

ANEJO A:

Manual de Usuario de SimulAcel©

ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE CONTENIDOS	III
ÍNDICE DE FIGURAS.....	V
1 ANTECEDENTES Y OBJETIVOS DEL PROGRAMA	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Objetivos	1
2 BASE TEÓRICA DEL PROGRAMA	3
2.1 Metodología para la generación de acelerogramas	3
2.2 Mejoras de la señal generada	5
2.2.1 Ajuste de línea base	5
2.2.2 Ajuste de pico del acelerograma	5
2.2.3 Ajuste de la respuesta espectral	6
2.3 Parámetros de interés	6
3 INSTALACIÓN DEL PROGRAMA.....	9
4 USO DEL PROGRAMA.....	11
4.1 Inicio del programa	11
4.2 Módulos del programa	12
4.3 Módulo 1. Pre-proceso	12
4.3.1 Menú (S): Definición del espectro de referencia	13
4.3.2 Menú (I): Definición de la función de intensidad	17
4.4 Módulo 2. Cálculo.....	20
4.4.1 Zona A: Datos para la solución.....	20
4.4.2 Zona B: Control de la solución	21
4.4.3 Zona C: Ajuste de la respuesta espectral	22
4.5 Módulo 3. Post-proceso	23
4.5.1 Zona A: Propiedades de la señal generada.....	23
4.5.2 Zona B: Forma de la señal	25
4.5.3 Guardar y cargar resultados de la señal generada	25
4.6 Ayuda	26
REFERENCIAS.....	27

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Tipos de funciones de intensidad envolvente. Fuente: Elaboración propia a partir de (Barbat et al., 1994b).....	4
Figura 4.1. Ventana de inicio de SimulAcel©. Fuente: Elaboración propia.	11
Figura 4.2. Mensaje de aviso de resolución de pantalla de SimulAcel©. Fuente: Elaboración propia.....	12
Figura 4.3. Módulos que componen el programa SimulAcel©. Fuente: Elaboración propia.	12
Figura 4.4. Componentes del menú (S). Fuente: Elaboración propia.	13
Figura 4.5. Zona A del menú (S): NCSP-07 (izquierda) y NCSE-02 (derecha). Fuente: Elaboración propia.	13
Figura 4.6. Zona B del menú (S): NCSP-07 (izquierda) y NCSE-02 (derecha). Fuente: Elaboración propia.	14
Figura 4.7. Ejemplo de botón de ayuda. Fuente: Elaboración propia.	15
Figura 4.8. Zona C del menú (S): NCSP-07 (izquierda) y NCSE-02 (derecha). Fuente: Elaboración propia.	15
Figura 4.9. Zona D del menú (S). Fuente: Elaboración propia.	16
Figura 4.10. Componentes del menú (I). Fuente: Elaboración propia.	17
Figura 4.11. Zona A del menú (I): tipos de función de intensidad disponibles en SimulAcel©. Fuente: Elaboración propia.	18
Figura 4.12. Zona B del menú (I): datos de entrada para cada función de intensidad: constante (a), trapezoidal (b), exponencial (c) y compuesta (d). Fuente: Elaboración propia.	18
Figura 4.13. Zona C del menú (I). Fuente: Elaboración propia.	19
Figura 4.14. Componentes del Módulo 2 – Cálculo de SimulAcel©. Fuente: Elaboración propia.	20
Figura 4.15. Zona A del Módulo 2: datos calculados (izquierda) y datos sin calcular (derecha). Fuente: Elaboración propia.	21
Figura 4.16. Zona B del Módulo 2: antes de calcular (izquierda), después de cálculo exitoso (centro) y después de cálculo fallido (derecha). Fuente: Elaboración propia.	21

Figura 4.17. Mensajes de aviso al usuario tras solución exitosa (izquierda) y solución fallida (derecha). Fuente: Elaboración propia.	22
Figura 4.18. Zona C del Módulo 2. Fuente: Elaboración propia.....	22
Figura 4.19. Componentes del Módulo 3. Fuente: Elaboración propia.....	23
Figura 4.20. Zona A del Módulo 3. Fuente: Elaboración propia.	24
Figura 4.21. Zona B del Módulo 3. Fuente: Elaboración propia.....	25
Figura 4.22. Acceso al menú de ayuda. Fuente: Elaboración propia.	26
Figura 4.23. Visualización del Manual de Usuario de SimulAcel© dentro del programa. Fuente: Elaboración propia.	26

1 ANTECEDENTES Y OBJETIVOS DEL PROGRAMA

1.1 ANTECEDENTES

El presente manual del programa SimulAcel©, un programa para la generación de señales sísmicas artificiales, forma parte del trabajo *Simulación Estocástica de Cargas para Análisis Dinámico de Estructuras en Ing. Civil*, el cual se enmarca dentro de la normativa referente al Trabajo Fin de Máster de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Sevilla (ETSI) para la obtención de los créditos de la asignatura Trabajo Fin de Máster y así obtener el título de Máster Universitario en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos por la Universidad de Sevilla (Plan 2016/2017).

El departamento adjudicador del Trabajo Fin de Máster ha sido el Departamento de Mecánica de los Medios Continuos y Teoría de Estructuras de la ETSI, siendo los tutores D. Javier Fernando Jiménez Alonso, profesor asociado del departamento de Estructuras de Edificación e Ingeniería del Terreno de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Edificación, y D. Andrés Sáez Pérez, catedrático de universidad del departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería.

1.2 OBJETIVOS

SimulAcel© es un programa de cálculo de señales sísmicas artificiales creado en MatLab. Con él se pretende disponer de una herramienta rápida y sencilla que permita la generación de señales sísmicas aleatorias artificiales basadas en un espectro de referencia normativo y ajustadas a una determinada función de intensidad que da forma al acelerograma.

El uso de señales sísmicas artificiales se hace necesario cuando se abordan cálculos dinámicos estructurales y no se dispone de mediciones reales en la zona, pero sí de normativas que definen espectros de referencia. En estos casos, es fundamental su uso cuando la estructura que se quiere analizar posee un comportamiento predominantemente no lineal, no siendo posible su análisis mediante espectros elásticos predefinidos, o cuando la estructura posee un funcionamiento tan complejo que imposibilita su análisis modal espectral.

Las señales sintéticas generadas por SimulAcel© están orientadas a su uso en los casos descritos anteriormente.

2 BASE TEÓRICA DEL PROGRAMA

En el presente apartado se aporta la base teórica, de forma resumida, que ha sido implementada en SimulAcel© para la generación de señales sísmicas artificiales. Para más información al respecto, se remite a las referencias (Barbat and Canet, 1994a) y (Barbat et al., 1994b).

