

Evaluación del efecto de la duración del sismo en la respuesta estructural de un sistema SDOF

(Evaluation of the Effect of Earthquake Duration on the Structural Response of an SDOF System)

Hugo Julianny Latorre Aizaga, Jonás Víctor Molina Pastáz, Brandon Ademir Arguello
Molina, Félix Ronaldo Cunduri Cunduri
Universidad Central del Ecuador-UCE, Quito, Ecuador
hjlatorre@uce.edu.ec, jvmolinap@uce.edu.ec, baarguello@uce.edu.ec, frcunduri@uce.edu.ec

Resumen: El presente trabajo analiza el efecto de la duración de un sismo sobre la respuesta dinámica de sistemas estructurales idealizados de un solo grado de libertad (SDOF). La investigación surge de la necesidad de considerar parámetros adicionales a la aceleración máxima (PGA) para evaluar con mayor precisión el comportamiento estructural. Para ello, se empleó un modelo lineal con amortiguamiento viscoso y se utilizaron registros sísmicos reales escalados con igual PGA, pero con duraciones de 5, 10 y 20 segundos. La respuesta dinámica se obtuvo mediante el método numérico de *Newmark*, evaluando el desplazamiento relativo máximo. Los resultados muestran una tendencia creciente del desplazamiento a medida que aumenta la duración del evento sísmico, lo que evidencia una mayor acumulación de energía y deformación. El aporte principal de este estudio radica en destacar la duración significativa del sismo como un parámetro relevante, incluso en etapas de diseño iniciales, proponiendo su inclusión en análisis sísmicos estructurales para mejorar la precisión y seguridad de los diseños.

Palabras clave: Análisis dinámico, desplazamiento máximo, duración sísmica, método de *Newmark*, PGA.

Abstract: This study analyzes the effect of earthquake duration on the dynamic response of idealized single-degree-of-freedom (SDOF) structural systems. The research arises from the need to consider additional parameters beyond peak ground acceleration (PGA) to more accurately evaluate structural behavior. A linear model with viscous damping was used, and real earthquake records scaled to the same PGA but with durations of 5, 10, and 20 seconds were applied. The dynamic response was obtained using the Newmark numerical method, focusing on the maximum relative displacement. The results show a growing trend in displacement as the duration of the seismic event increases, evidencing greater energy accumulation and deformation. The main contribution of this study lies in highlighting the significance of earthquake duration as a relevant parameter, even in early design stages, proposing its inclusion in structural seismic analysis to improve design accuracy and safety.

Keywords: Dynamic analysis, maximum displacement, seismic duration, newmark method, PGA.

1. INTRODUCCIÓN

En el análisis sismorresistente, uno de los parámetros más importantes al caracterizar un sismo es la aceleración máxima del suelo o PGA (*Peak Ground Acceleration*), comúnmente usada para describir la severidad del evento sísmico. Por medio de varios estudios se ha llegado a demostrar que, si la duración del sismo fuerte es alta, podrían influir significativamente en la respuesta dinámica de las estructuras [1]. La influencia podría ser mejor observada en sistemas de un grado de libertad (SDOF), donde la acción de una excitación prolongada puede generar respuestas mayores debido a la acumulación de deformaciones [2].

El tiempo ya ha sido estudiado en trabajos anteriores como menciona Hancock y Bommer [1], que plantearon definirla como un intervalo durante el cual se acumula un cierto porcentaje de energía total del movimiento sísmico. Luego de varios estudios posteriores, se ha demostrado que, aun cuando dos registros sísmicos logren tener la misma aceleración máxima, sus efectos pueden diferir considerablemente si la duración del movimiento varía [3]. En general, se observa que los registros de larga duración pueden generar varios ciclos de carga y que las deformaciones relativas se amplifican.

En Ecuador, donde los registros sísmicos presentan variabilidad considerable al ser producidos por diferentes fuentes, en cuanto a duración, este factor cobra especial importancia para una evaluación más exacta del comportamiento estructural. El presente estudio tiene como objetivo analizar la influencia de la duración del sismo sobre la respuesta dinámica de un sistema SDOF lineal, considerando desplazamiento relativo máximo como parámetro de comparación clave.

2. TRABAJO RELACIONADO

La influencia de la duración de los eventos sísmicos ha cobrado gran relevancia en los últimos años; se han realizado diversos estudios que detallan la alta influencia de la duración del sismo. Desde hace tiempo atrás, el diseño estructural se ha basado en parámetros como la aceleración espectral máxima o el periodo fundamental; sin embargo, esto deja de lado la duración del movimiento fuerte, que puede ser determinante en el comportamiento inelástico de las estructuras.

Varias investigaciones han evidenciado que incluso bajo espectros de diseño equivalentes los registros sísmicos con mayor duración y alta intensidad tienden a producir desplazamientos plásticos superiores y mayor energía histórica disipada. Carrasco [4] documentó que registros más prolongados incrementan significativamente la demanda inelástica, aumentando la ductilidad requerida y el daño acumulado. Algo semejante ocurre con Alva [5] que en su investigación concluye que la duración del pulso sísmico influye directamente en la probabilidad de colapso, aun cuando la intensidad espectral sea controlada.

