

PERIODO APARENTE DE SISTEMAS NO LINEALES DURANTE EXCITACIONES SÍSMICAS FUERTES

A. Cea (1), R. Boroschek (2)

(1) Ing. Civil, Universidad de Chile, abraham.cea@gmail.com

(2) Ph.D., Universidad de Chile, rborosch@ing.uchile.cl

Resumen

La estimación del período aparente de un sistema no-lineal ha sido estudiada extensamente a partir de metodologías orientadas al diseño o a partir de técnicas de identificación de sistemas. Siguiendo lo propuesto por Katsanos y Sextos en el 2015 [2], es posible reflejar de manera espectral la elongación esperada del período aparente en función de las variables que definen la respuesta histerética del sistema y la demanda sísmica. En el presente artículo se hace una revisión crítica de este enfoque, utilizando en lugar de identificación en espacio-frecuencia, herramientas de identificación y linealización equivalente que otorgan una efectiva representatividad en términos de ajuste de respuesta de aceleraciones relativas.

Para llevar a cabo este análisis, se toma en consideración una base de datos de 300 registros sísmicos y los modelos histeréticos de un grado de libertad estudiados por Katsanos y Sextos. Se utiliza OpenSEES para la obtención de la respuesta de los sistemas no-lineales tratados y la construcción de espectros de respuesta. Finalmente, se comparan los resultados obtenidos a partir de metodologías de identificación en espacio-frecuencia y linealización equivalente.

Se observan diversos problemas en la identificación en espacio-frecuencia aplicada a sistemas de respuesta no-lineal de grandes amplitudes. Se propone una mejora para la obtención de espectros de elongación del período aparente mediante el uso de métodos de identificación basados en análisis bayesiano para el ajuste de sistemas lineales-equivalentes.

Palabras-Clave: Elongación del periodo, identificación de sistemas, linealización equivalente, análisis bayesiano, respuesta de sistemas no lineales.

Abstract

The estimation of the apparent period of a non-linear system has been studied extensively from methodologies oriented to design or from systems identification techniques. Following the proposal by Katsanos and Sextos (2015) [1], it is possible to analyze spectrally the expected elongation of the apparent period based on the variables that define the hysteretic response of the system and the seismic demand. In this article a critical revision of this approach is made, using instead of identification in space-frequency, tools of identification and equivalent linearization that grant an effective representativeness in terms of response adjustment of relative accelerations.

To carry out this analysis, a database of 300 seismic records and the hysteretic models of a degree of freedom studied by Katsanos and Sextos are taken into consideration. OpenSEES is used to obtain the response of the treated non-linear systems and the construction of response spectra. Finally, we compare the results obtained from identification methodologies in space-frequency and equivalent linearization.

Several problems are observed in space-frequency identification applied to non-linear response systems of large amplitudes. An improvement is proposed to obtain elongation spectra of the apparent period through the use of identification methods based on Bayesian Analysis for the adjustment of linear-equivalent systems.

Keywords: Elongation Period, System Identification, Equivalent Linearization, Bayesian Analysis, Non-Linear System Response

1 Introducción

En el análisis y diseño sísmico convencional, el periodo fundamental de un sistema estructural se ha adoptado como el principal parámetro para la caracterización de su comportamiento dinámico ante excitaciones externas. Esto se ha convenido así debido al uso de metodologías simplificadas de análisis que se basan en el estudio de sistemas lineales y de amortiguamiento de tipo proporcional. Por otro lado, en el plano de sistemas estructurales reales, la respuesta dinámica ante una excitación se torna compleja, en función del comportamiento real de materiales y eventuales plastificaciones de componentes estructurales; por lo cual, el comportamiento global del sistema se aleja de la linealidad, y concepto del periodo fundamental de la respuesta pierde cualquier sentido físico.

A pesar de que las estructuras en general desarrollan propiedades no-lineales, desde finales de años sesenta hasta entonces se han llevado a cabo varios estudios de tipo experimental de monitoreo de propiedades dinámicas en base a técnicas de identificación de espacio-frecuencia que asumen una pseudo-linealización del sistema estructural [1-4, 6-9], permitiendo la estimación de un periodo fundamental aparente (o inelástico) del sistema. El ejemplo más directo es el uso de espectros de respuesta en frecuencia y funciones de transferencia empíricas, aplicadas a la respuesta de estructuras reales ante movimientos sísmicos. Este enfoque, teóricamente aceptado para sistemas lineales, permite que la respuesta dinámica estacionaria de un sistema sometido a una excitación externa sea pensada como el resultado de un proceso que opera sobre la misma variable de entrada [1].

Según se ha documentado de estas investigaciones, en función del comportamiento no-lineal del sistema, se presenta una tendencia general al aumento (o elongación) del periodo aparente identificado, y comúnmente potenciado por el aumento en las amplitudes de la excitación. Los estudios concuerdan finalmente en que las variaciones del periodo aparente se correlacionan cualitativamente con niveles de degradación o daño desarrollados en el sistema durante la excitación dinámica. Sin embargo, de esta correlación, la magnitud del periodo aparente no necesariamente conduce a las propiedades secantes del sistema, ni a las propiedades de un sistema lineal-equivalente representativo en términos de modelación de las respuestas en aceleraciones o desplazamientos. Los resultados de metodologías tradicionales de identificación de espacio-frecuencia, aplicados a sistemas altamente no-lineales, resultan no ser representativos de las incursiones inelásticas desarrolladas, y describen mayormente las propiedades iniciales que las propiedades efectivas del sistema (Martínez, Boroschek y Bilbao 2015) [5].

En la explotación de la elongación del periodo como parámetro de análisis y control, destaca la investigación de Katsanos y Sextos (2015), que con un enfoque estadístico proponen espectros para la predicción de la elongación del periodo, en función de parámetros base que definen la respuesta del sistema y/o características de la demanda sísmica. En términos generales, los autores definen modelos histeréticos degradantes como representativos de la respuesta global de un sistema estructural, se evalúa la respuesta de estos sistemas para una extensa base de datos de registros sísmicos seleccionados, y en base a un método de identificación basado en espacio-frecuencia se estiman las variaciones máximas del periodo fundamental aparente. Finalmente, para estimar la elongación probable del periodo se presentan los espectros promedio para condiciones específicas del sistema no-lineal y demanda sísmica.

En el presente estudio se busca reproducir la construcción de espectros para la predicción de la elongación del periodo aparente, a partir de una metodología de identificación cuyos resultados garanticen una representación cuantitativa de la respuesta no-lineal. Para esto, se hace una revisión de la metodología propuesta por Katsanos y Sextos (2015), se analiza la efectividad de los resultados de la identificación en el espacio de la frecuencia, y se propone y aplica una metodología alternativa de identificación basada en la linealización equivalente de la respuesta de los sistemas no-lineales.

2 Metodología

Para la construcción de espectros de elongación del periodo aparente de sistemas no-lineales se reproduce el esquema general de la metodología propuesta por Katsanos y Sextos (2015), desde la recopilación de eventos sísmicos, definición de sistemas dinámicos y leyes constitutivas, desarrollo del análisis de cada sistema dinámico para cada evento sísmico considerado y la implementación de la identificación sobre la respuesta de los sistemas no-lineales para la estimación del periodo aparente. Este procedimiento se describe en la Figura 1 a través de cuatro pasos.

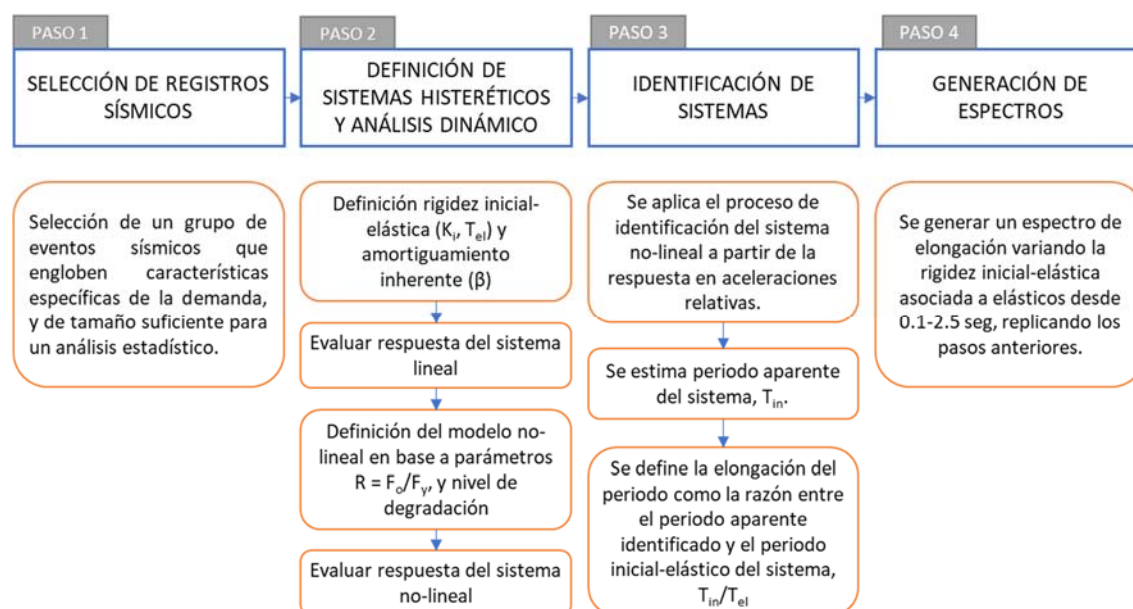


Figura 1. Procedimiento para la obtención de espectros de la elongación del periodo aparente de sistemas histeréticos. Katsanos y Sextos (2015).

- Paso 1 Se define el conjunto de registros sísmicos a considerar para el análisis y la construcción del espectro de elongación del periodo.
- Paso 2 Los sistemas no-lineales son definidos por una fuerza de fluencia equivalente a una fracción de la máxima respuesta elástica alcanzada. Debido a esto, en primer lugar, se analiza la respuesta de un modelo elástico definido por una rigidez inicial y un amortiguamiento inherente. Posteriormente se define el sistema no-lineal a partir de la fuerza de fluencia determinada y el régimen de degradación considerado.
- Paso 3 Se aplica la metodología de identificación, caracterizando la respuesta del sistema con un periodo aparente. La elongación del periodo se define como la razón entre el periodo aparente obtenido y el periodo asociado a las propiedades lineales-elásticas iniciales.
- Paso 4 Para la construcción del espectro de elongación se repiten los pasos anteriores, variando la rigidez inicial-elástica del modelo, cubriendo un rango de periodos fundamentales de 0.1 a 2.5 seg. Se construye un espectro para cada evento sísmico evaluado, y un espectro de elongación para el conjunto seleccionado.

