

**XXVII CONGRESO NACIONAL DE INGENIERÍA CIVIL
LIMA, PERÚ, 23 al 27 DE ABRIL DEL 2018**

GENERACIÓN DE ACELEROGRAMAS SINTÉTICOS

Ramiro Piedra¹

¹ *Georys Ingenieros SAC, Perú, rpiedra@georys.com*

RESUMEN:

Existen diversos procedimientos desarrollados para la generación de acelerogramas para su uso en el análisis de respuesta sísmica de las estructuras, partiendo desde la metodología más simple y comúnmente utilizada, que es la de escalar los valores de aceleración pico de un registro seleccionado al valor de la aceleración de diseño, hasta uno de los métodos más elaborados que consisten en modificar el espectro de respuesta del registro seleccionado para representar la forma espectral de un espectro de diseño objetivo. Los métodos de escalamiento de la aceleración pico tienen serios cuestionamientos al no cumplir con los principios teóricos de la geofísica, por lo cual su uso se ha descontinuado. Actualmente, los métodos de ajuste espectral han tomado mayor fuerza, debido a su simplicidad y practicidad en su aplicación a la ingeniería sismorresistente; por lo que son de uso más frecuente en la práctica de la ingeniería sísmica. Se hará una descripción de un procedimiento de ajuste espectral comúnmente utilizado, el cual, se basa en la modificación del espectro de respuestas del registro seleccionado mediante la adición de fragmentos de ondas (ondículas o wavelets)

ABSTRACT:

There are several procedures developed for the generation of accelerograms for use in the analysis of seismic response of structures, starting from the simplest and most commonly used methodology, which is to scale the peak acceleration values of a selected record to the value of the design acceleration, to one of the most elaborate methods that consists of modifying the response spectrum of the selected record to represent the spectral shape of a target design spectrum. The methods of scaling peak acceleration have serious questions because they do not comply with the theoretical principles of geophysics, so their use has been discontinued. At present, spectral adjustment methods have become more powerful, due to their simplicity and practicality in their application to seismic engineering; therefore, they are more frequently used in seismic engineering practice. A description will be given of a commonly used spectral adjustment procedure, which is based on modifying the response spectrum of the selected record by adding wave fragments (wavelets).

PALABRAS CLAVE: Espectro de respuesta elástico, respuesta sísmica de las estructuras, ajuste espectral, ondículas o wavelets, acelerograma, espectro de peligro uniforme.

INTRODUCCIÓN

El registro de acelerogramas como su tratamiento ha ido cambiando a medida que han evolucionado los sistemas de adquisición, de almacenamiento y procesamiento de los datos. El conocimiento de las fuerzas que actúan sobre un emplazamiento debido a los terremotos, el análisis de sus efectos sobre las estructuras, el desarrollo de normas de construcción y los métodos para determinar el riesgo sísmico sobre las construcciones son algunas de las principales motivaciones para el estudio de los acelerogramas. En ellos, el parámetro de mayor interés para la ingeniería civil es la aceleración del movimiento del suelo, aunque también son importantes la velocidad y el desplazamiento. Estos registros se denominan de **campo cercano**, ya que el estudio se realiza en la región epicentral, en la que los movimientos en superficie al paso de las ondas sísmicas son más intensos (movimientos fuertes del suelo), produciéndose desplazamientos, velocidades y aceleraciones elevadas, dependiendo fundamentalmente de la magnitud del sismo y de su distancia al epicentro.

CORRECCIONES DE ACELEROGRAMAS

Para la determinación lo más exacta posible de los valores de aceleración que se han producido durante el terremoto en el lugar del registro, es necesario hacer un cuidadoso tratamiento de los registros. El acelerograma obtenido, presenta una serie de errores, tanto instrumentales como aleatorios, que deberán ser corregidos para que dicho registro sea apto para ser utilizado.