La duración significativa se define como el intervalo entre el 5 % y el 95 % de la acumulación de la intensidad de Arias, esto representa la fase energética más relevante del sismo [6]. Este término, propuesto por el ingeniero chileno Arturo Arias, ha sido aplicado en estudios recientes para distinguir registros de corta y larga duración, revelando diferencias sustanciales en la respuesta de sistemas tipo SDOF.

El Eurocódigo 8 [7], y normas como FEMA-356 [8], no contemplan explícitamente la duración como criterio de selección de registros, lo cual limita la precisión de los análisis dinámicos no lineales. En ese contexto, autores como López *et al.* [9] y Vásconez *et al.* [10] han señalado la necesidad de enriquecer los modelos de análisis con factores que representen mejor las características reales del sismo.

Métodos como *Newmark- β* estudiados en libros de análisis estructural utilizados para integrar la ecuación de movimiento de un sistema SDOF, permiten simular con precisión la respuesta estructural frente a acelerogramas reales [11]. Esta metodología ha sido esencial para verificar

cómo la duración prolongada del sismo se traduce en más ciclos de histéresis con mayor remanencia de desplazamiento y fatiga acumulada, especialmente en materiales dúctiles o estructuras con articulaciones plásticas.

Estudios recientes como el de Pawirodikromo [12] han demostrado que la duración significativa (D595) tiene una correlación directa con medidas de intensidad sísmica y con la respuesta inelástica de estructuras de concreto reforzado. Se evidencia que una mayor duración del movimiento genera una acumulación de energía más extensa y mayores niveles de daño, aun con la misma PGA.

Asimismo, Alva [5] analizó cómo la duración y el contenido energético del movimiento sísmico afectan estructuras tipo SDOF con comportamiento no lineal. Su trabajo concluye que registros de larga duración generan incrementos notables en la demanda de ductilidad, y que ignorar este parámetro puede subestimar la vulnerabilidad estructural frente a sismos prolongados.

3. METODOLOGÍA

La investigación evaluó la influencia de extender el tiempo de duración del registro sísmico en la respuesta dinámica de un sistema idealizado SDOF mediante simulaciones numéricas. La aceleración máxima del suelo es el factor que se pretende asumir como constante y únicamente la duración del sismo es el componente que se va a modificar. Para ejecutar el análisis se siguió el siguiente orden:

1. Definir el modelo matemático de un sistema de un grado de libertad lineal con amortiguamiento viscoso; es decir, que el mismo pueda oscilar en una sola dirección debido a una fuerza externa (sismo).
2. Al registro base se lo debe escalar y recortar, de manera que la aceleración máxima sea la misma, se deberán recortar tres segmentos de 5, 10 y 20 segundos, seleccionados de la parte central del registro donde están concentradas las aceleraciones con mayor incidencia.
3. Por medio del método de *Newmark* se encuentra la solución numérica del sistema. Los parámetros para aplicar el método son $\beta = 1/4$ y $\gamma = 1/2$ de tal forma que garanticen que el sistema se comporte de forma lineal.
4. Para cada caso se registra la historia de desplazamientos $u(t)$ y se identifica el valor máximo alcanzado.
5. Comparar los desplazamientos encontrados en todos los casos y analizar la tendencia y el impacto de este parámetro en la estructura.

El estudio se desarrolla con base en un modelo elaborado y analizado mediante el lenguaje de programación Matlab, utilizando tanto para operaciones numéricas y visualización de los resultados. El registro base fue obtenido del portal USGS, que corresponde a un evento real con una aceleración máxima de aproximadamente 0,35 g el mismo que fue recortado de manera apropiada y manteniendo su amplitud.

En cuanto al modelo de un grado de libertad se usaron los siguientes parámetros para el análisis:

- Masa: $m = 1 \text{ kg}$
- Frecuencia: $f = 1,0 \text{ Hz}$
- Amortiguamiento crítico: $\xi = 5\%$
- Condiciones iniciales: $u(0) = 0, \dot{u}(0) = 0$

El registro sísmico base utilizado en la investigación corresponde al evento ocurrido en Chile en 1985, registrado por la estación Pacoima Dam. Se eligió este registro por su alto temporal. El tiempo de duración total fue de más de 20 segundos y su pulso estuvo bien definido, lo que permite idealizarlo como un candidato apropiado al analizar la respuesta dinámica. La aceleración máxima

fue de aproximadamente 0,35 g. De acuerdo con Hancock y Bommer [1], los registros con duración significativa y contenido energético concentrado en un intervalo definido permiten una evaluación más precisa de los efectos del componente temporal sobre la demanda estructural.