2.1 METOLOGÍA PARA LA GENERACIÓN DE ACELEROGRAMAS

El modelo que se describe en el presente apartado permite la generación de señales sísmicas artificiales compatibles con un espectro de respuesta dado; dicha señal se expresa como la historia temporal de aceleraciones, velocidades y desplazamientos del terreno.

El método está basado, fundamentalmente, en el hecho de que cualquier función periódica puede ser expresada como la superposición de un conjunto de ondas sinusoidales moduladas por una función temporal envolvente que, en definitiva, define la forma del acelerograma:

$$a(t) = I(t) \cdot \sum_{i=1}^n A_i \cdot \sin(\omega_i \cdot t + \phi_i) \quad (2.1)$$

Dónde:

- $a(t)$ es la historia de aceleraciones, es decir, el acelerograma buscado.
- $I(t)$ es la función envolvente que da forma al acelerograma. Con objeto de simular el carácter transitorio que poseen los terremotos reales, generalmente se utilizan funciones de intensidad envolventes deterministas previamente definidas que han sido obtenidas a partir de registros sísmicos reales. En la **Figura 2.1** se muestran las funciones de intensidad que se han implementado en la presente metodología.
- n es el número de ondas superpuestas que, al aumentar, mejora la compatibilidad del espectro al dar mayor contenido de frecuencias a la señal.
- ϕ_i es el ángulo de fase asociado a la onda i , siendo el responsable del carácter aleatorio de la señal artificial generada. Los ángulos de fase se han obtenido aleatoriamente siguiendo una distribución uniforme de los valores entre 0 y 2π . El hecho de que estos valores sean aleatorios propicia la generación de acelerogramas artificiales compatibles que, aunque posean diferentes detalles, son similares en cuanto al contenido de frecuencias.
- ω_i es la frecuencia asociada a la onda i . El conjunto de frecuencias se elige de manera regular en el intervalo fijado, de forma que en el cálculo se incluya todo el contenido de frecuencias de dicho intervalo.
- A_i es la amplitud asociada a la onda i . Dichas amplitudes son las responsables de la compatibilidad de la señal generada con el espectro de respuesta de referencia, pues se calculan, como se verá posteriormente, a partir de la función estacionaria de densidad espectral $G_z(\omega_n)$, obtenida a su vez del espectro de referencia en

velocidades $S_v(\omega_n)$. La modificación de estas amplitudes permite mejorar la compatibilidad entre el espectro de la señal y el espectro de referencia.

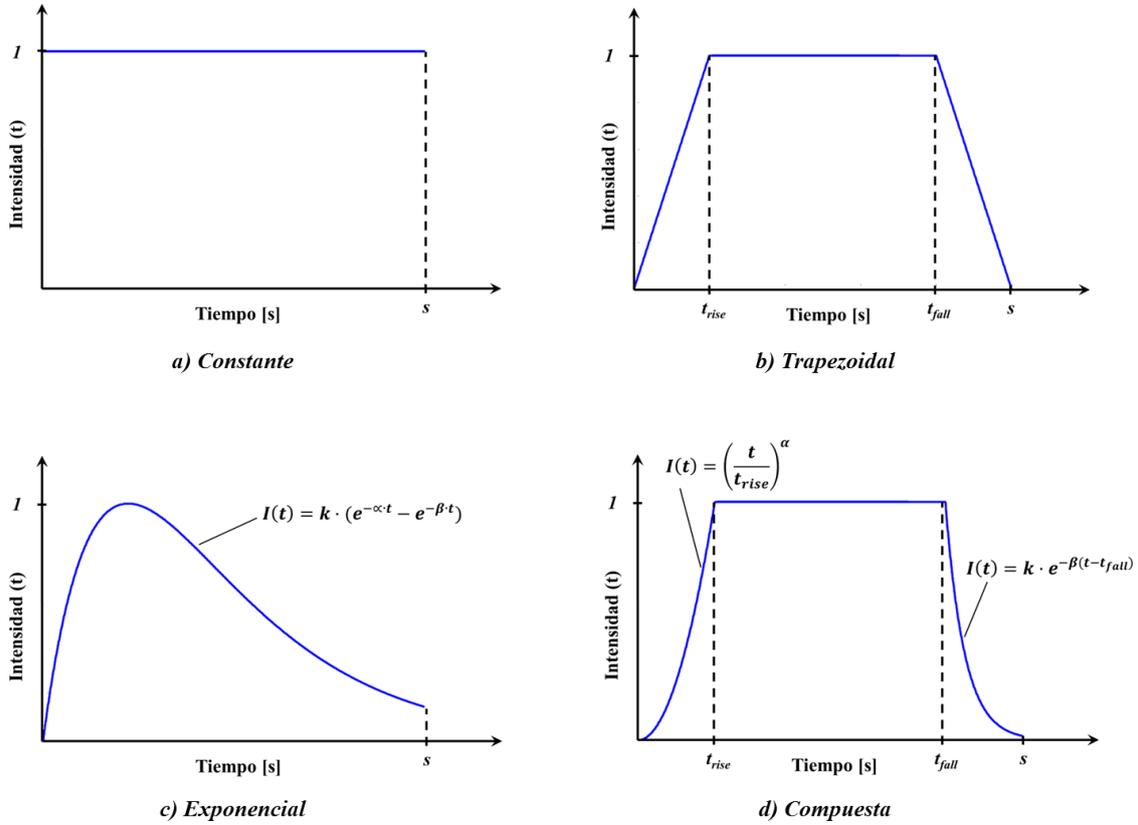


Figura 2.1. Tipos de funciones de intensidad envolvente. Fuente: Elaboración propia a partir de (Barbat et al., 1994b).

De esta forma, el modelo queda definido conociendo las características de un número n de ondas sinusoidales (ángulos de fase, frecuencias y amplitudes) y la función de intensidad envolvente. Obtenida la historia de aceleraciones, las velocidades y desplazamientos se obtienen mediante la integración en el tiempo de las anteriores, habiéndose utilizado para ello el método de Newmark.