2.1 Definición de Base de Datos de Eventos Sísmicos

Para validar una representación de tipo espectral, la metodología en estudio propuesta requiere de un vasto set de registros sísmicos, cuya selección cubre un amplio rango de parámetros tales como magnitud del sismo, clasificación sísmica suelo superficial, distancia a la fuente, magnitud de aceleración superficial máxima, contenido de frecuencias en la demanda, entre otros. La base de datos utilizada por Katsanos y Sextos es extraída del PEER-NGA y consta de 300 registros sísmicos, de 43 eventos distintos, mientras que para el presente estudio un total de 290 registros sísmicos fueron rescatados de la selección original. Actualizaciones en el sistema de almacenamiento y correcciones en la base de datos del PEER fueron factores que complicaron encontrar el set completo de registros sísmicos, sin embargo, gran parte de la selección fue considerada (96,7%), y se estima que esta falta de información no debería impactar de manera importante en los resultados. En anexo A se presenta una tabla resumen de los eventos sísmicos considerados y sus respectivas características.

2.2 Definición de Sistemas No-Lineales y Análisis Dinámico

Fueron modelados y analizados en OpenSEES dos sistemas histeréticos multi-lineales degradantes que asimilan el comportamiento dinámico global de sistemas estructurales de varios grados de libertad. Los parámetros que describen estos modelos constitutivos fueron ajustados a equivalencia de lo establecido por Katsanos y Sextos, que a su vez responden al comportamiento esperado de edificios de hormigón armado estructurados en marcos especiales de momento, provistos de un detallamiento acorde a actuales códigos de diseño sísmico, y afectados a dos niveles de degradación histerética.

Un primer modelo es definido con un régimen de “degradación leve”, que principalmente desarrolla una degradación en la rigidez tangente del sistema tras cada ciclo de recarga histerética y una leve componente de efecto *pinching*. Un segundo modelo se define con un régimen de “degradación severa”, que agrega una fuerte componente de *pinching* en la respuesta.

La definición de los sistemas histeréticos y el desarrollo de los análisis dinámicos fueron procesados en OpenSEES por su rapidez y amplio contenido de librerías de modelos constitutivos. Para la aceptabilidad de los resultados de análisis dinámicos se adoptó un criterio de convergencia basado en el control del error balance de energía (EBE) de entrada-salida, el cual se mantuvo para todos los casos inferior a un 0.1 % con respecto a la energía de entrada al sistema.

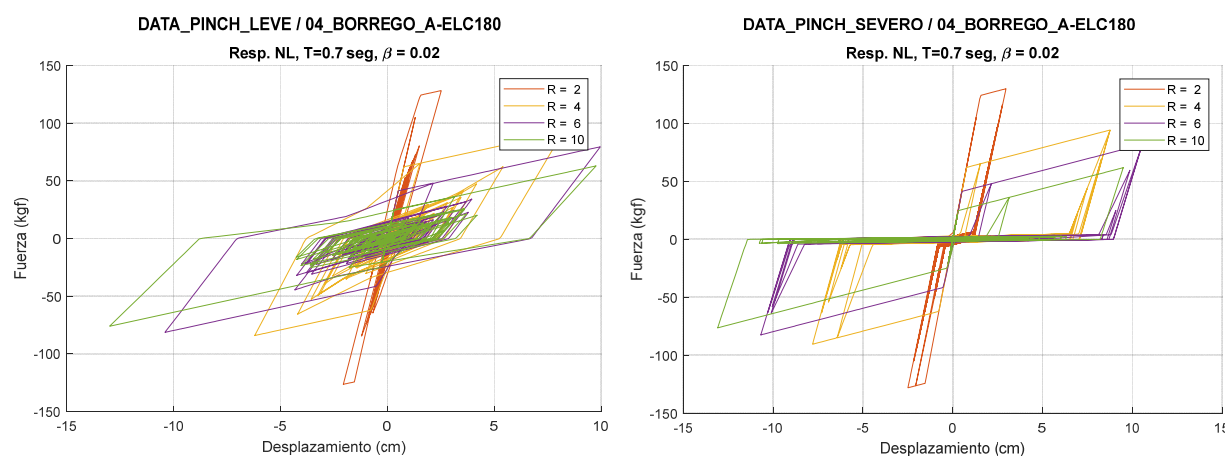


Figura 2. Respuesta de Modelos Histeréticos de Degradación Leve (Izquierda) y Severa (Derecha) para una rigidez inicial asociada a un periodo fundamental de 0.7 seg, razón de amortiguamiento crítico (inherente) de un 2.0 %, y factores de reducción R igual a 2, 4, 6 y 10. Registro sísmico de Borrego Mountain (1968).

2.3 Identificación de Sistemas Lineales-Equivalentes

Sobre la respuesta de estos sistemas se han implementado dos metodologías de identificación de sistemas para la estimación de las propiedades dinámicas lineales-equivalentes.

En primer lugar, siguiendo el enfoque propuesto por Katsanos y Sextos, se ha implementado una técnica de identificación de espacio-frecuencia (Short Time Fourier Transform, STFT) sobre la respuesta de aceleraciones relativas de los sistemas evaluados, estableciendo el periodo aparente del sistema como el máximo identificado a lo largo de la curva de espectrograma.

En segundo lugar, se implementa el método de identificación o linealización equivalente propuesto, basado en el ajuste de modelos lineales a la respuesta en el tiempo de aceleraciones relativas de los sistemas en estudio. Se utiliza un análisis bayesiano para determinar las propiedades de rigidez y amortiguamiento de un sistema lineal que logren minimizar el error entre la respuesta medida y modelada de aceleraciones relativas. Este ajuste se realiza dentro de un único y amplio segmento de respuesta (fase fuerte) definido por el segmento centrado de registro sísmico que reúne el 80% de la Intensidad de Arias acumulada, descontando las porciones iniciales y finales en partes iguales. Finalmente se determina el periodo aparente a partir de una transformación directa de la rigidez lineal-equivalente identificada (asumiendo un sistema oscilador armónico simple).

La metodología de identificación propuesta responde a la necesidad de asociar el parámetro de la elongación del periodo a magnitudes de efectiva representación de la respuesta no-lineal.

2.4 Análisis Bayesiano para la Linealización-Equivalente

Las propiedades secantes de un sistema no-lineal son un concepto comúnmente utilizado en el diseño y análisis estructural para la representación lineal de sistemas que no lo son. En estos casos, las propiedades secantes se encuentran referidas exclusivamente a las demandas máximas de desplazamientos o de ductilidad en el sistema (Rosenblueth y Herrera, 1964). Sin embargo, durante la mayor parte de la respuesta sísmica de un sistema, el nivel de demanda en desplazamiento o aceleraciones se encontrará por debajo de la respuesta máxima. En este sentido, variadas técnicas de identificación apuntan hacia una linealización equivalente, asociada a la búsqueda de un modelo lineal de parámetros tales que ajusten de manera óptima su respuesta a la respuesta del sistema real (Beck J. 1978 [10]). A diferencia del enfoque de las propiedades secantes que ponen énfasis en la respuesta extrema del sistema, la linealización equivalente busca la representatividad de un modelo simplificado para la respuesta completa.

Para el problema particular atinente a la presente investigación, el modelo de ajuste propuesto corresponde a un modelo lineal definido por propiedades de rigidez y amortiguamiento viscoso, del cual se espera una representación en base a un criterio de ajuste de respuesta en aceleraciones relativas. Finalmente, teniendo definido matemáticamente el modelo y el respectivo el criterio ajuste, el problema de identificación se reduce a un problema de optimización y minimización del error.

Para la determinación de las propiedades lineales-equivalentes óptimas del sistema dinámico “a priori” desconocido, se modela probabilísticamente la respuesta del sistema como la suma de una respuesta determinista del sistema lineal-equivalente y un error de tipo Gaussiano de media nula. Contando con un conjunto de mediciones de entrada y salida de un sistema dado, evaluando cada una de las mediciones se puede construir una función de densidad de probabilidad (PDF) esperada para la variable de salida. En medida que los parámetros del sistema asumidos se aproximen a los reales, la diferencia entre medición y predicción será mínima, y la función de densidad de probabilidad será máxima para todas las mediciones. Para encontrar las propiedades de rigidez y amortiguamiento equivalente óptimas se debe maximizar su PDF construido en base a las mediciones entrada-salida. Para esto, asumiendo un set de mediciones entrada-salida no correlacionadas, se utiliza el teorema de Bayes para la estimación de las PDF de las propiedades óptimas para el modelo de ajuste.

2.5 Generación de Espectros de Elongación del Periodo Aparente

La elongación del periodo de un sistema no-lineal se define como la razón entre el periodo aparente obtenido del proceso de identificación y el periodo asociado a las propiedades lineales-elásticas iniciales. Su magnitud se percibe mayor a uno, y varía en función de las propiedades del sistema histerético y su respuesta a la excitación dinámica. Luego, un espectro de elongación del periodo aparente se construye analíticamente para una excitación sísmica y un modelo histerético cuyas propiedades iniciales de rigidez varían en un rango de interés, en este caso, asociados un rango de periodos fundamentales (lineales-elásticos) que van desde 0.1 a 2.5 seg.

Para la reproducción de la metodología descrita, algunos de los parámetros son simplificados o corregidos en función de los resultados obtenidos por Katsanos y Sextos (2015). Se mantiene el rango de periodos elásticos considerados, se adoptan factores de modificación de respuesta, R , igual a 2, 4, 6 y 10; y se define una razón de rigidez de post-fluencia única de un 5%. A continuación, se presenta una tabla comparativa de los parámetros base considerados por el estudio original de Katsanos y Sextos (2015) y la presente investigación.

Tabla 2. Comparación de parámetros considerados para la elaboración de espectros de elongación del periodo.

TABLA COMPARATIVA DE PARAMETROS CONSIDERADOS		
	Katsanos y Sextos 2015	Cea y Boroschek 2018
Registros Sísmicos	300 unid.	290 unid.
Rango de Periodos Elásticos	0.1:0.1:2.5 seg	0.1:0.1:2.5 seg
Factor de Reducción de la Respuesta Elástica	2, 3, 4, 5, 6	2, 4, 6, 10
Cociente de Rigidez Post-Fluencia	0, 1, 3, 10 %	5 %
Nivel de Degradación	Leve, Severa	Leve, Severa
Razón de Amortiguamiento Crítico	1 %	2 %

3 Análisis de Resultados

Obtenida la respuesta dinámica de cerca de 110000 sistemas dinámicos distintos, esta fue organizada para su respectivo análisis, validación por control del error de balance de energía, cálculo analítico de propiedades secantes, identificación de propiedades dinámicas aparentes, linealización-equivalente y construcción de espectros de elongación del periodo. El manejo de datos masivos, sistematización de procesos y organización de la información se realizó mediante rutinas en lenguaje de programación "TCL" (lenguaje para OpenSEES) y MATLAB. Resultados y análisis son presentados a continuación.

