PROCEDIMIENTO DE DISEÑO SIMPLIFICADO DE AISLADORES SÍSMICOS PARA EQUIPOS RÍGIDOS SIMPLEMENTE APOYADOS EN LA CIUDAD DE MÉXICO CON CRITERIOS DE ESTABILIDAD

Miguel A. Jaimes [(1)], *Brandon Maldonado* [(2)] *y Francisco A. Godínez* [(1,3,*)]

RESUMEN

Este estudio presenta un procedimiento de diseño simplificado para aisladores sísmicos aplicados a equipos rígidos simplemente apoyados en la Ciudad de México. Se evalúa la respuesta sísmica de estos equipos no anclados, enfocándose en criterios de estabilidad como la prevención del balanceo, volcamiento y deslizamiento bajo cargas sísmicas. La metodología propuesta permite calcular las dimensiones y características iniciales de los aisladores, asegurando que se cumplan los requisitos de estabilidad. Mediante las ecuaciones dinámicas gobernantes, se verifica la efectividad del diseño simplificado de los aisladores, demostrando que el equipo permanece estable sin iniciar movimientos de balanceo ni deslizamiento. Este enfoque ofrece un marco confiable para el diseño de sistemas de aislamiento sísmico de equipos que cumplan con el ambiente sísmico de la Ciudad de México.

Palabras clave: equipos rígidos; aisladores sísmicos; diseño simplificado; volcamiento; deslizamiento; balanceo; respuesta sísmica; Ciudad de México

ISSN-e 2395-8251

SIMPLIFIED DESIGN PROCEDURE FOR SEISMIC ISOLATORS OF FREELY SUPPORTED RIGID EQUIPMENT IN MEXICO CITY BASED ON STABILITY CRITERIA

ABSTRACT

This study presents a simplified design procedure for seismic isolators used for rigid freestanding equipment in Mexico City. The seismic response of non-anchored equipment is evaluated, focusing on stability criteria such as preventing rocking, overturning, and sliding under seismic loads. The proposed methodology calculates the initial dimensions and characteristics of the isolators, ensuring that stability requirements are met. Using governing dynamic equations, the effectiveness of the simplified design is verified, demonstrating that the equipment remains stable without initiating rocking or sliding. This approach provides a reliable framework for designing seismic isolation systems for equipment that can withstand the seismic conditions of Mexico City.

Keywords: rigid equipment; seismic isolators; simplified design; overturning; sliding; rocking; seismic response; Mexico City

Artículo recibido el 26 de noviembre de 2024 y aprobado para su publicación el 3 de enero de 2026. Se aceptarán comentarios y/o discusiones hasta cinco meses después de su publicación.

(1) Instituto de Ingeniería, UNAM, Av. Universidad, No. 3000, CP 04510, Del. Coyoacán, México D.F. E-mail: mjaimest@iingen.unam.mx

(2) Facultad de Ingeniería, UNAM, Av. Universidad, No. 3000, CP 04510, Del. Coyoacán, México D.F. E-mail: bmaldonadoa@iingen.unam.mx

(3) Unidad de Investigación y Tecnología Avanzada, Universidad Nacional Autónoma de México, Vía de la Innovación No. 410, Autopista Monterrey-Aeropuerto, km. 10 PIIT, C.P. 66629 Apodaca Nuevo León, México. **Autor para correspondencia**: (*) fgodinezr@iingen.unam.mx

INTRODUCCIÓN

La estabilidad de equipos rígidos simplemente apoyados nuevos o existentes, como transformadores, estaciones de control y otros componentes en instalaciones críticas (e.g., hospitales, plantas eléctricas, centros de datos, museos, edificios históricos), así como otros objetos de alto valor o relevancia patrimonial, tales como piezas de museo, representa un desafío importante durante eventos sísmicos. El colapso o volcamiento de estos contenidos o equipos puede generar daños directos e interrupciones de servicios esenciales, lo que conlleva impactos socioeconómicos significativos (Figura 1a). Aunque el deslizamiento de equipos suele ser menos catastrófico que el volcamiento, también puede comprometer la operatividad de las instalaciones al dañar tanto el equipo como su entorno (Figura 1b). Estos riesgos destacan la importancia de desarrollar estrategias efectivas para proteger estos equipos contra el volcamiento y el deslizamiento.



a) b)

Figura 1. (a) Transformador volcado durante el sismo de Izmit de 1999 (Whittaker, 1999), Mw 7.4, Turquía; Desplazamiento lateral excesivo de un generador eléctrico en la Refinería de Salina Cruz durante el sismo de Oaxaca, Mw 8.2, en 2017, México (Jaimes y Candia 2020).

ISSN-e 2395-8251

En el análisis del balanceo y volcamiento, Housner (1963) fue pionero al estudiar bloques rígidos sometidos a movimientos sísmicos, demostrando que la estabilidad de estos cuerpos depende directamente de su geometría. Posteriormente, Psycharis y Jennings (1983) ampliaron este enfoque al investigar la interacción entre el levantamiento y el deslizamiento en cuerpos rígidos sobre superficies flexibles. Más adelante, Shao y Tung (1999) demostraron que los pulsos sísmicos de corta duración pueden ser especialmente peligrosos para objetos más pequeños, incrementando su tendencia al volcamiento bajo aceleraciones sísmicas intensas. Makris y Roussos (2000) estudiaron el volcamiento de bloques rígidos bajo movimientos de campo cercano. Recientemente, Jaimes y Candia (2018) analizaron el riesgo de volcamiento en equipos rígidos bajo distintas condiciones de soporte (equipos simplemente apoyados, anclados y sobre aisladores sísmicos), destacando que la confiabilidad de los equipos simplemente apoyados es menor en zonas cercanas a la fuente del sismo, pero puede mejorar en condiciones de sismos lejanos. Una revisión exhaustiva sobre estos esfuerzos se encuentra en Makris (2014a, b) y las referencias incluidas. En particular, investigaciones recientes han revelado que cuando un cuerpo rígido simplemente apoyado tiene un tamaño suficientemente grande, es capaz de resistir cualquier tipo de movimiento del suelo debido a su inercia rotacional, la cual aumenta proporcionalmente al cuadrado de su tamaño (Makris, 2014a, b).

Por otro lado, el deslizamiento de equipos rígidos ha sido ampliamente estudiado por autores como Lopez-Garcia y Soong (2003a, b), Nikfar y Konstantinidis (2013) y Konstantinidis y Nikfar (2015), quienes evaluaron la fragilidad sísmica de equipos no anclados en edificios con aislamiento de base. Sus investigaciones revelaron que, aunque el aislamiento sísmico puede reducir las aceleraciones transmitidas al equipo, puede aumentar el riesgo de deslizamiento si las interfaces de apoyo no están adecuadamente

diseñadas. Aslan et al. (1975) realizaron uno de los primeros estudios experimentales en este campo, cuantificando los desplazamientos residuales de bloques rígidos sometidos a excitaciones sísmicas mediante ensayos en mesa vibratoria. Su trabajo proporcionó un marco experimental fundamental para el análisis del deslizamiento en objetos simplemente apoyados. Jones y Shenton (1990) realizaron un análisis numérico para estudiar la respuesta combinada de deslizamiento y balanceo de bloques rígidos bajo movimientos sísmicos, considerando un rango de parámetros de contacto. Shenton y Jones (1991) describieron las ecuaciones diferenciales que gobiernan el movimiento de cuerpos rígidos simplemente apoyados, mientras que Agbabian et al. (1993) analizaron métodos analíticos y experimentales para evaluar la susceptibilidad al balanceo, volcamiento y deslizamiento de objetos en museos. Varios autores (e.g., Shao y Tung, 1999; Choi y Tung, 2014) han derivado las ecuaciones de movimiento y los criterios de inicio para diferentes modos de respuesta de bloques rígidos simplemente apoyados, incluyendo deslizamiento, balanceo, levantamiento y modos combinados. Shao y Tung (1999) también estimaron la distancia de deslizamiento y la probabilidad de volcamiento de cuerpos rígidos no simétricos utilizando un conjunto de 75 registros sísmicos reales. Más recientemente, Choi y Tung (2014) demostraron que el modelo de Newmark puede reproducir eficazmente los desplazamientos inducidos por sismos en bloques rígidos situados tanto a nivel de suelo como en pisos superiores de edificios, si se emplean factores de ajuste adecuados. Lin et al. (2014) estudiaron el deslizamiento de contenidos en estructuras simples de comportamiento lineal-elástico sometidas a aceleraciones en la base. Este trabajo destaca cómo las propiedades dinámicas de las estructuras y las aceleraciones de entrada afectan la estabilidad de los objetos simplemente apoyados, proporcionando información valiosa sobre los factores que influyen en la susceptibilidad al deslizamiento de equipos no anclados. De manera similar, Jaimes y Candia (2020) evaluaron el riesgo de deslizamiento en equipos rígidos, demostrando que las vibraciones de baja frecuencia en sitios alejados reducen los desplazamientos máximos y residuales en comparación con sitios cercanos al epicentro.

ISSN-e 2395-8251

A pesar de estos avances en el análisis de balanceo, volcamiento y deslizamiento, la Norma Técnica Complementaria para el Diseño por Sismo de 2023 (NTCD-DS 2023) en la Ciudad de México no ofrece directrices específicas para el uso de aisladores sísmicos en equipos rígidos no anclados. Actualmente, las normativas se limitan a evaluar la fricción entre los materiales del suelo y el equipo, sin proporcionar orientación sobre cómo mejorar la respuesta sísmica mediante sistemas de aislamiento. De manera similar, hasta donde es del conocimiento de los autores, aunque normas y guías internacionales desarrolladas en países como Estados Unidos y Japón abordan el comportamiento sísmico de equipos y contenidos no estructurales, estas se enfocan principalmente en criterios de anclaje, fuerzas sísmicas equivalentes o verificación de estabilidad, y no establecen de forma explícita procedimientos simplificados para el diseño de sistemas de aislamiento aplicados a equipos rígidos simplemente apoyados. En este contexto, resulta pertinente desarrollar metodologías prácticas que permitan incorporar el aislamiento sísmico de equipos como una estrategia efectiva de mitigación del riesgo.

Este estudio presenta un procedimiento de diseño simplificado de aisladores sísmicos para equipos rígidos simplemente apoyados en la Ciudad de México. El enfoque de esta metodología considera tanto el balanceo y volcamiento como el deslizamiento. La metodología propuesta permite calcular las dimensiones y características iniciales de los aisladores, garantizando que se cumplan los requisitos de estabilidad en condiciones sísmicas intensas. Posteriormente, a través de las ecuaciones dinámicas gobernantes, se evalúa la efectividad del diseño simplificado, verificando que el equipo se mantenga estable sin iniciar ni el balanceo ni el deslizamiento, validando así el procedimiento propuesto como un marco confiable para instalaciones críticas.

