

Terremotos que sacuden edificios

Adrian Pineda Sánchez¹, Luis Maximiliano López Ramírez², Kevin Antonio González Díaz³
¹A00834710@tec.mx, ²A00833321@tec.mx y ³A01338316@tec.mx

Escuela de Ingeniería y Ciencias,
Ingeniería en Ciencias de Datos y Matemáticas,
Análisis numérico para la optimización no-lineal (MA2008B.602)

I. INTRODUCCIÓN

I-A. Contexto de la problemática

Motivación: Los terremotos provocan oscilaciones en edificaciones que pueden llevar a daños estructurales graves y colapsos sin embargo, la variación en la respuesta de los distintos edificios se debe a la intensidad del sismo y características estructurales por lo que algunos edificios aguantan más los sismos que otros. Es por ello que el control de vibraciones es esencial para minimizar estos riesgos, evidenciado por los sismos en México en 1985 y 2017, que además generaron impactos sociales y económicos significativos.

Reto y Objetivo: Desarrollar y analizar sistemas de control que mitiguen vibraciones en estructuras durante sismos, asegurando la integridad y seguridad.

Sistemas de Control: La implementación de sistemas de control efectivos es crucial puesto que estos sistemas deben adaptar sus respuestas basándose en la retroalimentación recibida durante un sismo, lo que permite una corrección automática y minimiza la intervención humana.

I-B. Descripción del edificio

El edificio a considerar es el edificio de la Secretaría de Educación Pública que se encuentra en Ciudad de México. Cuenta con 7 pisos de dimensiones 150 x 150 metros, con una altura aproximada de 3 metros por piso.

I-C. Masa se cada piso (m)

$$m_i = \text{Piso} + \text{Paredes}$$

$$m_i = (\text{Área} \cdot \text{Espesor} \cdot \text{Densidad})$$

$$+ (\text{Perímetro} \cdot \text{Altura} \cdot \text{Espesor} \cdot \text{Densidad})$$

$$m_i = (22,500 \text{ m}^2 \cdot 0,2 \text{ m} \cdot 2400 \text{ kg/m}^3)$$

$$+ (600 \text{ m} \cdot 3 \text{ m} \cdot 0,2 \text{ m} \cdot 2400 \text{ kg/m}^3)$$

Considerando que un 1% está hecho de acero con una densidad de 7840 kg/m^3 y redondeando, da una masa por piso de $1,2 \times 10^7 \text{ kg}$.

I-D. Constante de rigidez (k)

La constante de rigidez se obtuvo con la fórmula utilizada en análisis estructural para calcular la rigidez lateral de una viga de extremos empotrados sujeta a una carga lateral [1]:

$$k_i = \frac{12E}{h^3} \times I = \frac{12 \times 21,4 \times 10^9}{3^3} \times \frac{150 \times (0,5)^3}{12}$$

$$\approx 1,48e10$$

Donde E es el módulo de elasticidad del concreto ($21,4e9$), I es el momento de inercia y h es la altura del piso (3).

I-E. Constante de amortiguamiento (c)

Para determinar el coeficiente de amortiguamiento c_i nos basamos del concepto de amortiguamiento crítico en sistemas de múltiples grados de libertad (MDOF) [2]:

$$c_i = 2\zeta\sqrt{k_i m_i} = 2 \times 0,0685 \times \sqrt{1,48 \times 10^{10} \times 12 \times 10^6}$$

$$\approx 5,77e7$$

Donde k_i es la rigidez calculada anteriormente ($1,48e10$), m_i es la masa de cada piso y ζ es el coeficiente de amortiguamiento modal (suponemos $\zeta = 0,0685$). Esto se debe a que el edificio se encuentra en una zona sísmica.

I-F. Señal de referencia

La señal de referencia en la Fig. 1 de color amarillo, que se utiliza para el controlador del edificio es una señal tipo *step* o escalón, generada en Simulink. Esta señal tiene las siguientes características:

- **Tiempo de inicio del escalón (Step time):** $t = 0$ segundos.
- **Valor inicial (Initial value):** 0 unidades.
- **Valor final (Final value):** 0 unidades.
- **Tiempo de muestreo (Sample time):** 0,01 segundos.

Esta señal es una señal constante de valor cero. Su objetivo es proporcionar una referencia estable y constante para el control del sistema.