3.1 Identificación de Sistemas en Espacio-Frecuencia

Las curvas de seguimiento de la frecuencia aparente, resultantes del método identificación, se presentan generalmente de manera errática y con una tendencia común a la reducción en su magnitud con el avance de la respuesta en el tiempo. Se considera una suavización de la curva de espectrograma basada en una media móvil para evadir problemas numéricos asociados en la selección de la menor frecuencia identificada (mayor periodo aparente) y posterior determinación de la elongación del periodo. Se presentan en Figura 3 los resultados característicos de identificación en espacio frecuencia, para el modelo histerético de degradación leve y severa con un periodo fundamental inicial-elástica de 1.0 seg.

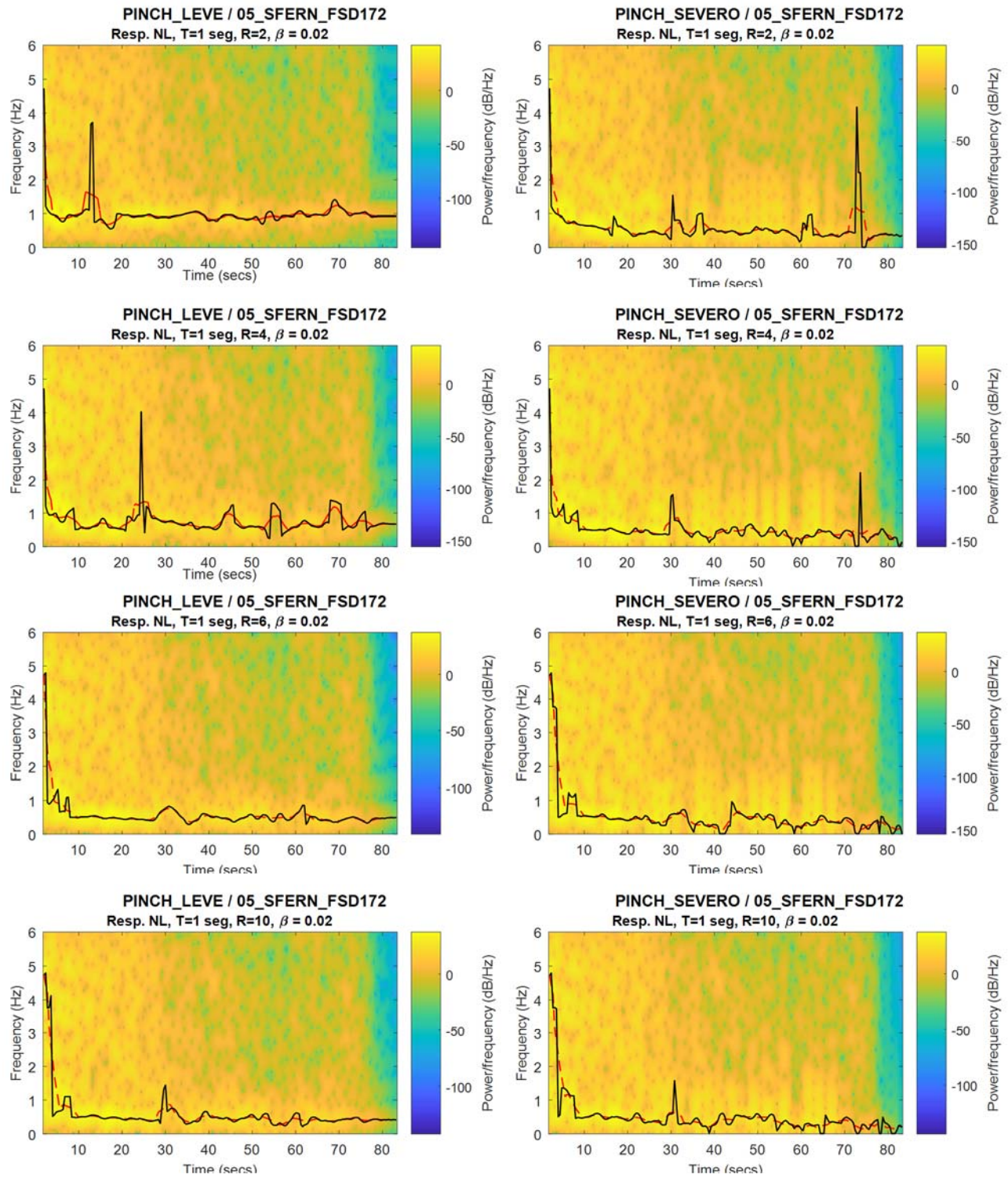


Figura 3. Identificación Espacio-Frecuencia, $STFT(a_r(t))$, de sistema con degradación leve (izquierda) y severa (derecha)
 $T_{el} = 1.0$ seg, $\beta = 2.0\%$, $R = 2, 4, 6$ y 10 , GM: San Fernando 1971.02.09.

Línea negra continua: Curva Frec. Predominante, Línea Roja Segmentada: Curva F.P. Suavizada

A pesar de la inestabilidad en las curvas de identificación, se ha observado una leve tendencia a la reducción de magnitud de las frecuencias aparentes del sistema, y en proporción a nivel incursión inelástica ("R") y nivel de degradación del sistema. Se observa que, para modelos degradantes, la frecuencia aparente identificada efectivamente puede dar indicios de la degradación que afecta al sistema, sin embargo, las magnitudes estimadas de elongación son fuertemente dependientes del nivel de suavización de la curva de seguimiento, y no necesariamente se mantiene una correlación cuantitativa con la respuesta no-lineal o nivel ductilidad alcanzada.

En numerosos casos de identificación, de sistemas lineales y no-lineales, se observa una fuerte influencia de la respuesta forzada en los resultados de la identificación. A pesar de utilizar la respuesta de aceleraciones relativas del sistema, durante la fase fuerte de respuesta el contenido de frecuencias de la excitación sísmica prima sobre el espectro de frecuencias propio del sistema. Esto pone un problema a la estimación de la frecuencia aparente (menor magnitud identificada en el espectrograma), y a su vez en el cálculo de la elongación del periodo, obteniendo resultados no representativos.

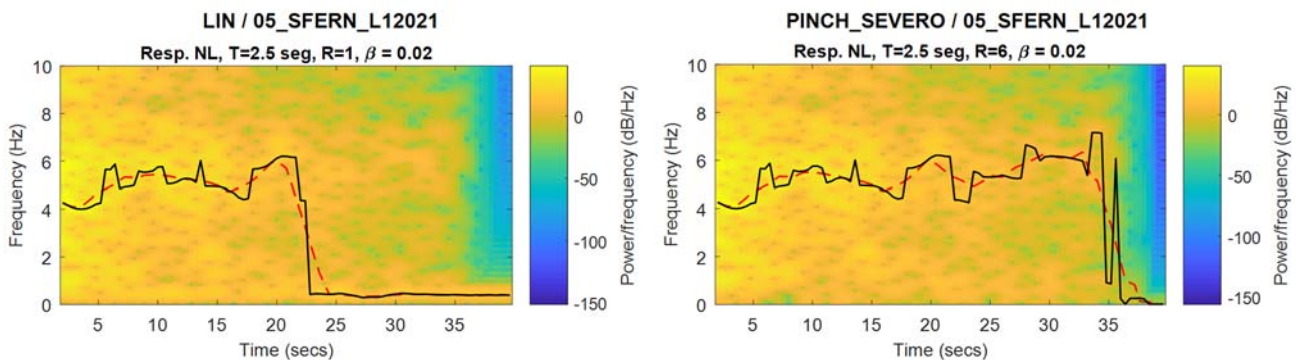


Figura 4. Identificación Espacio-Frecuencia, STFT($a_r(t)$), de sistema lineal (izquierda) y no-lineal deg. sev. (derecha)
 $T_{el} = 2.5$ seg, $\beta = 2.0\%$, $R = 1$ (Izquierda), $R = 6$ (Derecha), GM: San Fernando 1971.02.09.

Linea negra continua: Curva Frec. Predominante, Linea roja segmentada: Curva Frec. Predominante Suavizada

Varios autores han documentado el uso de funciones de transferencia empírica (razón espectral respuesta/excitación, ETF) para la identificación de frecuencias dominantes del sistema (Udwadia y Trifunac [1] 1974, McVerry 1980 [9]), filtrando indirectamente el contenido de frecuencia presente en la excitación sísmica. Se observó en este estudio que a partir de esta metodología se elimina la sensibilidad del espectrograma (STFT) a la respuesta forzada, capturando de mejor manera el contenido de frecuencia de la respuesta del sistema. Sin embargo, en los casos analizados aumenta levemente la inestabilidad en la curva de seguimiento de frecuencia aparente a lo largo de la respuesta. Esta metodología no fue mayormente profundizada en este estudio.

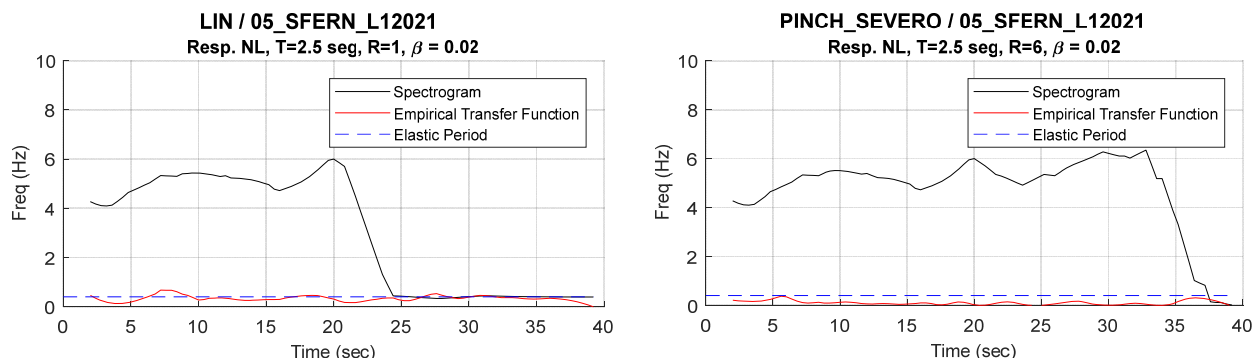


Figura 5. Comparación de Identificación de Frecuencia Predominante. STFT($a_r(t)$) vs ETF(t)
 $T_{el} = 2.5$ seg, $\beta = 2.0\%$, $R = 1$ (Izquierda), $R = 6$ (Derecha), GM: San Fernando 1971.02.09.
 Linea negra continua: STFT($a_r(t)$), Linea roja continua: ETF(t)

3.2 Análisis Bayesiano para la Identificación de Sistemas

El método de identificación propuesto demuestra ser efectivo y robusto, mostrándose estable para todos los modelos constitutivos tratados. Este presenta igualmente flexibilidad en su aplicación, posibilitando además una identificación secuencial por ventanas móviles de tiempo, permitiendo visualizar las variaciones de las propiedades lineales-equivalentes a lo largo de la respuesta completa del sistema. Este último enfoque otorga una representación únicamente cualitativa de los niveles de degradación y/o incursión inelástica alcanzada durante la excitación sísmica, pero desarrollando una sensibilidad mayor a la percibida aplicando un ajuste acotado a la fase fuerte de respuesta.