De igual manera, Bommer *et al.* [1] destacan que la presencia de un pulso claro en el movimiento del terreno facilita la interpretación de la respuesta dinámica, al reducir la influencia de frecuencias dispersas en el análisis. Además, la aceleración máxima del terreno, de aproximadamente 0,35 g, se mantuvo constante en todas las simulaciones, con el fin de aislar el efecto de la duración. Este procedimiento se encuentra respaldado por Chandramohan *et al.* [2], quienes establecen que el uso de registros espectralmente equivalentes o normalizados en términos de PGA permite analizar de forma independiente la influencia de la duración sísmica sobre la respuesta estructural.

En esta investigación, se analiza cómo la duración del registro sísmico afecta la respuesta dinámica máxima de un sistema idealizado de un SDOF. El PGA se mantiene constante, mientras que solo se modifica la duración de la ventana de excitación. El objetivo es estudiar la acumulación de energía y su impacto en el desplazamiento relativo máximo [14].

El sistema se representa como un oscilador lineal de un grado de libertad con un amortiguamiento viscoso clásico. Los parámetros que se utilizan son: masa, frecuencia y un amortiguamiento crítico del 5 %. Las condiciones iniciales se establecen en reposo y la integración temporal se lleva a cabo utilizando el método *Newmark*, lo que garantiza estabilidad incondicional y es ampliamente utilizado en estudios de respuesta dinámica lineal. Se establece un paso temporal o de acuerdo con la frecuencia de muestreo del acelerograma [15].

El registro base se refiere al movimiento capturado en la estación Pacoima Dam, un evento de gran relevancia histórica que presenta un pulso bien definido. El registro original fue filtrado para eliminar el ruido y se convirtió a unidades del Sistema Internacional (m/s^2). Luego, se ajustó el registro para que la PGA de cada subregistro fuera de 0,35 g, asegurando que la comparación entre las diferentes duraciones se realice con el mismo valor pico de aceleración. Se extrajeron tres ventanas centradas en la parte del registro con mayor actividad y energía, con duraciones netas de 5, 10 y 20 segundos. Esta selección (corto, medio y largo) se realizó para abarcar rangos [16], [17].

Para cada segmento de 5, 10 y 20 segundos, se calcularon varios indicadores que nos ayudan a cuantificar la energía impartida y la duración efectiva. Estos incluyen la Intensidad de Arias (Ia), la Velocidad Absoluta Acumulativa (CAV) y la duración significativa, siguiendo definiciones estándar. Al incluir estos índices, podemos demostrar que, incluso manteniendo constante la PGA, la energía acumulada y la duración efectiva varían entre los recortes, y son en gran medida responsables de las diferencias en las demandas de desplazamiento que hemos observado [18]. Estudios recientes indican que Ia y CAV tienen una mejor correlación con los desplazamientos acumulados y los daños que la PGA por sí sola [19].

Para cada recorte, se integra la ecuación de movimiento utilizando el método de γ , lo que nos permite obtener la historia temporal del desplazamiento. Los resultados principales que se registran son: (i) el desplazamiento máximo absoluto; (ii) la energía de deformación acumulada; (iii) el número de ciclos significativos y la evolución de la energía a lo largo del tiempo. Además, se generan espectros de respuesta (pseudo - aceleración y desplazamiento) para comparar cómo la duración influye en la demanda espectral efectiva [20].

Para poder separar los efectos de la duración y la energía total, se llevan a cabo las siguientes pruebas complementarias: (1) Familia PGA-igual: se mantiene la PGA constante (0,35 g) y se comparan los segmentos de 5, 10 y 20 segundos (procedimiento principal). (2) Familia Ia-igual: se escalan los recortes de manera alternativa para igualar la Ia entre las ventanas y así comparar las respuestas. Esta comparación nos ayuda a identificar si las diferencias observadas en relación

a la duración provienen de una mayor energía integrada o de la persistencia temporal del movimiento. Estudios recientes sugieren que este tipo de comparaciones son útiles para reducir sesgos que pueden surgir del simple escalado en la PGA [16], [18].

Además, se llevó a cabo un análisis de sensibilidad variando el periodo estructural (por ejemplo, 0,5, 1 y 2 Hz) y el amortiguamiento (2 %, 5 %, 10 %) para determinar en qué condiciones la duración tiene un mayor impacto. La literatura sugiere que los sistemas con periodos largos y bajo amortiguamiento son más sensibles [21]. Para aumentar la validez de los resultados, se aconsejó repetir el procedimiento utilizando varios registros representativos, como aquellos con y sin componente pulsada.

Es importante reconocer que la selección y el escalado de registros pueden introducir incertidumbre. Por eso, se documentan de manera detallada los procedimientos de corte, filtrado y escalado, siguiendo las mejores prácticas descritas en revisiones recientes [14]. También se menciona la limitación de utilizar un modelo SDOF lineal ya que, en estructuras no lineales, la acumulación por duración puede comportarse de manera diferente, lo que justifica investigaciones futuras que incluyan MDOF y comportamiento inelástico. Finalmente, se explica claramente cómo se calculó cada índice (fórmulas y parámetros) y se incluye la implementación en Matlab para facilitar la reproducibilidad.

