



Universidad de Puerto Rico
Recinto Universitario de Mayagüez
Departamento de Ingeniería Civil y Agrimensura
INCI6997 Tópicos Especiales
Prof. María Cortes



Reporte Final

Andrea E. Cruz Chamorro	843 09 1666
Samuel Montalvo Pérez	802 13 4935
Prieser Brunat	502 17 0633

Tabla de Contenido

1. Introducción	4
2. Objetivos	4
3. Descripción de mesa vibratoria	5
4. Descripción del prototipo y modelo	11
5. Calibración de mesa vibratoria	15
5.1 Parámetros considerados en la calibración	15
5.2 Metodología de calibración	17
5.3 Resultados	18
• Mesa vibradora sin peso	18
• Mesa vibradora con la estructura	22
6. Modelo en SAP2000	23
6.1 Modelo	23
6.2 Terremotos	24
6.3 Resultados	25
7. Modelo con amortiguadores	26
7.1 Amortiguadores viscosos	26
7.2 Modelo en SAP2000	27
7.3 Resultados	28
Conclusión	32
Recomendaciones	32

Tabla de Figuras

Figura 3.1 Frame reaction. (fuente: ExDSRA)	5
Figura 4.1 Dimensiones del prototipo de acero (no a escala).	11
Figura 4.2 Relaciones de similitud.	12
Figura 4.3 Dimensiones del modelo utilizando el “artificial mass simulation method” (no a escala).	13
Figura 4.4 Modelo ubicada en la mesa vibratoria.	14
Figura 5.1 Comportamiento de la señal recibida al cambiar el “proportional gain”. Ilustración obtenida del “Controller Service Manual” del MTS.	15
Figura 5.2 Comportamiento de la señal recibida al cambiar el ‘integral gain’. Ilustración obtenida del ‘Controller Service Manual’ del MTS.	16
Figura 5.3 Comportamiento de la señal recibida al cambiar el ‘derivative gain’. Ilustración obtenida del “Controller Service Manual” del MTS.	16
Figura 5.4 Comportamiento de la señal recibida al cambiar el “feed forward gain”. Ilustración obtenida del “Controller Service Manual” del MTS.	17
Figura 5.5 Parámetros de Calibración.....	18
Figura 5.6 Amplitud y Frecuencia para una onda cuadrada.	18
Figura 5.7 Gráfica onda cuadrada.....	19
Figura 5.8 Gráfica onda seno a 1 Hz.	19
Figura 5.9 Gráfica onda seno a 2 Hz.	20
Figura 5.10 Gráfica onda seno 3 Hz.	20
Figura 5.11 Gráfica onda seno 4 Hz.	21
Figura 5.12 Gráfica onda seno 5 Hz.	21
Figura 5.13 Comparación % de error por frecuencia (mesa vibradora sin peso).	22
Figura 6.1 Modelo en SAP2000.....	23
Figura 6.2 Terremoto Loma Prieta 1989.....	24
Figura 6.4 Aceleración del modelo bajo el terremoto Loma Prieta.	25
Figura 6.5 Desplazamientos del modelo bajo el terremoto Loma Prieta.....	25
Figura 7.1 Amortiguadores viscosos.....	26
Figura 7.2 Modelo del pórtico con amortiguadores.....	27

1. Introducción

El comportamiento de las estructuras en la ingeniería civil puede llegar a ser complejo, por lo que las pruebas experimentales son pasos fundamentales para la evaluación de dichos comportamientos. La evaluación experimental es de ayuda para entender mejor el comportamiento físico, para construir un apropiado modelo analítico, y para exponer dificultades que pueden no haber sido consideradas en estudios analíticos. Es por esta razón que este proyecto se enfocó en conocer en que está compuesta una mesa vibratoria. Luego de ya estar familiarizados con el equipo, se consideró un edificio de acero el cual se utilizó para someterlo a cargas sísmicas, para así conocer sus propiedades.

2. Objetivos

A continuación, se presentan los objetivos de este proyecto.

- Realizar un análisis de similitud de la estructura.
- Calibrar la mesa vibratoria con la estructura montada.
- Instrumentar la estructura utilizando acelerómetros y extensómetro.
- Someter a la estructura a cargas sísmicas utilizando la mesa vibratoria para conocer su comportamiento dinámico y realizar una comparación con los resultados obtenidos en SAP2000.
- Incluir amortiguamientos viscosos en el modelo de SAP2000 para conocer como la respuesta dinámica varía con respecto a la estructura original.

El reporte se divide en tres secciones:

Sección I: Se explica en que consiste la mesa vibratoria. Se describe el prototipo que se desea estudiar y se muestra cómo se obtiene el modelo que se utilizara en la mesa vibratoria. Se explica cómo se calibró la mesa vibratoria sin y con el modelo y los resultados.

Sección II: Se muestra cómo se modelo el edificio a escala utilizado en el laboratorio. Se muestra resultados obtenidos al considerar dos sismos.

Sección III: Se muestra el modelo el edificio a escala utilizado en el laboratorio considerando amortiguadores viscosos. Se muestra resultados obtenidos al considerar dos sismos.

Sección IV: Se muestra las conclusiones sobre este proyecto.

Sección I. Mesa vibratoria, prototipo, modelo y calibración.

3. Descripción de mesa vibratoria

La mesa vibratoria es un simulador sísmico que presenta diferentes condiciones de movimientos de acuerdo con la cantidad dispositivos generadores de potencia (actuadores) con los que cuentan.

El objetivo de la mesa vibratoria es aplicar vibración sobre un modelo a escala obteniendo así una simulación de los efectos reales que causan los sismos sobre las estructuras.

La efectividad de los experimentos mediante los simuladores en el laboratorio dependerá principalmente de las adecuadas interpretaciones de los resultados y de alta calidad de los equipos utilizados durante la prueba.

A continuación, se presentan las partes importantes que contienen la mesa vibratoria:

Frame reaction: Todas las partes del sistema están conectadas al frame reaction, lo que va fijada al suelo del laboratorio.



Figura 3.1 Frame reaction. (fuente: ExDSRA)

- **Plataforma rígida del simulador:** su principal función es de minimizar los efectos de transmisión de vibraciones al pórtico. Debe ser lo suficientemente rígida.



Figura 3.2 Plataforma del simulador con placas de acero atornilladas (fuente: ExDSRA)



Figura 3.3 Frame de la plataforma del simulador. (fuente: ExDSRA)

- **Servo-controlador:** es el que controla la señal de los datos enviada por el computador y los puertos del actuador de la servo-válvula.



Figura 3.4 Vista frontal (izquierda) y vista trasera (derecha) del servo-controlador (fuente: ExDSRA)

- **Sistema de rodamientos lineales:** Permiten el libre movimiento en una dirección determinada, es necesario que para su adecuada selección se consideren las fuerzas de tensión y compresión generadas por las cargas muertas de la estructura.



Figura 3.5 Sistema de rodamientos lineales de UPRM frame de la plataforma del simulador (fuente: ExDSRA)

- **Servo-válvulas y actuadores:** las servo-válvulas son elementos finales de control, y son las autorizan las modificaciones de dirección y desplazamientos del actuador. Los actuadores son sistemas hidráulicos encargados de mover la estructura metálica mediante una fuerza aplicada con diferentes aceleraciones, de manera lineal.