I-G. Señal de perturbación

La señal de perturbación utilizada para representar el sismo en el sistema de control del edificio es una onda sinusoidal generada en Simulink, en la Fig. 1 se puede observar en color verde. La ecuación de la onda sinusoidal está dada por [3]:

$$O(t) = \text{Amp} \cdot \sin(\text{Freq} \cdot t + \text{Phase}) + \text{Bias} \quad (1)$$

donde los parámetros de la señal son los siguientes:

- **Tipo de señal:** Basada en el tiempo.
- **Tiempo (t):** Usar tiempo de simulación.
- **Amplitud:** $0,1 \cdot (2 \cdot \pi)^2$
- **Sesgo (Bias):** 0 unidades.
- **Frecuencia (rad/seg):** $2 \cdot \pi \approx 6,2832$ radianes por segundo.
- **Fase (rad):** $\frac{\pi}{2} \approx 1,5708$ radianes.
- **Tiempo de muestreo:** 0 segundos.

La elección de estos parámetros se basa en estudios bibliográficos que indican que los terremotos pueden ser modelados como señales sinusoidales para ciertos análisis de estabilidad estructural [3].

La amplitud de la señal está ajustada para representar una intensidad sismológica moderada, mientras que la frecuencia corresponde a una oscilación con un periodo de aproximadamente un segundo, lo cual es común en terremotos de baja a media frecuencia. La fase inicial asegura que la oscilación comienza en el punto máximo de la onda, representando el instante de mayor desplazamiento inicial.

La señal de perturbación es crítica para evaluar la respuesta dinámica del edificio, permitiendo observar cómo las fuerzas inducidas por el sismo afectan la estructura y cómo el sistema de control puede mitigar estos efectos.



Figura 1. Señales de referencia y perturbación

I-H. Salida del sistema

En el análisis y control del edificio, la salida principal que se considera es el desplazamiento lateral de cada piso del

edificio en respuesta a las fuerzas inducidas por el sismo. El desplazamiento lateral, denotado como $x(t)$, se mide en metros (m). Este parámetro es crucial para determinar si el edificio se mantiene dentro de los límites de seguridad estructural durante un evento sísmico. Obteniendo el desplazamiento horizontal podemos obtener el ángulo de inclinación que analizamos en el reporte anterior. El objetivo del sistema de control es minimizar este desplazamiento para asegurar la estabilidad y la integridad estructural del edificio.

II. METODOLOGÍA

La metodología utilizada en este estudio se centra en la generación de diagramas de bloques en lazo cerrado para el control del edificio, asegurando que siga la señal de referencia con un error de estado estable despreciable. Para cada tipo de controlador, se diseñarán y simularán diagramas de bloques específicos. El objetivo es minimizar el error de seguimiento, que es la diferencia entre la salida deseada (señal de referencia) y la salida real del sistema. El control en lazo cerrado [8] es fundamental para mejorar la precisión y la estabilidad en sistemas dinámicos complejos, como el amortiguamiento del edificio.

Para modelar y controlar el edificio, se utiliza una representación en espacio de estados que permite describir el sistema de ecuaciones diferenciales de segundo orden en una forma matricial conveniente. Este proceso comienza con las ecuaciones de movimiento del edificio, que se expresan en términos de una matriz de masas M , una matriz de amortiguamiento C y una matriz de rigidez K . Basándonos en el artículo 'Mathematical Model Earthquake' [3], podemos reescribir la ecuación $M\ddot{x} = C\dot{x} + Kx + F$ de la siguiente forma:

$$\ddot{x} = P\dot{x} + Ax + f, \quad (2)$$

donde $A = M^{-1}K$, $P = M^{-1}C$ y $f = ma = mE\omega^2 \cos(\omega t)$ la cual es la fuerza del terremoto.

En un sistema homogéneo quedaría de la siguiente forma

$$\ddot{x} - P\dot{x} - Ax = 0 \quad (3)$$

Utilizamos esta representación lineal para obtener nuestras ecuaciones de estado que utilizamos para la representación de nuestro sistema.

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \ddot{x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & I \\ A & P \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \implies X = DX \quad (4)$$

donde X y D son matrices bloques de 2×1 y 2×2 respectivamente, cuyas entradas son matrices de $n \times 1$ y $n \times n$ [3].