El cálculo de las amplitudes requiere de un desarrollo estadístico-matemático que no se expone aquí. La solución obtenida, detallada en (Barbat et al., 1994b), es la siguiente:

$$A_i \approx \sqrt{2 \cdot G_z(\omega_i) \cdot \Delta\omega_i} \quad (2.2)$$

Tampoco se desarrolla aquí la forma de obtener la función de densidad espectral de potencia, cuya expresión, obtenida de un amplio desarrollo estadístico-matemático que se puede ver, junto con los parámetros implicados, en (Barbat et al., 1994b), es la siguiente:

$$G_z(\omega) \approx \frac{1}{\omega_n \cdot \left(\frac{\pi}{4 \cdot \xi_s} - 1 \right)} \cdot \left[\frac{\omega_n^2 \cdot S_v^2(\omega_n)}{\zeta_{s,p}^2} - \int_0^{\omega_n} G_z(\omega) \cdot d\omega \right] \quad (2.3)$$

que es la función buscada definida de manera recursiva. Para evaluar la expresión anterior, se empieza por la frecuencia natural más baja, donde la contribución del término integral de la

derecha es nula; en el resto de pasos, para una frecuencia arbitraria ω_i , se conoce la integral numérica de $G_z(\omega_i)$ y, por lo tanto, se puede evaluar $G_z(\omega_{i+1})$.

Como ya se ha mencionado, la generación de la señal artificial parte de un espectro de referencia. En SimulAcel© se han implementado los espectros de respuesta de referencia definidos en la NCSE-02 (Ministerio de Fomento, 2009) y en la NCSP-07 (Ministerio de Fomento, 2008). En futuras versiones del programa se plantea la incorporación de los espectros del Eurocódigo 8, espectros definidos por el usuario y espectros obtenidos a partir de un determinado acelerograma medido en campo.

2.2 MEJORAS DE LA SEÑAL GENERADA

La señal generada por el procedimiento descrito presenta una serie de deficiencias que, en algunos casos pueden ser completamente eliminadas, y en otros fácilmente atenuadas. Para ello se han seguido las especificaciones expuestas en (Barbat et al., 1994b), que establece un total de tres ajustes orientados a la mejora de la calidad de la señal artificial.

2.2.1 AJUSTE DE LÍNEA BASE

El acelerograma $a(t)$ generado por el método anterior se puede procesar de igual forma que si se tratara de un registro de un terremoto real. La corrección de la línea de base se realiza para intentar que tanto la velocidad como el desplazamiento de la señal generada tiendan a un valor nulo al final del terremoto. Para ello se realiza una corrección parabólica de la línea de base del acelerograma, una corrección cuyos coeficientes se eligen para minimizar el valor cuadrático medio de la velocidad.

Considerando la variable $a(t)$ como un acelerograma obtenido mediante el procedimiento descrito, el acelerograma tras la corrección de línea base $a'(t)$ tiene la siguiente forma:

$$a'(t) = a(t) + c_0 + c_1 \cdot \frac{t}{s} + c_2 \cdot \frac{t^2}{s^2} \quad (2.4)$$

dónde s es la duración de la señal. Los coeficientes c_i se seleccionan de forma que el valor cuadrático medio de la velocidad en el intervalo $[0, s]$ sea mínimo.

2.2.2 AJUSTE DE PICO DEL ACELEROGRAMA

La aceleración máxima que resulta del procedimiento de obtención de acelerogramas sintéticos es una variable aleatoria; a pesar de que el espectro de respuesta de referencia se escalada adecuadamente con una aceleración máxima, el procedimiento no garantiza que en el resultado final aparezca dicha aceleración, aunque la diferencia existente entre la obtenida y la esperada sea relativamente pequeña.

Para realizar el ajuste de la aceleración máxima se debe actuar según dos casos diferenciados:

- Si el valor absoluto de la aceleración máxima obtenida es menor que la especificada, simplemente se puede modificar su valor absoluto al valor deseado.
- Si el valor absoluto de la aceleración máxima obtenida es mayor que la especificada, se escalan todas aquellas aceleraciones cuyo valor absoluto sobrepase el especificado.

Con el ajuste descrito se puede garantizar que sólo exista una aceleración máxima de valor absoluto igual al prefijado.

2.2.3 AJUSTE DE LA RESPUESTA ESPECTRAL

El hecho de que el procedimiento de cálculo utilice expresiones aproximadas, junto con las dos correcciones realizadas en los apartados anteriores, propician que el espectro de respuesta de la señal generada no sea exactamente igual al de referencia, aunque sí compatible. Por lo tanto, aparece la posibilidad de mejorar el ajuste entre ambos espectros.

Este ajuste supone un procedimiento cíclico en el que se compara el espectro de respuesta de la señal con el de referencia en un conjunto de frecuencias de control ω_j (que por defecto pueden ser iguales al número total de frecuencias usadas en el cálculo), obteniendo en cada frecuencia de control la relación entre la respuesta deseada y la calculada. El ajuste de la respuesta espectral pasa por la modificación del valor correspondiente de la función de densidad espectral de potencia en proporción al cuadrado de la siguiente relación:

$$G(\omega_j)_{i+1} = G(\omega_j)_i \cdot \left[\frac{S_v(\omega_j)}{S_{v,i}(\omega_j)} \right]^2 \quad (2.5)$$

Con estos nuevos valores se genera una nueva señal de excitación, llevando a cabo el procedimiento cíclico junto con el resto de ajustes hasta alcanzar un grado de error aceptable. Este error se ha evaluado como el error relativo medio de todos los valores analizados.

El procedimiento descrito no es convergente en todas las frecuencias de control. Esto es así porque el proceso iterativo se basa en la hipótesis de que el valor de la densidad espectral de potencia en una frecuencia dada depende exclusivamente de tal frecuencia, hipótesis que no es del todo cierta pues también existe dependencia de los valores de dicha función en frecuencias cercanas. Sin embargo, en las primeras iteraciones del proceso el efecto de las frecuencias lejanas es despreciable, por lo que es una buena hipótesis para procesos cíclicos con pocas iteraciones.

2.3 PARÁMETROS DE INTERÉS

Tras la generación y corrección de la señal artificial, es posible definir y calcular algunos parámetros que pueden resultar de interés para el análisis físico de la señal sísmica. Algunos de los parámetros más importantes dentro del campo de la ingeniería sísmica se han obtenido de (Carreño et al., 1999) y (Susagna et al., 2012), detallándose su significado físico y la expresión que permite obtenerlos en los siguientes puntos:

- **Intensidad de Arias (IA):** es una medida de la energía del terremoto, definida de acuerdo a la siguiente expresión, donde $a(t)$ es la historia de aceleraciones y t_f es el tiempo total de la señal:

$$IA = \frac{\pi}{2 \cdot g} \cdot \int_0^{t_f} a^2(t) \cdot dt \quad (2.6)$$

- **Duración significativa (TD):** este concepto relaciona la duración con la fase de máxima energía del movimiento, quedando representado por el tiempo transcurrido entre los instantes en los que se alcanza el 5% y el 95% del valor de la intensidad de Arias.
- **Gráfico de Husid:** permite la visualización gráfica del significado de la duración significativa. Se trata de una gráfica en el que el eje de abscisas contiene la duración de la señal, y el eje de ordenadas los valores acumulados normalizados de la intensidad de Arias en cada instante t ; la expresión resultante es la siguiente:

$$\frac{It}{IA} = \frac{\frac{\pi}{2 \cdot g} \cdot \int_0^t a^2(t) \cdot dt}{\frac{\pi}{2 \cdot g} \cdot \int_0^{t_f} a^2(t) \cdot dt} \quad (2.7)$$