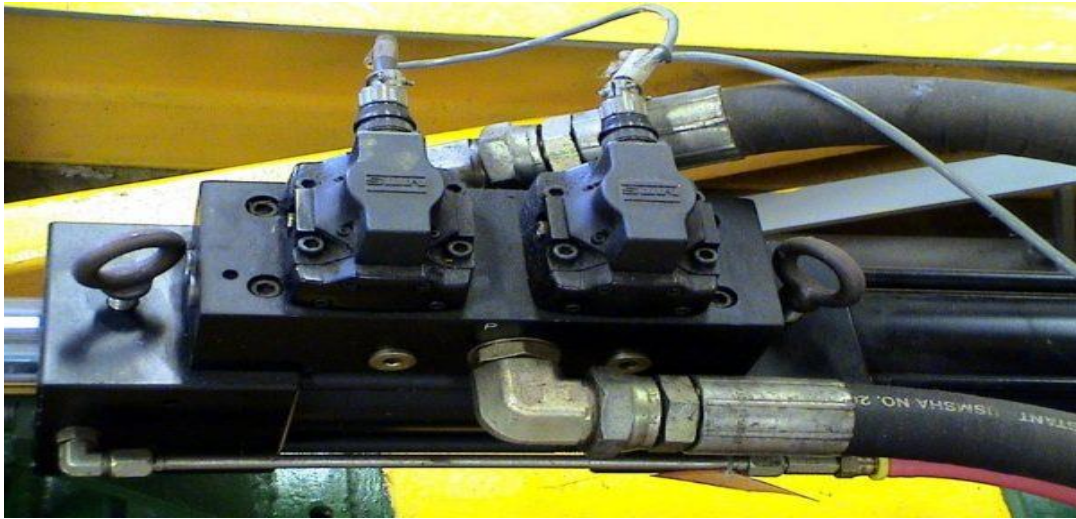
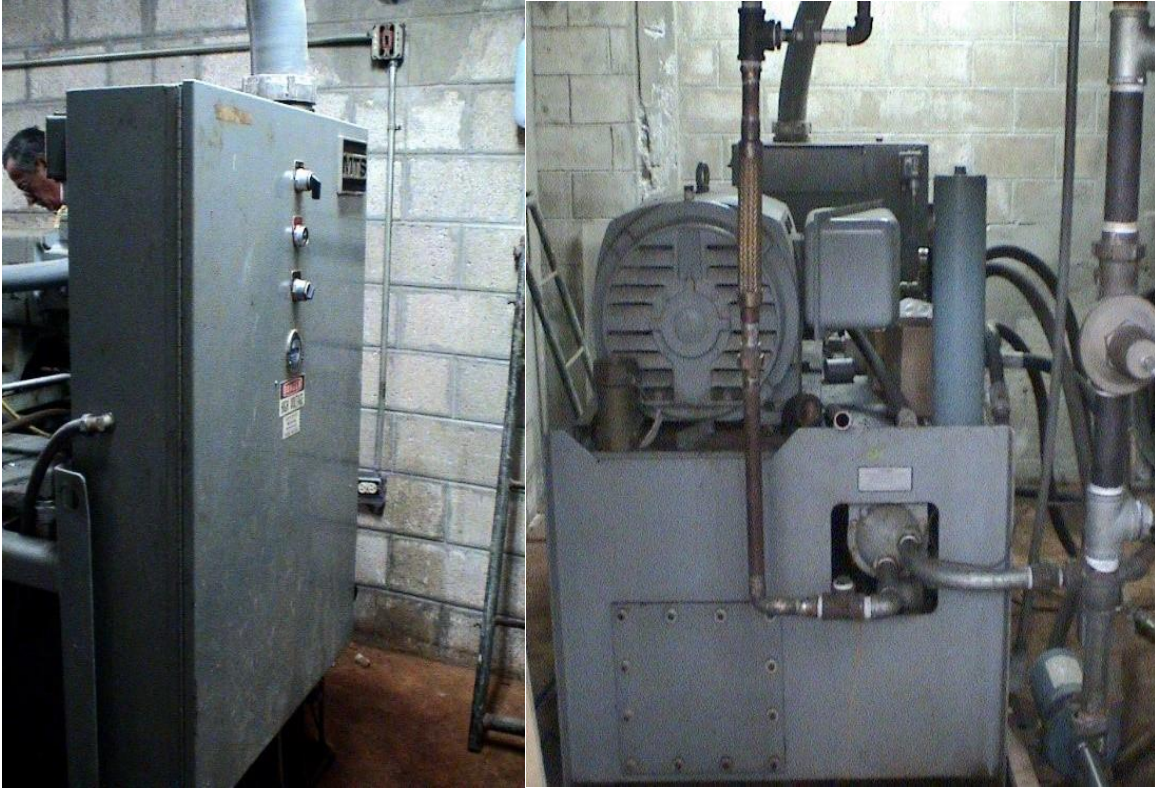


Figura 3.6 MTS 252.25 dual servo- válvulas (fuente: ExDSRA)

Unidad de poder Hidráulica: recipiente de aceite que tiene como objetivo el proporcionar la presión que necesita el sistema para generar el movimiento del actuador para producir los movimientos de la mesa vibratoria.

Manifol hidráulico de servicio MTS modelo 293.11, con una capacidad nominal de 190.0 l/min (50 gpm), se monta entre el HPS y las servoválvulas. (HSM) MTS Modelo 293.11, con una capacidad nominal de 190.0 l / min (50 gpm), se monta entre el HPS y las servoválvulas.



SRA)

- **Actuador hidráulico uniaxial MTS:** Parte mecánica conformada por la bomba y el actuador.

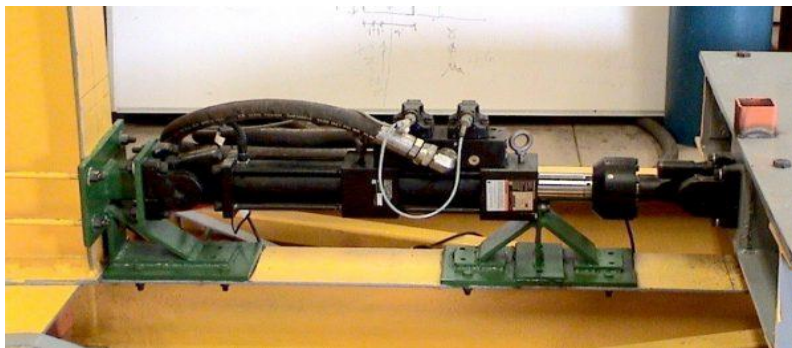


Figura 3.8 MTS 244.11 actuador hidráulico uniaxial (fuente: ExDSRA)

- **Instrumentación para medición:** sensores montados en la estructura de la mesa vibratoria, con objetivo de medir variables durante la simulación. Por ejemplo, medidores de aceleración (acelerómetros), extensómetro.



Figura 3.9 Acelerómetro (Izquierda), extensómetro (derecha) (fuente: ExDSRA)

- **Sistemas de adquisición y procesamiento de datos:** es el sistema de controlar y actuar el servo- controlador. Se emplea para medir y registrar las señales obtenidas de los transductores.



Figura 3.10 Sistema de adquisición y procesamiento de datos (fuente: ExDSRA)

4. Descripción del prototipo y modelo

La estructura que se tomó en consideración en este proyecto es un edificio de acero de tres pisos. Las secciones y dimensiones del mismo se muestran en la Figura 4.1.

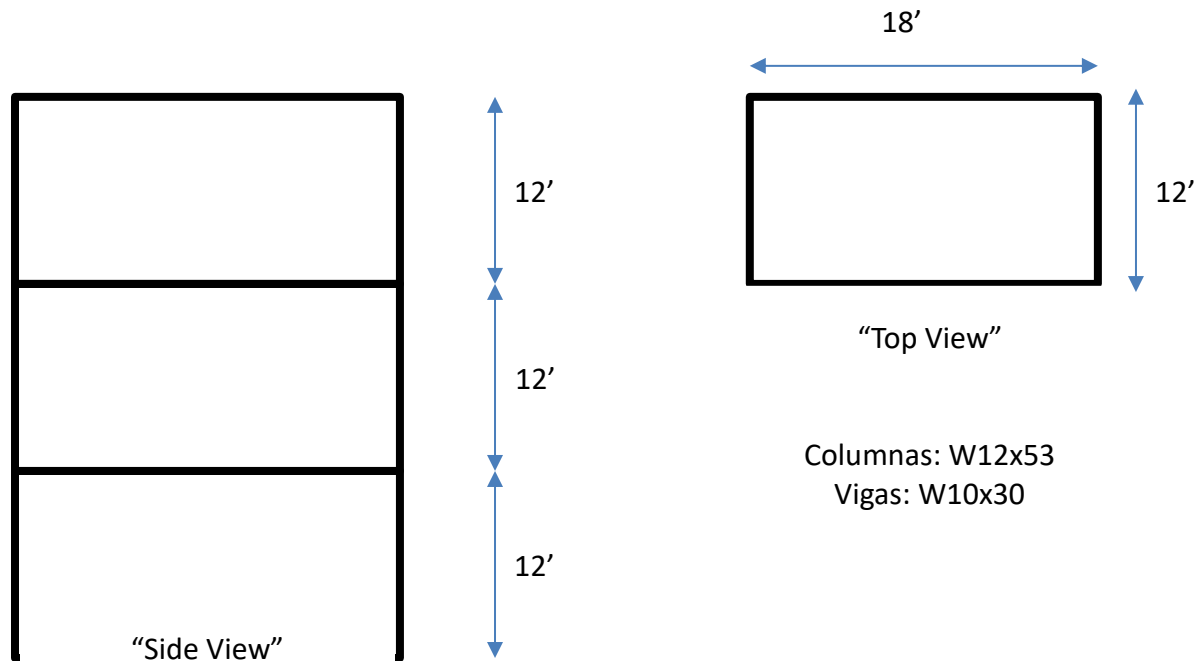


Figura 4.1 Dimensiones del prototipo de acero (no a escala).

La estructura a estudiar, el cual llamaremos prototipo, es un edificio a escala real. Para poder estudiarlo es necesario calcular las dimensiones de un modelo a escala. Para realizar esto es necesario conocer sobre la Teoría de Similitud. Utilizando esta teoría podemos encontrar el factor de escala, llamado λ , que es igual a la razón entre la variable que describe el prototipo y el modelo.

A un modelo que cumple con todas las variables de similitud se le llama un modelo de réplica real. Ya que esto es muy difícil de cumplir, a los modelos que no cumplen con todas las variables de similitud se les llama modelo adecuado o distorsionado. Los modelos adecuados son los que no afectan las ecuaciones de predicción y que se puede violar las condiciones de diseño ya que al hacerlo no afecta las sustancialmente predicciones del comportamiento. En este proyecto consideraremos un modelo adecuado. La Figura 4.2 presenta una tabla donde muestra las diferentes ecuaciones que se utilizan para relacionar al prototipo con el modelo

utilizando λ al utilizar el “artificial mass simulation method”. Al utilizar este método se le añade masa al modelo que no alteran el sistema estructural.