II-A. Análisis de valores propios

El sistema puede resolverse usando el método de valores propios para sistemas homogéneos encontrando los valores propios para la matriz bloque D dada por $\det(D - \lambda I) = 0$.

$$\det \begin{bmatrix} -\lambda I & I \\ A & P - \lambda I \end{bmatrix} = 0 \quad (5)$$

Por lo que el determinante de (5) viene dado por

$$\det(\lambda^2 I - \lambda P - A) = 0 \quad (6)$$

Utilizando la herramienta computacional Matlab obtuvimos los valores de lambda, las frecuencias naturales y periodos de vibración naturales:

λ	ω_n (rad/s)	T (s)
-9.2010 + 68.0839i	68.7028	0.0915
-9.2010 - 68.0839i	68.7028	0.0915
-8.0257 + 63.6614i	64.1653	0.0979
-8.0257 - 63.6614i	64.1653	0.0979
-4.3057 + 46.8005i	46.9981	0.1337
-4.3057 - 46.8005i	46.9981	0.1337
-0.1051 + 7.3411i	7.3419	0.8558
-0.1051 - 7.3411i	7.3419	0.8558
-6.2942 + 56.4738i	56.8235	0.1106
-6.2942 - 56.4738i	56.8235	0.1106
-0.9183 + 21.6852i	21.7046	0.2895
-0.9183 - 21.6852i	21.7046	0.2895
-2.4000 + 35.0400i	35.1221	0.1789
-2.4000 - 35.0400i	35.1221	0.1789

Cuadro I

VALORES DE λ , FRECUENCIAS NATURALES Y PERIODOS DE VIBRACIÓN NATURALES

(Código MATLAB)

Estos valores son indicativos de la estabilidad del sistema, ya que la parte real de los valores propios negativa sugieren que cualquier perturbación inducida por un terremoto tiende a atenuarse con el tiempo, lo que implica que el edificio volverá a su estado de equilibrio después de la perturbación [4].

Queremos que las frecuencias naturales del edificio estén lejos de los 0.25 Hz o 1.5708 radianes por segundo (que corresponde a un período de 4 segundos), preferiblemente a valores más altos o más bajos para evitar la coincidencia con la frecuencia del terremoto. Vemos que todas nuestras frecuencias naturales están lejos de los 1.5708 radianes por segundo.

Además en nuestro análisis los períodos de vibración son significativamente menores que 4 segundos. Por lo tanto, podemos concluir que el edificio no entrará en resonancia con un terremoto de esta duración.

II-B. Diagrama de bloques sin controlador

Inicialmente nuestro sistema de lazo cerrado con la señales de referencia y perturbación mencionadas, sin implementar ningún controlador se muestra en la Fig. 2 en donde utilizamos el bloque de Simulink en Matlan State-Space.

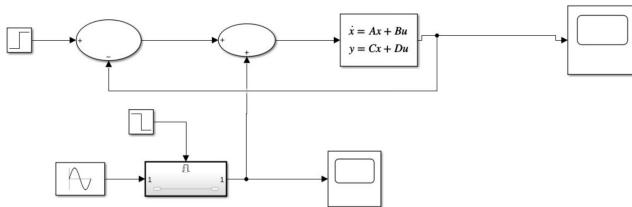


Figura 2. Diagrama de bloques del sistema sin controlador.

Con la configuración del diagrama de bloques del sistema sin controlador mostrado en la Fig. 2, se obtuvieron los resultados mostrados en la Fig. 3.

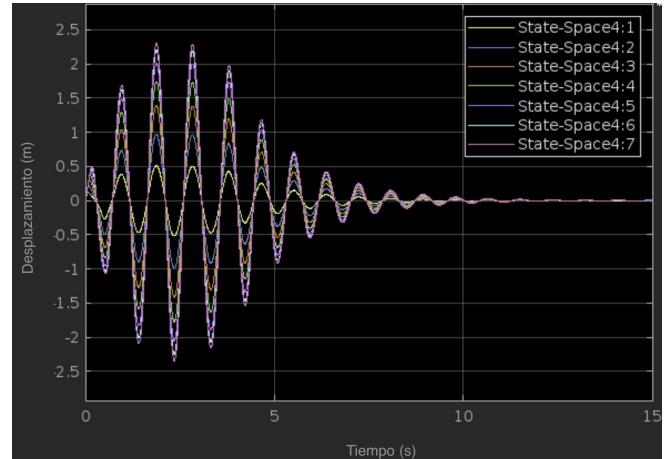


Figura 3. Respuesta al sistema sin controlador. MATLAB y Simulink de la simulación aquí.

En general observamos que el desplazamiento máximo del edificio se encuentra casi en los 2.5 metros, lo cual sobrepasa nuestro límite investigado para evitar que el edificio caiga (1.2 metros), que se encuentra en nuestro análisis de la etapa 3b. Además de que tarda casi 10 segundos en lograr estabilizarse, lo cual es bastante considerando el contexto en donde se necesita una respuesta rápida y unos cuantos segundos pueden ser decisivos.