ECUACIONES DE BLOQUES RÍGIDOS DE BALANCEO Y DESLIZAMIENTO AISLADOS SÍSMICAMENTE

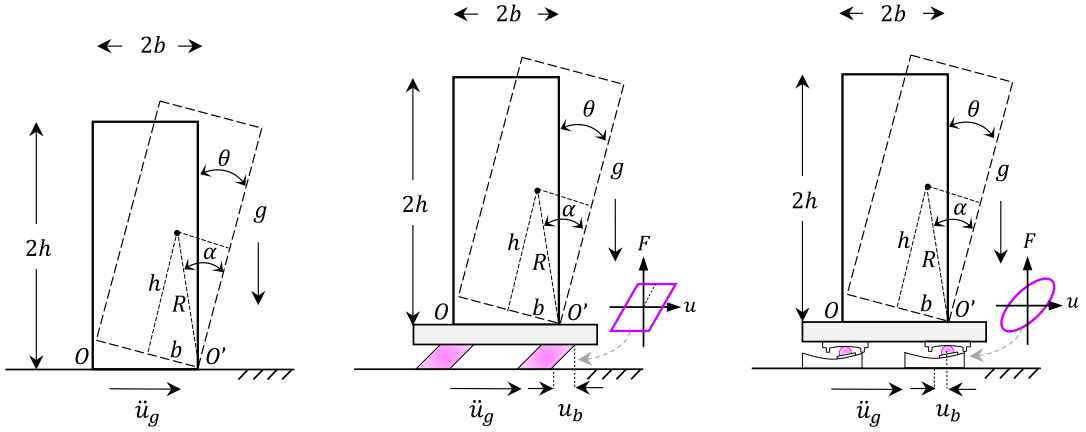
En esta sección se presentan las ecuaciones diferenciales que gobiernan el comportamiento de bloques rígidos simplemente apoyados sobre sistemas de aislamiento sísmico. Estas ecuaciones describen el balanceo y deslizamiento de los bloques bajo la acción de fuerzas sísmicas, y son fundamentales para evaluar la estabilidad de los contenidos no estructurales en instalaciones críticas. Los modelos matemáticos utilizados permiten capturar tanto los efectos de la aceleración sísmica en el sitio, como la interacción dinámica entre el sistema de aislamiento y los bloques rígidos. Se analizan los principales parámetros que influyen en la respuesta, como la geometría del bloque, la rigidez del sistema de aislamiento, y los coeficientes de fricción y restitución, asegurando un marco teórico robusto para la verificación de medidas de mitigación efectivas.

Bloque rígido propenso a balanceo apoyado sobre una base fija

El movimiento de balanceo de un bloque rígido se puede modelar como un sistema de un grado de libertad (Figura 2a, izquierda). La ecuación que rige este comportamiento está dada por (Housner 1963, Makris y Roussos, 2000):

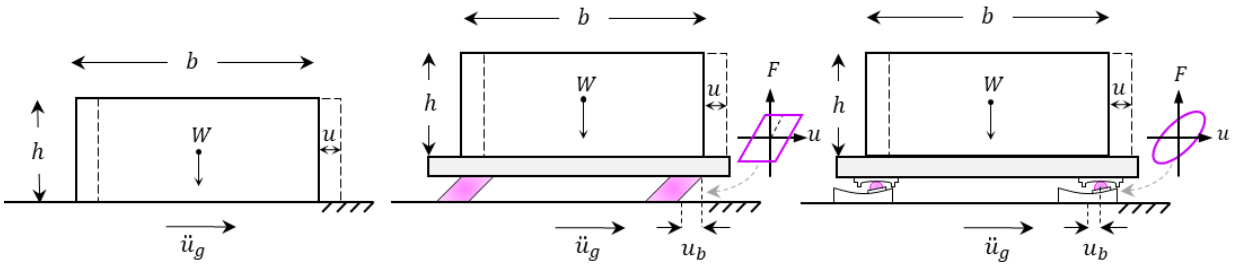
$$\ddot{\theta} = -p^2\left\{sinA + \frac{\ddot{u}_g}{g}cosA\right\} \tag{1}$$

donde $\ddot{\theta}$ es la aceleración angular del bloque, $p = \sqrt{3g/4R}$ es el parámetro de frecuencia del bloque, $\ddot{u}_g$ es la aceleración horizontal del suelo, g es la aceleración de la gravedad, $A = \alpha \cdot sign[\theta] - \theta$, R es la diagonal del bloque, $\alpha = tan^{-1}[b/h]$ es el ángulo del bloque, b es la semi-base del bloque y h es la semi-altura del bloque como se muestra en la Figura 2a.



a)

ISSN-e 2395-8251



b)

Figura 2. Representación esquemática de equipo eléctrico rígido en: a) movimiento de balanceo y b) movimiento de deslizamiento. Se presentan tres configuraciones: equipo simplemente apoyado (izquierda), equipo sobre una base con aislamiento sísmico de cojinetes de caucho con núcleo de plomo (centro), y equipo apoyado sobre una base con aislación sísmica tipo SCSS (derecha).

Para bloques delgados y bajo el supuesto de pequeñas rotaciones, la ecuación (1) se puede linealizar de la siguiente forma, lo que permite resolverla analíticamente.

$$\ddot{\theta} = -p^2\left\{A + \frac{\ddot{u}_g}{g}\right\} \tag{2}$$

Cuando ocurre un movimiento de balanceo, el bloque impacta contra la base, alternando los puntos de contacto entre O y O', Figura 2a. Después de cada impacto, parte de la energía cinética se disipa, siendo la proporción de disipación tras el impacto $r = \dot{\theta}_2^2/\dot{\theta}_1^2$, donde $\dot{\theta}_1$ y $\dot{\theta}_2$ son las velocidades angulares inmediatamente antes y después del impacto, respectivamente. Suponiendo conservación del momento angular (Housner, 1963), el valor teórico de r está dado por:

$$r = \left[1 - \frac{3}{2}sin^2\alpha\right]^2 \tag{3}$$

Nótese que la ecuación (3) está en función del ángulo del bloque α dejando implícitamente la relación de esbeltez (b/h).

Bloque rígido propensos a balanceo sobre sistemas de aislamiento sísmico

El modelo de aislamiento de base implementado en este estudio sigue el modelo bilineal propuesto por Roussis et al. (2008) y Vassiliou y Makris (2012). La ecuación de movimiento para un bloque de masa m, apoyado sobre una base aislada de masa m_b, con un desplazamiento elástico del sistema de aislamiento u_y, rigidez lateral k_b y coeficiente de fricción υ, esta dada por:

$$\ddot{\theta} = -p^2\left(sinA + cosA\,\frac{-\omega_b^2 u_b - vgz - \gamma R(\dot{\theta})^2 sinA + \gamma Rp^2 cosAsinA)}{g - \gamma Rp^2 cos^2 A}\right) \tag{4}$$

$$\ddot{u}_b = \frac{-\omega_b^2 u_b - vgz - yR(\dot{\theta})^2 sinA + \gamma Rp^2 cosAsinA}{1 - \dfrac{\gamma Rp^2 cos^2 A}{g}} - \ddot{u}_g \tag{5}$$

ISSN-e 2395-8251

$$\dot{z} = \frac{1}{u_y}\left(\dot{u}_b - \zeta|\dot{u}_b|z|z|^{n-1} - \beta\dot{u}_b|z|^n\right) \tag{6}$$

donde $\ddot{\theta}$ es la aceleración angular del bloque, $\ddot{u}_b$ es la aceleración de la base aislada relativa al suelo, $\gamma = m/(m_b + m)$ es la relación de masa entre el bloque y la base aislada, $\omega_b = \sqrt{k_b/(m_b + m)}$ es la frecuencia natural del sistema de aislamiento (donde k_b es la rigidez lateral del sistema de aislamiento, m es la masa del bloque y m_b es la masa de la base aislada). El término z es un parámetro histerético adimensional que describe el comportamiento no lineal del sistema de aislación utilizando el modelo de Bouc-Wen (Bouc 1971; Wen 1976). Los parámetros ζ, β y n son parámetros del modelo Bouc-Wen que gobiernan el comportamiento histerético.

De manera análoga a los modelos de base fija, las rotaciones del bloque sobre la base aislada son continuas desde el punto O hasta O' (Figura 2a, centro y derecha). La relación máxima teórica de pérdida de energía en el sistema está dada por la ecuación (7) propuesta por Roussis et al. (2008) y Vassiliou y Makris (2012):

$$r = \left[\frac{(\gamma + 4)cot^2\alpha - 2(\gamma + 1)}{(\gamma + 4)cot^2\alpha + 4(\gamma + 1)}\right]^2 \tag{7}$$

ISSN-e 2395-8251

Bloque rígido propenso a deslizamiento apoyado sobre una base fija

La ecuación de movimiento para un bloque que se desliza sobre una base fija (Figura 2b, izquierda) está dada por (Lopez-García y Soong 2003a, b, Jaimes y Candia 2020):

$$\ddot{u} = -\mu_k sgn(\dot{u})g - \ddot{u}_g \tag{8}$$

donde $\ddot{u}$ es la aceleración del bloque con respecto al suelo, $\dot{u}$ es la velocidad relativa del bloque (i.e., de equipo-bloque) con respecto al suelo, $\mu_k sgn(\dot{u})mg$ es la fuerza de fricción desarrollada en la interfaz, μ_k es el coeficiente de fricción cinética presente en la interfaz del equipo, y g es la aceleración de la gravedad. Cuando las fuerzas de inercia no son suficientes para superar la fricción, no se produce deslizamiento, es decir, $\dot{u} = 0$.

Bloque rígido propenso a deslizamiento apoyado sobre un sistema de aislamiento sísmico viscoelástico

La ecuación de movimiento para un bloque-equipo que se desliza sobre un sistema de aislamiento sísmico viscoelástico (Figura 2b, centro) está dada por (Jaimes y Candia, 2020):

$$\ddot{u} = -\left(\ddot{u}_g + \ddot{u}_b\right) - \mu_k sgn(\dot{u})g \tag{9}$$

$$\ddot{u}_b = -\gamma\ddot{u} - 2\xi_b\omega_b\dot{u}_b - \omega_b^2 u_b - \ddot{u}_g \tag{10}$$

donde $\ddot{u}$ es la aceleración del bloque relativa a la base aislada, $\ddot{u}_b$ es la aceleración de la base aislada relativa al suelo, y $\gamma = m/(m_b + m)$, $\omega_b = \sqrt{k_b/(m_b + m)}$ y ξ_b es el amortiguamiento del sistema de aislación.

Bloque rígido propenso a deslizamiento apoyado sobre un sistema de aislamiento sísmico bilineal

Análogamente a la ecuación (9), la ecuación de movimiento para un bloque que se desliza sobre una base aislada bilineal (Figura 2b, derecha) con fuerza horizontal del sistema de aislamiento Q y desplazamiento elástico u_y está dada por (Jaimes y Candia, 2020):

$$\ddot{u} = -\left(\ddot{u}_g + \ddot{u}_b\right) - \mu_k sgn(\dot{u})g \tag{11}$$

$$\ddot{u}_b = -\gamma\ddot{u} - \frac{Q}{m + m_b}z - \omega_b^2 u_b - \ddot{u}_g \tag{12}$$

donde $Q = \mu_b(m + m_b)g$ es la resistencia horizontal del sistema de aislamiento, μ_b es el coeficiente de fricción del sistema de aislamiento sísmico, m_b es la masa de la base aislada, y ω_b es la frecuencia natural de la base aislada. La formulación propuesta para bloques que experimentan tanto balanceo como deslizamiento sobre un sistema de aislamiento sísmico se ajusta razonablemente al comportamiento de dos tipos de aislamiento de base: los cojinetes de caucho de plomo (Figura 2b, centro) y los cojinetes deslizantes cóncavos simples (SCSS, Figura 2b, derecha). Estas ecuaciones completan el procedimiento propuesto y permiten la verificación directa de la estabilidad frente al deslizamiento en sistemas de aislamiento bilineales, sin requerir la presentación de resultados gráficos adicionales en esta etapa. Cabe señalar que el esquema de verificación es conceptualmente análogo al caso del aislamiento viscoelástico, cuya validación se presenta en la siguiente sección mediante las ecuaciones (9)–(10).

ISSN-e 2395-8251

PROCEDIMIENTO DE DISEÑO SIMPLIFICADO PARA EQUIPOS RÍGIDOS SOBRE AISLADORES SÍSMICOS

En esta sección se describe el procedimiento de diseño simplificado para garantizar la estabilidad de equipos rígidos simplemente apoyados sobre aisladores sísmicos en la Ciudad de México. El enfoque del diseño se basa en criterios fundamentales de estabilidad, como la prevención del balanceo, volcamiento y deslizamiento bajo la acción de movimientos sísmicos. Para lograr esto, se establecen parámetros clave que permiten dimensionar adecuadamente los aisladores, asegurando que los equipos mantengan su estabilidad durante eventos sísmicos. La metodología presentada se enfoca en evaluar la respuesta dinámica de los equipos bajo diferentes escenarios sísmicos característicos de la Ciudad de México, proporcionando un marco estructurado que guía a los ingenieros en la selección y diseño simplificado de los sistemas de aislamiento.