Correcciones de línea base

Puede ocurrir que los valores del acelerograma se encuentran desplazados respecto a la línea cero de aceleración. Este error puede ocurrir porque el acelerómetro no está perfectamente nivelado en su emplazamiento, o bien porque el sistema de registro provocó una deriva de los datos respecto a la línea de base. Aunque este error puede ser inapreciable en aceleración, puede ser muy importante cuando se obtienen la velocidad y el desplazamiento por integración numérica, ya que se contabiliza y acumula el área que hay entre la curva de aceleración y la línea de base, tal como se muestra en la Figura 1

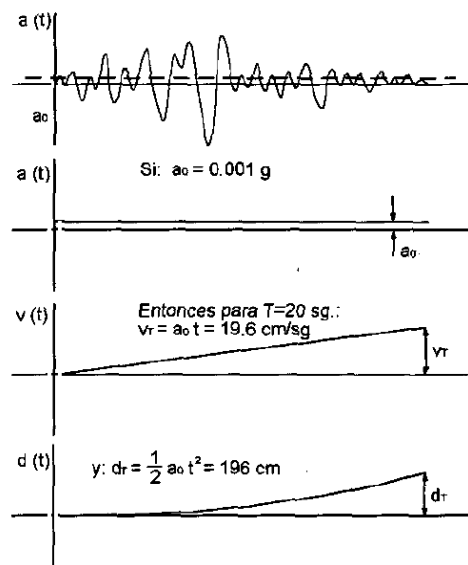


Figura 1. Error de ceros o línea base del acelerograma (Hudson 1979)

Corrección por filtrado de señales

Una vez que el acelerograma ha sido corregido por línea base, habrá que tener en cuenta la repercusión que el ruido tiene sobre la señal. Este ruido puede estar causado tanto por fenómenos naturales como por el tratamiento de los datos. Así podremos considerar que el acelerograma es la suma de la señal sísmica más el ruido,

$$a(t) = s(t) + r(t)$$

siendo $a(t)$ el acelerograma sin corregir, $s(t)$ la señal sísmica y $r(t)$ el ruido. El ruido que afecta al acelerograma puede ser de dos tipos, de alta frecuencia y baja frecuencia, tal como se muestra en la Figura 2.

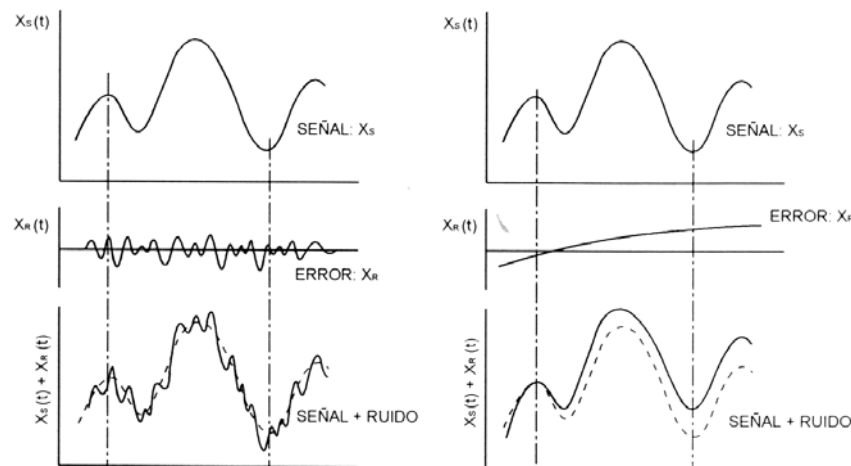


Figura 2. Izquierda: Efecto del ruido de alta frecuencia; derecha: Efecto del ruido de baja frecuencia (Hudson 1979)

- Ruido de alta frecuencia: Cuando aparecen ondas de alta frecuencia, por encima de la banda de frecuencias de las ondas de interés. Este ruido afecta fundamentalmente a los valores pico de aceleración. Sin embargo, no afecta mucho en el proceso de integración numérica, ya que el área bajo la curva es prácticamente la misma que para la señal corregida, dado que las desviaciones por encima y por debajo se compensan.
- Ruido de baja frecuencia: Cuando aparecen ondas de baja frecuencia, por debajo de la banda de frecuencias de las ondas de interés. Afecta al proceso de integración numérica básicamente, ya que, al integrar la aceleración para obtener la velocidad y el desplazamiento, se incrementa grandemente el área bajo la curva.

Para evitar que estos errores afecten al registro, se debe limitar la información a la banda de frecuencias deseada, en lugar de mantener todos los datos incluyendo las ondas de mayores y menores frecuencias. Para hacerlo, se utilizan los filtros pasa baja para eliminar altas frecuencias y los filtros pasa alta para eliminar las bajas frecuencias. Los filtros pasa banda, eliminan el ruido de alta y baja frecuencia simultáneamente.