II-C. Diagrama de bloques con controlador

El diagrama de bloques general para el control del edificio se muestra en la Figura 4. Este diagrama representa la estructura del sistema de control en lazo cerrado diseñado para minimizar el desplazamiento del edificio en respuesta a perturbaciones sísmicas. Los bloques principales y su funcionamiento son los siguientes:

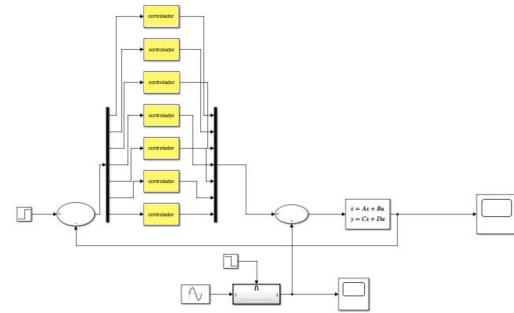


Figura 4. Diagrama de bloques del sistema con controlador

- **Bloque del edificio:** Representa el modelo matemático del edificio, descrito por las ecuaciones de estado analizadas anteriormente.
- **Bloques de controladores:** En la parte superior del diagrama en color amarillo, se encuentran los bloques de controladores. Estos bloques

pueden ser cambiando como controladores Proporcionales (P), Proporcionales-Integradores (PI), Proporcionales-Derivativos (PD) o Proporcionales-Integradores-Derivativos (PID), para realizar el análisis y comparación de resultados.

- **Bloque de referencia:** Este bloque genera la señal de referencia que el sistema debe seguir. En este caso, la señal de referencia puede ser una señal de paso (step).
- **Bloque de perturbación:** Representa la perturbación externa, que en este caso es una señal sinusoidal que simula las fuerzas inducidas por un sismo.
- **Bloque de simulación y visualización:** Estos bloques se encargan de ejecutar la simulación del sistema de control y de visualizar los resultados. Las salidas del sistema (desplazamientos del edificio) se monitorean y se comparan con la señal de referencia para evaluar el desempeño de los diferentes controladores.

III. RESULTADOS

En la siguiente tabla se muestran los valores de K_p , K_i , K_d para cada controlador:

Controlador	K_p	K_i	K_d
P	20	0	0
PI	10	5	0
PD	15	0	10
PID	20	3	10

Cuadro II

RESULTADOS PARA CADA CONTROLADOR

Durante el análisis, se intercambian los bloques de controladores para implementar y evaluar el desempeño de los controladores P, PI, PD y PID. El desempeño de cada controlador se evalúa en términos de su capacidad para minimizar el error de seguimiento, reducir el sobreimpulso y disminuir el tiempo de asentamiento.

III-A. Controlador Proporcional (P)

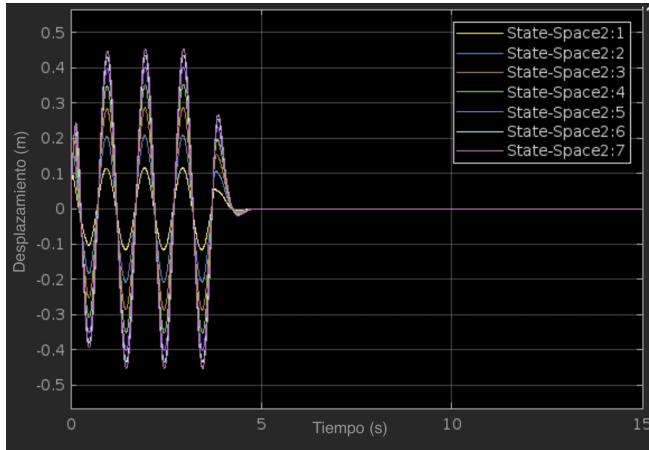


Figura 5. Respuesta del Controlador P. MATLAB y Simulink de la simulación aquí.

El controlador proporcional (P) tiene un comportamiento oscilatorio que se atenúa con el tiempo. Las oscilaciones

iniciales son bastante grandes, con una amplitud inicial de aproximadamente 0.5 unidades. El sistema presenta un overshoot pronunciado, sobre pasando inicialmente el valor deseado en un 44 %. El tiempo de asentamiento es moderado, alrededor de 5 segundos, ya que el sistema tarda un tiempo en reducir las oscilaciones y alcanzar el valor de referencia sin oscilaciones. Finalmente, el sistema se estabiliza, aunque puede ser lento en hacerlo.