En la Figura 3 se presenta un diagrama que resume este procedimiento de diseño simplificado, diferenciando entre equipos propensos a movimientos de balanceo y volcamiento y aquellos susceptibles a deslizamiento, permitiendo una visualización clara de los pasos a seguir en cada caso.

Los pasos principales son los siguientes:

- **Análisis de las propiedades geométricas del equipo o contenido**. El primer paso consiste en analizar las dimensiones y características geométricas del equipo o contenido. En el caso de equipos

susceptibles al balanceo o volcamiento, se obtienen parámetros clave como la ubicación del centro de masa, representada por la semi-altura (h) y la semi-base (b), con el fin de determinar la esbeltez (b/h) y el tamaño del equipo (R) (Figura 2). Estos factores son determinantes para evaluar la vulnerabilidad del equipo al balanceo o volcamiento bajo condiciones sísmicas. Para los equipos susceptibles al deslizamiento, se evalúan el peso del equipo (W) y el coeficiente de fricción estático (μ_k) entre la base del equipo y la superficie de apoyo o el aislador.

- **Evaluación de la susceptibilidad al volcamiento y deslizamiento**. A partir de las propiedades geométricas, se procede a calcular la aceleración mínima que provocaría el balanceo o volcamiento del equipo (a_b), utilizando la expresión $a_b = g \cdot (b/h)$, donde g es la aceleración gravitacional. Para el caso de deslizamiento, se evalúa la aceleración mínima que provocaría el deslizamiento (a_d), utilizando la expresión $a_d = \mu_s \cdot g$ donde μ_s es el coeficiente de fricción estático existente entre la base del equipo y la superficie de apoyo. Este coeficiente se utiliza porque evalúa la resistencia al inicio del movimiento deslizante, antes de que se produzca el deslizamiento propiamente dicho. Este coeficiente puede estimarse en función de la rugosidad de la superficie o con información proporcionada por el fabricante del aislador. Estos parámetros (a_b y a_d) son fundamentales para definir las condiciones bajo las cuales el equipo podría perder estabilidad, ya sea por volcamiento o deslizamiento, durante un evento sísmico, como se detalla a continuación.

- **Determinación de las intensidades sísmicas de diseño simplificado**. A continuación, se selecciona el espectro de diseño para el sitio de estudio, que puede ser un espectro de peligro uniforme (EPU) o el espectro sísmico de diseño correspondiente. Este espectro debe proporcionar una referencia de las aceleraciones esperadas tanto para el equipo o contenido como para los distintos periodos del sistema de aislamiento, ajustado según el nivel de importancia del equipo y el amortiguamiento del sistema de aislamiento (ξ).

- **Superposición de los parámetros de estabilidad en el espectro sísmico**. Los valores de aceleración mínima de balanceo o volcamiento (a_b) y/o la aceleración mínima de deslizamiento (a_d) se trazan sobre el espectro sísmico seleccionado. Este paso permite identificar los intervalos de aceleración y periodo en los que el equipo está en mayor riesgo de inestabilidad, orientando la selección simplificada de los aisladores símicos. Cabe señalar que, considerando los criterios de estabilidad, si $a_b > a_s$ (donde a_s es la aceleración máxima del suelo indicada por el espectro de diseño seleccionado), el equipo no volcará; de igual manera, si $a_d > a_s$, el equipo no deslizará, lo que indicaría que no es necesario un sistema de aislamiento sísmico.

- **Determinación del periodo fundamental del aislador**. En caso de que se requiera un sistema de aislamiento, a partir de la intersección entre el espectro sísmico y los parámetros de estabilidad del equipo, se calcula el periodo fundamental del sistema de aislamiento (T_b). Este valor es importante para guiar la configuración del aislador, asegurando que su comportamiento dinámico mantenga la estabilidad del equipo frente a solicitaciones sísmicas.

- **Propuesta de los parámetros dinámicos del aislador**. Finalmente, se proponen los parámetros dinámicos del aislador, como el coeficiente de amortiguamiento (ξ) y el periodo del sistema de aislación (T_b), asegurando que el sistema de aislamiento cumpla con los requisitos de estabilidad y protección del equipo en el sitio de estudio bajo las condiciones sísmicas características de la Ciudad de México.

ISSN-e 2395-8251

Con estos parámetros, se puede calcular el desplazamiento objetivo relativo del sistema de aislamiento (u_o). Para el caso de equipos donde se busca evitar el balanceo o volcamiento, el desplazamiento objetivo relativo se estima como $u_o = g \cdot (b/h) \cdot (T_b/2\pi)^2$. Para el caso de equipos donde se busca evitar el deslizamiento, el desplazamiento objetivo relativo se estima como $u_o = \mu_k \cdot g \cdot (T_b/2\pi)^2$. Este desplazamiento ($u_o$) representa el valor que debe ser soportado de manera efectiva por el sistema de aislamiento sísmico para garantizar la estabilidad del equipo ante los movimientos sísmicos.

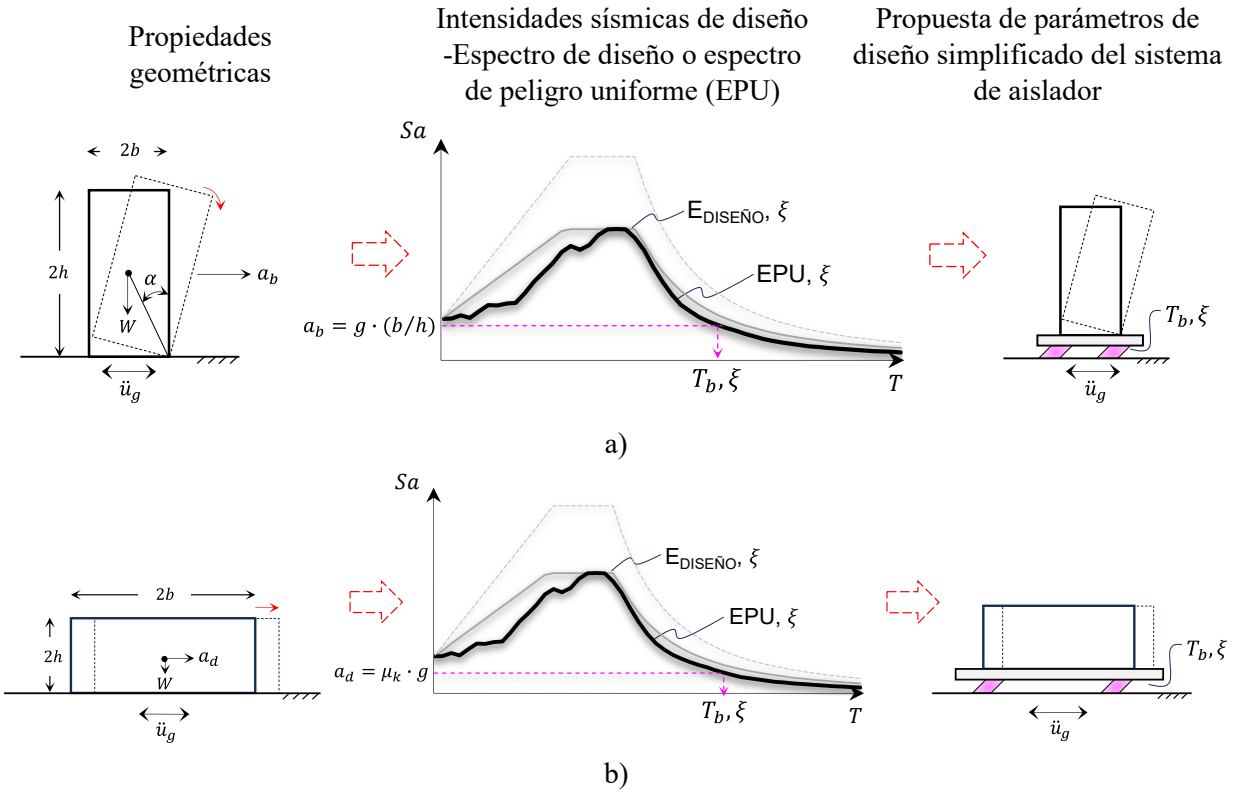


Figura 3. Diagrama de procedimiento para el diseño simplificado para garantizar la estabilidad de equipos rígidos simplemente apoyados sobre aisladores sísmicos: a) Equipos propensos a movimientos de balanceo y volcamiento y b) Equipos propensos a movimientos de deslizamientos.

VALIDACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE DISEÑO SIMPLIFICADO

En esta sección, se presenta la validación del procedimiento de diseño simplificado mediante la aplicación del modelo en casos de estudio específicos en la Ciudad de México. Para ello, se seleccionan escenarios representativos que permiten comparar los resultados obtenidos con el diseño simplificado contra simulaciones detalladas. La validación incluye la evaluación de la respuesta sísmica de los equipos sobre los aisladores, comprobando que se cumplen los criterios de estabilidad previamente establecidos, como la prevención del balanceo, volcamiento y deslizamiento.

Sitios de estudio y movimientos sísmicos usados

Se seleccionaron tres sitios representativos: uno en terreno firme (periodo de suelo de T_s= 0.5 s) y dos en zonas de lago (periodos de suelo de T_s= 1.3 s y T_s= 1.8 s) de la Ciudad de México. Para cada uno de estos sitios, se estimaron los espectros de diseño (línea negra) y los espectros de peligro uniforme (EPU,

ISSN-e 2395-8251

línea magenta gruesa), considerando factores de amortiguamiento del 5% y 20%, como se ilustra en la Figura 4. Además, se obtuvieron acelerogramas representativos del peligro sísmico para un periodo de retorno de 475 años, en conformidad con las especificaciones del Reglamento de Diseño Sísmico de la Ciudad de México (NTCD-DS 2023), siguiendo el enfoque de la NTCD-DS-2023 para edificios del Grupo A. Para la validación del procedimiento de diseño simplificado, se consideraron los equipos en el contexto de un sismo infrecuente, con un periodo de retorno de 475 años, en línea con el nivel de Seguridad de Vida (SV) establecido por la normativa.

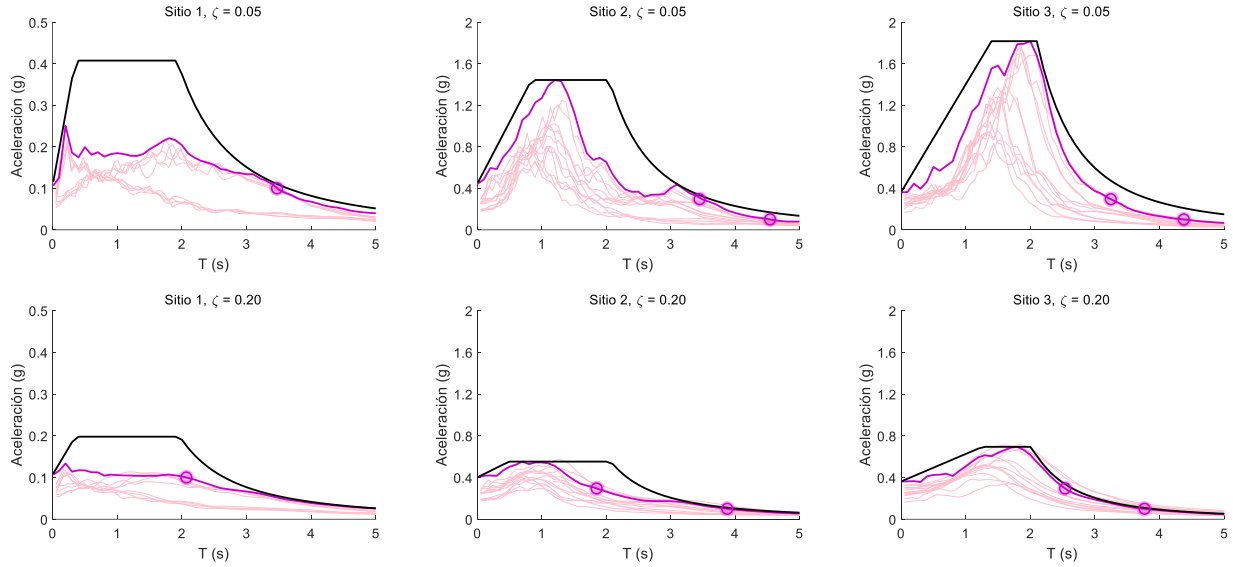


Figura 4. Espectros de diseño (línea negra) y espectros de peligro uniforme (EPU, línea magenta gruesa) para los sitios representativos en la Ciudad de México: sitio 1 (terreno firme, T_s=0.5 s, izquierda), sitio 2 (zona de lago, T_s= 1.3 s, centro) y sitio 3 (zona de lago, T_s=1.8 s, derecha). Los espectros se muestran para factores de amortiguamiento del 5% (arriba) y 20% (abajo). Las líneas rosa delgadas representan los espectros de respuesta de los acelerogramas seleccionados, correspondientes a un periodo de retorno de 475 años, en conformidad con las especificaciones de la NTCD-DS-2023para edificios del Grupo A y el nivel de desempeño de Seguridad de Vida (SV) bajo sismos infrecuentes.