Lo más importante a la hora de aplicar los filtros, es elegir la frecuencia de corte adecuada, ya que una mala elección puede suponer eliminar parte de la señal que es de interés, o, por el contrario, no eliminar el ruido de la señal. El filtrado de la señal se hace multiplicando el espectro del acelerograma por una función que reduzca o anule el valor de la amplitud del espectro de Fourier fuera de la banda de frecuencias en donde están

contenidas las frecuencias importantes de la señal sísmica. En dicha banda de frecuencias, el filtro deja inalteradas las amplitudes de las ondas.

En la práctica los filtros ideales no se pueden utilizar porque su función de transferencia en el tiempo es de longitud infinita; sin embargo, se utilizan aproximaciones a ellos. En el presente trabajo se ha empleado un filtro de forma trapezoidal, debido a que este tipo de filtros aminoran grandemente los errores de integración en el acelerograma. El filtro usado en el presente trabajo tiene los valores de amplitud mostrados en la Tabla 01.

Tabla 01: Filtro trapezoidal utilizado

| Eje x (Hz) | Eje y |
|------------|-------|
| 0 | 0 |
| 0.05 | 0 |
| 0.1 | 1 |
| 30 | 1 |
| 40 | 0 |
| 100 | 0 |

METODOLOGÍA PARA LA GENERACIÓN DE ACELEROGRAMAS

El propósito de esta investigación es la generación de acelerogramas sintéticos que sean compatibles con los espectros del International Building Code (IBC 2012) y con espectros de peligro uniforme obtenidos para la ciudad de Lima.

Generación de acelerogramas por Método de Ajuste Espectral en el Dominio del Tiempo

El diseño sísmico de estructuras se encuentra invariablemente basado en la representación de las acciones sísmicas en la forma de un espectro de respuesta. Sin embargo, en muchas situaciones tales como el diseño de instalaciones críticas o estructuras irregulares con sistemas de aislamiento, la simulación de la respuesta estructural usando un espectro de respuesta elástico escalado no se considera adecuado para verificar la resistencia sísmica. En tales casos, será requerido un análisis dinámico no lineal de la estructura y la entrada de datos sísmicos necesitará ser definida en series de tiempo de aceleración, estos registros generalmente deberán ser compatibles con el espectro de respuesta elástico que representa las acciones sísmicas de diseño en el lugar de estudio.

Existen diversos procedimientos para la generación de acelerogramas sintéticos, como el teorema de Green, y otros más; ya no se hace el escalamiento de valores de aceleración pico de un registro seleccionado al valor de la aceleración de diseño, porque el acelerograma final no tenía las frecuencias predominantes de la zona de estudio. Los métodos de ajuste espectral han tomado mayor fuerza, debido a su simplicidad y practicidad en su aplicación a la ingeniería sismorresistente; por lo que son de uso más frecuente en la práctica de la ingeniería sísmica. Seguidamente se hace una descripción de un procedimiento de ajuste espectral comúnmente utilizado, el cual, de manera similar al procedimiento utilizado en el acápite anterior, se basa en la modificación del espectro de respuestas del registro seleccionado mediante la adición de fragmentos de ondas (ondículas o wavelets), como se ve en la Figura 3.