Comparación con modelo sin controlador: Se reduce el desplazamiento drásticamente de 2.5 metros a 0.5 metros, así que únicamente con el controlador proporcional se puede evitar que el edificio se desplome. Igualmente el tiempo en el que el sistema logra estabilizarse se reduce a prácticamente la mitad (5 s).

Efecto: Ajusta la salida proporcionalmente al error actual. Si el error es grande, la corrección será grande; si el error es pequeño, la corrección será pequeña.

Ventajas: Es simple de implementar y puede reducir significativamente el error.

Desventajas: Puede no eliminar el error de estado estacionario y puede provocar oscilaciones si la ganancia proporcional es muy alta.

III-B. Controlador Proporcional-Derivativo (PD)

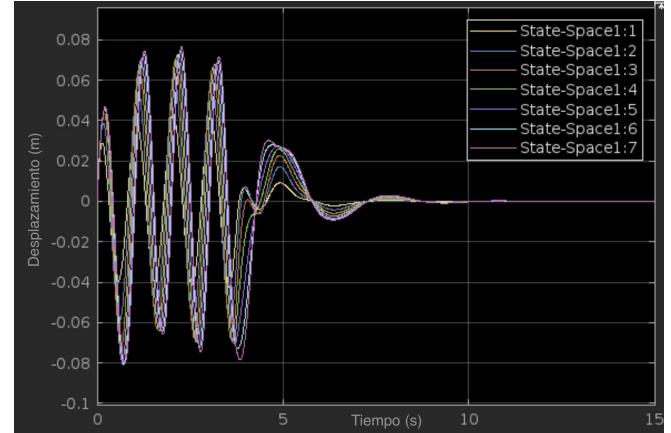


Figura 6. Respuesta del Controlador PD. MATLAB y Simulink de la simulación aquí.

El controlador proporcional-derivativo (PD) también presenta un comportamiento oscilatorio, pero con una amplitud inicial moderada, alrededor de 0.08 metros. Las oscilaciones iniciales son menores comparadas con el controlador P. La componente derivativa ayuda a disminuir el overshoot, resultando en un overshoot reducido al 9 %. El sistema se estabiliza más rápidamente, con un tiempo de asentamiento rápido de aproximadamente 5-6 segundos. En general, el sistema alcanza la estabilidad de forma más eficiente que con el controlador P.

Comparación con Controlador P: Se puede observar una mejora en comparación en el modelo que tiene únicamente controlador proporcional, hay una reducción del desplazamiento máximo de 0.5 metros a 0.08 metros. Nuestro ajuste disminuyó el desplazamiento máximo del

edificio, pero en cuestión de segundos tarda un poco más en estabilizarse con los parámetros que escogimos.

Efecto: Combina la corrección proporcional con una acción derivativa que depende de la tasa de cambio del error. Esto ayuda a anticipar el error futuro basándose en su tendencia.

Ventajas: Puede reducir las oscilaciones y mejorar la estabilidad del sistema.

Desventajas: La acción derivativa puede amplificar el ruido en la señal de error y puede ser sensible a cambios rápidos.

III-C. Controlador Proporcional-Integrador (PI)

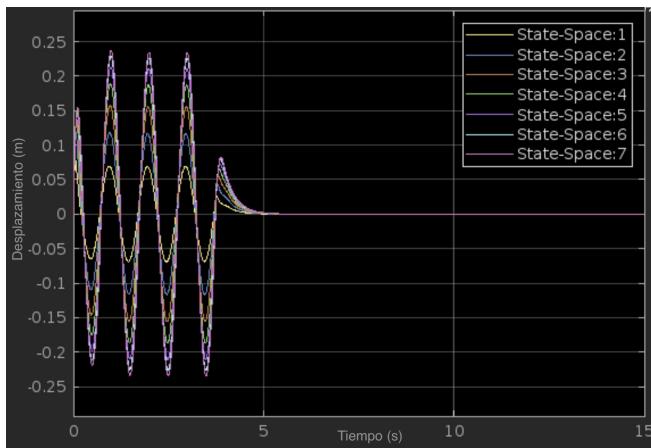


Figura 7. Respuesta del Controlador PI. MATLAB y Simulink de la simulación aquí.

El controlador proporcional-integral (PI) muestra oscilaciones similares a las del controlador P al inicio, pero con una amplitud inicial de aproximadamente 0.23 unidades en algunos casos. El sistema presenta un overshoot inicial debido a la componente integral, con un valor de alrededor del 23-24 %. El tiempo de asentamiento es variable; puede ser más lento inicialmente, alrededor de 5-6 segundos, pero finalmente el sistema elimina el error de estado estacionario. Este controlador proporciona un buen control de estado estacionario, aunque puede tener oscilaciones iniciales más prolongadas.