Equipos seleccionados y parámetros de diseño simplificado

Para la evaluación de la estabilidad frente al volcamiento, se seleccionaron dos tipos de equipos con relaciones de esbeltez (b/h) de 0.1 y 0.3. Para el análisis de deslizamiento, se consideró un equipo con un coeficiente de fricción (μ_k) de 0.1, ya que, en este caso específico, solo el valor de μ_k es relevante, sin que el peso o las dimensiones del equipo afecten la estabilidad frente a deslizamiento.

Cada equipo se evaluó bajo dos condiciones: 1) simplemente apoyado (sin sistema de aislamiento) y 2) sobre un sistema de aislamiento con niveles de amortiguamiento del 5% y 20%. Los periodos de aislamiento T_b, necesarios para garantizar la estabilidad del equipo en cada sitio, se determinaron en función de las características del sitio y el nivel de amortiguamiento, siguiendo el procedimiento de diseño simplificado descrito en la sección correspondiente (Figura 3). Las dimensiones y parámetros de los equipos, junto con los valores de T_b, se resumen en la Tabla 1 para los casos de equipos susceptibles a volcamiento y deslizamiento para cada sitio y nivel de amortiguamiento. Estos valores permiten verificar que el diseño simplificado del sistema de aislamiento cumple con los criterios de estabilidad para el volcamiento y deslizamiento.

ISSN-e 2395-8251

Como se ha explicado anteriormente, los valores de T_b en la Tabla 1 se calcularon considerando las intersecciones de los parámetros de estabilidad, la aceleración mínima de balanceo o volcamiento a_b y la aceleración mínima de deslizamiento a_d, con los espectros de peligro uniforme (EPU) de cada sitio. Aunque es posible utilizar también los espectros de diseño, los resultados indican que el EPU es adecuado para obtener un diseño seguro, como se corrobora en las evaluaciones de este estudio.

Para los casos en los que los umbrales de estabilidad, a_b para balanceo o volcamiento y a_d para deslizamiento, superan la aceleración sísmica de diseño a_s, el equipo permanecerá estable sin necesidad de un sistema de aislamiento adicional en esos sitios específicos. La Figura 4 ilustra los espectros de diseño y de peligro uniforme (línea magenta gruesa) para los tres sitios representativos en la Ciudad de México, donde las intersecciones de a_b y a_d con los espectros permiten definir zonas de estabilidad. En los casos donde estas aceleraciones críticas exceden el espectro de respuesta del suelo, no se requiere un sistema de aislamiento. En el caso contrario, se define un valor de T_b acorde con las demandas sísmicas específicas del sitio. Estas intersecciones se destacan con un círculo magenta en la figura.

En la validación de la estabilidad frente a balanceo y volcamiento de equipos rígidos, así como de la estabilidad frente a deslizamiento, se incorpora un caso de diseño subóptimo con un periodo de aislamiento de $0.5{\cdot}T_b$, permitiendo analizar cómo una selección inadecuada del periodo de aislamiento puede afectar la estabilidad del equipo. Este caso destaca la importancia de ajustar el periodo de aislamiento a las condiciones sísmicas y características específicas del sitio para satisfacer los criterios de estabilidad del equipo.

Finalmente, se analizó el impacto del tamaño de los equipos rígidos sobre la estabilidad en función de su frecuencia natural (p). Los valores de p varían entre 2 rad/s (representando equipos grandes, como transformadores eléctricos) y 4 rad/s (representando objetos pequeños, como piezas de arte o bustos). Este análisis revela que, aunque el tamaño del equipo afecta ligeramente la estabilidad frente al volcamiento, el parámetro p tiene un impacto menor en comparación con la relación de esbeltez (b/h). Esto sugiere que la relación b/h es suficiente para evaluar la tendencia al balanceo o volcamiento del bloque.

ISSN-e 2395-8251

Tabla 1. Parámetros geométricos y de diseño simplificado para equipos rígidos simplemente apoyados en la Ciudad de México.

					T_b (s) Sitio 1		T_b (s) Sitio 2		T_b (s) Sitio 3		
ID	m kN-s^2/m	b/h	p rad/s	μ_k	ξ=0.05	ξ=0.2	ξ=0.05	ξ=0.2	ξ=0.05	ξ=0.2	Revisión de estabilidad
1	27.2	0.1	2-4	Alta	3.47	2.07	4.54	4.10	4.37	4.07	Volcamiento
2	27.2	0.3	2-4	Alta	*NA	*NA	3.45	1.85	3.24	2.56	Volcamiento
3	8.7	2	2-4	0.1	3.47	2.07	4.54	4.10	4.37	4.07	Deslizamiento

*NA indica que no se requiere sistema de aislamiento sísmico de protección de acuerdo con el procedimiento de diseño simplificado propuesto
**Los cálculos para los aisladores sísmicos aplicados a equipos rígidos simplemente apoyados consideran una relación de masa $\gamma = 0.1$, desplazamiento elástico $u_y = 0.25\ mm$, rigidez lateral posterior al límite elástico $k_b = 4\pi^2(m_b + m)/T_b^2$ y parámetros de Bouc-Wen $\zeta = \beta = n = 1$ (Jaimes y Candia 2018, 2020)

Validación de la estabilidad frente a balanceo y volcamiento de equipos rígidos

La Figura 5 presenta la respuesta dinámica de equipos rígidos frente a balanceo y volcamiento en tres sitios representativos de la Ciudad de México: sitio 1 (Figura 5a), sitio 2 (Figura 5b) y sitio 3 (Figura 5c), para una configuración de esbeltez de $b/h = 0.1$ y un amortiguamiento del 5%. En cada sitio, se consideran tres configuraciones de aislamiento, organizadas en tres niveles: en la parte superior, el equipo se modela como simplemente apoyado, sin sistema de aislación, cuya respuesta se evalúa mediante las ecuaciones (2) y (3); en la sección media, se evalúa sobre un sistema de aislación viscoelástico, modelado mediante las

ecuaciones (4)-(7), con un periodo óptimo de diseño (T_b); y en la parte inferior, se analiza con un sistema de aislamiento subóptimo, con un periodo reducido ($0.5 \cdot T_b$).

Cada configuración permite observar tres aspectos clave de la respuesta del equipo en función del tiempo: la aceleración del suelo ($\ddot{u}_g$, izquierda), la rotación normalizada del equipo (θ/α, centro) y la velocidad de rotación normalizada ($\dot{\theta}/p$, derecha). La aceleración máxima del suelo (a_s) son 0.058 g, 0.24 g y 0.32 g en los sitios 1, 2 y 3, respectivamente. En el caso del sitio 1 (terreno firme), la figura indica que no se requiere un sistema de aislación (i.e., $a_b > a_s$), ya que incluso al implementarlo no se observa una mejora significativa en el comportamiento frente al volcamiento del equipo. Para los sitios 2 y 3 (zonas de lago donde $a_b < a_s$), la figura muestra cómo un sistema de aislamiento bien diseñado, con un periodo T_b ajustado a las características sísmicas del sitio, mejora la estabilidad del equipo, evitando el balanceo en comparación con la configuración sin aislamiento y con la configuración subóptima ($0.5 \cdot T_b$), en la cual se observa el volcamiento del equipo, identificado por el crecimiento no acotado de la rotación normalizada y por valores de $\theta/\alpha \geq 1$ lo que indica la pérdida de estabilidad rotacional, acompañada por incrementos significativos en la velocidad de rotación normalizada $\dot{\theta}/p$, que reflejan el carácter dinámico e irreversible del volcamiento.

Este análisis subraya la importancia de seleccionar adecuadamente el periodo del sistema de aislamiento para reducir eficazmente la susceptibilidad al volcamiento bajo demandas sísmicas específicas de cada sitio. Además, se observa que un diseño inadecuado del sistema de aislamiento (como en el caso de $0.5 \cdot T_b$) incrementa el riesgo de volcamiento del equipo. Sin un sistema de aislamiento adecuado, el equipo en los sitios de lago podría volcar bajo las solicitaciones sísmicas correspondientes a un periodo de retorno de 475 años.

ISSN-e 2395-8251

La Figura 6 presenta la respuesta dinámica de equipos rígidos en los mismos tres sitios representativos de la Ciudad de México que se muestran en la Figura 5, pero considerando un amortiguamiento del sistema de aislación del 20%. Al igual que en la Figura 5, se evalúan tres configuraciones para cada sitio: (i) equipo rígido simplemente apoyado sin sistema de aislación (arriba); (ii) equipo sobre un sistema de aislación con el periodo de diseño óptimo T_b (centro); y (iii) equipo con un sistema de aislamiento subóptimo con un periodo reducido $0.5 \cdot T_b$ (abajo).

El aumento en el amortiguamiento reduce el periodo del sistema de aislación (T_b, ver Tabla 1), lo cual impacta la respuesta dinámica del equipo. A pesar de esta reducción en T_b, se observan patrones de estabilidad similares a los de la Figura 5: el sistema de aislamiento óptimo mejora la estabilidad del equipo en los sitios de lago (sitios 2 y 3), mientras que en el sitio de terreno firme (sitio 1) el sistema de aislación sigue sin ser necesario.

Estos resultados refuerzan la idoneidad del procedimiento de diseño simplificado propuesto en este estudio para los aisladores sísmicos en equipos rígidos simplemente apoyados. Destacan, además, la importancia de ajustar tanto el periodo como el nivel de amortiguamiento del sistema de aislamiento de acuerdo con las características del equipo y las condiciones sísmicas del sitio. Este ajuste permite maximizar la estabilidad del equipo y cumplir con los criterios de diseño de estabilidad como la prevención del balanceo y volcamiento del equipo bajo cargas sísmicas.

Es relevante mencionar que, aunque este análisis se centra en una configuración de esbeltez de $b/h = 0.1$, se realizaron también evaluaciones para $b/h = 0.3$, las cuales presentan tendencias consistentes con las descritas anteriormente. Estos resultados adicionales se incluyen en el Apéndice A en las Figuras A1 y A2.