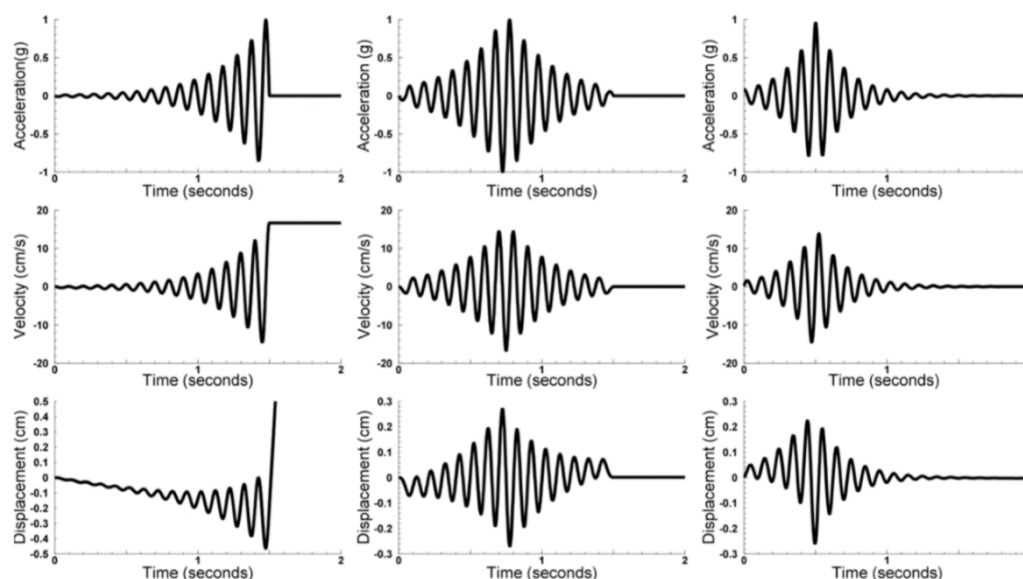


Fig.3. Registros de aceleración (superior), velocidad (centro) y desplazamiento (inferior) de wavelet de impulso inverso (izquierda), wavelet sinusoidal corregida (centro) y wavelet de coseno cónico corregido (derecha) (Hancock, Watson-Lamprey, Abrahamson, Bommer, 2006).

Procedimiento del Método de Ajuste Espectral en el Dominio del Tiempo.

Una técnica para realizar el ajuste espectral del tiempo-historia del registro sísmico en el dominio del tiempo se encuentra implementada en el programa RspMatch2009. Este programa ejecuta una modificación del tiempo-historia de un registro de aceleración para hacerlo compatible con un espectro de respuestas especificado por el usuario. La metodología está basada en los trabajos de Lilhanand y Tseng (1987, 1988). El código original del programa fue escrito por N. A. Abrahamson (1993) y posteriormente actualizado por J. Hancock et al. (2005), quien introduce nuevas formas funcionales para las wavelets. Finalmente, como parte de un proceso de actualización del software, Attik y Abrahamson (2009) introducen nuevas formas funcionales, que permiten optimizar el proceso de generación de registros sísmicos en términos de convergencia y manteniendo las características no estacionarias de los movimientos sísmicos reales. La modificación del tiempo-historia puede ser realizada por una variedad de modelos de modificación denominados wavelets. Estos modelos de ajuste preservan el periodo de fase no estacionario del registro tiempo-historia original (Fig. 4).

El procedimiento de ajuste espectral que realiza el programa RSPMatch consiste básicamente en lo siguiente:

- Calcular el espectro de respuesta de un sistema de un grado de libertad, bajo la acción del registro sísmico seleccionado, considerando diferentes periodos y para un determinado factor de amortiguamiento.
- Comparar las aceleraciones espectrales máximas del espectro de respuesta así obtenido con el espectro objetivo y determinar las diferencias existentes en términos de ordenadas espectrales.
- Adicionar los fragmentos de ondículas o wavelets con fases y amplitudes adecuadas al acelerograma, de tal forma que la aceleración espectral obtenida se ajuste al espectro objetivo. Este procedimiento se realiza de manera iterativa hasta obtener un error aceptable en el ajuste espectral.