Comparación con Controlador P: Se puede observar una mejora en comparación en el modelo que tiene únicamente controlador proporcional, hay una reducción del desplazamiento máximo de 0.5 metros a 0.25 metros. Nuestro ajuste disminuyó el desplazamiento máximo del edificio y en cuestión del tiempo de asentamiento vemos que se mantienen iguales.

Comparación con Controlador PD: Se puede observar una mejora en el tiempo de establecimiento, pero a la vez un aumento en el desplazamiento máximo del edificio de 0.08m en el PD a 0.25m en el PI. Dependiendo de las necesidades del sistema, si se necesita un menor desplazamiento o una respuesta más rápida, va a ser el controlador que mejor se adapte.

Efecto: Combina la corrección proporcional con una acción integradora que acumula el error pasado para eliminar el error de estado estacionario.

Ventajas: Elimina el error de estado estacionario y es adecuado para sistemas donde la precisión es importante.

Desventajas: Puede introducir una respuesta más lenta y puede provocar oscilaciones si no está bien sintonizado.

III-D. Controlador Proporcional - Integrador - Derivativo (PID)

El controlador proporcional-integral-derivativo (PID) combina las características de los controladores P, I y D. Presenta oscilaciones iniciales con una amplitud baja, aproximadamente 0.07 unidades, minimizando las oscilaciones iniciales. La combinación de las tres componentes reduce significativamente el overshoot, manteniéndolo en un nivel mínimo de alrededor del 7 %. El sistema se estabiliza rápidamente y de manera eficiente, con un tiempo de asentamiento rápido de aproximadamente 5-6 segundos. Este controlador proporciona una respuesta balanceada con rápida estabilización y mínima oscilación, ofreciendo una excelente estabilidad.

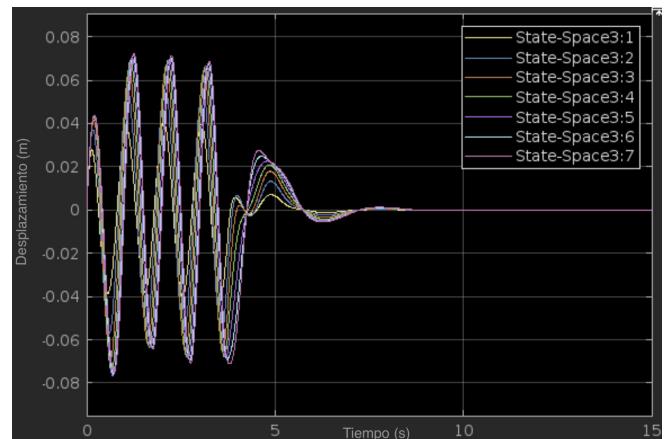


Figura 8. Respuesta del Controlador PID. MATLAB y Simulink de la simulación aquí.

Comparación con los demás modelos: Se puede observar que es el modelo que tiene el desplazamiento máximo menor, muy cercano al del controlador PD, pero es menor. En cuanto al tiempo de establecimiento observamos que tarda menos tiempo que el modelo sin controlador, pero tarda un poco más que los modelos PI y P. Sin embargo, parece ser la opción ideal.

Efecto: Combina todas las acciones de los controladores P, I y D. Proporciona corrección proporcional, elimina el error de estado estacionario y anticipa errores futuros.

Ventajas: Es el controlador más completo y puede proporcionar una respuesta rápida, precisa y estable si se sintoniza correctamente.

Desventajas: Es más complejo de implementar y sintonizar. Puede ser sensible al ruido y a cambios rápidos en el error.

III-E. Ángulo bajo el que el edificio puede restablecerse a su posición vertical

III-E1. Descripción del Edificio:

- Número de pisos: 7
- Altura de cada piso: 3 metros
- Altura total del edificio: 21 metros

III-E2. Parámetros del Sistema:

- Masa (m): 12×10^6 kg
- Rígidez (k): $1,48 \times 10^{10}$ N/m
- Amortiguamiento (c): $5,77 \times 10^7$ Ns/m

III-E3. Estimación del Desplazamiento Lateral Máximo:

Para edificios en zonas sísmicas como la Ciudad de México, se utiliza la siguiente fórmula empírica para estimar el periodo fundamental T :

$$T = C_T \cdot H^x$$

donde:

- C_T es una constante que depende del tipo de edificio. Para edificios de concreto y acero, C_T suele estar en el rango de 0.02 a 0.03.
- x es un exponente que suele estar en el rango de 0.75 a 0.9.