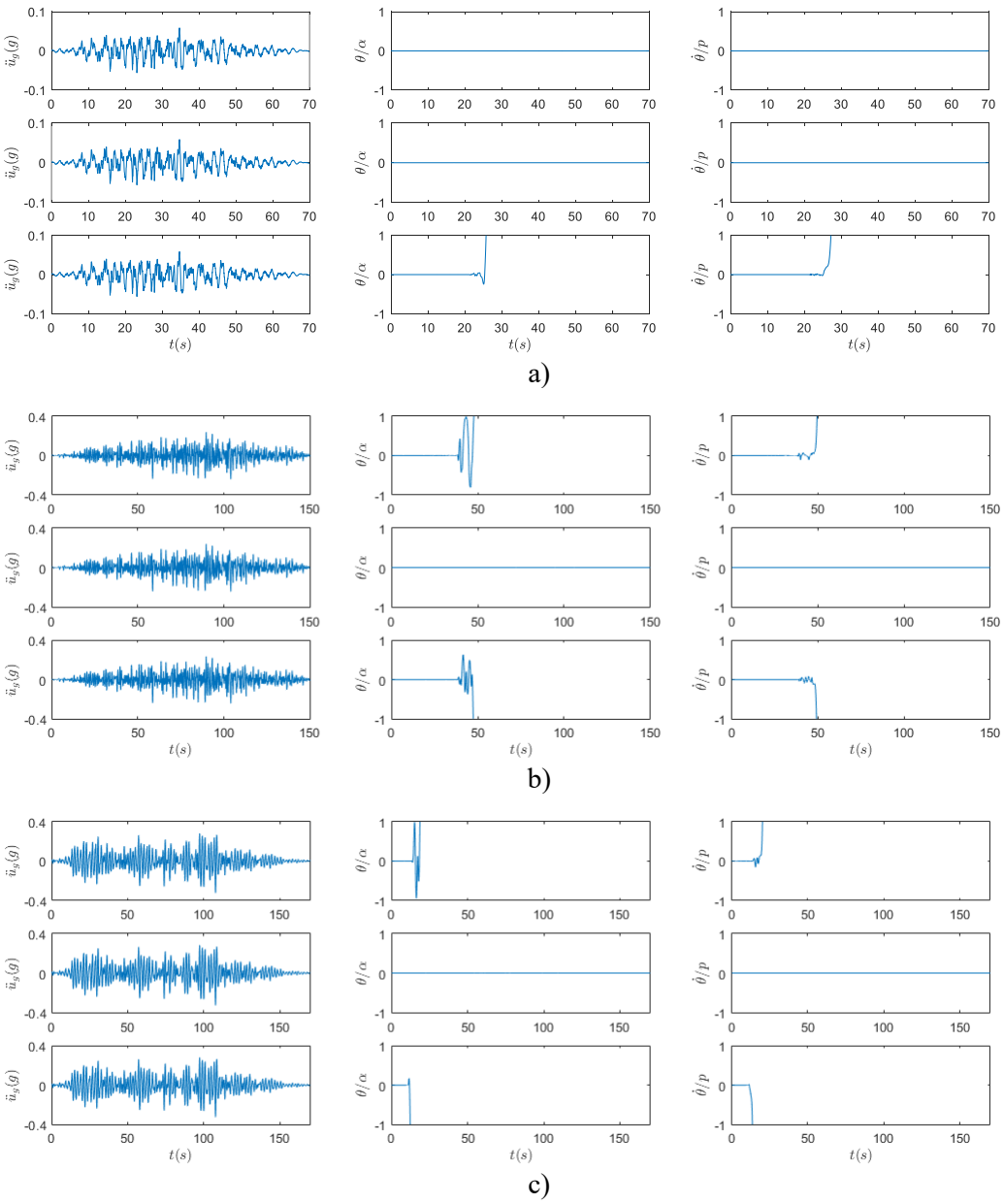


Figura 5. Respuesta dinámica de equipos rígidos en tres sitios representativos de la Ciudad de México: sitio 1 (a), sitio 2 (b) y sitio 3 (c), evaluando la estabilidad frente al balanceo y volcamiento con una relación de esbeltez $b/h = 0.1$ y un amortiguamiento de 5%. Se consideran tres configuraciones: equipo simplemente apoyado sin sistema de aislación (simplemente apoyado, renglón superior), equipo sobre un sistema de aislación viscoelástico con un periodo adecuado (T_b, renglón central), y equipo sobre un sistema de aislación viscoelástico subóptimo ($0.5 \cdot T_b$, renglón inferior).

ISSN-e 2395-8251

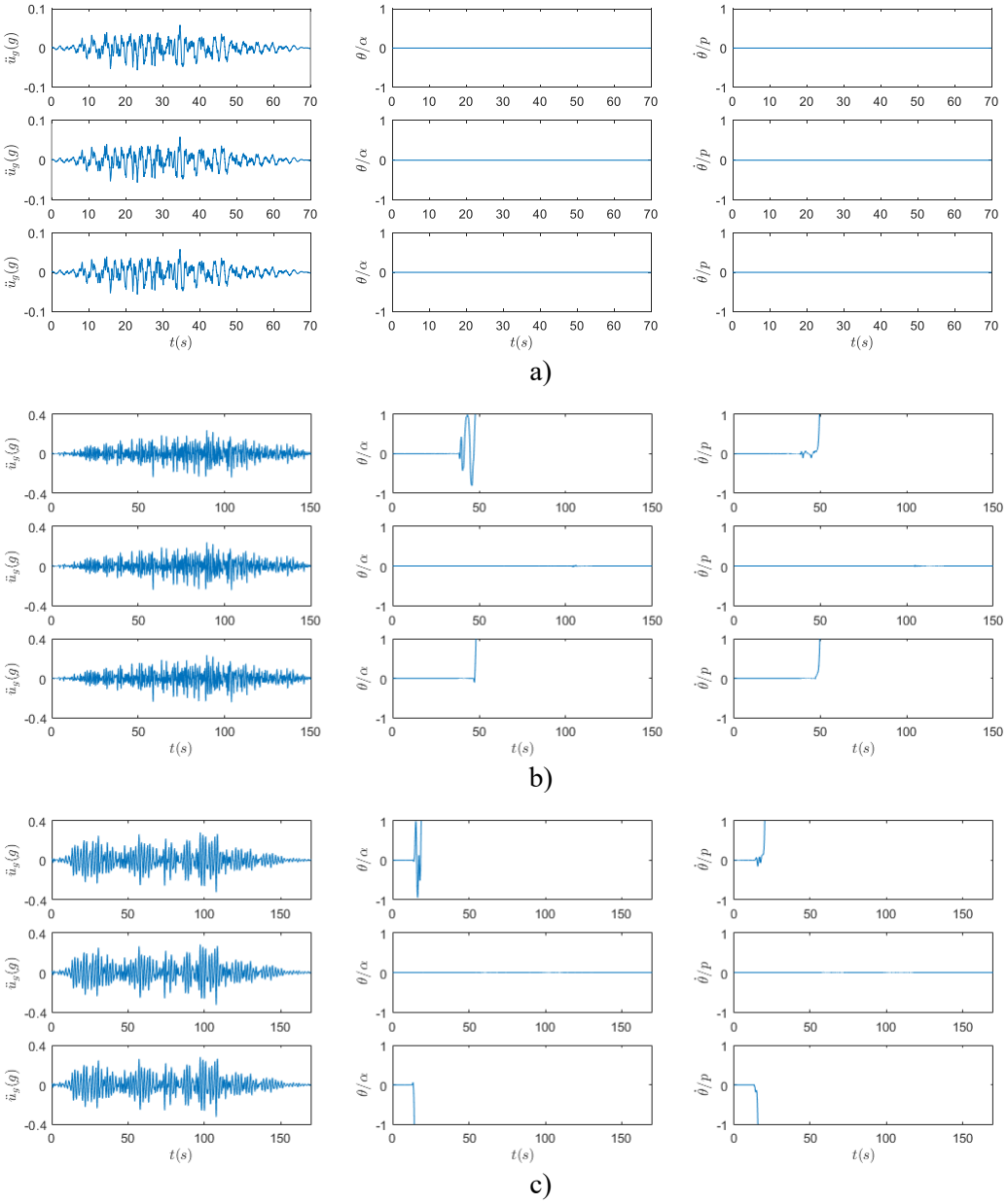


Figura 6. Respuesta dinámica de equipos rígidos en tres sitios representativos de la Ciudad de México: sitio 1 (a), sitio 2 (b) y sitio 3 (c), evaluando la estabilidad frente al balanceo y volcamiento con una relación de esbeltez $b/h = 0.1$ y un amortiguamiento de 20%. Se consideran tres configuraciones: equipo simplemente apoyado sin sistema de aislación (simplemente apoyado, renglón superior), equipo sobre un sistema de aislación viscoelástico con un periodo adecuado (T_b, renglón central), y equipo sobre un sistema de aislación viscoelástico subóptimo ($0.5 \cdot T_b$, renglón inferior).

ISSN-e 2395-8251

Validación de la estabilidad frente a deslizamiento de equipos rígidos

La Figura 7 muestra la respuesta dinámica de equipos rígidos frente a deslizamiento en tres sitios representativos de la Ciudad de México: sitio 1 (Figura 7a, a_s=0.058 g), sitio 2 (Figura 7b, $a_s = 0.24$ g) y sitio 3 (Figura 7c, $a_s = 0.32$ g), donde los valores de a_s corresponden a la aceleración máxima del suelo de los acelerogramas seleccionados como representativos del peligro sísmico en cada sitio, evaluados con un coeficiente de fricción ($\mu_k = 0.1$) y un amortiguamiento del sistema de aislación del 5%. Para cada sitio, se presentan tres configuraciones de apoyo para el equipo: en la parte superior, sin sistema de aislación, cuya respuesta se evalúa mediante la ecuación (8); en la sección media, con un sistema de aislación viscoelástico, modelado mediante las Ecs. (9)–(10), con un periodo óptimo T_b; y en la parte inferior, con un sistema de aislación subóptimo, con periodo reducido $0.5 \cdot T_b$.

En la Figura 7 se presenta la evaluación de tres aspectos de la respuesta del equipo ante cargas sísmicas: la aceleración del suelo ($\ddot{u}_g$, izquierda), el desplazamiento horizontal del equipo, medido en el centro de masa del bloque (u, centro) y la aceleración máxima del equipo ($\ddot{u} + \ddot{u}_g$, derecha). En el sitio 1 (terreno firme), la estabilidad del equipo frente al deslizamiento se mantiene incluso sin sistema de aislación, indicando que la demanda sísmica en este sitio es insuficiente para causar deslizamientos significativos (i.e., $a_d > a_s$). Sin embargo, en los sitios de lago (sitios 2 y 3), el sistema de aislación optimizado (T_b) es importante para limitar el desplazamiento y asegurar la estabilidad del equipo bajo demanda sísmica (i.e., $a_d < a_s$). Además, la figura muestra que, tanto en la configuración de equipo simplemente apoyado (parte superior derecha) como en el equipo con base aislada (sección media e inferior derecha), la aceleración máxima del bloque (i.e., $\ddot{u} + \ddot{u}_g$) es aproximadamente ≈ 0.1 g. Esto sugiere que la movilización de la resistencia al corte en el soporte impide que el bloque desarrolle valores de aceleración superiores.

ISSN-e 2395-8251

Estos resultados destacan la importancia de un diseño adecuado del sistema de aislación, no solo en términos de periodo, sino también del nivel de amortiguamiento, y muestran cómo una configuración inadecuada (como $0.5 \cdot T_b$) incrementa significativamente el riesgo de deslizamiento. En particular, en zonas de lago, un sistema de aislamiento no óptimo o su ausencia podría llevar al equipo a deslizarse bajo solicitaciones sísmicas con un periodo de retorno de 475 años.

La Figura 8 presenta la respuesta dinámica de los mismos equipos rígidos en los tres sitios, pero con un amortiguamiento del sistema de aislación incrementado al 20%. Al igual que en la Figura 7, se examinan las tres configuraciones de apoyo: sin sistema de aislación (simplemente apoyado, parte superior), sistema de aislación con periodo de diseño óptimo (T_b, centro), y equipo con un sistema de aislamiento subóptimo con un periodo reducido ($0.5 \cdot T_b$, abajo).

Tal como se observa en el caso de balanceo y volcamiento en la Figura 6, el aumento del amortiguamiento reduce el periodo del sistema de aislación (T_b), mejorando en este caso la estabilidad frente al deslizamiento en los sitios de lago (sitios 2 y 3) y adaptándose mejor a las condiciones de demanda sísmica local. En el sitio 1 (terreno firme), el sistema de aislamiento sigue siendo innecesario, ya que el equipo se mantiene estable sin deslizamiento, sin requerir amortiguamiento adicional.