○ Ajuste de Respuesta en Fase Fuerte (Sistema Lineal-Equivalente)

Se define este enfoque de ajuste como la identificación de un sistema lineal-equivalente representativo de la respuesta completa de aceleraciones relativas del sistema no-lineal, y sus resultados son utilizados para la posterior construcción de espectros de elongación del periodo. Algunos resultados de este enfoque de identificación se presentan en la Figura 6.

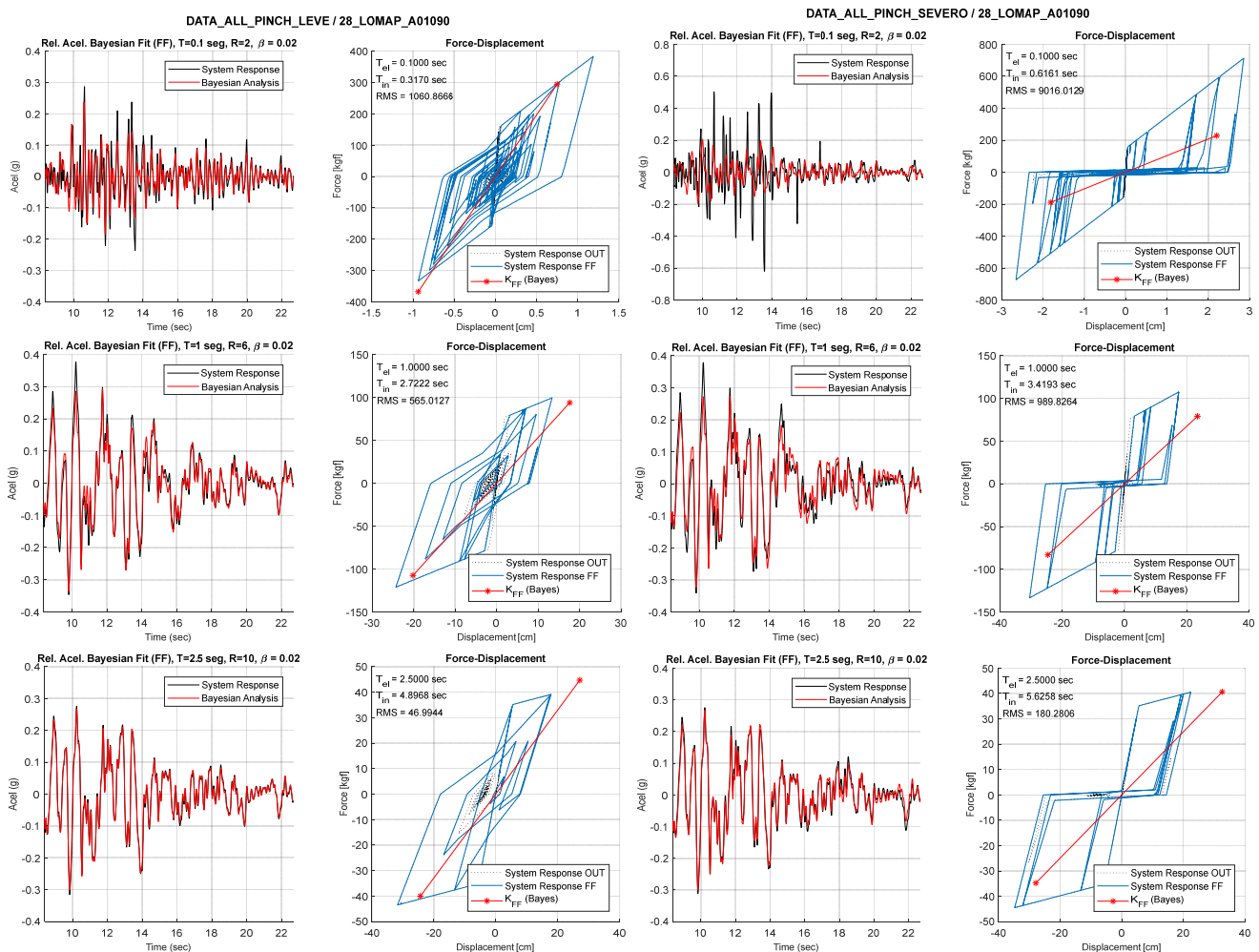


Figura 6. Identificación por Ajuste Bayesiano en Fase Fuerte de Respuesta de Aceleraciones Relativas

Modelo de Degradación Leve (Izquierda) y Degradación severa (Derecha)

Arriba: $T_{el} = 0.1$, $R = 2$, Centro: $T_{el} = 1.0$, $R = 6$, Abajo: $T_{el} = 2.5$, $R = 10$, GM: Loma Prier 1989.10.18.

En general, para todos los modelos histeréticos analizados, de la identificación se obtiene una regular tendencia al aumento del periodo aparente (reducción de la rigidez lineal-equivalente) en proporción a nivel incursión inelástica ("R") y grado de degradación del sistema.

Los resultados de la identificación de los sistemas de degradación leve y severa se ven naturalmente influenciados por las características de degradación de cada modelo constitutivo. Para los sistemas con degradación leve (degradación de rigidez y mínimo efecto *pinching*) se obtienen los mejores niveles de ajuste de respuesta (RMS) y con resultados de rigidez lineal-equivalente que tienden hacia las propiedades secantes del sistema. En cuanto a los sistemas con degradación severa (fuerte componente de *pinching*), los resultados de la identificación se encuentran ligados al grado de *pinching* presente en la respuesta histerética. Con menos ciclos histeréticos desarrollados por el sistema (sistemas flexibles) se obtienen resultados de rigidez lineal-equivalente con una ligera tendencia hacia las propiedades secantes, mientras que con una mayor cantidad de ciclos de recarga (sistemas rígidos), se obtienen rigideces equivalentes cada vez menor.

○ Ajuste de Respuesta por Ventanas Móviles (Seguimiento de Propiedades Dinámicas)

Los resultados de este enfoque de ajuste representan la respuesta del sistema no-lineal dentro de un acotado segmento de tiempo y no son representativos de la respuesta global del sistema frente a la excitación sísmica. Es por esto que este enfoque se propone de manera complementaria para una representación cualitativa de incursiones inelásticas y/o degradación histerética desarrollada por el sistema, presentando un seguimiento de propiedades lineales-equivalentes (o efectivas) de rigidez y amortiguamiento en el tiempo. Algunos resultados de este enfoque de identificación se presentan en la Figura 7.

De este enfoque de identificación y seguimiento de propiedades dinámicas lineales-equivalentes, se observan mejores niveles de ajuste en términos de error cuadrático medio (RMS) del ajuste de respuesta. Esto se asocia a segmentación del problema de minimización del error. Igualmente se obtienen magnitudes del periodo aparente mayores a las obtenidas para fase fuerte. En general, el análisis por segmentos de tiempo se ha mostrado más sensible a las incursiones inelásticas desarrolladas por el sistema no-lineal, sin embargo, perdiendo el carácter de representación de la respuesta.

Con las curvas de seguimiento de propiedades efectivas es posible observar cómo el nivel de incursión inelástica del sistema impacta simultáneamente en las propiedades de rigidez y amortiguamiento identificados, de manera regular una baja en la rigidez identificada se ve compensada con un respectivo aumento del amortiguamiento efectivo. Es posible observar la degradación de estas propiedades dinámicas, y en qué magnitud estas son restituidas al final de la respuesta.

En particular para el modelo de degradación severa se observa que desde las primeras incursiones inelásticas la rigidez identificada sufre una fuerte degradación, acompañado de un aumento puntual del amortiguamiento efectivo, y seguido por una baja instantánea en su magnitud. Este fenómeno se encuentra directamente relacionado con el modelo histerético, que en un primer ciclo de carga responde con una amplia disipación histerética, seguido por ciclos de recarga con una rigidez altamente degradada durante la fase de *sliding*, lo cual reduce fuertemente esta componente de disipación. Con el uso del ajuste de respuesta por ventanas móviles de corta duración, se corre el riesgo de que las propiedades efectivas identificadas se vean fuertemente influenciadas por este rango de respuesta, alejándose a las propiedades representativas de las máximas magnitudes de fuerza y/o desplazamientos alcanzados por el sistema. En este sentido, para este tipo de sistemas con una fuerte componente de *pinching*, conviene desarrollar el análisis con ventanas de mayor duración.