4. RESULTADOS

El modelo desarrollado aplicando el método de *Newmark* a un sistema SDOF sometido a registros sísmicos con diferente duración, pero a la vez con el misma PGA, ha permitido analizar de qué manera la duración de un movimiento sísmico puede afectar la respuesta dinámica estructural del sistema. Esto pone en evidencia que las simulaciones realizadas para el aumento del tiempo con el mismo registro sísmico, tiende a acumular un mayor de ciclos de carga y descarga variando el tiempo de duración, lo que se traduce en incrementos graduales en la historia de desplazamientos. Aunque estos incrementos en los desplazamientos no se manifiestan de manera proporcional a la duración, pero sí se logra evidenciar una respuesta más sostenida en el tiempo, con mayores amplitudes en ciclos intermedios.

Registro sísmico escalado

El registro sísmico utilizado para el estudio corresponde al sismo de Chile de 1985, con una duración mayor a 60 segundos (ver Figura 1). Para asegurar que la única variable modificada durante el desarrollo de este estudio sea solo la duración del evento, se escaló el registro para alcanzar una aceleración máxima aproximadamente de 0,35g.

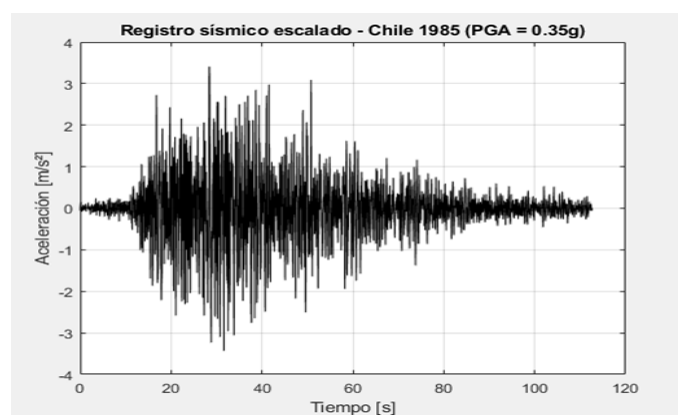


Figura 1. Registro sísmico escalado, sismo de Chile (1985).

Segmentos de análisis

Con la finalidad de capturar el contenido dinámico más representativo del evento se extrajeron tres segmentos de análisis del registro de 5, 10 y 20 segundos de duración alrededor del tramo en el que se produce la mayor energía. Los tramos seleccionados se representan en la Figura 2.

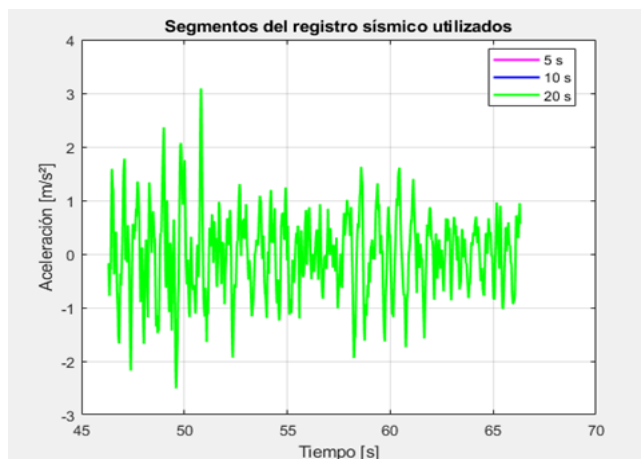


Figura 2. Segmentos del registro sísmico para análisis de 5, 10 y 20 segundos.

Respuesta dinámica del sistema

El sistema SDOF se analizó empleando el método de *Newmark*, bajo condiciones iniciales nulas y para garantizar el comportamiento lineal del sistema, se utilizó los parámetros de $\beta = \frac{1}{4}$ y $\gamma = \frac{1}{2}$, los cuales nos aseguran estabilidad incondicional y precisión para sistemas lineales, sometidos a aceleraciones dinámicas. Los demás valores asumidos en el modelo son los siguientes: masa de 1 kg, frecuencia de 1 Hz, amortiguamiento crítico del 5% los cuales son valores muy representativos para un sistema estructural flexible con disipación moderada.

De acuerdo con Bommer *et al.* [1] y Pawirodikromo [12], mantener constante la intensidad pico del movimiento es fundamental para aislar el efecto del componente temporal, evitando que las diferencias en la respuesta provengan de variaciones en la amplitud o en el contenido espectral del registro. Así, la variable independiente principal en este estudio fue la duración significativa del sismo, mientras que la variable dependiente fue la respuesta dinámica estructural medida en términos de desplazamiento, velocidad y aceleración.