Usando valores típicos para un edificio de concreto y acero:

$$C_T = 0,03, \quad x = 0,75$$

Entonces:

$$T = 0,03 \cdot 21^{0,75} \approx 0,63 \text{ segundos}$$

Utilizando un valor medio de $C_s = 0,2$:

$$\delta_{\max} = \frac{C_s \cdot g \cdot H^2}{T^2}$$

III-E4. Fórmula Ángulo máximo de inclinación:

$$\theta = \arctan \left(\frac{\delta_{\max}}{H} \right)$$

donde:

- δ_{\max} es el desplazamiento lateral máximo permisible.
- H es la altura total del edificio.

III-E5. Cálculos:

- Altura total del edificio:

$$H = 7 \times 3 = 21 \text{ metros}$$

- Período fundamental:

$$T = 0,03 \cdot 21^{0,75} \approx 0,63 \text{ segundos}$$

- Desplazamiento lateral máximo:

$$\delta_{\max} = \frac{0,2 \cdot 9,81 \cdot 21^2}{0,63^2} \approx 140 \text{ cm}$$

- Ángulo máximo de inclinación:

$$\theta = \arctan \left(\frac{\delta_{\max}}{H} \right)$$

$$\theta = \arctan \left(\frac{140}{21} \right) \approx 3,82 \text{ grados}$$

III-E6. Resultados:

- **Desplazamiento lateral máximo (d_{\max})**: El cálculo muestra que el desplazamiento lateral máximo estimado para el edificio es aproximadamente 140 cm.
- **Ángulo máximo de inclinación (θ)**: El ángulo máximo de inclinación estimado es de aproximadamente 3.82 grados.

III-F. El edificio, ¿está a salvo de un terremoto con duración de 4 segundos?

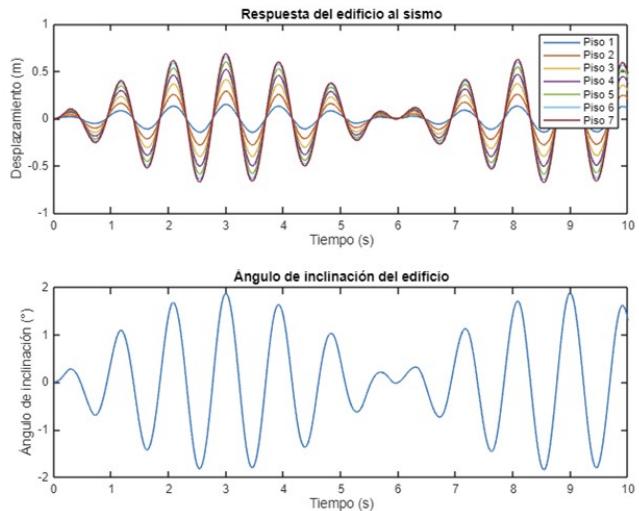


Figura 9. Simulación del comportamiento sísmico del edificio de 7 pisos con ángulo de inclinación

III-F1. Desplazamiento Máximo Observado (d_{\max}): La gráfica de desplazamiento indica que, durante el sismo simulado, los desplazamientos laterales del edificio no superan el límite de 1.4 metros en ningún momento de la simulación de 10 segundos. Esto sugiere que, en términos de desplazamiento lateral, el edificio se mantiene dentro de los límites de seguridad. El desplazamiento máximo observado fue significativamente menor a 1.4 metros.

III-F2. Ángulo de Inclinación Máximo (θ): La gráfica del ángulo de inclinación muestra que el ángulo máximo observado no supera valores críticos que podrían comprometer la estabilidad estructural del edificio. Utilizando la fórmula:

$$\theta = \arctan \left(\frac{\delta_{\max}}{H} \right)$$

donde $H = 21$ metros y $\delta_{\max} = 1,4$ metros, se obtiene un ángulo de inclinación máximo permisible:

$$\theta_{\max} = \arctan \left(\frac{1,4}{21} \right) \approx 3,82 \text{ grados}$$

La gráfica del ángulo de inclinación muestra que el ángulo máximo observado durante la simulación es considerablemente menor que este límite, lo cual indica que la estructura no alcanza niveles críticos de inclinación.