Parameter	Units ²	Any Material	Same Material as Prototype
Length	L	λ_L	λ_L
Time	T	$\lambda_L^{1/2}$	$\lambda_L^{1/2}$
Frequency	$\frac{1}{T}$	$\lambda_L^{-1/2}$	$\lambda_L^{-1/2}$
Velocity	$\frac{L}{T}$	$\lambda_L^{1/2}$	$\lambda_L^{1/2}$
Displacement	L	λ_L	λ_L
Gravitational Acceleration	$\frac{L}{T^2}$	1	1
Acceleration	$\frac{L}{T^2}$	1	1
Force	F	$\lambda_E \lambda_L^2$	λ_L^2
Mass	$\frac{F \cdot T^2}{L}$	$\lambda_E \lambda_L^2$	λ_L^2
Specific Stiffness	L	λ_L	λ_L
Strain	$\frac{L}{L}$	1	1
Stress	$\frac{F}{L^2}$	λ_E	1
Modulus of Elasticity	$\frac{F}{L^2}$	λ_E	1
Energy	FL	$\lambda_E \lambda_L^3$	λ_L^3

Notes:

1. From [19].
2. L = Length, T = Time, F = Force and E = Modulus of Elasticity.

Figura 4.2 Relaciones de similitud.

Para este caso se escogió un factor de escala $N = 3$. Ya que el material del prototipo y modelo serán iguales, se escoge solamente el valor de λ_L , que será igual a 4. En la Figura 4.3 se muestran las dimensiones del modelo, utilizando la ecuación de longitud de la Figura 4.2. Los largos de las vigas y columnas se obtienen utilizando la ecuación (1).

$$\text{Largo de modelo} = \text{Largo de prototipo} / \lambda_L \quad (1)$$

Las nuevas dimensiones (no a escala) se muestran en la Figura 4.3, las cuales en nuestro caso fueron medidas en el laboratorio.

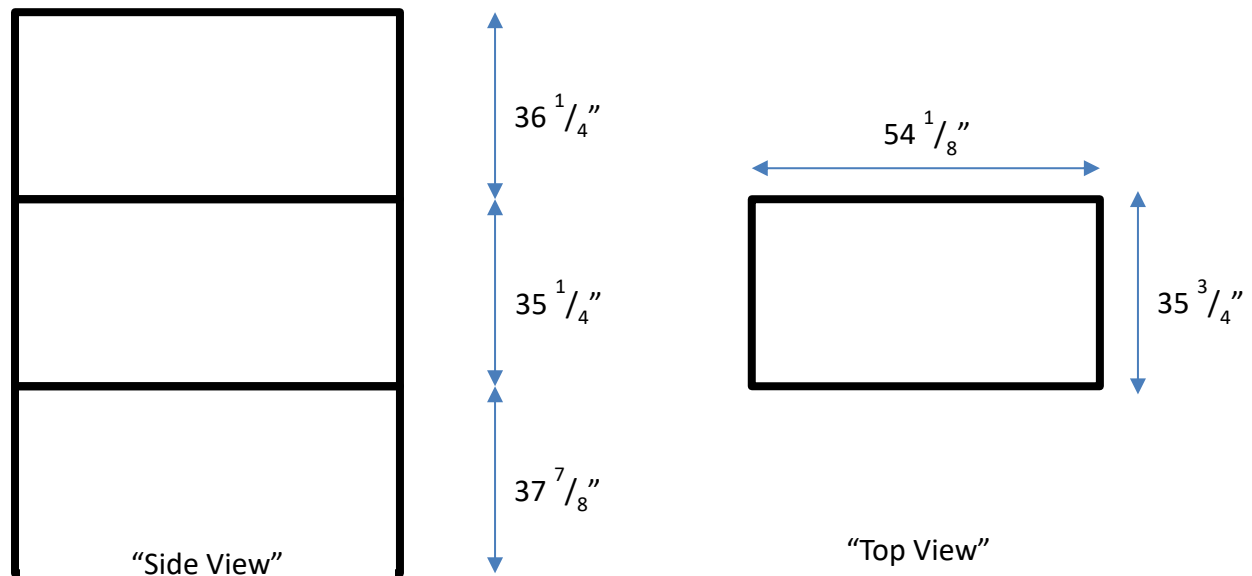


Figura 4.3 Dimensiones del modelo utilizando el "artificial mass simulation method" (no a escala).

Se escogió la sección S3x5.7 para las vigas y columnas. Para calcular la masa que se requiere tener en el modelo, se utilizó la ecuación (2).

$$\text{Masa de modelo} = \text{Masa del prototipo} / \lambda_L^2 \quad (2)$$

La Tabla 4.1 muestra las masas por piso del prototipo y del modelo. También se muestra las masas requeridas para poder obtener la masa total que se debe considerar en el modelo.

Tabla 4.1 Pesos de prototipo y modelo.

	Prototipo	Modelo		
	Peso [kips]	Peso [kips]	Peso requerido [kips]	Peso añadido para obtener el requerido [kips]
Techo	11.584	0.2134	0.724	0.5106
2	12.858	0.2458	0.804	0.5578
1	12.858	0.2458	0.804	0.5578
Total	37.30	0.71	2.33	1.63

En nuestro caso, solo se le añadió 0.486 kips por piso, ya que La Figura 4.4 muestra el modelo a escala encima de la mesa vibratoria.



Figura 4.4 Modelo ubicada en la mesa vibratoria.

5. Calibración de mesa vibratoria

Se procedió a calibrar la mesa vibratoria a un rango de frecuencias entre 1 a 5 Hz mediante un proceso llamado “tuning”. Al hacer este proceso se está corrigiendo los errores que puedan existir en la amplitud del desplazamiento o diferencia en tiempo entre la señal enviada y la recibida. La señal enviada al controlador se obtiene del “linear variable differential transformer” (LVDT).

Primero, se utilizó un “square wave” con una frecuencia de 0.10 Hz para ajustar los parámetros que se mencionarán a continuación. Luego, se utilizó una senoide para las frecuencias entre 1 y 5 Hz para calcular el porciento de diferencia.

En este tipo de calibración es necesario ajustar alguno de los 4 parámetros, los cuales son: ‘proportional gain’, ‘integral gain’, ‘derivative gain’ y ‘feed forward gain’. No es necesario ajustarlos todos. A continuación, se explica que corrige cada parámetro.

5.1 Parámetros considerados en la calibración

“Proportional gain” (P)

Al aumentar este valor el error disminuye, haciendo que la señal recibida sea más similar a la señal enviada ya que incrementa la respuesta del sistema. Hay que estar consciente de que si se aumenta mucho este valor puede ocasionar inestabilidad en el sistema, tal como lo muestra la Figura 4.1. Los valores de ‘proportional gain’ pueden variar desde 1 hasta 10,000.

The tuning command is shown as a gray square waveform, and the black waveform is the sensor feedback



Figura 5.1 Comportamiento de la señal recibida al cambiar el “proportional gain”. Ilustración obtenida del “Controller Service Manual” del MTS.

“Integral gain” (I)

Este valor incrementa la respuesta del sistema cuando se considera una señal con frecuencias bajas o estática. En los casos de frecuencias altas mantiene el promedio. Cuando se utiliza una señal con frecuencias bajas o estática, la señal que regresa suele tener un efecto de “spring” debido a las selvo-válvulas. Este parámetro corrige este comportamiento. La Figura 4.2 muestra que puede suceder al disminuir y aumentar demasiado este valor. También, la imagen muestra cómo debe comportarse la señal al encontrar el “I gain” ideal.

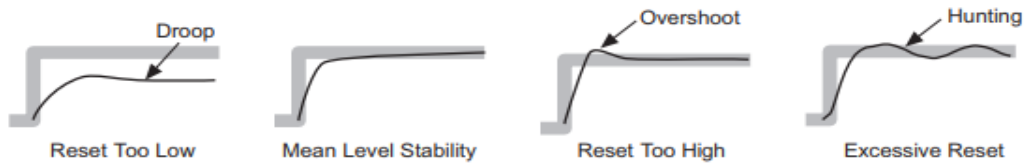


Figura 5.2 Comportamiento de la señal recibida al cambiar el ‘integral gain’. Ilustración obtenida del ‘Controller Service Manual’ del MTS.

“Derivative gain” (D)

Este parámetro (Figura 4.3) es considerado cuando se realizan pruebas dinámicas. Anticipa la razón de cambio en la señal recibida. También reduce el ruido provocado por utilizar un “proportional gain” alto. Si se aumenta mucho este valor puede provocar inestabilidad en frecuencias altas. Al usar un valor muy bajo puede causar un sonido retumbante.