A partir de los tres registros analizados con duraciones de 5, 10 y 20 segundos respectivamente se obtuvieron las historias de desplazamiento, velocidad y aceleración para cada duración establecida.

Duración de 5 segundos

La Figura 3 muestra que las oscilaciones que se presentan en la respuesta del sistema frente a una excitación sísmica de 5 segundos son relativamente moderadas. La velocidad y aceleración muestran picos ajustados con los ciclos de mayor excitación, lo que conlleva a una disipación de energía rápida debido a la corta duración del evento. A su vez, el desplazamiento máximo es cercano a 0,055m. Se refleja un sistema que no alcanza niveles críticos de deformación, evidenciándose una acumulación de energía escasa en eventos sísmicos de corta duración.

Este comportamiento coincide con lo reportado por Hancock y Bommer [1], quienes señalan que, para excitaciones de corta duración, la demanda estructural tiende a concentrarse en un número reducido de ciclos, generando respuestas de alta intensidad momentánea, pero con bajo potencial de daño acumulativo. De manera similar, los estudios experimentales de Carrasco *et al.* [4] y Alva *et al.* [5] demostraron que movimientos de corta duración con la misma intensidad pico

producen menores índices de energía de Arias y, por tanto, una disipación más rápida, asociada a una respuesta estructural menos exigente. Bommer *et al.* [1] y Pawirodikromo [12] destacan precisamente que, en escenarios donde el contenido energético del sismo se libera en intervalos cortos, los efectos inerciales dominan sobre los acumulativos, lo que se traduce en una respuesta transitoria y de baja persistencia.

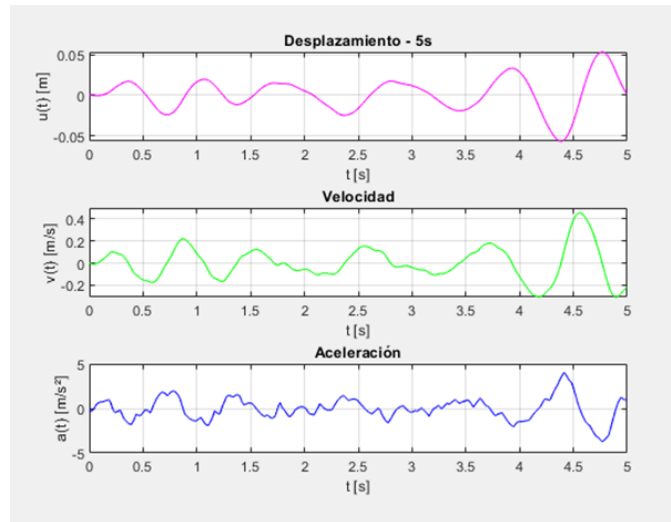


Figura 3. Historia de desplazamiento, velocidad y aceleración para 5 segundos.

Duración de 10 segundos

La Figura 4 revela un incremento en la cantidad de ciclos de vibración, alcanzando un desplazamiento máximo aproximado de 0,068 m representa un incremento cercano al 20 % respecto al caso de 5 segundos, evidenciando que la prolongación del evento produce una mayor acumulación de energía cinética y potencial antes de alcanzar el equilibrio.

La curva de velocidad muestra un comportamiento oscilatorio más constante y simétrico, reflejando que el sistema permanece activo durante un intervalo de excitación más extenso. Por su parte, la aceleración presenta una mayor densidad de picos distribuidos a lo largo de la duración total del sismo, lo cual se traduce en una secuencia de impactos energéticos que prolongan la respuesta estructural y exigen una disipación continua de energía a través del amortiguamiento. Este efecto acumulativo confirma que, aunque la amplitud de la excitación no se incrementa, la persistencia temporal amplifica las demandas internas del sistema.

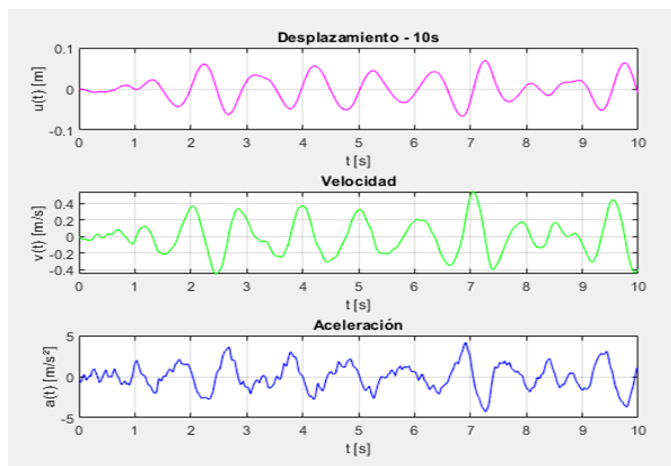


Figura 4. Historia de desplazamiento, velocidad y aceleración para 10 segundos.