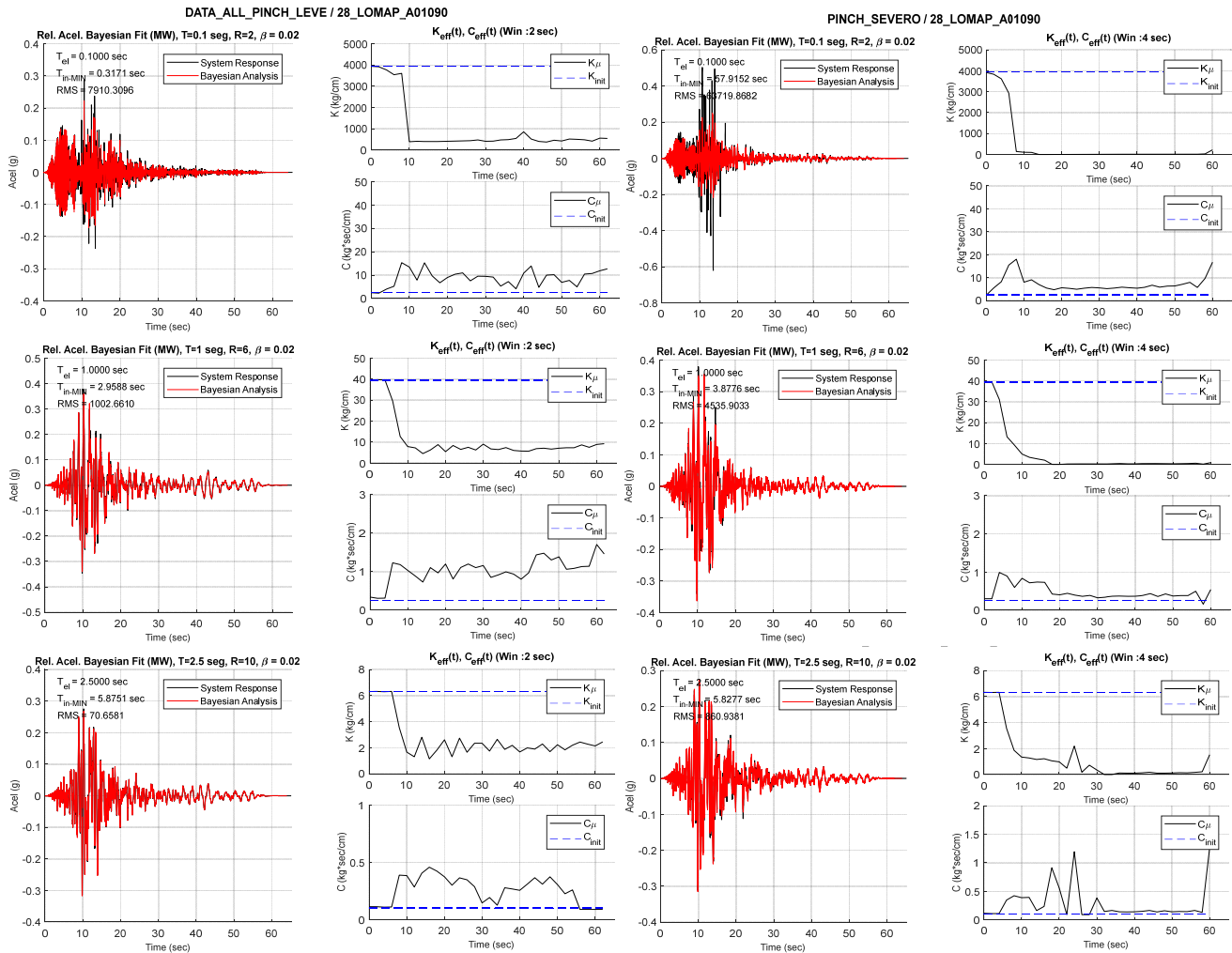


Figura 7. Identificación por Ajuste Bayesiano de Ventanas Móviles de Respuesta de Aceleraciones Relativas
Modelo de Degradación Leve (Izquierda) y Degradación severa (Derecha)

Arriba: $T_{el} = 0.1$, $R = 2$, Centro: $T_{el} = 1.0$, $R = 6$, Abajo: $T_{el} = 2.5$, $R = 10$, GM: Loma Prieta 1989.10.18.

3.3 Espectros de Elongación del Periodo Aparente

Para ambas metodologías de identificación descritas (Short Time Fourier Transform y Análisis Bayesiano para la Linealización Equivalente) se han obtenido los espectros de elongación del periodo aparente para todos los eventos sísmicos considerados en el estudio. Estos resultados son analizados, comparados entre sí, y contrastados con las magnitudes elongación asociadas a las propiedades secantes desarrolladas por cada sistema no-lineal (Figura 8).

Una gran parte de los espectros de elongación presenta mayores amplitudes en periodos elásticos bajos (0.1 a 0.5 seg.), y un decaimiento en magnitud hacia sistemas más flexibles. Sin embargo, es común observar espectros que presentan elongaciones mayores en torno a periodos fundamentales particulares. Este fenómeno se atribuye a la particularidad y naturaleza de cada registro sísmico en términos de contenido de frecuencia, amplificaciones dinámicas para ciertos periodos, etc. En general, las magnitudes de elongación del periodo obtenidas siguen una tendencia lógica con respecto al nivel de incursiones inelásticas definido por el factor de reducción de la respuesta elástica "R".

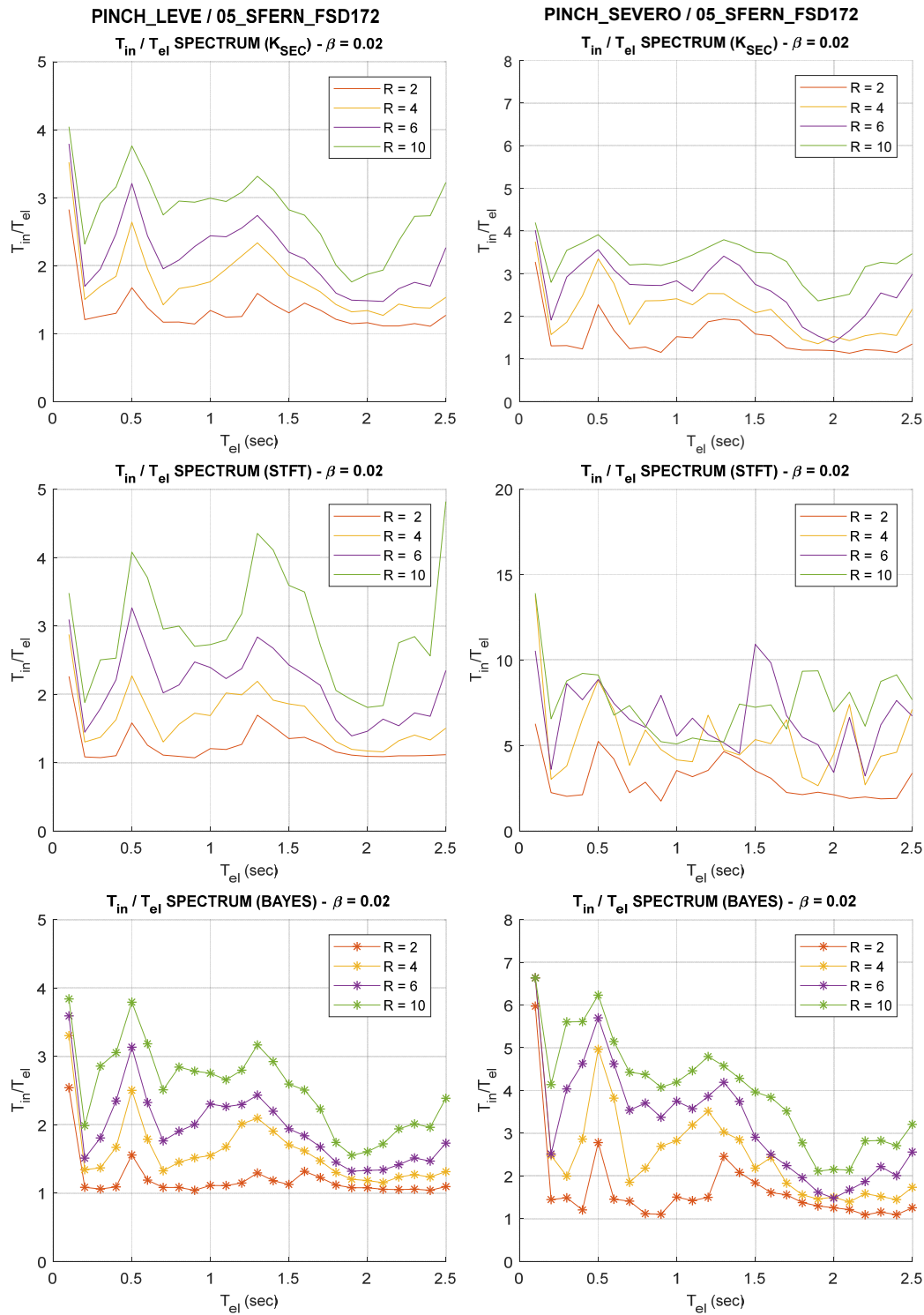


Figura 8. Espectros de Elongación del Periodo Aparente para el Evento Sísmico de San Fernando 1971.02.09
 Modelo de Degradación Leve (Izquierda) y Degradación severa (Derecha)
 Arriba: Propiedades Secantes, Centro: Short Time Fourier Transform, Abajo: Análisis Bayesiano Lineal-Equivalente

- Espectros de Elongación del Periodo a partir de Propiedades Secantes

En general, para un mismo registro sísmico, se obtienen magnitudes de elongación similares para ambos sistemas analizados, y levemente mayores para los sistemas de degradación severa. Con el uso de las propiedades secantes, los niveles de elongación del periodo se encuentran directamente relacionadas con la demanda máxima de desplazamiento de cada sistema histerético. Por consecuencia, la similitud entre los espectros da cuenta de la ligera equivalencia en términos de demanda de deformaciones entre los sistemas analizados, invisibilizando las características propias de degradación de cada uno.

- Espectros de Elongación del Periodo a partir de Identificación STFT

Si se compara con los espectros obtenidos de las propiedades secantes (y demandas máximas de desplazamiento), los espectros de elongación del periodo obtenidos del modelo de degradación leve resultan normalmente más razonables y representativos que los obtenidos para el modelo de degradación severa. Esta ventaja en los resultados se atribuye a las características y limitaciones propias del modelo histerético analizado. El modelo de degradación leve posee principalmente una componente de degradación de rigidez y en menor grado una componente de efecto *pinching*. Por otro lado, el modelo de degradación severa incorpora un importante efecto *pinching* que logra distorsionar fuertemente los resultados de la identificación producto de ciclos de carga y recarga con cambios abruptos de rigidez. A pesar de las fuertes amplitudes de la demanda y amplias incursiones inelásticas, la identificación en espacio-frecuencia es especialmente sensible y asertiva en casos de no-linealidades controladas por la degradación de la rigidez tangente del sistema. No así en el caso de sistemas que incorporan en su respuesta cambios abruptos.

En cualquier caso, persiste el problema de que los resultados de la identificación del periodo aparente no garantizan representatividad efectiva de los sistemas no-lineales en términos de ajuste de respuesta del sistema lineal equivalente en desplazamientos o aceleraciones. Cabe señalar que los espectros resultantes, en particular las amplitudes de elongación, mantienen una dependencia al nivel de suavización aplicado a las curvas de identificación en el tiempo de respuesta (espectrogramas). Esto incide principalmente para el modelo histerético que incorpora un fuerte efecto *pinching* (degradación severa), mientras que para el caso de degradación leve se obtienen curvas espectrales más regulares y estables respecto al nivel de suavización aplicado.

- Espectros de Elongación del Periodo a partir de Linealización Equivalente

Los espectros de elongación obtenidos para el modelo de degradación leve presentan una cercana similitud en forma y magnitudes a los espectros obtenidos de propiedades secantes, principalmente para los factores “R” mayores. Esto se mantiene constante para todos los registros sísmicos analizados. Frente a esto, junto con el buen ajuste de respuestas alcanzado (RMS) respecto al modelo de degradación severa, se estima que la respuesta de aceleraciones relativas para la identificación de propiedades dinámicas presenta una especial sensibilidad a las componentes de degradación de rigidez presentes en el sistema.