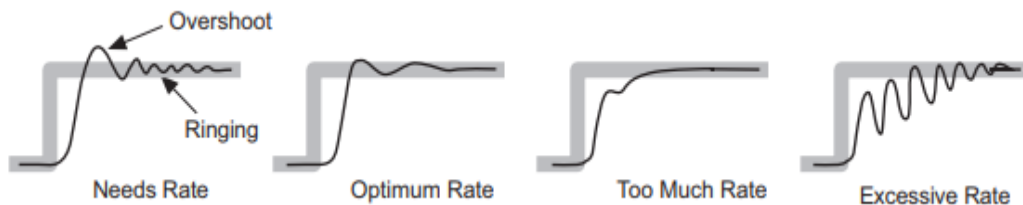


Figura 5.3 Comportamiento de la señal recibida al cambiar el ‘derivative gain’. Ilustración obtenida del “Controller Service Manual” del MTS.

“Feed Forward Gain” (F)

Este parámetro anticipa cuanto la válvula debe abrir para obtener la respuesta requerida. Se utiliza para minimizar el retraso de la fase. Ayuda a que el servo-control reaccione correctamente cuando hay un cambio abrupto en la señal. La Figura 4.4 muestra los diferentes comportamientos ajustando este parámetro.

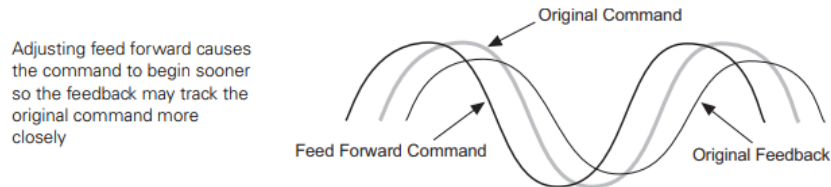


Figura 5.4 Comportamiento de la señal recibida al cambiar el “feed forward gain”. Ilustración obtenida del “Controller Service Manual” del MTS.

5.2 Metodología de calibración

A continuación, se presenta la metodología para realizar la calibración de la mesa vibratoria.

- Conectar todos los cables desde el controlador FlexTest 60 hasta el actuador hidráulico.
- Prender la estación de control.
- En “Station Manager” calentar el equipo 600 ciclos con una onda seno de 1 Hz de frecuencia y 1 in de amplitud para alcanzar su temperatura óptima.
- Correr un “square wave” con una frecuencia de 0.10 Hz para calibrar los parámetros Kp (“proportional gain”) y Ki (“integral gain”).
- Iterar con los valores del “proportional gain” hasta encontrar el punto donde se genere una onda ideal según el manual del FlexTest 60.
- Calibrar con el parámetro de “integral gain” usando un 10% del “proportional gain”, hasta llegar a la onda esperada por FlexTest 60.
- Con los mismos parámetros se procede a correr una onda sinusoidal con frecuencias entre 1 y 5 Hz. También calculando que el porcentaje de diferencia de la amplitud y retraso de fase este dentro del 30-50%.
- Repetir el mismo procedimiento para encontrar los parámetros de calibración, pero ahora con la mesa cargada con aproximadamente 400 lb.

5.3 Resultados

- Mesa vibradora sin peso.

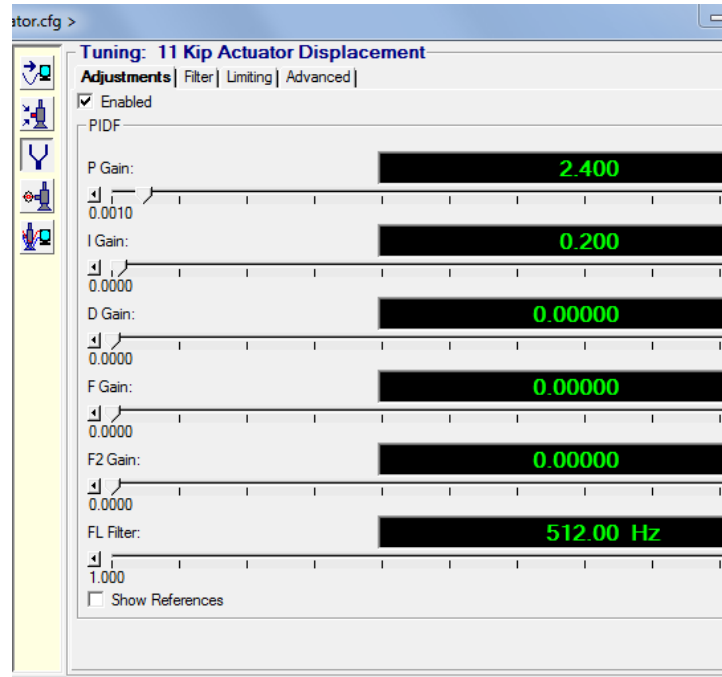


Figura 5.5 Parámetros de Calibración.

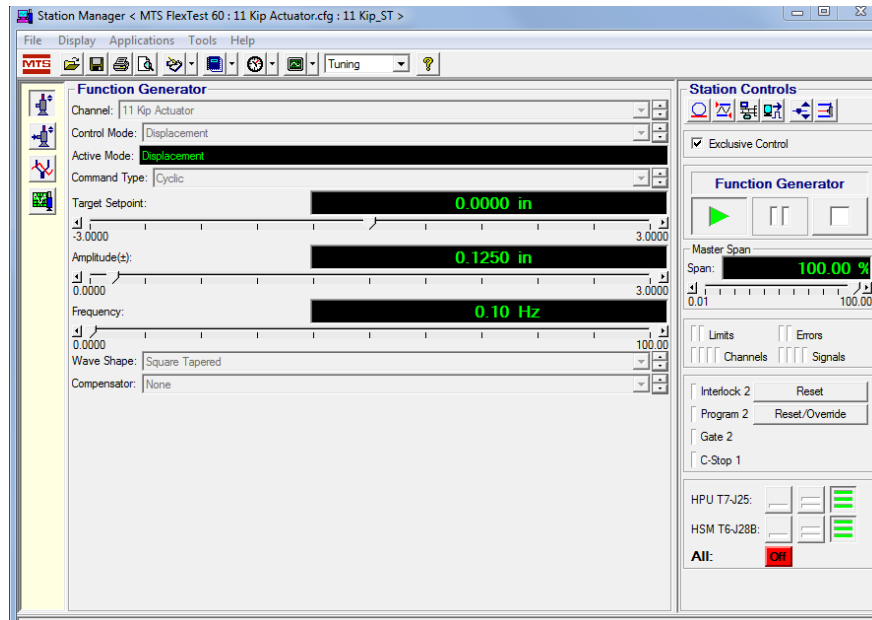


Figura 5.6 Amplitud y Frecuencia para una onda cuadrada.