Sin embargo hay normativas como la ASCE 7-16 en donde se establece que para la distancia y el ángulo máximo que un edificio tiene permitido es el siguiente:

- $d_{\max} = \frac{21\text{ m}}{200} \approx 0,105$ metros
- $\theta = 0,286$ grados

En este caso, solamente los edificios con controladores PD y PID cumplen con la normativa descrita. Por lo que se de esta manera se puede ver la importancia de los controladores dentro de un sistema.

IV. CONCLUSIONES

Durante la elaboración de nuestro proyecto utilizamos distintas herramientas teóricas y computacionales para poder minimizar el impacto de un sismo en el edificio. Desarrollamos el modelo matemático con el que pudimos realizar la simulación del sistema en Matlab. Además, explicamos la implementación de controladores Proporcional, Proporcional-Derivativo, Proporcional-Integrador, y Proporcional-Integrador-Derivativo analizando las respuestas de las señales de perturbación que simulan un sismo y su impacto en nuestro edificio analizado.

Entendimos que hay ciertas normativas que se deben respetar para que en el momento en el que ocurra el sismo, el edificio no tenga daños estructurales, que se minimicen los riesgos y por supuesto que no se derrumbe. Con nuestro diseño inicial sin controladores nos dimos cuenta que el edificio no se cae en un sismo de 4 segundos, debido a que su desplazamiento lateral era menor a los 1.4 m que establece la normativa para evitar el desplome de un edificio. Sin embargo la normativa que nos ayuda a minimizar el impacto y que busca evitar daños estructurales, este desplazamiento debe ser menor para evitar estos daños. Por lo que nuestro edificio sin controlador no cumplía esta normativa, entonces si lo dejábamos así como lo teníamos era muy probable que durante el sismo el edificio contara con daños estructurales, a pesar de que podía resistir el temblor y no desplomarse, eso no evitaba los daños internos que podría provocar. Al implementar los controladores pudimos reducir drásticamente el desplazamiento horizontal a 0.07m aproximadamente con el controlador PID, por lo que este modelo ya evitaría tener daños estructurales.

En términos de tiempo de establecimiento, los modelos PI y P mostraron una disminución drástica del tiempo en comparación con el modelo original sin controlador. Pudimos observar la importancia de técnicas de control en Simulink en ingeniería estructural para mejorar la seguridad y la durabilidad de estructuras en zonas sísmicas, como el caso de nuestro edificio.

Por otra parte, nuestra investigación desde la modelación matemática basándonos en la teoría de optimización no lineal usando un sistema de ecuaciones de segundo orden para el análisis del edificio de 7 pisos, todo esto implementado con las herramientas computacionales que nos ofrece

Matlab, específicamente Simulink, pudimos darnos cuenta de la relevancia de la relación entre la ingeniería de control y civil, y cómo puede modelarse la respuesta de estructuras a sismos y ver su comportamiento antes distintas perturbaciones. De esta forma logramos exitosamente diseñar el sistema con controlador que permite al edificio resistir un sismo de 4 segundos sin tener daños estructurales graves que afecten el funcionamiento del edificio.

V. APÉNDICE (RECURSOS)

Código MATLAB y Simulink

REFERENCIAS

- [1] L. M. Jahuira Mamani, "Determinación de la rigidez lateral de los muros de forma "H" en el análisis estructural de edificaciones en la ciudad de Lima," 2014.
- [2] M. I. Supe Camino, "Estudio del comportamiento sísmico de estructuras de hormigón armado diseñados por el método de diseño directo basado en desplazamientos (DDBD) para tres, seis y nueve pisos," Bachelor's thesis, 2015.
- [3] S. Bagai, P. Madaan, and T. Khajuria, "A Mathematical Model for the Effect of Earthquake on High Rise Buildings of Different Shapes," *DU Journal of Undergraduate Research and Innovation*, vol. 2, no. 1, pp. 180-188, 2016.
- [4] S. L. Ross, *Introduction to Ordinary Differential Equations*. John Wiley & Sons, 1984.
- [5] N. Djafar-hennia, A. Zine, G. Salah, and R. Chebilie, "Optimum structural wall distribution in reinforced concrete buildings subjected to earthquakes," ResearchGate, 2024.
- [6] Y. Domadzra, M. Bhandari, and M. Hasan, "Seismic response of base-isolated buildings: exploring isolator properties," *Asian Journal of Civil Engineering*, 2024.
- [7] R. Marchand and T.J. McDevitt, "Learning Differential Equations by Exploring Earthquake Induced Structural Vibrations: A Case Study," *Int. J. Engng. Ed.*, vol. 15, no. 6, 1999.
- [8] K. Ogata, *Modern Control Engineering*, 5th ed., Pearson, 2010.