Para los sistemas de degradación severa, las magnitudes de elongación obtenidas no son correspondidas con los resultados obtenidos de propiedades secantes o identificación en espacio-frecuencia. Producto de la influencia a los ciclos de *sliding* en la respuesta histerética afecta a *pinching* (mayormente presente en sistemas rígidos, $T_{el} < 1.0$ seg), las rigideces lineales-equivalentes obtenidas resultan regularmente menores a las obtenidas por propiedades secantes, desarrollando mayores niveles de elongación del periodo. Para los sistemas más flexibles, los resultados del ajuste llevan a magnitudes de elongación similares a los obtenidos con propiedades secantes.

○ Espectros Finales de Elongación del Periodo Aparente Esperada

A partir de la identificación de sistemas lineales-equivalentes basados en el ajuste en la respuesta en aceleraciones relativas de sistemas no-lineales, se obtienen los espectros finales de elongación del periodo aparente esperado, cuyas magnitudes son representativas del nivel de incursión inelástica de cada sistema histerético. Se presenta en Figura 9 las curvas finales de elongación del periodo para cada modelo analizado, junto a sus respectivas expresiones matemáticas de mejor ajuste en ecuaciones n°1 (degradación leve) y n°2 (degradación severa), en función del periodo inicial-elástico y factor de reducción de la respuesta elástica, R.

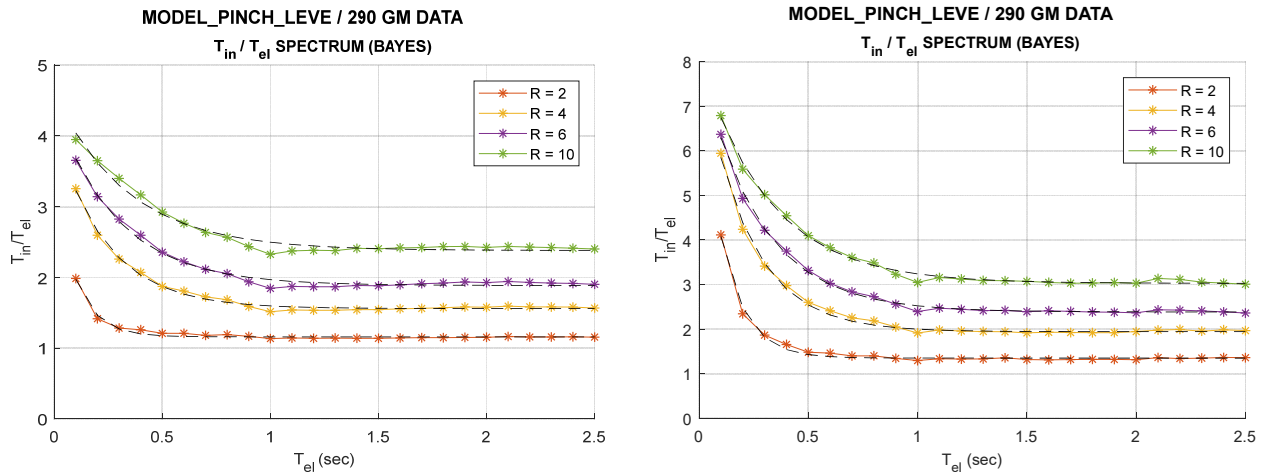


Figura 9. Espectros de Elongación del Periodo Aparente Esperada (Promedio de 290 Eventos Sísmicos)
Modelo de Degradación Leve (Izquierda) y Degradación severa (Derecha)
Rojo: R = 2, Amarillo: R = 4, Violeta: R = 6, Verde: R = 10, Negro-Segmentado: Curvas de Ajuste

$$T_{in}/T_{el}(R)_{P.LEVE} = (-0.022 \cdot R^2 + 0.264 \cdot R + 1.775) \cdot e^{-7.03 \cdot T_{el} \cdot R^{-0.38}} + (-0.0074 \cdot R^2 + 0.241 \cdot R + 0.710) \quad (1)$$

$$T_{in}/T_{el}(R)_{P.SEVERO} = (-0.162 \cdot R + 6.971) \cdot e^{-12.74 \cdot T_{el} \cdot R^{-0.65}} + (-0.0129 \cdot R^2 + 0.363 \cdot R + 0.680) \quad (2)$$

Las curvas de elongación del periodo presentan magnitudes máximas para sistemas de alta rigidez, un decaimiento hacia estructuras de rigidez moderada, y una leve tendencia asintótica hacia sistemas flexibles ($T_{el} > 1.0$ seg). Este límite resultante para un periodo de 1.0 seg, que separa las tendencias en las curvas de elongación del periodo aparente, fue igualmente observado por Katsanos y Sextos (2015), con tendencias similares en su proyección asintótica.

Para el caso del modelo de degradación leve se observa que la elongación determinada mediante la linealización equivalente ronda entre un 90-105% de la elongación obtenida en base a las propiedades secantes, casi para todo el espectro de periodos elásticos, y con leves diferencias en función del factor R del sistema. Para el caso del modelo de degradación severa se aprecia el fenómeno contrario, en que la elongación determinada mediante la linealización equivalente resulta hasta un 40% mayor a la obtenida en base a las propiedades secantes para sistemas de periodo elástico mayor a 0.5 seg, y hasta un 90% mayor para sistemas de mayor rigidez. En este último caso igualmente se observa una fuerte dependencia del factor R considerado en el sistema. En Figura 10 se presentan gráficamente las razones de elongación obtenidas mediante linealización equivalente y propiedades secantes.

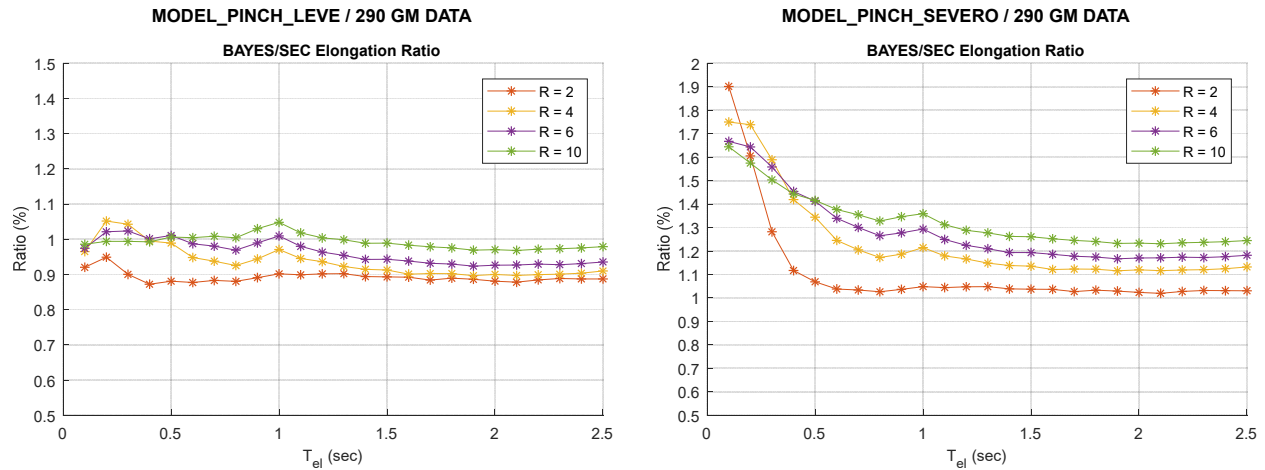


Figura 10. Espectros de Elongación del Periodo Aparente Esperada (Promedio de 290 Eventos Sísmicos)
Modelo de Degradación Leve (Izquierda) y Degradación severa (Derecha)
Rojo: $R = 2$, Amarillo: $R = 4$, Violeta: $R = 6$, Verde: $R = 10$, Negro-Segmentado: Curvas de Ajuste

○ Influencia del Tipo de Suelo

Dada la diversidad de la base de datos de eventos sísmicos, se analiza la influencia del tipo de suelo en los resultados de elongación del periodo para los modelos histeréticos estudiados. En Figura 11 se observa que se mantienen diferencias de magnitud de elongación entre casos de degradación leve/severa, sin embargo, no se observan diferencias considerables en los resultados influenciadas por la clasificación del suelo.

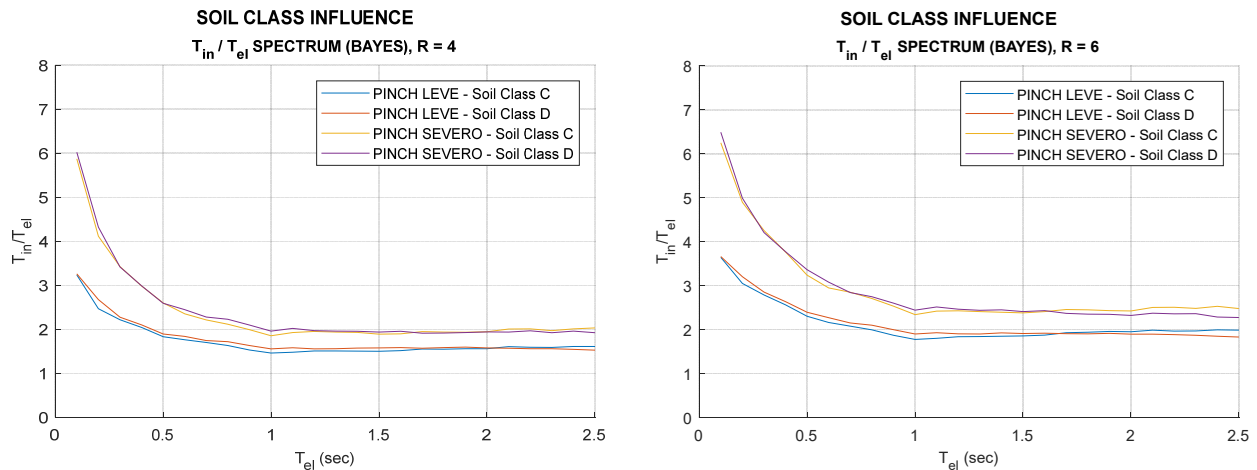


Figura 11. Espectros de Elongación del Periodo Aparente Esperada para Suelos Tipo C (172 GM) y D (106 GM)
Modelos de Degradación Leve y Severa, $R = 4$ (Izquierda) y $R = 6$ (Derecha)

Se estima que la independencia generalizada de los resultados frente las características de los eventos sísmicos (tipo de suelo, distancia al foco, etc.) radica en el hecho de que los niveles de incursión inelástica de los sistemas histeréticos analizados, tal como se plantea originalmente la metodología, se encuentran justamente normalizados con respecto a la respuesta elástica máxima producto de los mismos eventos sísmicos (uso de factores “ R ”). Esto invisibiliza las características propias del evento sismo frente a otro evento y se pierde la definición del sistema histerético para cada excitación analizada.