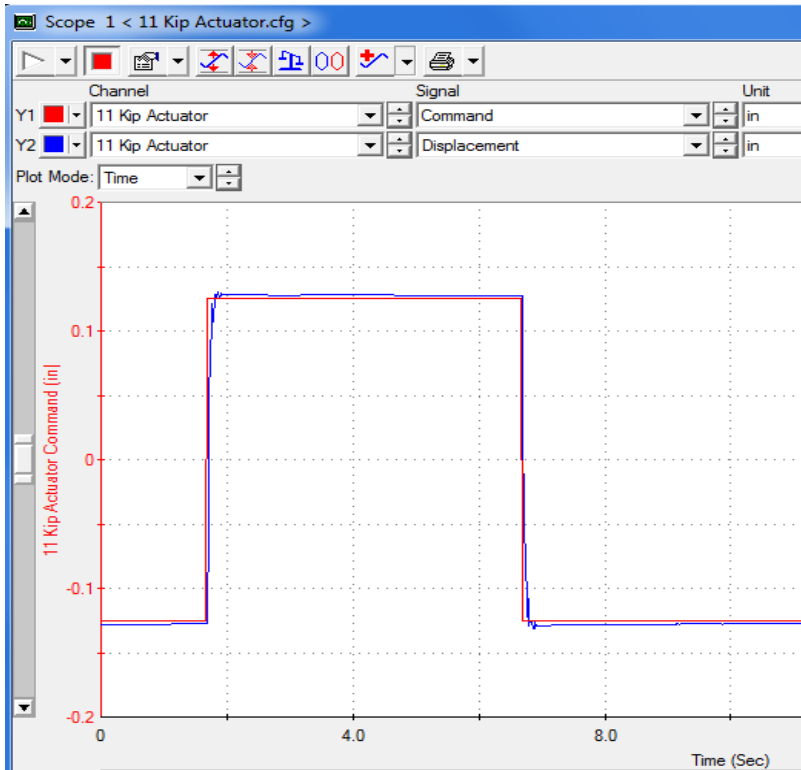


Figura 5.7 Gráfica onda cuadrada

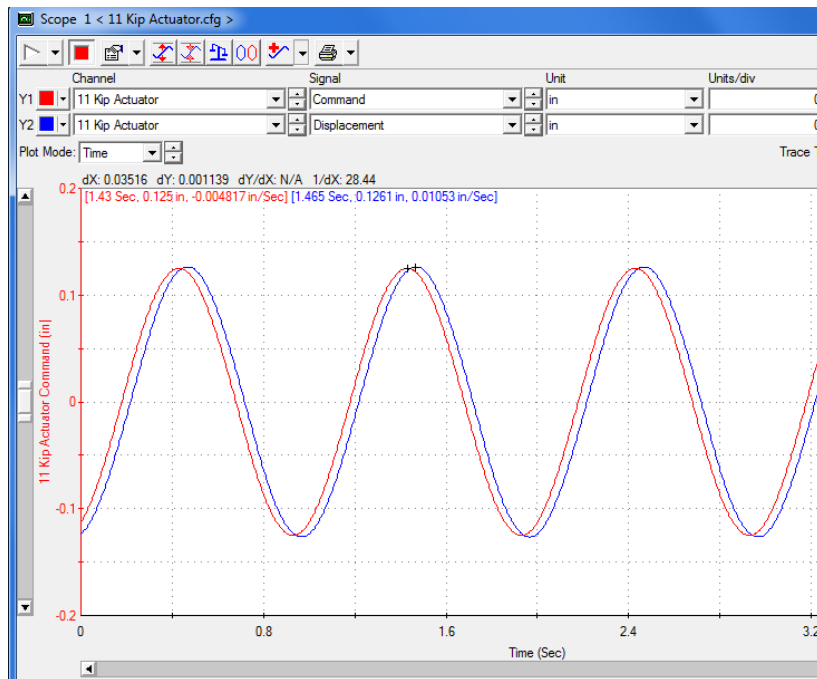


Figura 5.8 Gráfica onda seno a 1 Hz.

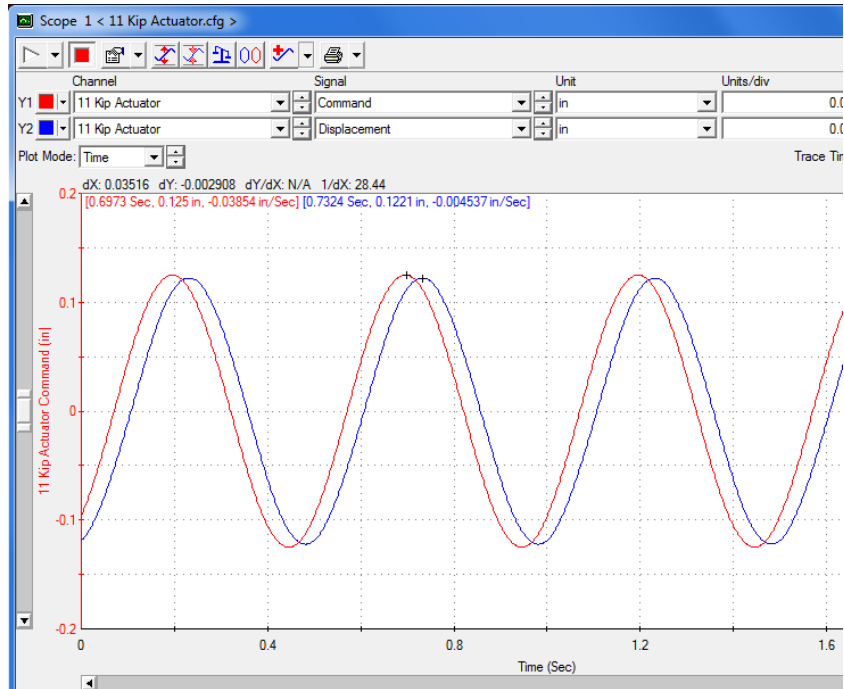


Figura 5.9 Gráfica onda seno a 2 Hz.

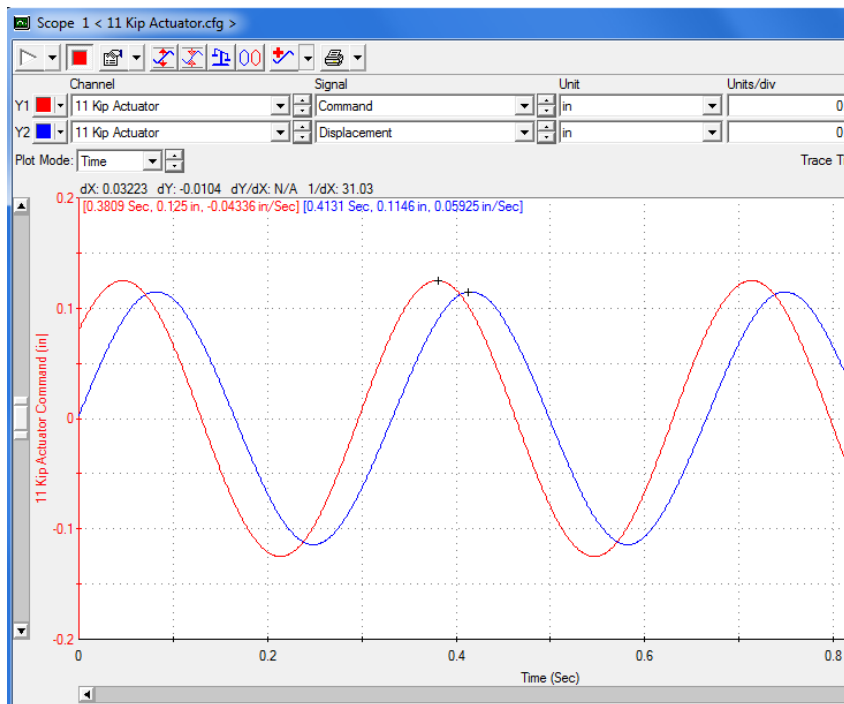


Figura 5.10 Gráfica onda seno 3 Hz.

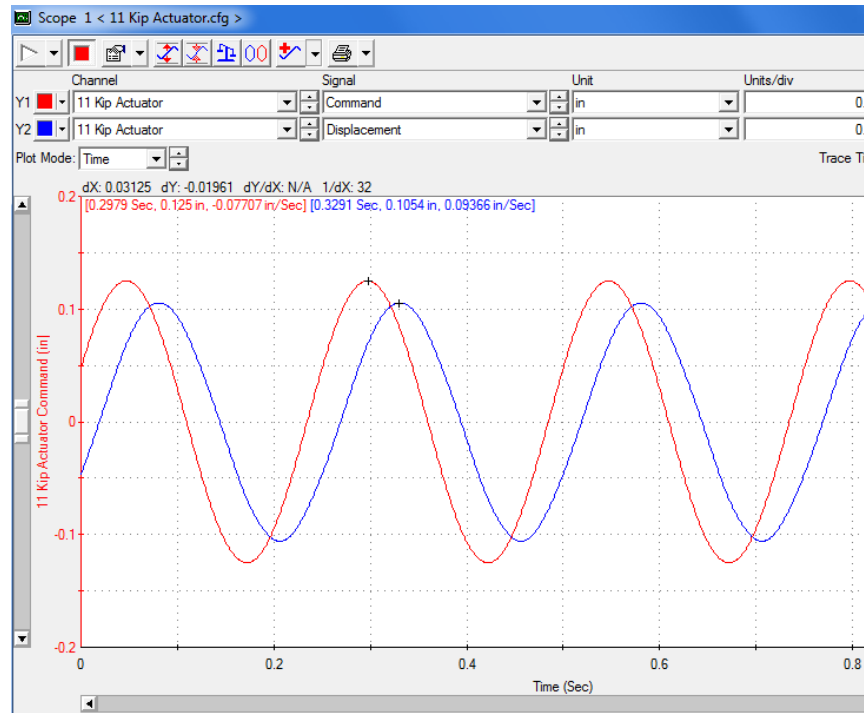


Figura 5.11 Gráfica onda seno 4 Hz.

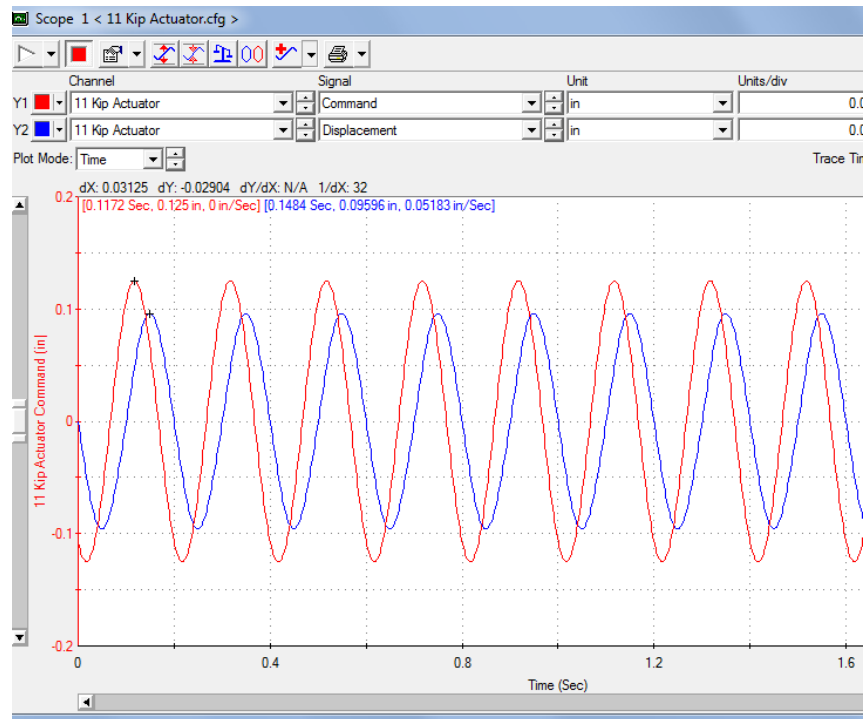


Figura 5.12 Gráfica onda seno 5 Hz.

