el 1.0 %.

Calificación

Para cada grupo se calculará el valor de MAC_{ae} mediante la siguiente ecuación que permite ver la precisión de los modos encontrados:

$$M = MAC_{ae} = \frac{\phi_a^T \phi_e}{\phi_a^T \phi_a \phi_e^T \phi_e} \quad (1)$$

Donde ϕ_a son los modos encontrados por cada grupo y ϕ_e los modos que se esperan que los estudiantes encuentren. Además se calculará la diferencia entre frecuencias analíticas (f_a) y las esperadas (f_e) así:

$$F = 1 - \left| \frac{f_a - f_e}{f_e} \right| \quad (2)$$

La nota de cada grupo se obtendrá a partir de la Ec. (3) utilizando la diferencia mínima y máxima de los grupos. Por lo tanto, en algunos términos el grupo con la diferencia mínima sacará 5 y el grupo con la máxima diferencia obtendrá 1.

$$Nota = 0,2 \times \text{Nota informe} + 0,4 \times (5 \times N) + 0,4 \times \left(5 - \frac{GOF - \min(GOF)}{\max(GOF) - \min(GOF)} \times 4 \right) \quad (3)$$

Donde $N = \text{promedio}(M, F)$ y GOF es el promedio de los errores utilizando la función *goodnessOfFit*.