El comportamiento observado también se encuentra alineado con lo planteado por Chandramohan *et al.* [2], quienes identificaron que, para sistemas con la misma intensidad espectral pero diferente duración, la respuesta estructural experimenta una reducción de la capacidad de colapso equivalente a un incremento en la energía de entrada. En el presente estudio, aunque el modelo es estrictamente lineal y no presenta degradación, el aumento del desplazamiento máximo y la densidad de aceleraciones sugieren una acumulación progresiva de energía que, en estructuras reales, podría traducirse en mayor daño por fatiga o demanda inelástica acumulativa.

Duración de 20 segundos

La Figura 5 presenta una respuesta más intensa que las anteriores, ya que el registro de desplazamiento muestra oscilaciones extensas y de mayor intensidad con un desplazamiento máximo de 0,0996 m valor que representa un incremento significativo respecto a los casos de 5 segundos y 10 segundos, lo que indica una acumulación considerable de energía. La curva de velocidad evidencia una mayor cantidad de oscilaciones y la aceleración una excitación prolongada durante un número más amplio de periodos. Este comportamiento indica que el sistema debe recurrir de forma más sostenida a su capacidad de amortiguamiento para disipar la energía introducida, evidenciándose que una prolongada duración del sismo puede provocar que el sistema enfrente condiciones dinámicas más rigurosas, incluso bajo la misma aceleración máxima.

En consecuencia, el registro de 20 segundos evidencia un sistema que enfrenta condiciones dinámicas más rigurosas, con una demanda energética sostenida que podría comprometer la seguridad estructural si existieran no linealidades o mecanismos de fatiga. De acuerdo con las observaciones de Bommer *et al.* [1] y Pawirodikromo [12], este tipo de comportamiento es característico de movimientos sísmicos de larga duración, en los cuales la energía liberada durante un número elevado de ciclos provoca una acumulación progresiva de daño o disipación.

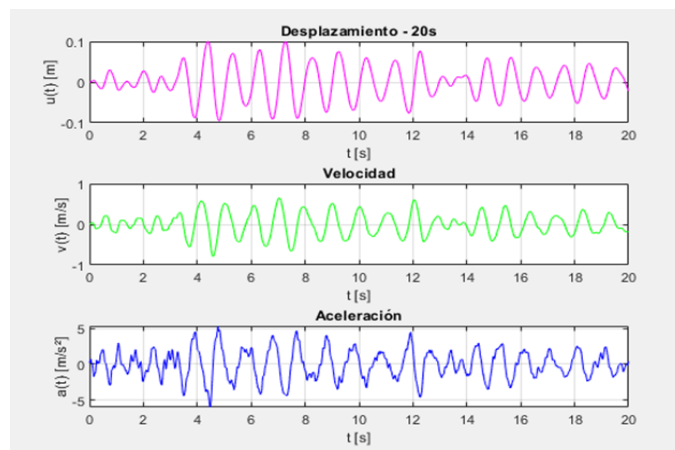


Figura 5. Historia de desplazamiento, velocidad y aceleración para 20 segundos.

Comparación del desplazamiento máximo

Los desplazamientos máximos registrados en cada caso se encuentran compilados en la Tabla 1.

Tabla 1. Desplazamientos máximos.

Duración del sismo (s)	Desplazamiento máximo (m)
5	0,0565
10	0,0683
20	0,0996

Al analizar los resultados obtenidos en la Tabla 1 se observa que el desplazamiento máximo presenta una tendencia creciente con respecto a la duración del sismo, un comportamiento que se puede justificar ya que la cantidad de energía que se transmite al sistema será mayor para un tiempo más prolongado de excitación sísmica, a pesar de poseer una intensidad igual, lo que conlleva a deformaciones más significativas.

Este estudio resalta la importancia de considerar el efecto que produce la duración más prolongada del evento sísmico sobre las estructuras, además de considerarlo como un parámetro fundamental en el análisis sísmico.

5. DISCUSIÓN

Los resultados de esta investigación evidencian que, a pesar de mantener constante el PGA, la duración del registro sísmico influye significativamente en la respuesta dinámica de un sistema SDOF. A medida que aumenta la duración del sismo, se incrementa el desplazamiento relativo máximo del sistema. Esto valida la afirmación planteada al inicio, según la cual una excitación prolongada genera respuestas mayores debido a la acumulación de deformaciones.

Este comportamiento es coherente respecto a las diferentes investigaciones, evidenciándose una notable convergencia entre ellas. El trabajo de Chandramohan *et al.* [2] estableció que la duración afecta sustancialmente la capacidad de colapso estructural mediante análisis con registros espectralmente equivalentes, mientras que Bravo *et al.* [22] documentaron aumentos significativos en la demanda de desplazamiento para sistemas SDOF bajo sismos de larga duración. Esta coherencia entre estudios independientes refuerza la necesidad de considerar la duración como parámetro fundamental en la evaluación sísmica.