Para la calibración sin peso observamos la onda cuadrada con un poco de “overshoot” pero fue necesario para alcanzar el rango de porcentaje de error deseado. Las gráficas de seno de 1 Hz, 2 Hz, 3 Hz, 4 Hz y 5 Hz obtuvieron un porcentaje de error en amplitud de 0.88%, 2.32%, 8.32%,

15.68% y 23.23% respectivamente. Por otro lado, el porcentaje de error para el retraso de fase fue de 2.43%, 5.03%, 8.45%, 10.47% y 26.62% respectivamente.

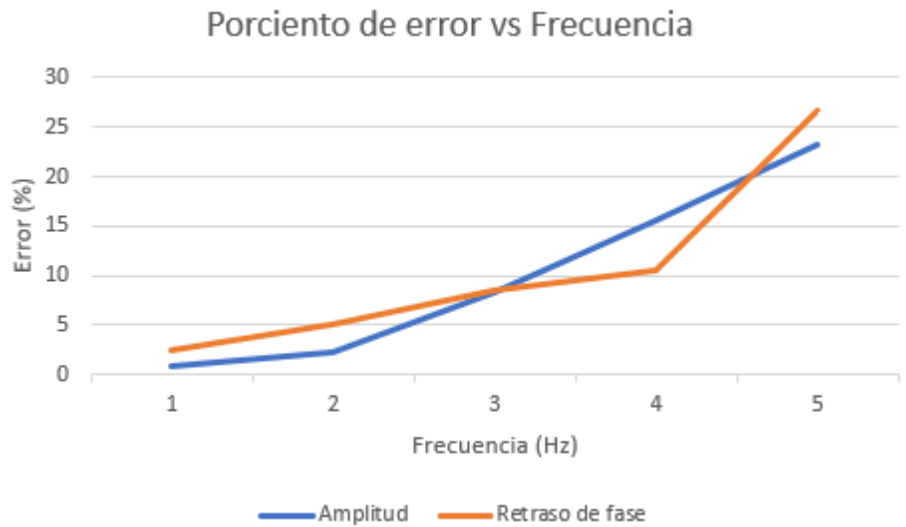


Figura 5.13 Comparación % de error por frecuencia (mesa vibradora sin peso).

En la Figura 4.13 se observa que el porcentaje de error en el retraso de fase es mayor que el de la amplitud. Por otro lado, observamos un comportamiento lineal con respecto al error en la amplitud.

- Mesa vibradora con la estructura.

Frecuencias (Hz)	Command Signal/Amp (inches)	P-gain	I-gain	Response Displacement (inches)	Error (%)
1	0.25	2.0	0.15	0.2531	1.2
0.5	0.5	2.0	0.15	0.5032	0.64
1	0.5	2.0	0.15	0.4984	0.32

Sección II Modelo en SAP2000

6. Modelo en SAP2000

6.1 Modelo

El modelo que se muestra en la Figura 4.4 se modela en el programa SAP2000. La Figura 6.1 muestra el resultado del mismo.

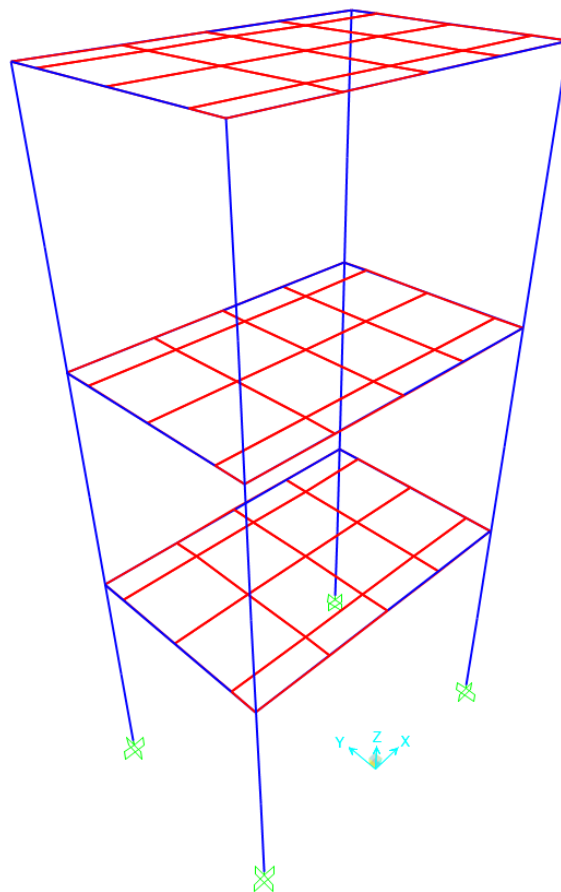


Figura 6.1 Modelo en SAP2000.

Se le añadió el peso de las placas que tiene por piso, como lo muestra la Figura 4.4, que simula la masa requerida. En este caso se añadieron tres placas, lo cual es un total de 0.486 kips por piso. También se le añadió 0.099 kips, que es el peso de la losa incluida en el pórtico del laboratorio. Se considerará el modelo como “plane frame” aunque esté modelado en 3D. Al hacer un análisis modal se obtuvo que el periodo fundamental es de 0.14 sec y la frecuencia natural de 7.18 Hz.

6.2 Terremotos

Se consideraron los terremotos de Loma Prieta que sucedió en San Francisco en el 1989 y El Centro que ocurrió al Sur de California en el año 1940. Ambos se muestran en las Figuras 6.2 y 6.3. El terremoto de Loma Prieta tiene una aceleración máxima de 0.274 g, mientras que El Centro es de

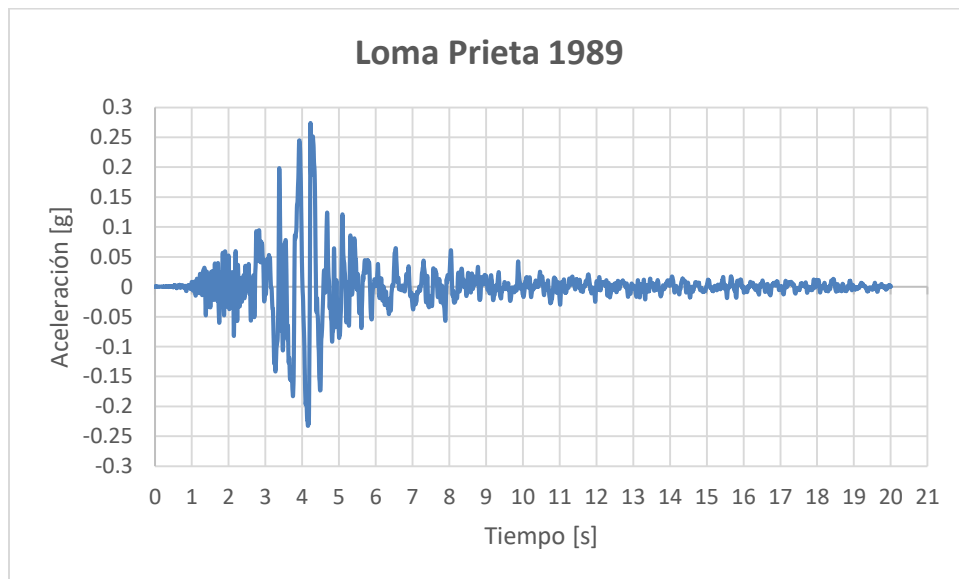


Figura 6.2 Terremoto Loma Prieta 1989.

6.3 Resultados

A continuación, en la Figuras 6.4 y se muestra la aceleración y desplazamientos obtenidos en el último piso bajo los dos terremotos.

- Loma Prieta

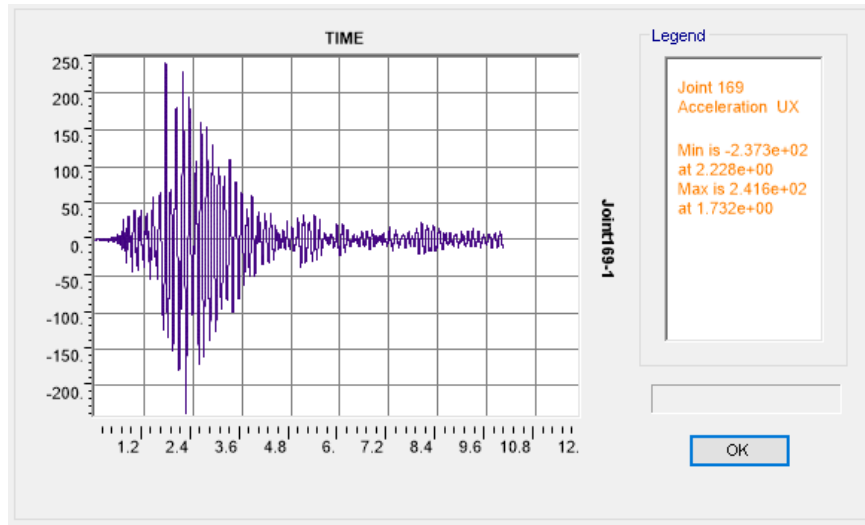


Figura 6.3 Aceleración del modelo bajo el terremoto Loma Prieta.