- **Velocidad Absoluta Acumulada (CAV):** es una función que está relacionada con el daño estructural al incluir, además de la amplitud del movimiento, los efectos acumulativos de su duración. Su expresión es la siguiente:

$$CAV = \int_0^{t_f} |a(t)| \cdot dt \quad (2.8)$$

- **Intensidad de Houssner (IH):** es usada como medida del daño potencial del acelerograma en estructuras tipo. Se obtiene, en función del período T y el índice de amortiguamiento ξ de la estructura, como:

$$IH = \int_{0,1}^{2,5} S_v(T, \xi) \cdot dT \quad (2.9)$$

3 INSTALACIÓN DEL PROGRAMA

Para instalar el programa SimulAcel© y proceder a su uso basta con seguir las siguientes indicaciones según el caso:

- En ordenadores con MatLab instalado, es suficiente con ejecutar el archivo “SimulAcel.exe” para utilizar el programa.
- En ordenadores sin MatLab instalado, es necesario seguir los siguientes pasos:
 - 1) Instalación del componente RunTime que permite la ejecución de archivos generados con MatLab. Para ello, ejecutar el archivo “MCRInstaller.exe”.
 - 2) Ejecución del archivo “SimulAcel.exe” para la utilización del programa.

NOTA 1: El programa ha sido desarrollado en una resolución de 1920x1080, por lo que se recomienda utilizar dicha resolución de pantalla durante su uso para asegurar la visualización de todos sus componentes.

NOTA 2: Se recomienda que los archivos con extensión .txt exportados por el usuario durante la ejecución del programa sean visualizados con un visor de texto tipo NotePad o similar.

4 USO DEL PROGRAMA

SimulAcel© dispone de una interfaz gráfica sencilla e intuitiva que permite la introducción de datos por el usuario en un entorno guiado y la exportación de los resultados más significativos del proceso de generación de señales sísmicas artificiales. A continuación se describen las principales características de cada uno de los complementos que posee el programa.

4.1 INICIO DEL PROGRAMA

Una vez instalado el programa, la ventana de inicio del mismo es la que se presenta en la **Figura 4.1**. Para acceder a los componentes del programa se debe pulsar el botón “COMENZAR”.



Figura 4.1. Ventana de inicio de SimulAcel©. Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente, aparecerá un mensaje de aviso con la recomendación de usar una resolución de pantalla de 1920x1080 para visualizar de manera óptima el entorno de trabajo y sus componentes (ver **Figura 4.2**). A continuación, pulsar “OK” para cerrar el aviso.

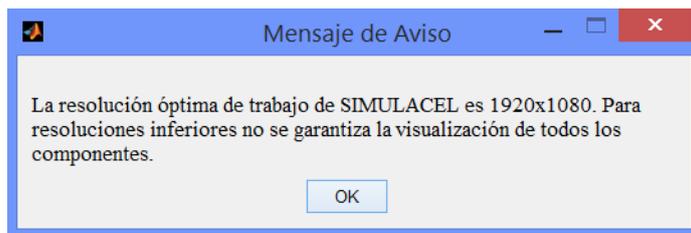


Figura 4.2. Mensaje de aviso de resolución de pantalla de SimulAcel©. Fuente: Elaboración propia.

4.2 MÓDULOS DEL PROGRAMA

El programa SimulAcel© se maneja mediante una barra de herramientas situada en la parte superior izquierda del entorno de trabajo y compuesta por cinco botones. La barra de herramientas se muestra en la *Figura 4.3*, dónde se pueden apreciar los distintos módulos del programa:

- **Módulo 1. Pre-proceso:** menú para la definición del espectro de referencia en el que se basará la señal sísmica generada (S) y para la definición de la función de intensidad envolvente que dará forma al acelerograma calculado (I).
- **Módulo 2. Cálculo:** menú dónde se introducen los parámetros de control del cálculo del acelerograma, así como las mejoras de la señal que se pretenden realizar.
- **Módulo 3. Post-proceso:** menú para visualizar los resultados de la señal artificial generada y algunos parámetros de interés para la ingeniería.
- **Ayuda:** botón que permite consultar el Manual de Usuario de SimulAcel©.

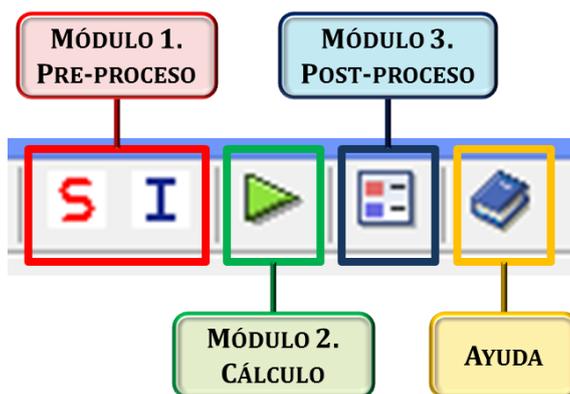


Figura 4.3. Módulos que componen el programa SimulAcel©. Fuente: Elaboración propia.

4.3 MÓDULO 1. PRE-PROCESO

El módulo de pre-proceso dispone de dos menús diferenciados: un primer menú (S), dónde se define el espectro de referencia en el que se basará la señal artificial generada, y un segundo menú (I), dónde se define la función de intensidad envolvente que da forma al acelerograma.

4.3.1 MENÚ (S): DEFINICIÓN DEL ESPECTRO DE REFERENCIA

Los componentes del menú (S) se muestran en la **Figura 4.4**, pudiendo distinguir cuatro zonas diferenciadas:

- **Zona A:** Tipo de Espectro según Normativa.
- **Zona B:** Datos de Entrada.
- **Zona C:** Datos Derivados.
- **Zona D:** Resultados Obtenidos.