Estos resultados refuerzan la idoneidad del procedimiento de diseño simplificado propuesto para los aisladores sísmicos en equipos rígidos simplemente apoyados, y subrayan la importancia de adaptar el sistema de aislamiento no solo al periodo de diseño adecuado, sino también al nivel de amortiguamiento óptimo, considerando las características sísmicas del sitio y el comportamiento del equipo frente al deslizamiento.

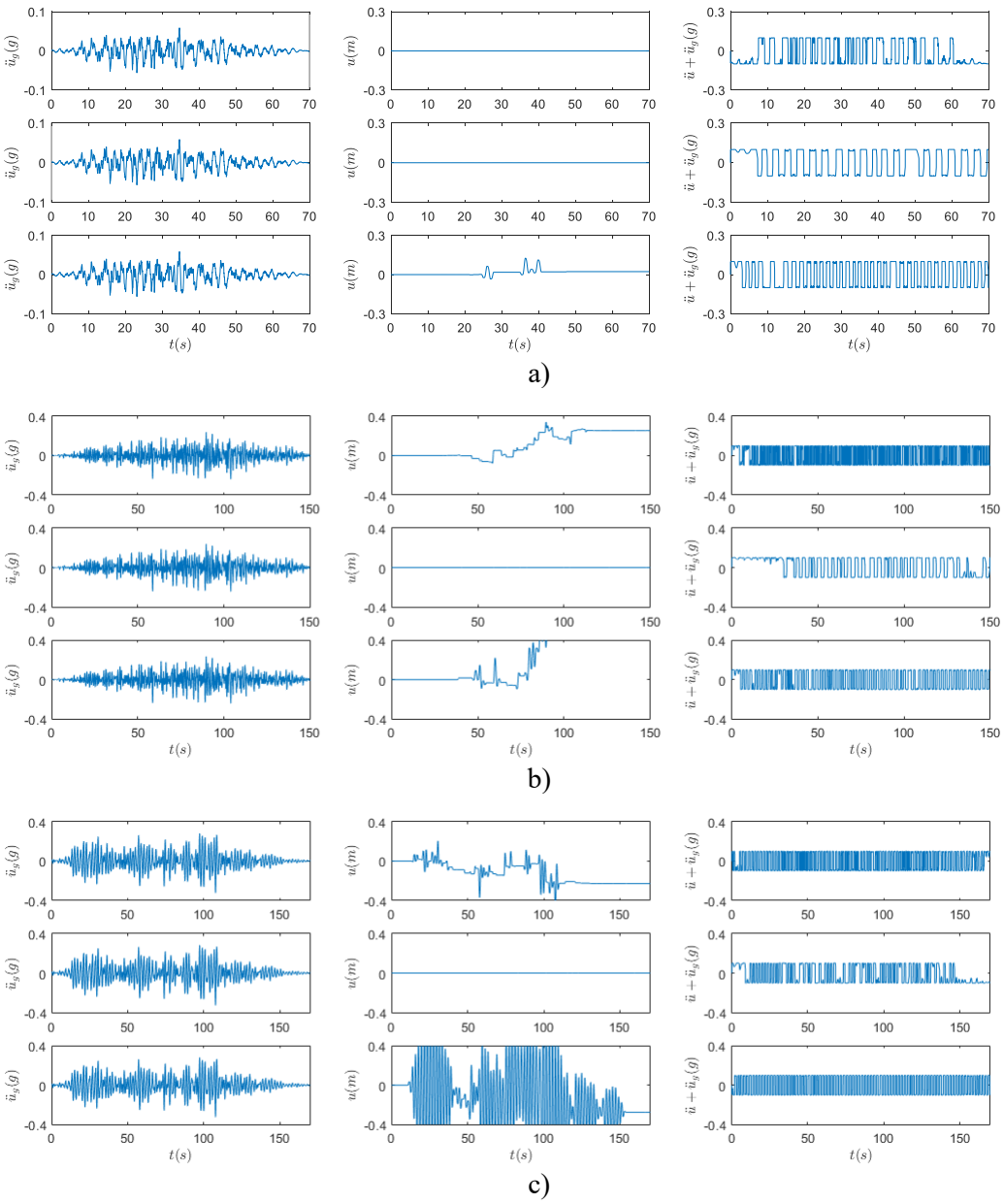


Figura 7. Respuesta dinámica de equipos rígidos en tres sitios representativos de la Ciudad de México: sitio 1 (a), sitio 2 (b) y sitio 3 (c), evaluando la estabilidad frente al deslizamiento con un coeficiente de fricción $\mu_k = 0.1$ y un amortiguamiento de 5%. Se consideran tres configuraciones: equipo simplemente apoyado sin sistema de aislación (simplemente apoyado, renglón superior), equipo sobre un sistema de aislación viscoelástico con un periodo adecuado (T_b, renglón central), y equipo sobre un sistema de aislación viscoelástico subóptimo ($0.5 \cdot T_b$, renglón inferior).

ISSN-e 2395-8251

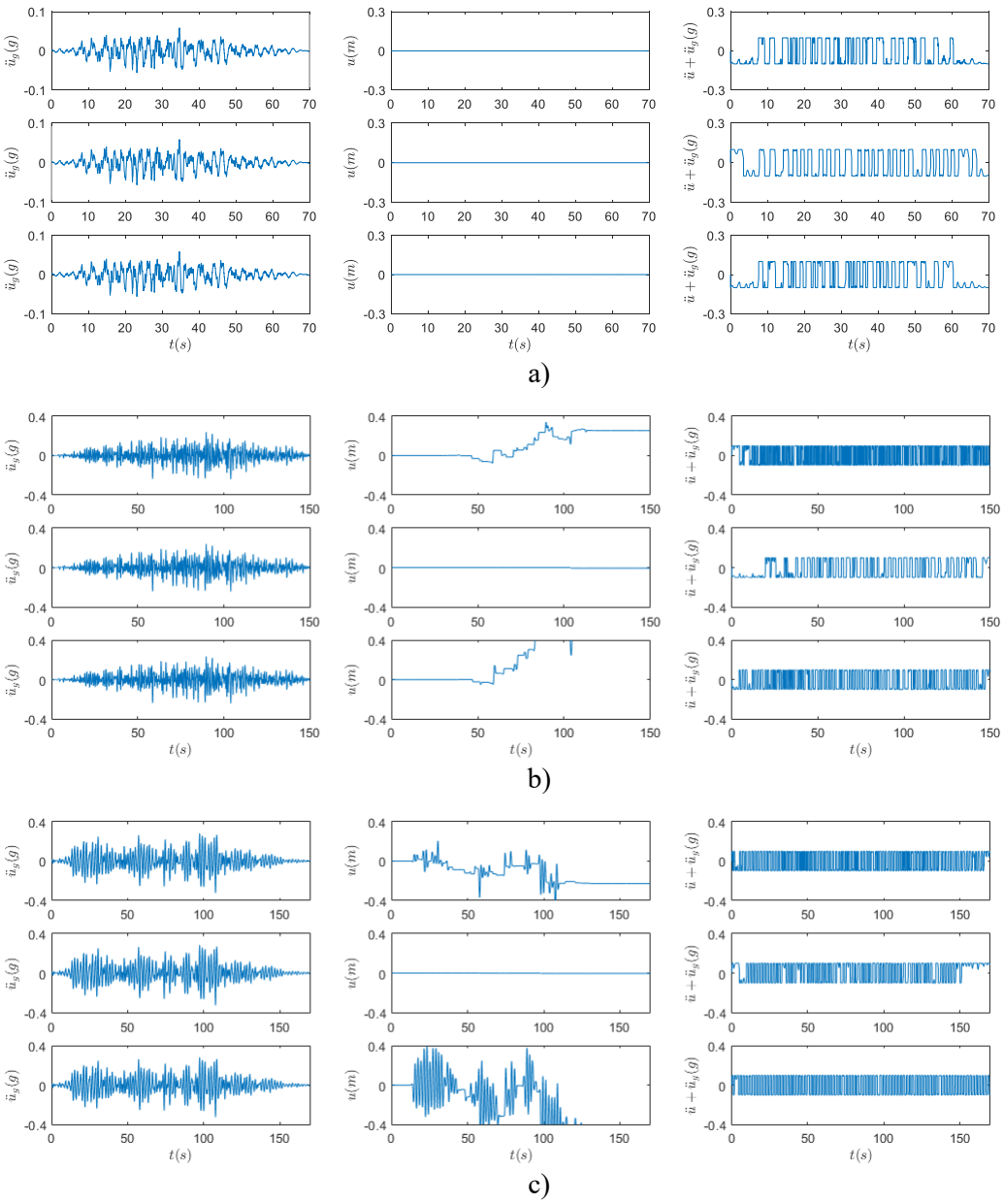


Figura 8. Respuesta dinámica de equipos rígidos en tres sitios representativos de la Ciudad de México: sitio 1 (a), sitio 2 (b) y sitio 3 (c), evaluando la estabilidad frente al deslizamiento con un coeficiente de fricción $\mu_k = 0.1$ y un amortiguamiento de 20%. Se consideran tres configuraciones: equipo simplemente apoyado sin sistema de aislación (simplemente apoyado, renglón superior), equipo sobre un sistema de aislación viscoelástico con un periodo adecuado (T_b, renglón central), y equipo sobre un sistema de aislación viscoelástico subóptimo ($0.5 \cdot T_b$, renglón inferior).

ISSN-e 2395-8251

Evaluación del impacto del tamaño en la estabilidad del equipo

La Figura 9 presenta un análisis detallado de la estabilidad frente al balanceo y volcamiento de equipos rígidos simplemente apoyados, evaluando el efecto del tamaño del bloque mediante el parámetro de frecuencia natural (p) del equipo y el periodo del sistema de aislamiento (T_b) bajo distintos niveles de amortiguamiento. Cada gráfica muestra la mediana de la máxima rotación absoluta normalizada (θ/α), obtenida del conjunto de acelerogramas del peligro sísmico asociado a un periodo de retorno de 475 años (Figura 4), proporcionando una visión promedio de la respuesta del equipo en función de estos parámetros.

Los resultados están organizados para tres sitios representativos de la Ciudad de México: sitio 1 (izquierda), sitio 2 (centro) y sitio 3 (derecha), para una configuración de esbeltez de $b/h = 0.1$. Para cada sitio, se consideran dos niveles de amortiguamiento del sistema de aislamiento: 5% (fila superior) y 20% (fila inferior). Las frecuencias naturales del equipo (p) varían de 2 rad/s (representando equipos grandes, como transformadores eléctricos) a 4 rad/s (representando equipos pequeños, como objetos de arte o bustos), en incrementos de 0.2 rad/s, y el periodo del sistema de aislamiento (T_b) varía de 1 a 5 s.

Este análisis muestra que, aunque el tamaño de los equipos (representado por el parámetro p) introduce algunas ligeras variaciones en la respuesta rotacional, su impacto en la estabilidad frente al volcamiento es menos significativo que el efecto de la relación de esbeltez (b/h). Los valores de T_b calculados según el procedimiento de diseño simplificado propuesto para aisladores sísmicos en equipos rígidos (ver Tabla 1), resultan efectivos en los sitios de lago (sitios 2 y 3) para ambos niveles de amortiguamiento (5% y 20%). En particular, se observa que los valores de T_b calculados, considerando la mediana de θ/α, son aproximadamente entre un 5% y un 11% menores a los valores requeridos para asegurar la estabilidad en el caso de amortiguamiento del 5%, y entre un 7% y un 8% menores para el caso del 20%.

Por ejemplo, para el sitio 1, 2 y 3, con un amortiguamiento del 5%, los valores requeridos de T_b según el procedimiento son 3.5, 4.5 y 4.4 s (Tabla 1), respectivamente, mientras que los valores calculados en función de la respuesta del equipo a la demanda sísmica son aproximadamente 3.3, 4.1 y 3.9 s, respectivamente (Figura 9, fila superior). En el caso de un amortiguamiento del 20%, los valores requeridos de T_b son 2.1, 3.9 y 3.8 s (Tabla 1), mientras que los valores calculados usando las ecuaciones gobernantes y los acelerogramas indican que los valores de T_b serían aproximadamente 3.6 y 3.5 s para los sitios 2 y 3, sin requerirse aislamiento adicional en el sitio 1 (Figura 9, fila inferior). Estos resultados subrayan la importancia de ajustar los parámetros del sistema de aislamiento, considerando tanto el periodo de diseño adecuado como el nivel de amortiguamiento óptimo, para maximizar la estabilidad frente al balanceo y volcamiento de los equipos rígidos.