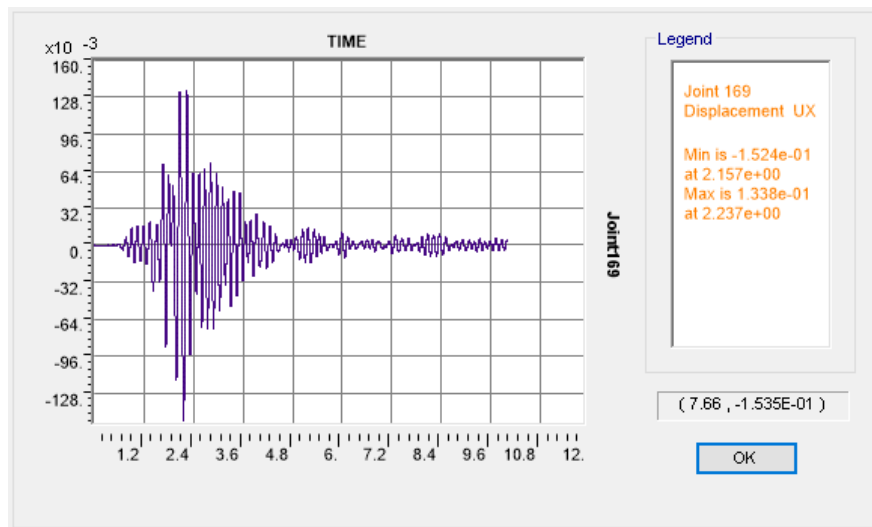


Figura 6.4 Desplazamientos del modelo bajo el terremoto Loma Prieta.

La aceleración máxima obtenida bajo el terremoto Loma Prieta fue 241.6 in/s², que es equivalente a 0.62 g. El desplazamiento máximo fue 0.15 in.

Sección III Modelo en SAP2000 con amortiguadores

7. Modelo con amortiguadores

7.1 Amortiguadores viscosos

Los amortiguadores que se consideraran en este proyecto son los que se muestran en la Figura 7.1. Su especificación es que aguanta una fuerza de amortiguamiento máximo de 0.450 kips.



Figura 7.1 Amortiguadores viscosos.

7.2 Modelo en SAP2000

En la Figura 7.2 se muestra el modelo del pórtico en SAP2000. Al mismo se le incluyó dos amortiguadores solamente en el primer piso para conocer el comportamiento dinámico bajo el terremoto de Loma Prieta.

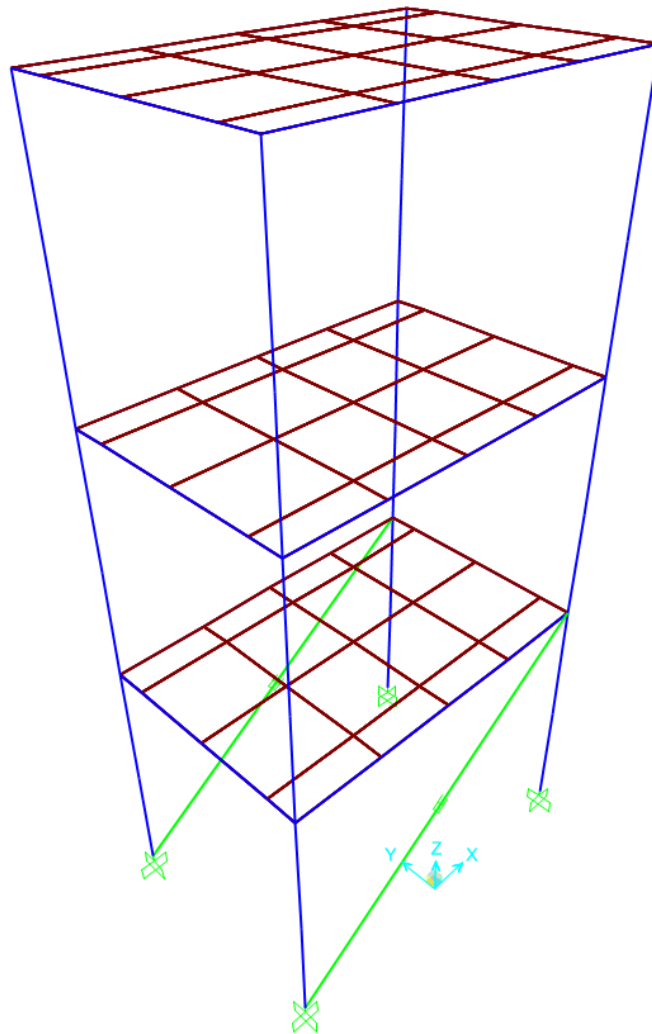


Figura 7.2 Modelo del pórtico con amortiguadores.

7.3 Resultados

A continuación, se presentan los resultados obtenidos considerando amortiguadores en el primer y último piso.

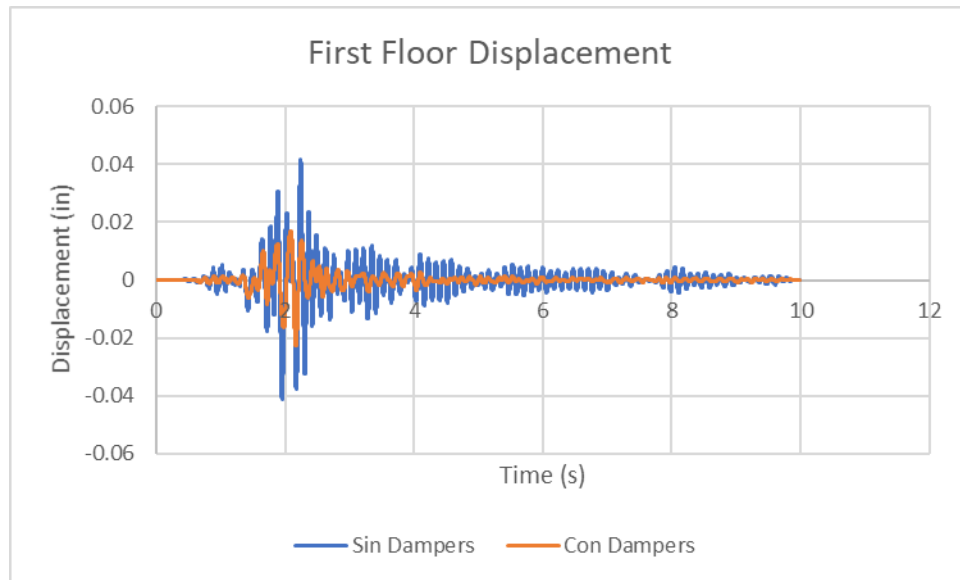


Figura 7.3 Desplazamiento primer piso.

Without dampers: 0.04158 in

With dampers: 0.01677 in

Difference: 59.67%

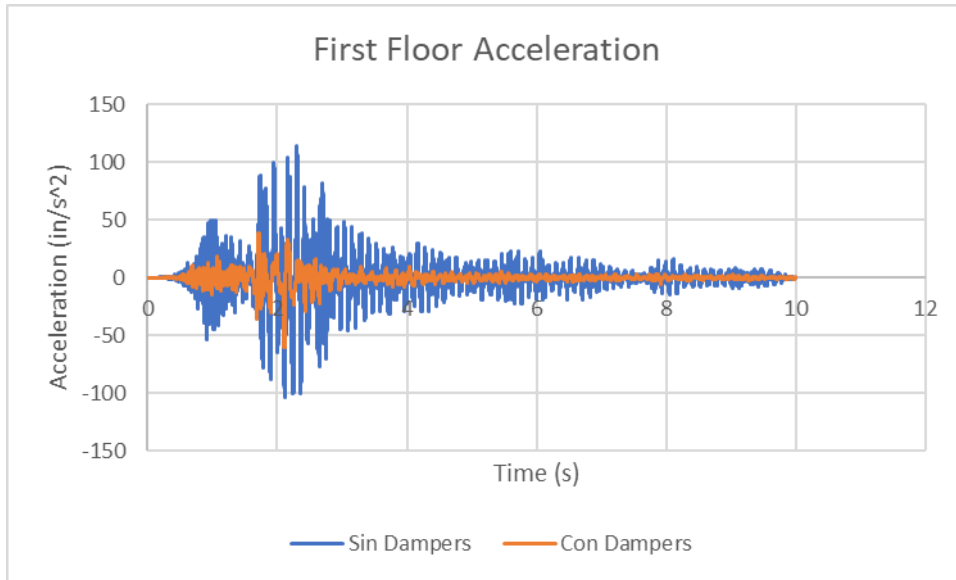


Figura 7.4 Aceleraciones primer piso.