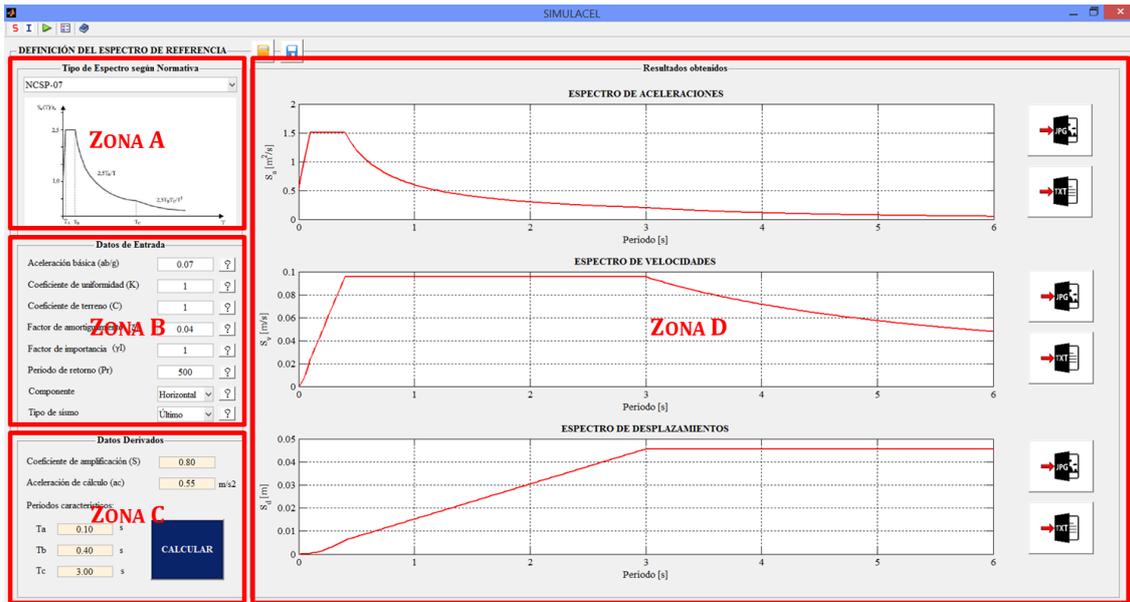


Figura 4.4. Componentes del menú (S). Fuente: Elaboración propia.

4.3.1.1. Zona A: Tipo de Espectro según Normativa

La zona A contiene una lista desplegable (ver **Figura 4.5**) en la que se puede elegir la normativa a considerar a la hora de definir el espectro de referencia. En la actual versión de SimulAcel©, las opciones son: NCSE-02 y NCSP-07. Elegida la normativa de referencia, se muestra una imagen con el espectro tipo definido y sus parámetros característicos.

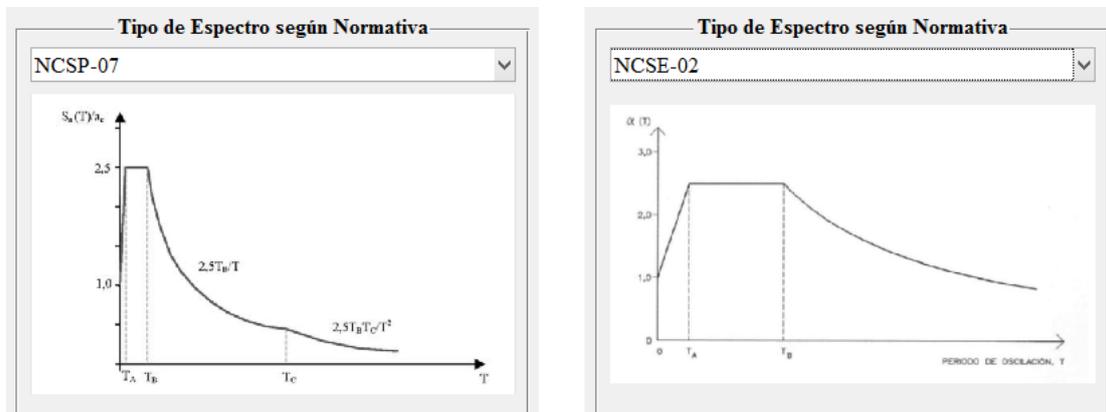


Figura 4.5. Zona A del menú (S): NCSP-07 (izquierda) y NCSE-02 (derecha). Fuente: Elaboración propia.

4.3.1.2. Zona B: Datos de Entrada

La zona B permite la introducción de los diferentes datos que permiten la definición del espectro normativo de referencia. En función del tipo de espectro elegido, los datos de entrada difieren (ver *Figura 4.6*):

- **Aceleración básica (ab/g):** relación de “ab”, o aceleración básica, entre la gravedad. Su valor se puede encontrar en el Anejo I de la NCSE-02 (Ministerio de Fomento, 2009) o en el Anejo I de la NCSP-07 (Ministerio de Fomento, 2008) para distintas ubicaciones de España.
- **Coefficiente de uniformidad (K):** coeficiente de contribución. Su valor se puede encontrar en el Anejo I de la NCSE-02 (Ministerio de Fomento, 2009) o en el Anejo I de la NCSP-07 (Ministerio de Fomento, 2008) para distintas ubicaciones de España.
- **Coefficiente de terreno (C):** tipo de terreno en relación al movimiento sísmico del suelo.
- **Factor de amortiguamiento (ξ):** relación entre el amortiguamiento de la estructura analizada y su amortiguamiento crítico. Se introduce en tanto por uno.
- **Factor de importancia (γ_I):** factor que define si el sismo es normal (1) o especial (1,3).
- **Período de retorno (Pr):** período de retorno del sismo de cálculo en años.
- **Componente:** componente horizontal o vertical del sismo de cálculo. La vertical se corresponde con el 70% de la horizontal.
- **Tipo de sismo:** último o frecuente. Esta opción sólo está disponible en el caso de elegir como espectro de referencia el definido en la NCSP-07.

Datos de Entrada (NCSP-07)		Datos de Entrada (NCSE-02)	
Aceleración básica (ab/g)	0.07	Aceleración básica (ab/g)	0.07
Coefficiente de uniformidad (K)	1	Coefficiente de uniformidad (K)	1
Coefficiente de terreno (C)	1	Coefficiente de terreno (C)	1
Factor de amortiguamiento (ξ)	0.04	Factor de amortiguamiento (ξ)	0.04
Factor de importancia (γ_I)	1	Factor de importancia (γ_I)	1
Periodo de retorno (Pr)	500	Periodo de retorno (Pr)	500
Componente	Horizontal	Componente	Horizontal
Tipo de sismo	Último		

Figura 4.6. Zona B del menú (S): NCSP-07 (izquierda) y NCSE-02 (derecha). Fuente: Elaboración propia.

Los botones de ayuda  abren ventanas con información acerca de los diferentes parámetros; por ejemplo, para el parámetro “Coeficiente de terreno (C)”, se abre la ventana mostrada en la *Figura 4.7*.