La extensión de estos principios a sistemas lineales representa una contribución significativa, ya que investigaciones como las de Carrasco [4] y Alva [5] se habían centrado predominantemente en el comportamiento inelástico, lo cual demuestra que el efecto de la duración es crítico incluso en las primeras etapas de diseño donde predominan los modelos lineales.

En el ámbito metodológico, la elección del esquema de integración temporal merece especial consideración, dado que el método de *Newmark* ($\gamma = 1/2$, $\beta = 1/4$) implementado ha demostrado ser adecuado para capturar los efectos asociados a la duración sísmica en sistemas lineales. Si bien estudios comparativos, como el realizado por Alva [5] mediante el método de diferencias centrales, también reportan variaciones significativas en la demanda con registros de larga duración, investigaciones como la de Dhadse *et al.* [23] contribuyen desde el ámbito del modelado numérico al resaltar la importancia de formular estrategias computacionales consistentes y precisas en análisis estructurales, validando así la robustez de las conclusiones.

Las limitaciones reconocidas, particularmente en este estudio son: Primero que el modelo empleado es un sistema idealizado SDOF con comportamiento lineal, lo que no refleja completamente la complejidad de las estructuras reales, que tienen múltiples grados de libertad y pueden mostrar respuestas no lineales. Segundo, el uso de un único registro sísmico limita la generalización de los resultados, ya que no se considera la variabilidad entre diferentes eventos sísmicos o las características del suelo. Finalmente, el análisis no incluye un estudio paramétrico de otros factores, como la frecuencia natural del sistema o diferentes niveles de amortiguamiento, los cuales podrían tener un efecto combinado con la duración del evento. En este caso resulta prioritario extender este enfoque a modelos no lineales que incorporen criterios de daño acumulado, donde la duración sísmica podría revelar efectos aún más significativos.

6. CONCLUSIONES

La investigación demuestra que la duración del movimiento sísmico afecta de forma notable la respuesta estructural, aun con la misma intensidad (PGA). El estudio realizado en un sistema SDOF lineal, establece una base sólida para extender el análisis a modelos no lineales, a estructuras con varios grados de libertad y a diversas condiciones de amortiguamiento. Incluir estos factores permitirá precisar los efectos acumulativos de sismos prolongados y su vínculo con el daño real.

La duración influye no solo en el valor máximo de desplazamiento, sino también en la evolución temporal del daño. El aumento progresivo del desplazamiento en intervalos de 5, 10 y 20 segundos indica que la fatiga y el sobreesfuerzo pueden acumularse, aunque la PGA inicial se mantenga constante. Este resultado respalda la necesidad de considerar la duración como parámetro de diseño, sobre todo en zonas de alta sismicidad expuestas a eventos largos.

El uso del método de *Newmark* con registros escalados evidencia que los sismos prolongados modifican el instante y la magnitud del desplazamiento máximo. Por ello, el análisis temporal detallado es imprescindible desde las primeras fases de diseño. Se recomienda que la “duración significativa” se incorpore como requisito mínimo en las normativas de análisis dinámico.

Se sugiere complementar futuros estudios con modelos tridimensionales y criterios de daño basados en energía. Estas ampliaciones permitirán correlacionar la duración con los niveles de desempeño exigidos por los estándares de diseño basados en desempeño y afinar las estrategias de mitigación sísmica.

REFERENCIAS

- [1] J. Hancock, y J. J. Bommer, “A state-of-knowledge review of the influence of strong-motion duration on structural damage”, *Earthquake Spectra*, vol. 22, no. 3, pp. 827–845, Aug. 2006. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1193/1.2220576>
- [2] R. Chandramohan, J. W. Baker, y G. G. Deierlein, “Quantifying the influence of ground motion duration on structural collapse capacity using spectrally equivalent records”, *Earthquake Spectra*, vol. 32, no. 2, pp. 927–950, May 2016. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1193/122813eqs298mr2>
- [3] J. J. Kempton, y J. P. Stewart, “Prediction Equations for Significant Duration of Earthquake Ground Motions considering Site and Near-Source Effects”, *Earthquake Spectra*, vol. 22, no. 4, pp. 985–1013, Nov. 2006. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1193/1.2358175>
- [4] F. Carrasco, E. Behrens, y C. Oyarzo, “Efectos de la duración de los terremotos en la respuesta inelástica de las estructuras”, en *XII Jornadas Chilenas de Sismología e Ingeniería Antisísmica*, Santiago, Chile, 2010. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/259800994_Efectos_de_la_duracion_de_los_terremotos_en_la_respuesta_inelastica_de_las_estructuras
- [5] R. E. Alva, L. A. Pinzón, y L. G. Pujades, “Intensidad de Arias y duración significativa en análisis dinámico de estructuras”, *Ingeniería*, vol. 32, no. 2, pp. 1–14, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.15517/ri.v32i2.49580>
- [6] LIS-UCR, “Intensidad de Arias: medida de energía sísmica”, Laboratorio Ing. Sísmica, Universidad de Costa Rica, 2018. [En línea]. Disponible en: https://lis.ucr.ac.cr/mapas/2018-08-15-00%3A16%3A05/arias.php?utm_source.com