Without dampers: 113.85 in/s²

With dampers: 39.01 in/s²

Difference: 65.73%

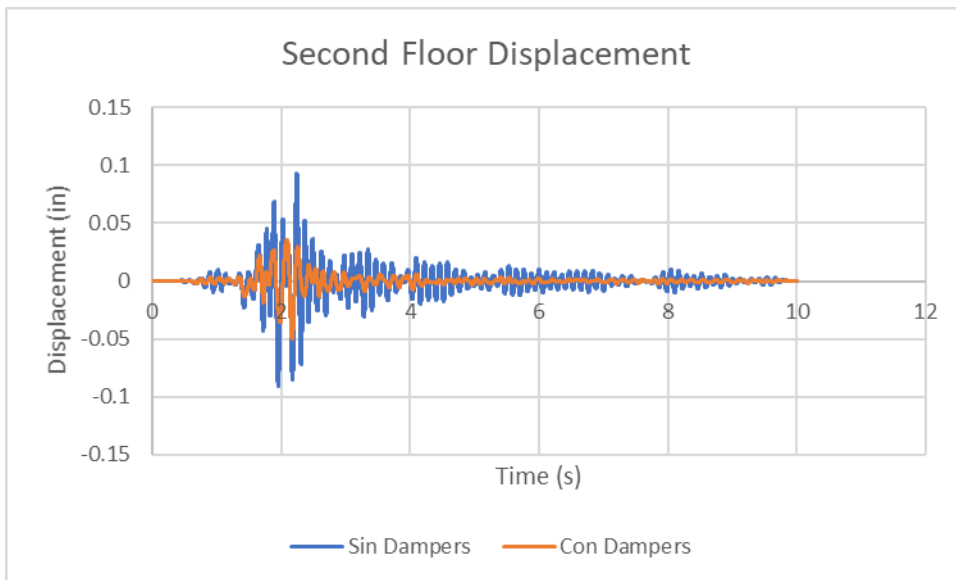


Figura 7.5 Desplazamiento segundo piso.

Without dampers: 0.09307 in

With dampers: 0.03579 in

Difference: 61.55%

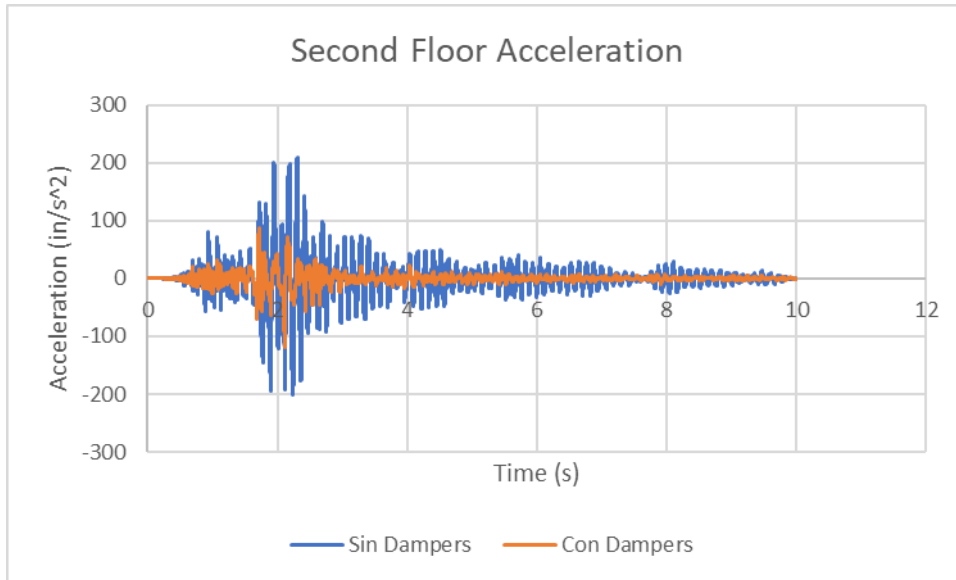


Figura 7.6 Aceleraciones segundo piso.

Without dampers: 210.05 in/s^2
 With dampers: 86.21 in/s^2
 Difference: 58.96%

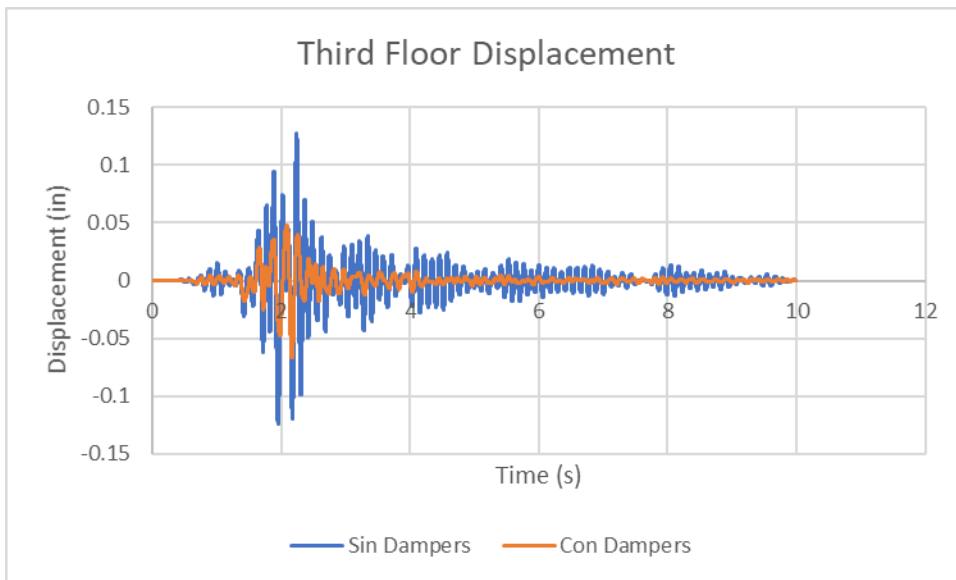


Figura 7.7 Desplazamiento tercer piso.

Without dampers: 0.12804 in
 With dampers: 0.04794 in
 Difference: 62.56%

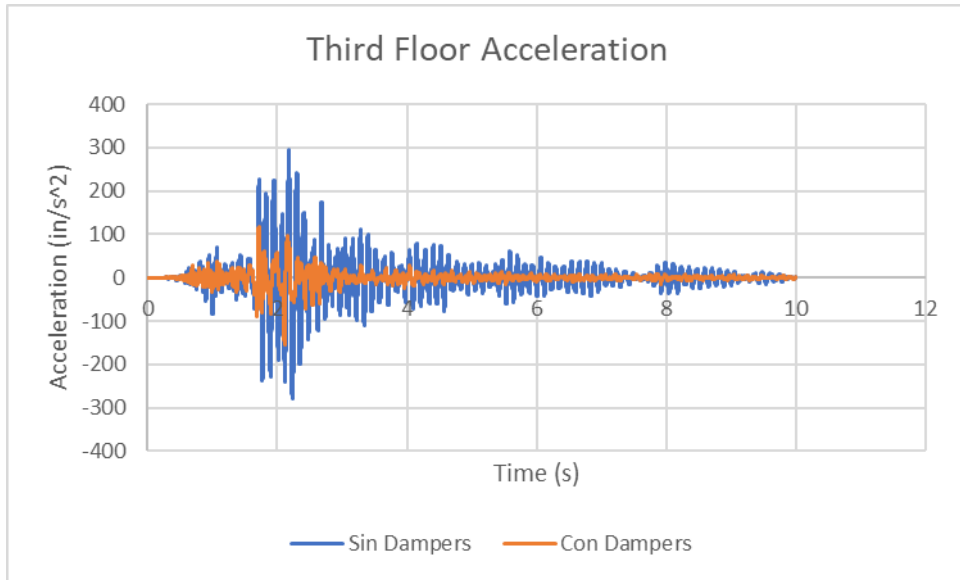


Figura 7.8 Aceleraciones tercer piso.

Without dampers: 294.09 in/s²

With dampers: 117.74 in/s²

Difference: 59.96%

Conclusión

Las calibraciones de la mesa vibradora obtuvimos porcentajes de errores menores de 30%, tanto para la mesa sin carga, con carga y con la estructura flexible. Luego de analizar nuestro modelo analíticamente encontramos que nuestra configuración de dámper es eficiente, ya que en todos los pisos las aceleraciones y los desplazamientos mejoraron mas de un 55%. Donde mas efecto causó el dámper fue en el tercer piso.

Recomendaciones

Para futuras pruebas tratar diferentes configuraciones de dámper que nos permitan ver como mejora la reacción de las estructuras según aumentamos el ángulo de 45 grados hasta llevarlo mas horizontal. Tratar de optimizar el prototipo físico para que sea más similar el prototipo de SAP2000. Respecto a la asignación de dámper a la estructura le pondríamos dámper ya que por sus desplazamientos y aceleraciones requeriría un amortiguamiento mayor.