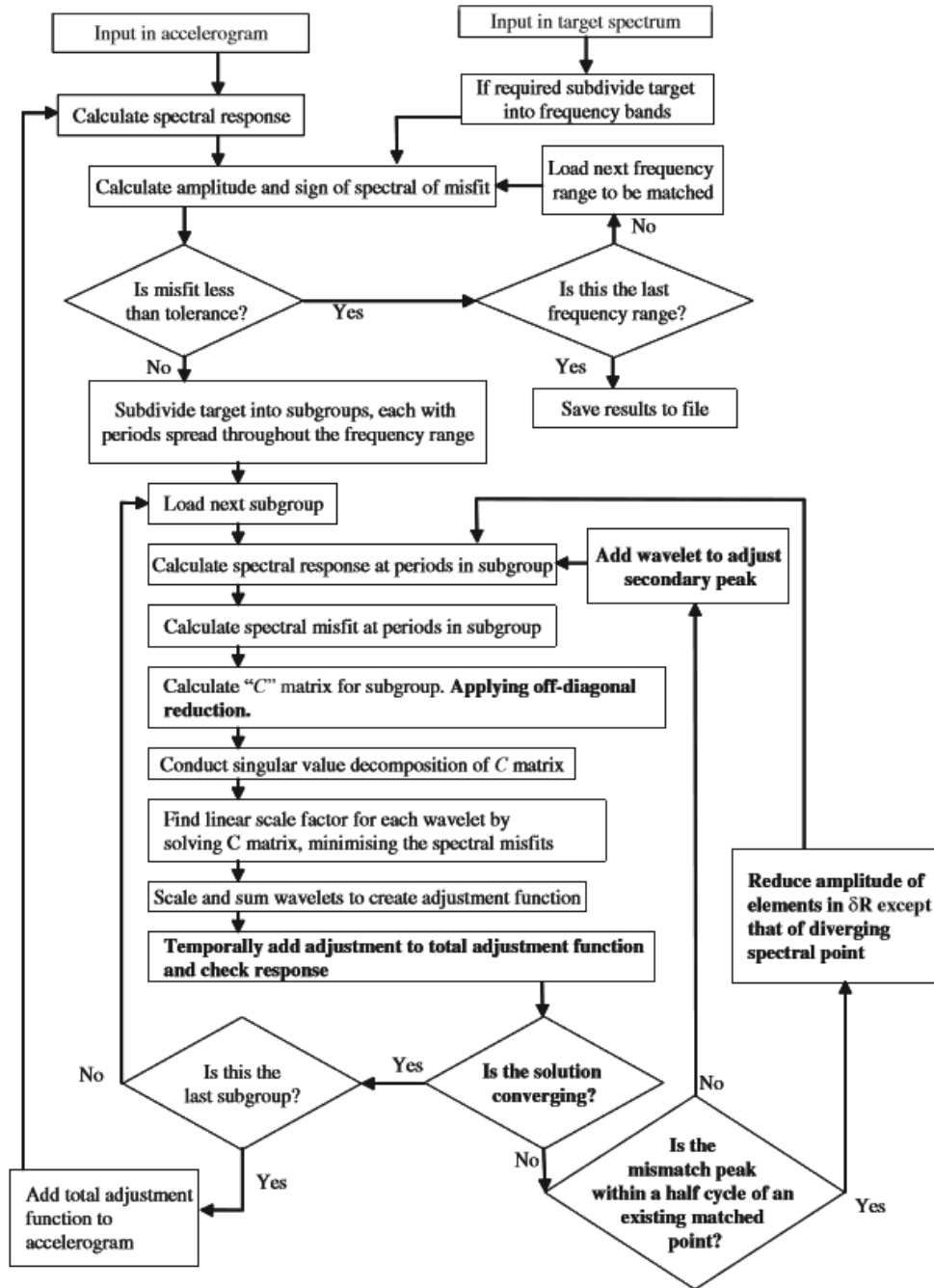


Figura 4. Metodología del programa RSPMatch incluyendo una nueva solución de algoritmo

La diferencia entre el espectro objetivo y el espectro del acelerograma seleccionado para una frecuencia (ω_i) dada y un amortiguamiento (β_i), está dado por:

$$\Delta R_i = (Q_i - R_i) P_i, \quad (1)$$

Donde Q_i es el valor de la aceleración espectral objetivo, R_i es el valor de la aceleración espectral del acelerograma seleccionado y P_i es la polaridad de la respuesta pico del oscilador. Asumiendo que el tiempo del pico de la respuesta del oscilador, t_i , no será perturbado al añadir un pequeño ajuste de $a(t)$, el método básico consiste en determinar un ajuste del acelerograma, $\delta a(t)$, tal que la respuesta del oscilador $\delta a(t)$ en el tiempo t_i sea igual a ΔR_i para todo i . $\delta a(t)$ puede ser escrito como:

$$\delta a(t) = \sum_{j=1}^N b_j f_j(t), \quad (2)$$

Donde $f_j(t)$ es un set de funciones de ajuste, b_j es el set de amplitudes de funciones de ajuste (coeficientes a ser determinados) y N es el número total de puntos espectrales (pares de frecuencia y amortiguamiento) para ser ajustados. La respuesta de aceleraciones de $\delta a(t)$ para una frecuencia ω_i y un amortiguamiento β_i en el tiempo t_i está dado por:

$$\delta R_i = \int_0^{\infty} \delta a(\tau) h_i(t_i - \tau) d\tau, \quad (3)$$

Donde $h_i(t)$ es la función de respuesta del impulso de aceleración para un oscilador de un grado de libertad con frecuencia ω_i y amortiguamiento β_i , y τ es el parámetro de integración del tiempo. Sustituyendo la ecuación 2 en la ecuación 3, tenemos:

$$\delta R_i = \sum_{j=1}^N b_j \int_0^{\infty} f_j(\tau) h_i(t_i - \tau) d\tau. \quad (4)$$