Es importante señalar que, aunque este análisis se centra en una relación de esbeltez $b/h = 0.1$, también se realizaron evaluaciones para una relación de $b/h = 0.3$ mostrando tendencias similares a las explicadas previamente. Estos resultados se presentan en el Apéndice A en la Figura A3 como referencia adicional, evidenciando la robustez del procedimiento de diseño propuesto en distintas configuraciones de esbeltez.

ISSN-e 2395-8251

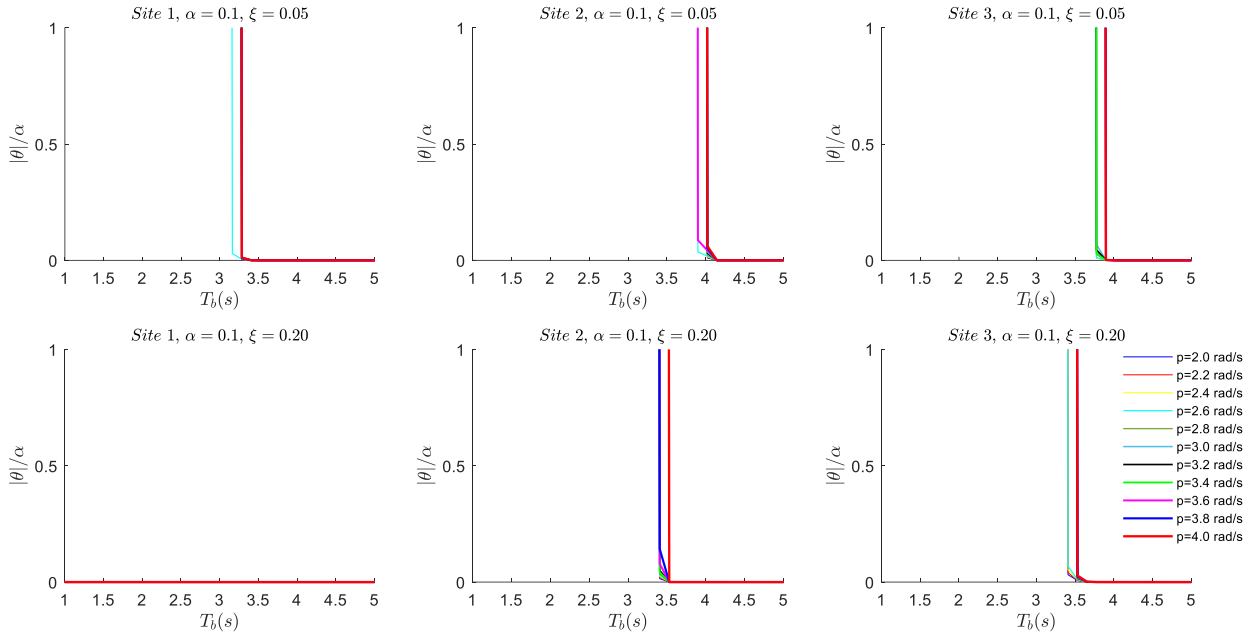


Figura 9. Mediana de la máxima rotación absoluta normalizada (θ/α) para equipos rígidos con una configuración de esbeltez de $b/h = 0.1$ en tres sitios representativos de la Ciudad de México: sitio 1 (izquierda), sitio 2 (centro) y sitio 3 (derecha). Se presentan frecuencias naturales (p) del equipo de 2 a 4 rad/s en incrementos de 0.2 rad/s y periodos de sistema de aislamiento (T_b) de 1 a 5 s, con un amortiguamiento del 5% (fila superior) y del 20% (fila inferior)

ISSN-e 2395-8251

CONCLUSIONES

Este estudio presentó un procedimiento de diseño simplificado de aisladores sísmicos para equipos rígidos simplemente apoyados, adaptado a las condiciones sísmicas particulares de la Ciudad de México. El procedimiento propuesto permite establecer los parámetros adecuados de los sistemas de aislamiento para garantizar la estabilidad de los equipos bajo distintas demandas sísmicas, previniendo el volcamiento, deslizamiento y balanceo.

Para validar la eficacia de este procedimiento, se aplicaron ecuaciones dinámicas gobernantes en casos representativos de terreno firme y zonas de lago. Los resultados confirman que, incluso en condiciones de alta demanda sísmica, la estabilidad de los equipos puede mantenerse cuando se seleccionan adecuadamente los periodos y niveles de amortiguamiento del sistema de aislamiento. En sitios de lago, un sistema de aislamiento óptimo mejoró considerablemente la estabilidad ante el volcamiento y deslizamiento, mientras que en terreno firme no fue necesario añadir aislamiento para conservar la estabilidad.

La metodología presentada constituye un marco confiable para el diseño de sistemas de aislamiento sísmico en instalaciones críticas como hospitales, centros de datos y museos, donde la continuidad operativa es esencial durante y después de eventos sísmicos severos. Aunque el enfoque del estudio se centró en la Ciudad de México, el procedimiento es adaptable a otros contextos sísmicos en el país y puede aplicarse a equipos situados en niveles superiores de estructuras, evaluando así su estabilidad en diferentes pisos.

Finalmente, se recomienda que futuras investigaciones integren parámetros adicionales, como la degradación de los aisladores con el tiempo y la variabilidad en las características de los sismos, para

mejorar la precisión del procedimiento. Además, la validación experimental de los resultados fortalecería aún más la confianza en la aplicación de estos sistemas de aislamiento para la protección de equipos sensibles.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación contó con el apoyo financiero de los proyectos Rehabilitación de elementos no estructurales y contenidos en edificaciones existentes – Primera Etapa ISCDF/CEC-04/2025-13 y DGAPA-PAPIIT-UNAM No. IG100623. Expresamos nuestro sincero agradecimiento a los revisores por su valiosa labor; sus observaciones y sugerencias contribuyeron de manera significativa a mejorar la calidad del manuscrito y a enriquecer su contenido técnico.

REFERENCIAS

Agbabian, M. S., Ginell, W. S., Masri, S. F., y Nigbor, R. L. (1991). Evaluation of-earthquake damage mitigation methods for museum objects. Studies in conservation, 36(2), 111-120. https://doi.org/10.2307/1506335

Aslam, M., Scalise DT, Godden WG (1975). Sliding response of rigid bodies to earthquake motions: A report of an analytical and experimental study of the sliding response of rigid blocks under simultaneous horizontal and vertical earthquake accelerations. ERDA.

Bouc R. (1971). Modèle mathématique d'hystérésis. Acustica, 21, 16-25.

Choi, B., y Tung, C. D. (2002). Estimating sliding displacement of an unanchored body subjected to earthquake excitation. Earthquake Spectra, 18(4), 601-613. https://doi.org/10.1193/1.1516750

Housner, G. W. (1963). The behavior of inverted pendulum structures during earthquakes. Bulletin of the seismological society of America, 53(2), 403-417. https://doi.org/10.1785/BSSA0530020403

Jaimes, M. A., y Candia, G. (2018). Toppling of rigid electric equipment during earthquakes. Engineering Structures, 168, 229-242. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.04.083

Jaimes, M. A., y Candia, G. (2020). Seismic risk of sliding ground-mounted rigid equipment. Engineering Structures, 204, 110066. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.110066

Jones, N. P., y Shenton III, H. W. (1990). Generalized slide-rock response of rigid blocks during earthquakes. In Proc. Fourth US Nat. Conf. on Earthquake Engrg (pp. 20-24).

Konstantinidis, D., y Nikfar, F. (2015). Seismic response of sliding equipment and contents in base-isolated buildings subjected to broadband ground motions. Earthquake engineering & structural dynamics, 44(6), 865-887. https://doi.org/10.1002/eqe.2490

Lin, S. L., MacRae, G. A., Dhakal, R. P., y Yeow, T. Z. (2015). Building contents sliding demands in elastically responding structures. Engineering Structures, 86, 182-191. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.01.004

Lopez-Garcia, D., y Soong, T. T. (2003a). Sliding fragility of block-type non-structural components. Part 1: unrestrained components. Earthquake engineering & structural dynamics, 32(1), 111-129. https://doi.org/10.1002/eqe.217

Lopez-Garcia, D., y Soong, T. T. (2003b). Sliding fragility of block-type non-structural components. Part 2: Restrained components. Earthquake engineering & structural dynamics, 32(1), 131-149. https://doi.org/10.1002/eqe.218

Makris, N., y Roussos, Y. S. (2000). Rocking response of rigid blocks under near-source ground motions. Geotechnique, 50(3), 243-262. https://doi.org/10.1680/geot.2000.50.3.243

Makris, N. (2014a). A half-century of rocking isolation. Earthquakes and Structures, 7 (6), 1187–1221. https://doi.org/10.12989/eas.2014.7.6.1187

Makris, N. (2014b). The role of the rotational inertia on the seismic resistance of free-standing rocking

ISSN-e 2395-8251

columns and articulated frames. Bulletin of the Seismological Society of America, 104(5), 2226-2239. https://doi.org/10.1785/0120130064

Nikfar, F., y Konstantinidis, D. (2013). Sliding response analysis of operational and functional components (OFC) in seismically isolated buildings. In Proceedings 3rd specialty conference on disaster prevention and mitigation, Canadian society of civil engineering (CSCE), Montreal, QC.

NTCD-DS 2023 (2023). Norma Técnica Complementaria para el Diseño por Sismo. Gaceta Oficial de la Ciudad de México. 15 de diciembre 2023. Disponible en línea: https://www.isc.cdmx.gob.mx/directores-res/cursos-de-actualizacion-2022/normas-tecnicas-complementarias-2023 (acceso en 10 noviembre 2024).

Psycharis, I. N., y Jennings, P. C. (1983). Rocking of slender rigid bodies allowed to uplift. Earthquake engineering & structural dynamics, 11(1), 57-76. https://doi.org/10.1002/eqe.4290110106

Roussis, P. C., Pavlou, E. A., y Pisiara, E. C. (2008, October). Base-isolation technology for earthquake protection of art objects. In The 14th World Conference on Earthquake Engineering: Innovation Practice Safety.

Shao, Y., y Tung, C. C. (1999). Seismic response of unanchored bodies. Earthquake Spectra, 15(3), 523-536. https://doi.org/10.1193/1.1586056

Shenton III, H. W., y Jones, N. P. (1991). Base excitation of rigid bodies. I: Formulation. Journal of Engineering Mechanics, 117(10), 2286-2306. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1991)117:10(2286)

Vassiliou, M. F., y Makris, N. (2012). Analysis of the rocking response of rigid blocks standing free on a seismically isolated base. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 41(2), 177-196. https://doi.org/10.1002/eqe.1124

Wen, Y. K. (1976). Method for random vibration of hysteretic systems. Journal of the engineering mechanics division, 102(2), 249-263. https://doi.org/10.1061/JMCEA3.0002106

Whittaker A. (1999). Transformador derribado en Enerjisa patio de transformadores. (Izmit, Turquía) obtenido de < https://nisee.berkeley.edu/elibrary/ > The Earthquake Engineering Online Archive NISEE e Library.

ISSN-e 2395-8251

APENDICE A. Resultados complementarios de respuesta dinámica de equipos rígidos

En este apéndice se presentan resultados complementarios de la respuesta dinámica de equipos rígidos sometidos a registros sísmicos representativos de tres sitios de la Ciudad de México. Las figuras muestran la influencia del amortiguamiento y del periodo del sistema de aislación viscoelástico en la estabilidad frente al balanceo y volcamiento, para una relación de esbeltez constante $b/h = 0.3$.