- [7] Eurocódigo 8, *Diseño de estructuras para resistencia sísmica*, UNE-EN 1998-1:2004, Asociación Española de Normalización, 2004.
https://structuraldynamics.ulb.be/DOS/Eurocode8.pdf?utm_source=.com
- [8] FEMA-356, *Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings*, Federal Emergency Management Agency, 2000. [En línea]. Disponible en:
https://nehrpsearch.nist.gov/static/files/FEMA/PB2009105376.pdf?utm_source.com
- [9] O. López, y G. Del Ré Ruíz, “Evaluación de los métodos de análisis estático no-lineal para determinar la demanda sísmica en estructuras aporricadas de concreto armado”, IMME, vol. 46, no. 3, pp. 1–18, Caracas, Venezuela, 2008. [En línea]. Disponible en:
https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0376-723X2008000300001
- [10] E. Váscquez, R. Aguiar, y A. Aref, “Análisis de respuesta elástica en el tiempo aplicando el método de Newmark y el método de Wilson,” *Revista CIENCIA*, vol. 18, no. 2, pp. 279–302, 2016. [En línea]. Disponible en:
<https://es.scribd.com/document/521810761/Metodos-Newmark-y-Wilson>
- [11] A. K. Chopra, *Dinámica de Estructuras*, Pearson Educación, México, 2014.
<https://hebrmerma.com/wp-content/uploads/2020/10/Dinamica-de-Estructuras-4Ed-Anil-K.-Chopra-1.pdf>
- [12] W. Pawirodikromo, “The Effects of Earthquake Significant Duration D595 to the Earthquake Intensity Measures and the Inelastic Response of SDOF Reinforced Concrete Structure”, *MATEC Web of Conferences*, vol. 280, art. 01005, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201928001005>
- [13] D. Caicedo, S. Karimzadeh, V. Bernardo, y P. B. Lourenço, “Selection and scaling approaches of earthquake time-series for structural engineering applications: a state-of-the-art review”, *Archives of Computational Methods in Engineering*, vol. 31, pp. 1475–1505, 2024. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s11831-023-10025-y>
- [14] S. Hasanoğlu, A. Güllü, A. Anıl Dindar, Z. Müderrisoğlu, H. Özkaynak, y A. Bozer, “Optimal selection and scaling of ground motion records compatible with input energy and acceleration spectra”, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, vol. 53, no. 7, pp. 2382–2404, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1002/eqe.4114>
- [15] A. S. López-Castañeda, O. Martín del Campo, y E. Reinoso, “Seismic hazard study for the duration of ground-motions triggered by intraslab earthquakes”, *Natural Hazards*, vol. 120, pp. 12221–12263, 2024. [En línea]. Disponible en:
<https://doi.org/10.1007/s11069-024-06682-2>
- [16] S. Céspedes, J. P. Stewart, y R. Montalva, “Strong-motion models for Arias intensity and duration for Chilean earthquakes,” *Journal of Earthquake and Tsunami*, vol. 16, no. 4, 2022. [En línea]. Disponible en:
<https://www.worldscientific.com/doi/10.1142/S1793431122500105>
- [17] J. M. Liu, B. Zhang, y X. D. Zhao, “Empirical relationships between Arias Intensity and peak ground acceleration for western China”, *Frontiers in Earth Science*, vol. 12, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.3389/feart.2024.1434194>
- [18] Li Xuejing, Xu Weijin, y Gao Mengtan, “Characteristics of Arias intensity and Newmark displacement of strong ground motion in Lushan earthquake”, *Acta Seismologica Sinica*, vol. 43, no. 6, pp. 768–786, 2021. [En línea]. Disponible en:
<https://doi.org/10.11939/jass.20200180>

- [19] F. M. Wani, J. Vemuri, y C. Rajaram, “Strong ground motion characteristics observed in the February 6, 2023 MW7.7 Türkiye earthquake”, *Earthquake Science*, vol. 37, no. 3, pp. 241–266, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.eqs.2024.03.005>
- [20] M. Harati, y J. W. van de Lindt, “Impact of long-duration earthquakes on successive structural response and collapse performance”, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, vol. 150, no. 10, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1061/JSENDH.STENG-13018>
- [21] M. A. Bravo-Haro, M. Liapopoulou, y A. Y. Elghazouli, "Seismic collapse capacity assessment of SDOF systems incorporating duration and instability effects", *Bulletin of Earthquake Engineering*, vol. 18, no. 7, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s10518-020-00829-9>
- [22] Dhadse, G. D., Ramtekkar, G. D., & Bhatt, G, " Finite Element Modeling of Soil Structure Interaction System with Interface", *Archives of Computational Methods in Engineering*, vol. 28, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s11831-020-09505-2>