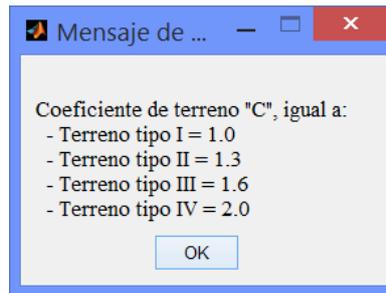


Figura 4.7. Ejemplo de botón de ayuda. Fuente: Elaboración propia.

4.3.1.3. Zona C: Datos Derivados

La zona C es un apartado no editable, en el que aparece el botón “CALCULAR” que permite definir el espectro de respuesta una vez se han editado los parámetros de la zona B (ver **Figura 4.8**). Los parámetros que se pueden visualizar son:

- **Coeficiente de amplificación (S):** coeficiente de amplificación del terreno que tiene en cuenta la aceleración sísmica básica “ a_b ”, el factor de importancia “ γ_I ” y el período de retorno “ Pr ”.
- **Aceleración de cálculo (ac):** aceleración sísmica de cálculo, que se define como el valor máximo de aceleración que alcanzará el terreno.
- **Períodos característicos:** serie de valores que permiten definir el espectro de referencia. Para el espectro de la NCSP-07 son necesarios tres valores (T_a , T_b y T_c), mientras que para el espectro de la NCSE-02 únicamente son necesarios dos (T_a y T_b).

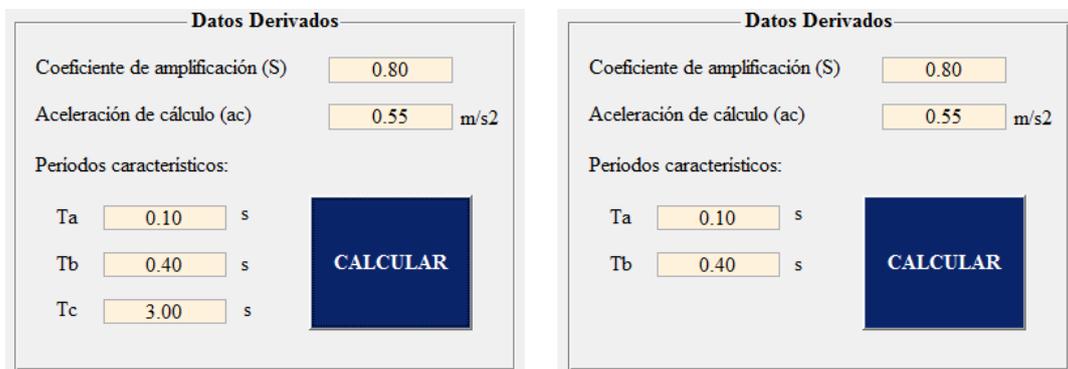


Figura 4.8. Zona C del menú (S): NCSP-07 (izquierda) y NCSE-02 (derecha). Fuente: Elaboración propia.

4.3.1.4. Zona D: Resultados obtenidos

El botón “CALCULAR” de la zona C activa los componentes de la zona D, en la cual se pueden ver los resultados del espectro generado; los componentes de la zona D son (ver **Figura 4.9**):

- Gráfica del espectro obtenido, en términos de aceleraciones, velocidades y desplazamiento.
- Botones de exportación de resultados que permiten la generación de archivos con el nombre definido por el usuario en la ubicación deseada.

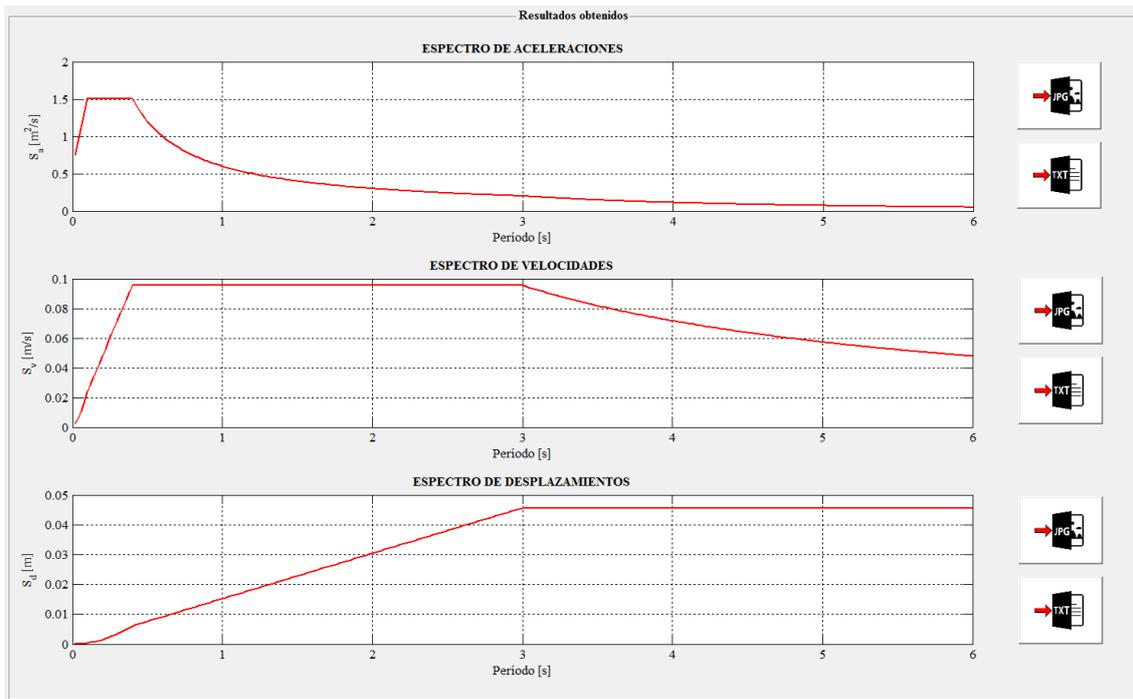


Figura 4.9. Zona D del menú (S). Fuente: Elaboración propia.

Los botones disponibles son los siguientes:



Exportación de imágenes a formato .jpg.



Exportación de resultados a formato .txt.

4.3.1.5. Guardar y cargar datos del espectro de referencia

Una vez definido el espectro de referencia siguiendo las instrucciones mostradas en los apartados anteriores, es posible **guardar** los datos para su uso en sesiones posteriores. Para ello se usaría el siguiente botón, situado al lado derecho del título del menú:



Guardar los datos que definen el espectro en formato .mat.