○ Correlación de Elongación del Periodo con la Demanda de Ductilidad

El enfoque utilizado para la linealización equivalente tiene por objetivo ajustar la respuesta en aceleraciones relativas de un sistema lineal a la respuesta del sistema histerético de interés. Este enfoque dista en cierto grado del enfoque del diseño, contexto en el cual se tiene especial interés en las demandas máximas del sistema en deformaciones. Sin embargo, el parámetro de elongación del periodo como indicador de degradación en el sistema, presenta igualmente una correlación con los niveles de demanda de ductilidad alcanzada por los sistemas histeréticos, presentando tendencias consistentes incluso para distintos eventos sísmicos.

En Figura 12 se concentra en una nube de puntos la demanda máxima de ductilidad alcanzada para todos los sistemas histeréticos analizados (T_{el} , R) y todos los eventos sísmicos de la base de datos, asociados a su respectiva magnitud de elongación del periodo estimada a partir de la linealización equivalente aplicada. En esta figura, separado según régimen de degradación, se observa una correlación menos estable para el modelo de degradación severa. Curvas de ajuste para ambos casos se presentan en ecuaciones n°3 y n°4.

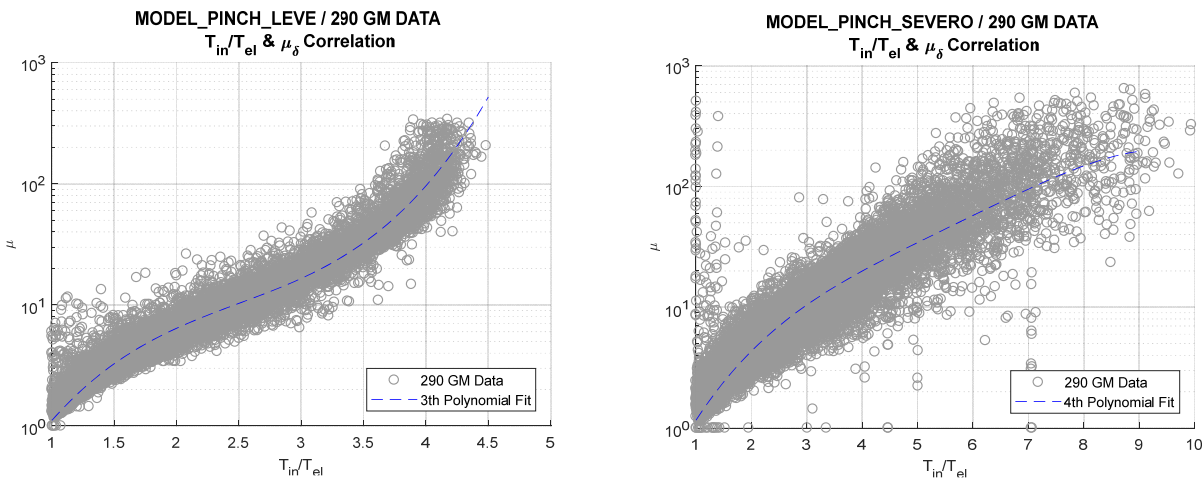


Figura 12. Correlación de elongación y demanda de ductilidad.

Sistema de degradación leve (Izquierda) y severa (Derecha).

Conjunto de 290 eventos sísmicos. Ajuste exponencial-polinomial de orden 4.

$$\mu_{P.LEVE} \approx e^{0.2692\left(\frac{T_{in}}{T_{el}}\right)^3 - 2.0171\left(\frac{T_{in}}{T_{el}}\right)^2 + 5.9178\left(\frac{T_{in}}{T_{el}}\right) - 4.0632} \quad (3)$$

$$\mu_{P.SEVERO} \approx e^{-0.0025\left(\frac{T_{in}}{T_{el}}\right)^4 + 0.0574\left(\frac{T_{in}}{T_{el}}\right)^3 - 0.4975\left(\frac{T_{in}}{T_{el}}\right)^2 + 2.4411\left(\frac{T_{in}}{T_{el}}\right) - 1.8475} \quad (4)$$

Se aprecia en el gráfico de correlación para el modelo de degradación leve una mayor estabilidad en los resultados, aspecto que se ha visto igualmente en la calidad de los resultados de identificación y espectros de elongación obtenidos. Por otro lado, para el modelo de degradación severa se percibe una mayor dispersión de los resultados, con una gran cantidad de puntos fuera de la tendencia general. En general se ha observado que las abruptas no-linealidades en la respuesta histerética generadas por el efecto *pinching*, así como la falta de una suavización entre las ramas de respuesta, son aspectos que perjudican la calidad de los métodos de identificación orientados a la linealización del sistema.

4 Discusión y Conclusiones

○ Identificación de Sistemas en Espacio-Frecuencia

En base a los resultados obtenidos y presentados, se estima que el presente estudio es otra prueba de las limitaciones de metodologías de espacio-frecuencia para la identificación de propiedades dinámicas representativas, o cualquier definición de aspectos cuantitativos, de sistemas no-lineales de amplias incursiones inelásticas. Los resultados obtenidos son fuertemente dependientes del tratamiento y suavización de espectros de frecuencia, y las magnitudes resultantes no aseguran en ningún caso una correlación cuantitativa con aspectos de demanda del sistema no-lineal.

Sistemas histeréticos con abruptas no-linealidades, fuertes y recurrentes cambios de rigidez, y sin suavización entre ramas de respuesta, empeoran los resultados de la identificación de espacio-frecuencia STFT, obteniendo resultados más erráticos y menos representativos. Por otro lado, para sistemas principalmente afectados a una degradación progresiva de la rigidez tangente, la frecuencia aparente identificada a partir de la metodología de espacio-frecuencia STFT efectivamente puede dar indicios de la degradación alcanzada durante la respuesta. Sin embargo, manteniendo los problemas de representación cuantitativa de la respuesta del sistema no-lineal.

○ Análisis Bayesiano para la Identificación de Sistemas

Cumpliendo con uno de los objetivos principales del estudio, se propone una mejora a la metodología propuesta por Katsanos y Sextos (2015) para la estimación del periodo aparente de un sistema dinámico, con la aplicación de una metodología de identificación orientada a asegurar una representatividad cuantitativa del sistema lineal-equivalente identificado. Esto se logra con la implementación de un Análisis Bayesiano para el ajuste (minimización del error) entre la respuesta en el tiempo de aceleraciones relativas de los sistemas no-lineales y la respuesta modelada de un sistema lineal dado, dentro de un único y característico segmento de respuesta (fase fuerte).

La identificación basada en la respuesta en aceleraciones relativas resultó ser un buen parámetro de entrada para capturar los niveles de incursión inelástica para todos los sistemas histeréticos tratados, con una especial sensibilidad a los efectos de degradación de la rigidez (similar a lo observado de la identificación en espacio-frecuencia). Para sistemas histeréticos con cambios abruptos en sus ramas de respuesta, se obtienen buenos niveles de ajuste, pero con una mayor presencia de óptimos locales e inestabilidades en los resultados finales. Se estima que en estos casos una suavización entre ramas de respuesta histerética, tal como se presenta en sistemas dinámicos reales, pueden favorecer la calidad de los resultados de la identificación.

La linealización equivalente aplicado por segmentos móviles de tiempo, si bien no logra caracterizar la respuesta global del sistema no-lineal, resulta ser una herramienta de alto potencial para el análisis y control de sistemas a partir del seguimiento de las propiedades dinámicas efectivas en el tiempo, al mostrarse más sensible a incursiones inelásticas puntuales y concentradas en la respuesta.

○ Espectros de Elongación Esperada del Periodo Aparente

Para los dos modelos degradantes definidos se obtienen finalmente espectros de elongación esperada del periodo aparente, cuya magnitud se asocia a una representación cuantitativa de la respuesta no-lineal de los sistemas histeréticos. Para estas curvas se define un modelo matemático para la predicción de la elongación de un sistema definido por un periodo inicial-elástico y diseñado en base a un factor de reducción de la respuesta elástica R .

La forma y tendencia de los espectros de elongación del periodo obtenidos se asimila a lo obtenido por Katsanos y Sextos (2015) a partir de metodologías de identificación en espacio-frecuencia. Las amplitudes máximas de

elongación se producen para sistemas de mayor rigidez ($T_{el} \leq 0.5$ seg), presentando un decaimiento asintótico en su magnitud hacia sistemas de mayor flexibilidad ($T_{el} > 1.0$ seg). Consecuentemente, los modelos definidos con degradación severa presentan niveles de elongación mayores a los resultados del modelo de degradación leve.

Se observa que las magnitudes de elongación del periodo obtenidas (a partir de la metodología implementada) se encuentran esencialmente ligadas a las características del modelo constitutivo. Para modelos con degradación de rigidez tangente, las propiedades efectivas identificadas y magnitudes de elongación del periodo estimadas se aproximan a los resultados obtenidos a partir de propiedades secantes; mientras que con la incorporación del efecto *pinching*, y con la influencia de los sucesivos ciclos de *sliding* en la respuesta, la rigidez lineal-equivalente tiende en todos los casos menor a la rigidez secante, desarrollando elongaciones mayores del periodo aparente.

En base a los espectros de elongación resultantes, en general no se observa una influencia de las propiedades que definen la demanda sísmica, tal como la clasificación del suelo en donde se registra el evento sísmico. Esta independencia se asocia al enfoque con que se definen los distintos niveles de incursión inelástica mediante el uso del factor de reducción de la respuesta elástica, R .

Tal como propone Katsanos y Sextos (2015), la respuesta inelástica de un sistema a una excitación sísmica se encuentra calibrada (o escalada) en función de la demanda que impone al respectivo sistema en condiciones lineales-elásticas. Esto invisibiliza las características propias del evento sísmico frente a otro, y se pierde la definición del sistema histerético entre eventos sísmicos. Para mitigar este problema, sería conveniente calibrar los distintos niveles de esfuerzo de fluencia en fracciones de la masa del sistema ($F_y/M = 0.1, 0.2, 0.5...$), con la idea de establecer una definición del sistema histerético independiente de la excitación sísmica. Sólo en este caso se podrá diferenciar la elongación del periodo impuesta por un sismo frente a otro.

Se observa una interesante correlación entre el parámetro de elongación del periodo aparente obtenido y los niveles de demanda de ductilidad en el sistema. Estas tendencias se observaron constantes para el conjunto de eventos sísmicos analizados para el conjunto de eventos sísmicos analizados, y consecuentemente, dependientes de las características propias del modelo degradante. En base la correlación observada entre elongación del periodo aparente y demanda de ductilidad del sistema histerético, se estima es posible establecer, en etapa de diseño, límites de desempeño global asociados a las capacidades de ductilidad provistas a la estructura, y estos límites ser controlados únicamente a partir del monitoreo e identificación de la elongación del periodo aparente luego de cada periodo de excitación sísmica aplicado al sistema.