La función de respuesta del impulso de aceleración está dada por:

$$h_i(t) = \frac{-\omega_i}{\sqrt{1-\beta_i^2}} \exp(-\omega_i \beta_i t) \left[(2\beta_i^2 - 1) \sin(\omega_i' t) - 2\beta_i \sqrt{1-\beta_i^2} \cos(\omega_i' t) \right], \quad (5)$$

Donde

$$\omega_i' = \omega_i \sqrt{1-\beta_i^2}, \quad (6)$$

y $h_i(t)=0$ para $t < 0$. Designando c_{ij} a la respuesta en el tiempo t_i para la frecuencia i y el amortiguamiento resultante de la función de ajuste $f_j(t)$, entonces

$$c_{ij} = \int_0^{t_i} f_j(\tau) h_i(t_i - \tau) d\tau. \quad (7)$$

Sustituyendo la ecuación (7) en la ecuación (4), se tiene:

$$\delta R_i = \sum_{j=1}^N b_j c_{ij}. \quad (8)$$

Si la respuesta del ajuste del acelerograma, δR_i , es igual al error espectral, ΔR_i , entonces:

$$\Delta R_i = \sum_{j=1}^N b_j c_{ij}. \quad (9)$$

La amplitud de cada wavelet usado en el ajuste es determinada por:

$$b = C^{-1} \delta R \quad (10)$$

Donde C es una matriz cuadrada con elementos que describen la amplitud de la respuesta de cada sistema de un grado de libertad en el tiempo en que la respuesta necesita

ser ajustada, bajo la acción de cada wavelet; b es un vector de factores de escala lineal para cada wavelet utilizado en el ajuste y δR es un vector de ajuste requerido.

Dado un b_j , el acelerograma ajustado $\delta a(t)$, puede ser calculado utilizando la ecuación (2). El nuevo acelerograma ajustado para la primera iteración viene dado por:

$$a_1(t) = a(t) + \gamma \delta a(t), \quad (11)$$

Donde γ es un parámetro de relajación (entre 0 y 1) para amortiguar los ajustes. En la segunda iteración se repite el algoritmo usando el acelerograma ajustado, $a_1(t)$, en lugar de $a(t)$. Las iteraciones se continúan hasta que se alcance la precisión deseada en el ajuste espectral.

Especificación del acelerograma de ingreso

La selección cuidadosa de los acelerogramas es importante para reducir al mínimo el ajuste requerido por las ondículas (wavelet). Una estrategia útil es seleccionar registros utilizando la diferencia RMS en el registro normalizado y la aceleración espectral objetivo (en base a la ecuación usada por Ambraseys et al 2004):

$$SA_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{SA_o(T_i)}{PGA_o} - \frac{SA_s(T_i)}{PGA_s} \right)^2} \quad \dots\dots(12)$$

donde N es el número de períodos en los cuales se especifica la forma espectral, $SA_o(T_i)$ es la aceleración espectral a partir del registro en el periodo T_i , $SA_s(T_i)$ es la aceleración espectral de destino en el mismo periodo; PGA_o y PGA_s son el pico de aceleración del suelo del acelerograma y el punto de anclaje del período cero del espectro objetivo. A medida que la aceleración espectral RMS sólo coincide con la forma espectral de los acelerogramas, deben ser escalados linealmente de manera que la amplitud de las aceleraciones espectrales tenga una buena coincidencia con el objetivo antes de que se lleve a cabo el ajuste por ondículas (wavelet). La investigación reciente indica que los factores de escala lineal pueden ser utilizados sin causar un sesgo en la respuesta si los registros se seleccionan para que coincida con la forma espectral (Watson-Lamprey y Abrahamson 2006, Hancock y Bommer 2006).

Para asegurarse que se está haciendo un ajuste (matching) realista de la duración del escenario objetivo y distribución de energía, se recomienda que los acelerogramas tengan una magnitud similar a la del terremoto del escenario objetivo (ver Bommer y Acevedo 2004). Si se requiere un conjunto de acelerogramas es preferible seleccionar registro de acelerogramas de terremotos de diferentes estaciones para evitar el sesgo de origen, trayectoria o efectos de sitio.

Especificación del espectro objetivo

Se recomienda que los espectros de destino se especifiquen utilizando puntos espaciados uniformemente en una escala de período de registro. Esto debido a que el ancho de banda de la respuesta es una relación de la frecuencia forzada a la frecuencia natural; se requieren por lo tanto un menor número de puntos en períodos largos (frecuencias bajas) para obtener una coincidencia espectral suave.