En una sesión posterior de SimulAcel© es posible recuperar los datos guardados a partir del siguiente botón de **cargar**:



Cargar los datos que definen el espectro en formato .mat.

4.3.2 MENÚ (I): DEFINICIÓN DE LA FUNCIÓN DE INTENSIDAD

Los componentes del menú (I) son los mostrados en la **Figura 4.10**, pudiendo distinguir tres zonas diferenciadas:

- **Zona A:** Tipo de función.
- **Zona B:** Datos de entrada.
- **Zona C:** Resultados.

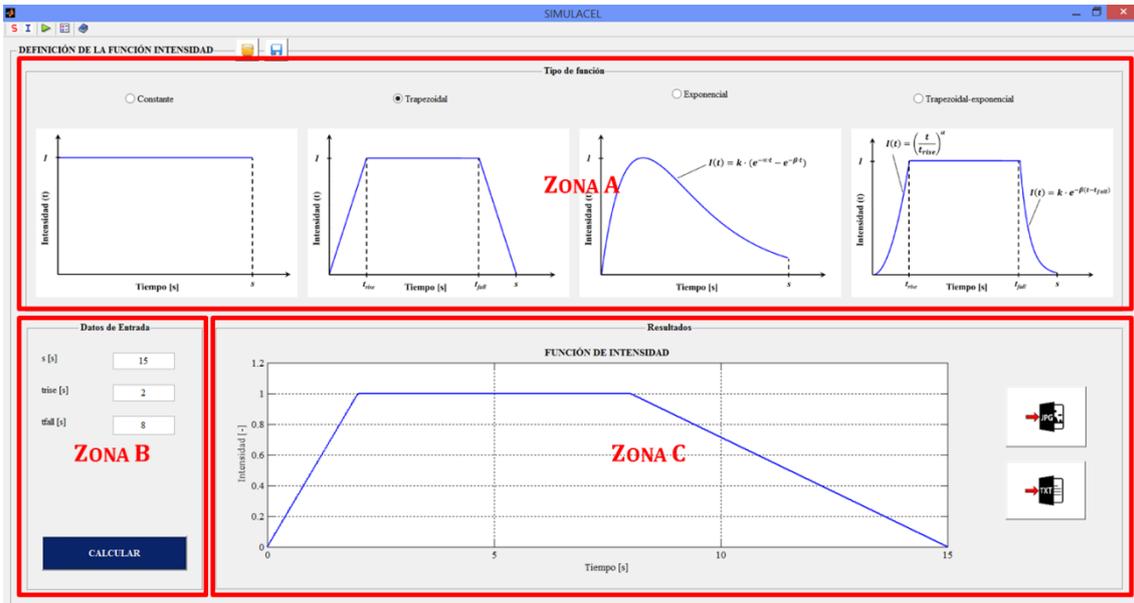


Figura 4.10. Componentes del menú (I). Fuente: Elaboración propia.

4.3.2.1. Zona A: Tipo de función

La zona A permite la definición del tipo de función de intensidad que se quiere usar para dar forma al acelerograma de la señal artificial generada (ver **Figura 4.11**). En la actual versión de SimulAcel© se puede elegir entre las siguientes opciones:

- **Función constante:** determina un valor constante a lo largo de toda la duración de la señal.
- **Función trapezoidal:** establece una función de intensidad con un tramo de subida de forma lineal, un tramo constante y un tramo de bajada de forma lineal.
- **Función exponencial:** determina una evolución exponencial de la función de intensidad.
- **Función trapezoidal-exponencial o compuesta:** define una función de intensidad con un tramo de subida de forma exponencial, un tramo constante y un tramo de bajada de forma exponencial.

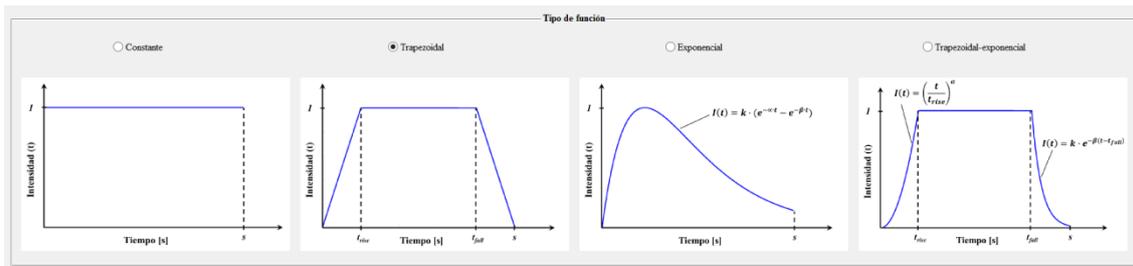


Figura 4.11. Zona A del menú (I): tipos de función de intensidad disponibles en SimulAcel©. Fuente: Elaboración propia.

4.3.2.2. Zona B: Datos de entrada

Dependiendo del tipo de función de intensidad elegida en la zona A, los datos a introducir para su definición son diferentes en la zona B. Para cada tipo se tienen los siguientes datos (ver Figura 4.12):

- **Función constante:** duración de la señal “s”.
- **Función trapezoidal:** duración de la señal “s”, fin del tramo de subida “trise” e inicio del tramo de bajada “tfall”.
- **Función exponencial:** duración de la señal “s” y parámetros de la función exponencial (“α” y “β”).
- **Función trapezoidal-exponencial o compuesta:** duración de la señal “s”, fin del tramo de subida “trise”, inicio del tramo de bajada “tfall” y parámetros de la función exponencial (“α” y “β”).

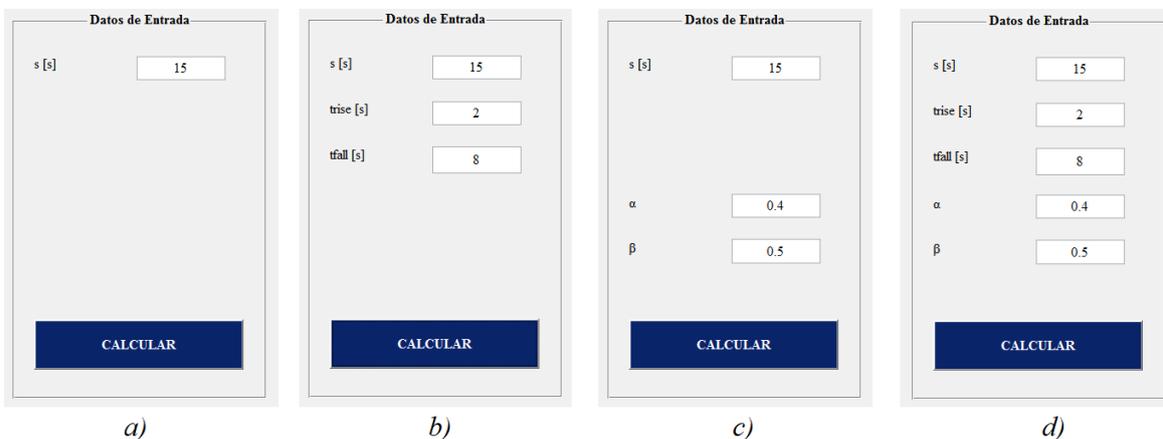


Figura 4.12. Zona B del menú (I): datos de entrada para cada función de intensidad: constante (a), trapezoidal (b), exponencial (c) y compuesta (d). Fuente: Elaboración propia.