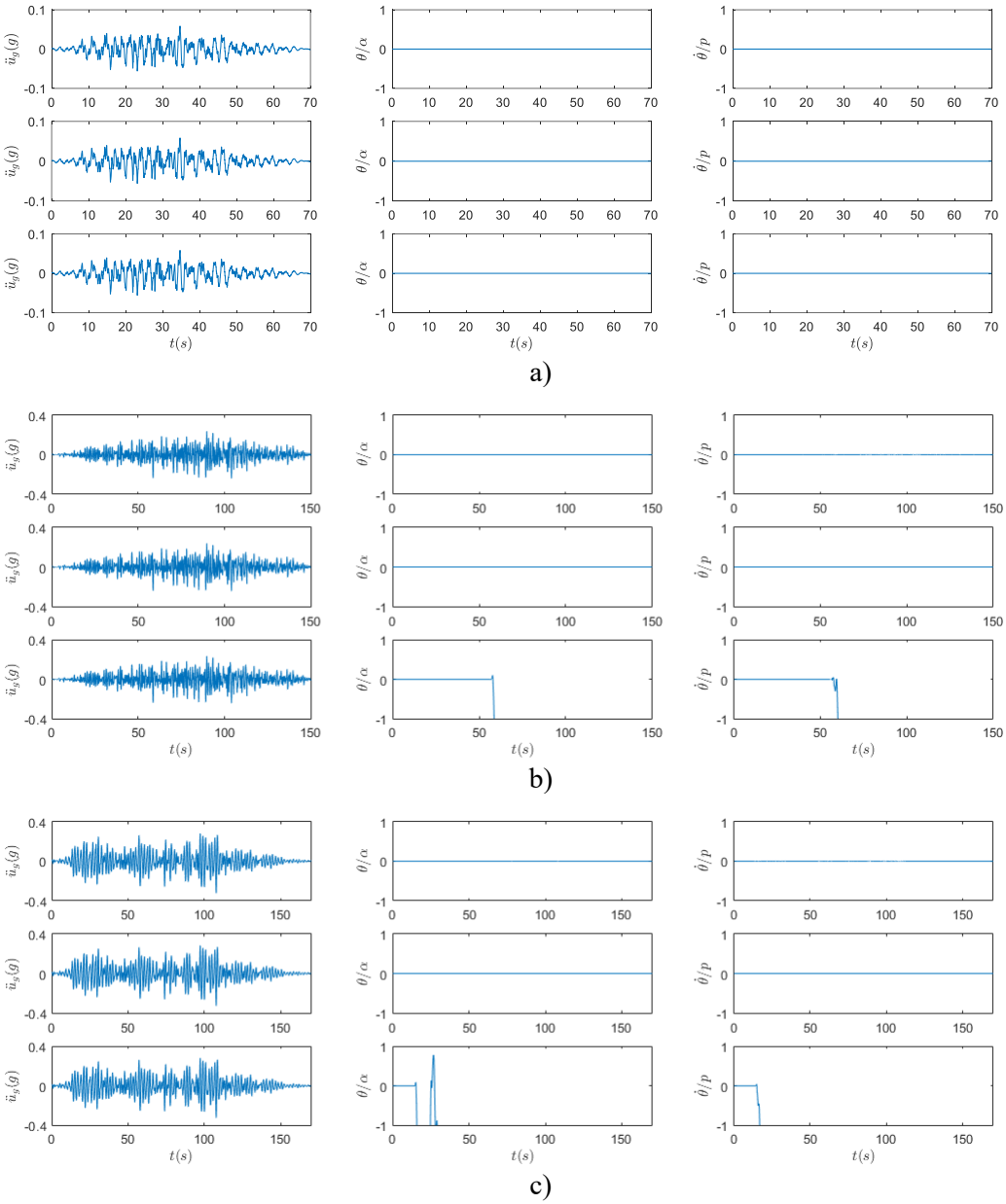


Figura A1. Respuesta dinámica de equipos rígidos en tres sitios representativos de la Ciudad de México: sitio 1 (a), sitio 2 (b) y sitio 3 (c), evaluando la estabilidad frente al balanceo y volcamiento con una relación de esbeltez $b/h = 0.3$ y un amortiguamiento de 5%. Se consideran tres configuraciones: equipo simplemente apoyado sin sistema de aislación (simplemente apoyado, renglón superior), equipo sobre un sistema de aislación viscoelástico con un periodo adecuado (T_b, renglón central), y equipo sobre un sistema de aislación viscoelástico subóptimo ($0.5 \cdot T_b$, renglón inferior).

ISSN-e 2395-8251

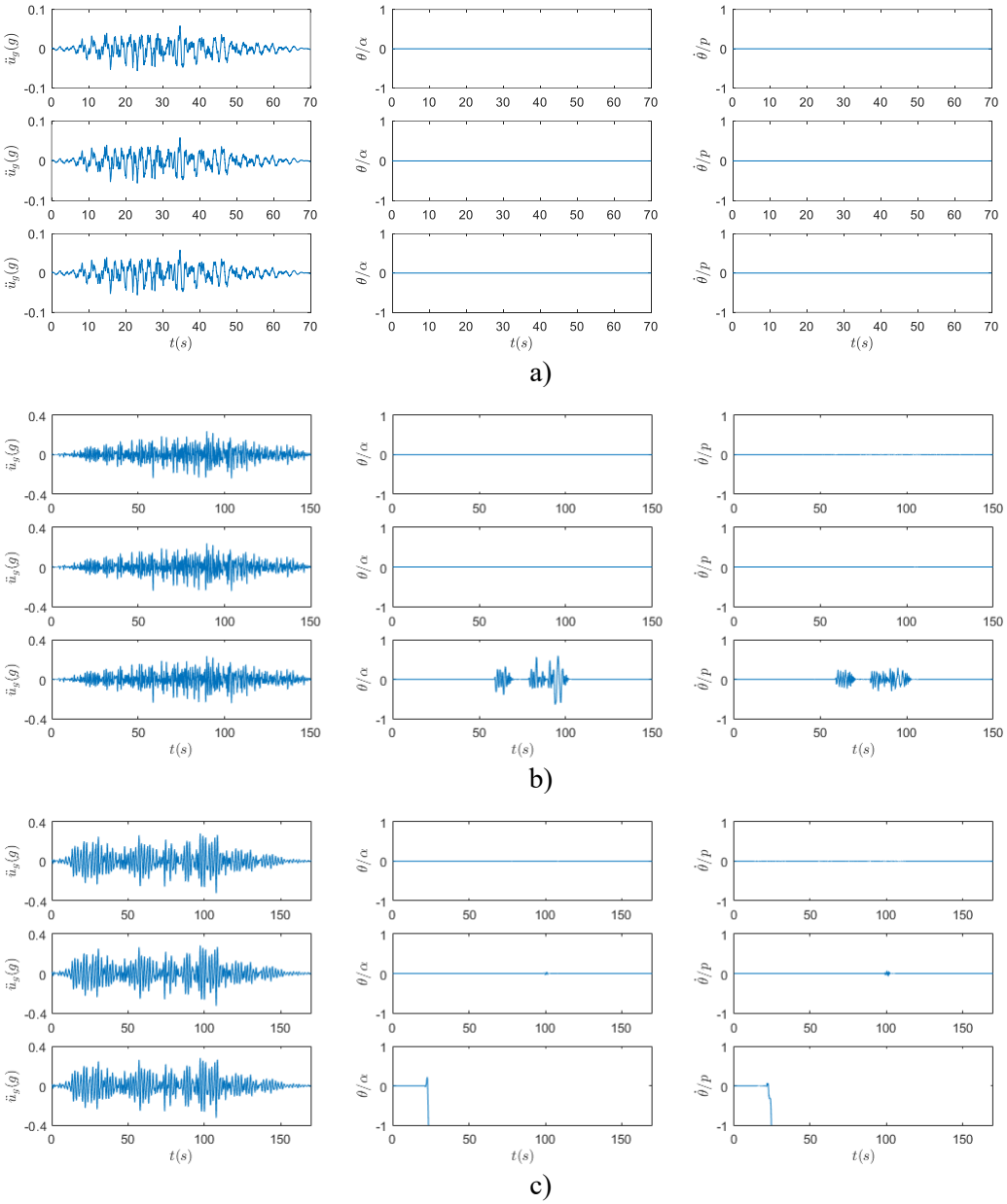


Figura A2. Respuesta dinámica de equipos rígidos en tres sitios representativos de la Ciudad de México: sitio 1 (a), sitio 2 (b) y sitio 3 (c), evaluando la estabilidad frente al balanceo y volcamiento con una relación de esbeltez $b/h = 0.3$ y un amortiguamiento de 20%. Se consideran tres configuraciones: equipo simplemente apoyado sin sistema de aislación (simplemente apoyado, renglón superior), equipo sobre un sistema de aislación viscoelástico con un periodo adecuado (T_b, renglón central), y equipo sobre un sistema de aislación viscoelástico subóptimo ($0.5 \cdot T_b$, renglón inferior).

ISSN-e 2395-8251

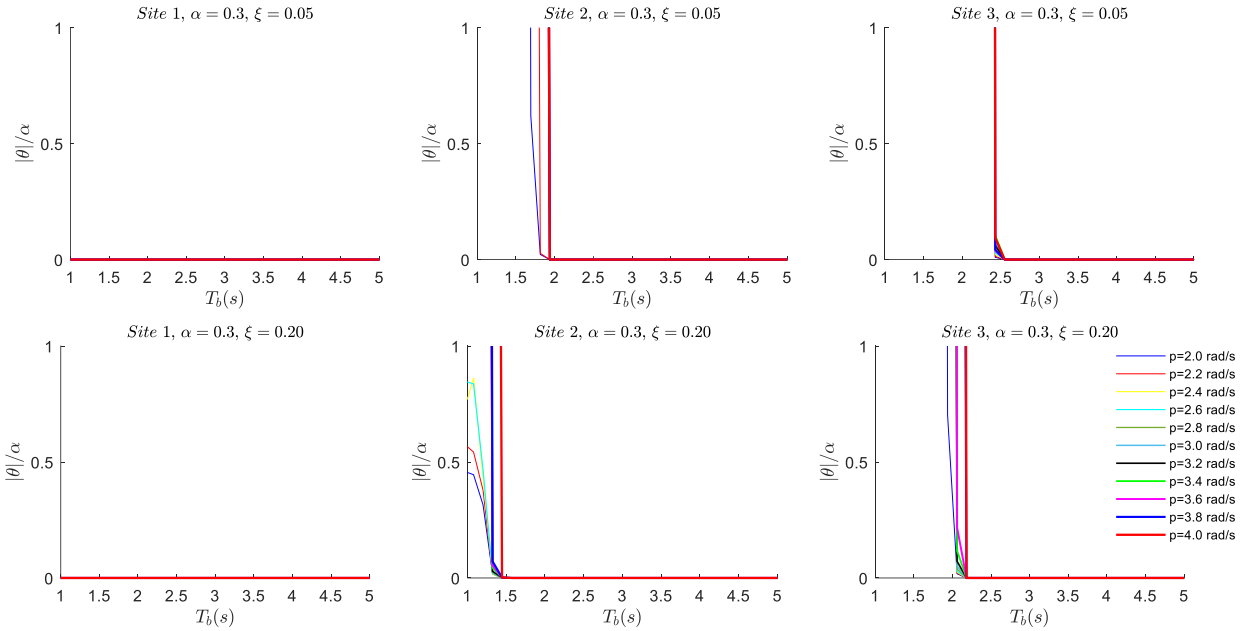


Figura A3. Mediana de la máxima rotación absoluta normalizada (θ/α) para equipos rígidos con una configuración de esbeltez de $b/h = 0.3$ en tres sitios representativos de la Ciudad de México: sitio 1 (izquierda), sitio 2 (centro) y sitio 3 (derecha). Se presentan frecuencias naturales (p) del equipo de 2 a 4 rad/s en incrementos de 0.2 rad/s y periodos de sistema de aislamiento (T_b) de 1 a 5 s, con un amortiguamiento del 5% (fila superior) y del 20% (fila inferior).

ISSN-e 2395-8251