En la presente investigación, se realizaron los ajustes espectrales de cada registro seleccionado, en este caso los registros que se utilizaron fueron las tres componentes del sismo de Arequipa 2001 en la estación del CISMID en Moquegua, de tal forma que se generaron acelerogramas sintéticos de diseño para la zona de más alta actividad sísmica

del Perú (Zona 3 del código E-030 2003, que ahora es Zona 4 de acuerdo a E-030-2016) y para los tres tipos de suelos establecidos por la Norma E-030 2003, que sean compatibles con los siguientes espectros:

- Espectro de Peligro Uniforme para un periodo de retorno $Tr=475$ años, este estudio de Peligro fue efectuado para la zona de Lima.
- Espectro de diseño genérico del Código Internacional IBC 2012

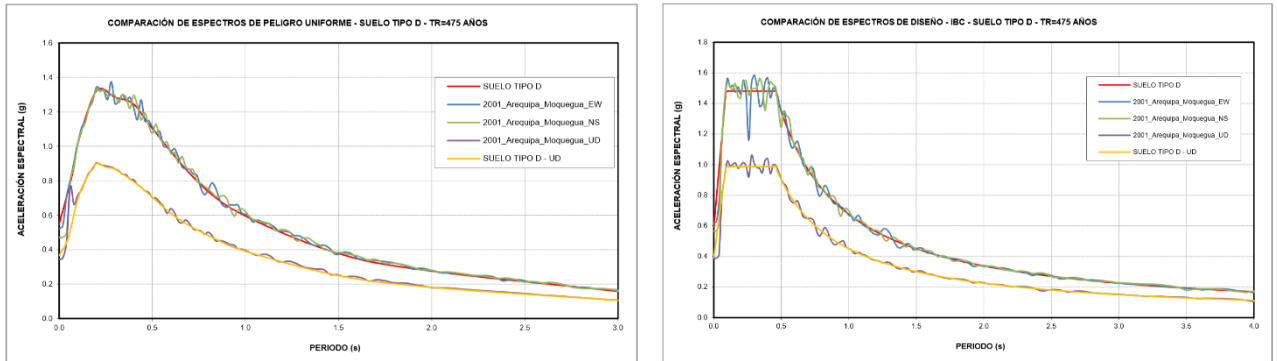


Figura 5. Espectros de Peligro Uniforme para un periodo de retorno de 475 años y espectros de diseño genérico del Código IBC 2012 utilizados para la generación de acelerogramas sintéticos.

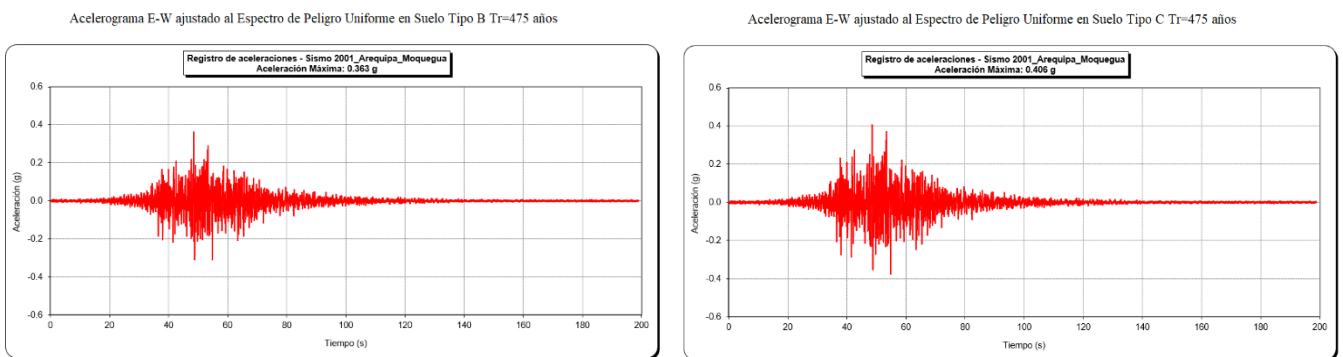


Fig.6. Registros de aceleración del sismo del año 2001 de Arequipa, estación Moquegua, componente Este Oeste, ajustado al espectro de peligro uniforme de la zona central de Lima, con un periodo de retorno de 475 años, para los tipos de suelo B y C de la norma E-030 2003.