○ Recomendaciones y Futura Investigación

Se estima que el desarrollo y uso de espectros de elongación del periodo propuestos por Katsanos y Sextos cuentan con un gran potencial en el campo del diseño, análisis y control de sistemas dinámicos. En esta línea de estudio, y para extender su aplicación general y en el contexto nacional, se proponen las siguientes mejoras según lo observado en la presente investigación.

- Es necesario definir modelos histeréticos degradantes que representen el comportamiento global de sistemas estructurales convencionales, utilizados en el contexto nacional, y en función del detallamiento y capacidades de ductilidad asignadas a los componentes estructurales. Se destaca la estructuración en base a muros ordinarios y muros especiales. Magnitudes de elongación del periodo en estos casos pueden aportar para el diseño de tipo espectral (aceleración y/o desplazamiento), así como para un análisis simplificado de respuesta en el tiempo.
- Se recomienda considerar componentes de suavización en la respuesta de modelos histeréticos. Este aspecto, que se encuentra presente en la respuesta de sistemas dinámicos reales, favorece la calidad y estabilidad de la identificación, y en la estimación de la elongación del periodo aparente.

- Se recomienda considerar componentes de suavización en la respuesta de modelos histeréticos. Este aspecto, que se encuentra presente en la respuesta de sistemas dinámicos reales, favorece la calidad y estabilidad de la identificación, y en la estimación de la elongación del periodo aparente.
- Es necesaria la implementación de un método de identificación cuyos resultados sean cuantitativamente representativos de la respuesta del sistema no-lineal. Se propone el uso de la metodología utilizada en este estudio, basada en el Análisis Bayesiano para el ajuste de modelos lineales a la respuesta en aceleraciones relativas.
- Se estima que la forma de normalización de los sistemas histeréticos propuesta por Katsanos y Sextos, en base a factores de reducción de la respuesta elástica (" R " = 2, 3, 4...) invisibiliza las componentes y características propias que impone una excitación sísmica frente a otra. Para comparar niveles de elongación del periodo aparente entre eventos sísmicos de distintas características, se propone construir curvas de elongación del periodo, calibrando los sistemas no-lineales a partir de distintos niveles de esfuerzo de fluencia en razón de la masa del sistema (" F_y/M " = 0.1, 0.2, 0.5...). Se estima que de esta forma se apreciarán efectivamente la influencia de las variables que definen la demanda sísmica.
- Sin perjuicio de la recomendación anterior, se estima que la normalización de los sistemas histeréticos en base a factores de reducción de la respuesta elástica (" R "), sí mantiene un enfoque de diseño sísmico, y las magnitudes de elongación obtenidas con este enfoque serán tan válidos cuanto más se ajuste el conjunto de eventos sísmicos a ciertas características particulares de la demanda. Se recomienda, bajo este enfoque, analizar la construcción de espectros de elongación del periodo a partir de un conjunto de eventos sísmicos que engloben un único nivel de peligro sísmico y mecanismo de falla sísmica, tal como establecería una normativa de diseño sísmico. De esta manera se diferencian curvas de elongación por cada zona de sismicidad.
- La metodología de identificación utilizada, orientada a la linealización equivalente, demostró un gran potencial gracias a su efectividad y flexibilidad en la implementación. Se considera interesante explorar su aplicación y análisis de resultados, a partir del ajuste de respuestas en velocidades o deformaciones relativas y explorar la correlación de demandas de ductilidad frente a los resultados de identificación por ventanas móviles.

5 Agradecimientos

Al profesor Anastasios Sextos (University of Bristol) por su colaboración en el acceso a la información para el desarrollo de esta investigación.

Al profesor Rafael Ruiz (Universidad de Chile), por su ayuda y colaboración en la aplicación del Análisis Bayesiano como metodología de identificación y linealización equivalente de sistemas histeréticos; herramienta esencial para el desarrollo de esta investigación.

6 Referencias

- [1] F. E. Udwadia and M. D. Trifunac, "Time And Amplitude Dependent Response Of Structures", Earthquake Engineering And Structural Dynamics, Vol. 2, 359-378 (1974).
- [2] E. I. Katsanos and A. G. Sextos, "Inelastic spectra to predict period elongation of structures under earthquake loading", Earthquake Engng Struct. Dyn. 2015; 44:1765–1782.
- [3] L. Lin, N. Naumoski, S. Foo and M. Saatcioglu, "Elongation Of The Fundamental Periods Of Reinforced Concrete Frame Buildings During Nonlinear Seismic Response", The 14th World Conference on Earthquake Engineering October 12-17, 2008, Beijing, China
- [4] Z. Zembatya, M. Kowalskia, S. Pospisilb, "Dynamic identification of a reinforced concrete frame in progressive states of damage", Engineering Structures 28 (2006) 668–681.
- [5] J. Martínez, R. Boroschek, J. Bilbao, "System Identification procedures for nonlinear response of Buckling Restraint Braces", SHMII Torino 2015.
- [6] M. D. Trifunac, "Comparisons Between Ambient and Forced Vibration Experiments", Earthquake Engineering And Structural Dynamics, Vol. 1, 133-150 (1972).
- [7] P. C. Jennings, R. B. Matthiesen, J. B. Hoernes, "Forced Vibration of a 22-Story Steel Frame Building", California Institute Of Technology Earthquake Engineering Research Laboratory And University Of California At Los Angeles Earthquake Engineering And Structures Laboratory (1971).
- [8] J. H. Wood, "Analysis of the Earthquake Response of a Nine-Story Steel Frame Building During the San Fernando Earthquake", California Institute of Technology (1972).
- [9] G. H. McVerry, "Structural Identification in the Frequency Domain From Earthquake Records", Earthquake Engineering And Structural Dynamics, Vol. 8, 161-180 (1980).
- [10] J. L. Beck, "Determining Models of Structures From Earthquake Records", California Institute of Technology (1978).

ANEXO A – RESUMEN DE EVENTOS SÍSMICOS

GROUND MOTION DATA BASE							
#	Earthquake name (Date)	Magnitude	Distance	Records	Site Class	Completed	
1	Kern County (1952.07.21)	7.36	88.39	1	C(1)	1	100%
2	Northern California (1954.12.21)	6.5	30.79	1	D(1)	1	100%
3	Parkfield (1966.06.28)	6.19	32.56-40.26	3	C(1) + D(2)	3	100%
4	Borrego Mountain (1968.04.09)	6.63	70.75	1	D(1)	1	100%
5	San Fernando (1971.02.09)	6.61	20.04-39.49	5	C(4) + D(1)	5	100%
6	Managua, Nicaragua (1972.12.23)	6.24	5.68	1	D(1)	0	0%
7	Friuli, Italy (1976.05.06)	6.5	20.23	1	C(1)	1	100%
8	Tabas, Iran (1978.09.16)	7.35	20.63-74.66	2	C(1) + D(1)	2	100%
9	Coyote Lake (1979.08.06)	5.74	4.37-10.94	4	C(1) + D(3)	4	100%
10	Imperial Valley (1979.10.15)	6.53	2.47-43.15	18	D(18)	17	94%
11	Livermore (1980.01.24)	5.8	17.13	1	D(1)	1	100%
12	Mammoth Lakes (1980.05.25)	5.94	5,90 - 14,19	7	D(7)	7	100%
13	Victoria, Mexico (1980.06.09)	6.33	36.67	1	D(1)	1	100%
14	Trinidad and Tobago (1980.11.08)	7.2	76.75	2	D(2)	2	100%
15	Corinth, Greece (1981.02.24)	6.6	19.92	1	D(1)	1	100%
16	Westmorland (1981.04.26)	5.9	7,02 - 20,47	3	D(3)	3	100%
17	Coalinga (1983.05.02)	6.36	4,60 - 52,86	22	C(9)+D(13)	22	100%
18	Morgan Hill (1984.04.24)	6.19	3,94 - 38,20	5	C(2)+D(3)	5	100%
19	Taiwan-SMART1-40 (1986.05.20)	6.32	65,48 - 70,27	8	D(8)	8	100%
20	North Palm Springs (1986.07.08)	6.06	4,24 - 6,28	2	D(2)	2	100%
21	Chalfant Valley (1986.07.20)	6.19	10,54 - 31,25	4	D(4)	4	100%
22	San Salvador, El Salvador (1986.10.10)	5.8	9.54	1	D(1)	1	100%
23	Taiwan-SMART1-45 (1986.11.14)	7.3	71,35 - 78,21	15	C(1)+D(14)	15	100%
24	New Zealand (1987.03.02)	6.6	24.23	1	C(1)	1	100%
25	Whittier Narrows (1987.10.01)	5.99	2,86 - 26,55	25	C(11)+D(14)	25	100%
26	Superstition Hills (1987.11.24)	6.54	19,51 - 35,83	3	D(3)	3	100%
27	Spitak, Armenia (1988.12.07)	6.77	36.19	1	D(1)	1	100%
28	Loma Prieta (1989.10.18)	6.93	7,17 - 114,87	42	B(1)+C(19)+D(17)+E(5)	42	100%
29	Manjil, Iran (1990.06.20)	7.37	40,43 - 77,84	2	C(1)+D(1)	2	100%
30	Sierra Madre (1991.06.28)	5.61	12.64	1	C(1)	1	100%
31	Erzincan, Turkey (1992.03.13)	6.69	8.97	1	D(1)	1	100%
32	Cape Mendocino (1992.04.25)	7.01	22,64 - 53,34	3	C(1)+D(2)	2	67%
33	Landers (1992.06.28)	7.28	13,67 - 91,77	6	C(2)+D(4)	6	100%
34	Big Bear (1992.06.28)	6.46	40.46	1	D(1)	0	0%
35	Northridge (1994.01.17)	6.69	4,85 - 63,53	33	A(1)+B(1)+C(16)+D(15)	29	88%
36	Kobe, Japan (1995.01.16)	6.9	16,25 - 55,81	10	A(1)+D(9)	10	100%
37	Northwest China (1997.04.11)	6.1	19.11	1	D(1)	1	100%
38	Kocaeli, Turkey (1999.08.17)	7.51	5,31 - 112,26	9	B(1)+C(1)+D(6)+E(1)	9	100%
39	Chi-Chi, Taiwan-1 (1999.09.20)	7.62	4,96 - 106,20	39	C(31)+D(8)	37	95%
40	Chi-Chi, Taiwan-2 (1999.09.20)	6.2	10,10 - 59,29	3	C(2)+D(1)	3	100%
41	Chi-Chi, Taiwan-3 (1999.09.25)	6.3	8,80 - 51,51	4	C(2)+D(2)	4	100%
42	Hector Mine (1999.10.16)	7.13	26,53 - 117,88	4	C(2)+D(2)	4	100%
43	Duzce, Turkey (1999.11.12)	7.14	29,27 - 31,56	2	C(1)+D(1)	2	100%