Conclusiones

Se muestra uno de los métodos de la generación de los acelerogramas sintéticos, existen muchos otros métodos más, cada uno de ellos reviste sus bondades y limitaciones.

Se elaboraron los acelerogramas sintéticos utilizándose como origen el sismo de Arequipa del año 2001, por el método de ajuste espectral en el dominio del tiempo, obteniéndose acelerogramas en sus componentes Este-Oeste, Norte-Sur, y Vertical, cuyos espectros de respuesta en aceleración para un amortiguamiento del 5% son compatibles con los Espectros de Peligro Uniforme obtenido por medio de un estudio de Peligro Sísmico de la zona de Lima y espectros de la Norma IBC, para un periodo de retorno de 475 años para tres tipos de suelo (Suelo Tipo B, Suelo Tipo C y Suelo Tipo D). Definidos los acelerogramas a emplear en el análisis, éstos fueron ajustados espectralmente a los espectros objetivos; de este modo, los acelerogramas obtenidos mediante ajuste espectral, representan de forma más específica las características del área de estudio ya que incorporan un espectro de respuesta compatible con el espectro calculado en el análisis de peligro sísmico, modificando las amplitudes y contenidos de frecuencias del registro

sísmico original. En los registros seleccionados se realizaron los respectivos procesos de ajuste espectral al 5% de amortiguamiento.

Sobre la base de los resultados obtenidos, se puede observar que los espectros de los registros sísmicos calculados presentan una correlación adecuada con los Espectros de Peligro Uniforme y del Código Internacional IBC 2012 a niveles de máxima amplitud y forma del espectro en la mayoría de los casos, motivo por el cual, se recomienda su uso para el análisis de respuesta sísmica y de amplificación sísmica de las estructuras en el área de estudio.

El presente artículo es un extracto del estudio de Generación de Acelerogramas Sintéticos para la Costa del Perú, Convenio CISMID – SENCICO, 2013, el autor formó parte del grupo técnico que elaboró este estudio.

REFERENCIAS

- Abrahamson, N.A.**, Non-Stationary Spectral Matching. Seismological research letters 63(1), 30-30., 1992
- Aguilar, Z., Quiñonez, A.**, Synthetic Strong Ground Motion Accelerograms for the 03/10/74. Lima Earthquake. Japan Peru EQTAB Workshop, Lima, Perú, 2001
- Aguilar, Z. y Piedra, R.**, Implementación del sistema de adquisición de datos para la red acelerográfica del CISMID – FIC, Programa Científico PC CISMID, 1999 – 2000, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, 2000
- Aguilar, Z. y Piedra, R.**, Sistema de Adquisición de datos de la Red Acelerográfica del CISMID - FIC y Registros del Sismo Atico 2001, 1er Congreso Binacional de Ingeniería Civil Perú - Ecuador, Cuenca, Ecuador, 2002
- Aguilar, Z y Piedra, R.**, Replotamiento de la Red Acelerográfica del CISMID y su contribución para una base de Datos de Sismos Fuertes, XV Congreso Nacional de Ingeniería Civil, Ayacucho, Perú, 2005
- Hudson, D.E. (1979).**, Reading and interpreting strong motion accelerograms. Earthquake Engineering Research Institute, (1979) Berkeley, Pasadena, California, USA
- Hancock, J., Watson-Lamprey, J., Abrahamson, N.A., Bommer, J.J., Markatis, A., McCoy, E. and Mendis, R.** An improved method of matching response spectra of recorded earthquake ground motion using wavelets. Journal of Earthquake Engineering, Special Issue, 1996.
- Kramer, S. L. (1996)**, “Geotechnical Earthquake Engineering”, Prentice Hall, Inc. New Jersey, U. S. A.
- Lilhanand, K. and Tseng, W.S.** Generation of synthetic time histories compatible with multiple design response spectra. Transactions of the 9th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, Lausanne, K1, 105-110, 1987
- Pulido N., Aguilar Z., Lazares F., Piedra R., Roncal M.**, Generación de Acelerogramas Sintéticos para la Costa del Perú, Convenio CISMID – SENCICO, 2013
- Pulido, N., and M. Matsuoka**, Broadband Strong Motion Simulation of the 2004 Niigata-ken Chuetsu Earthquake: Source and Site Effects, Third International Symposium on the Effects of Surface Geology on Seismic Motion, Grenoble, France, 1, 657-666, 2006.