En la zona B también se encuentra el botón “CALCULAR”, mediante el cual se define la función de intensidad elegida da acuerdo a los parámetros editados y se activan los componentes de la zona C.

4.3.2.3. Zona C: Resultados

En la zona C se puede visualizar la función de intensidad definida por el usuario (ver *Figura 4.13*).

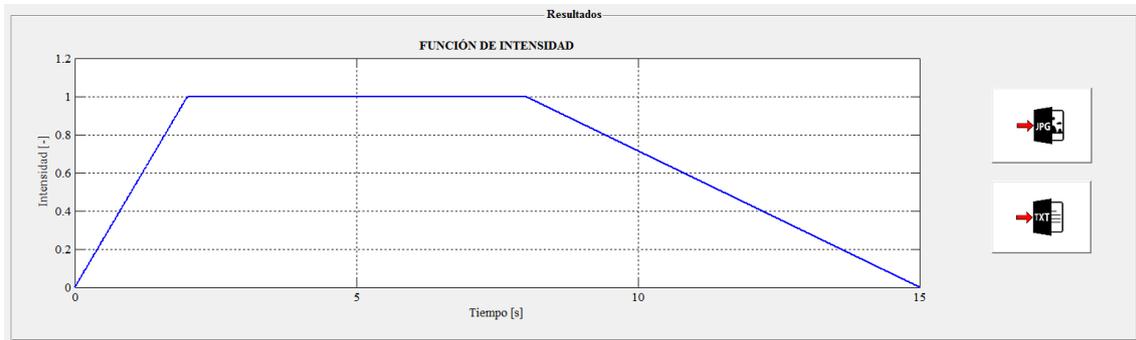
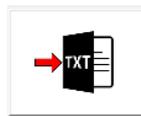


Figura 4.13. Zona C del menú (I). Fuente: Elaboración propia.

El usuario también puede exportar los valores de la función de intensidad a partir de los siguientes botones:



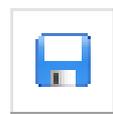
Exportación de imágenes a formato .jpg.



Exportación de resultados a formato .txt.

4.3.2.4. Guardar y cargar datos de la función de intensidad

Una vez definida la función de intensidad siguiendo las instrucciones mostradas en los apartados anteriores, es posible **guardar** los datos para su uso en sesiones posteriores. Para ello se usaría el siguiente botón, situado al lado derecho del título del menú:



Guardar los datos que definen la función en formato .mat.

En una sesión posterior de SimulAcel© es posible recuperar los datos guardados a partir del siguiente botón de **cargar**:



Cargar los datos que definen la función en formato .mat.

4.4 MÓDULO 2. CÁLCULO

Los componentes del Módulo 2 – Cálculo son los mostrados en la **Figura 4.14**, existiendo tres zonas diferenciadas:

- **Zona A:** Datos para la solución.
- **Zona B:** Control de la solución.
- **Zona C:** Ajuste de la respuesta espectral.

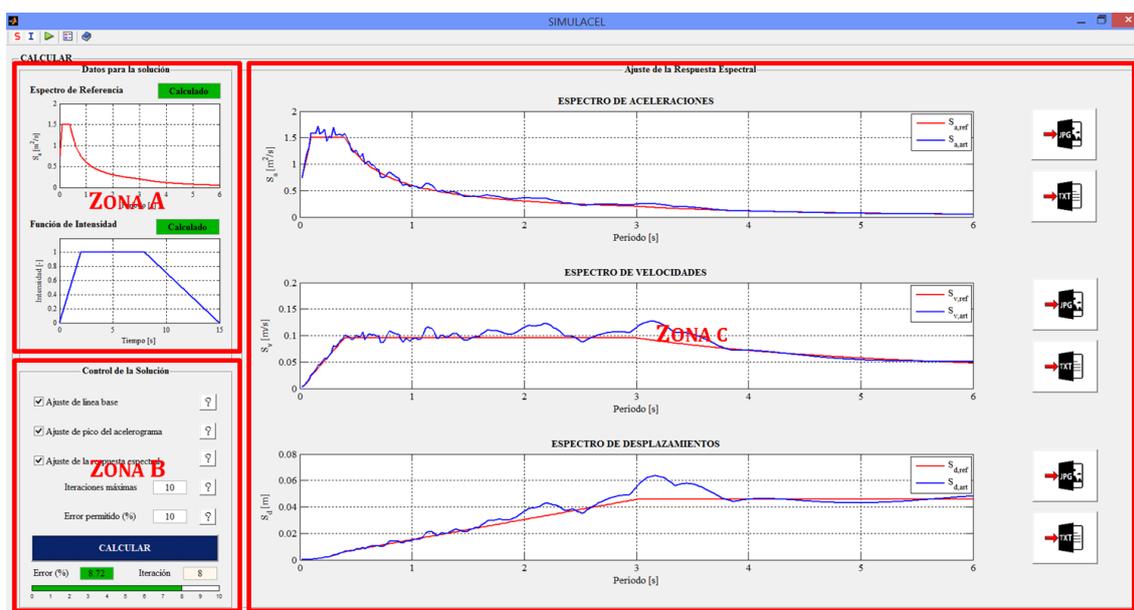


Figura 4.14. Componentes del Módulo 2 – Cálculo de SimulAcel©. Fuente: Elaboración propia.

4.4.1 ZONA A: DATOS PARA LA SOLUCIÓN

En la zona A se muestran los datos previos necesarios para el cálculo de la señal sísmica artificial (ver **Figura 4.15**), es decir, el espectro de referencia y la función de intensidad. El programa avisa al usuario si éste no ha calculado previamente los datos, mostrando cuadros de texto con la etiqueta “Sin calcular”; una vez el usuario haya calculado tanto el espectro de referencia en el menú (S) como la función de intensidad en el menú (I) la etiqueta de dichos cuadros de texto cambia a “Calculado”, estando en disposición de pasar a la siguiente zona del módulo.

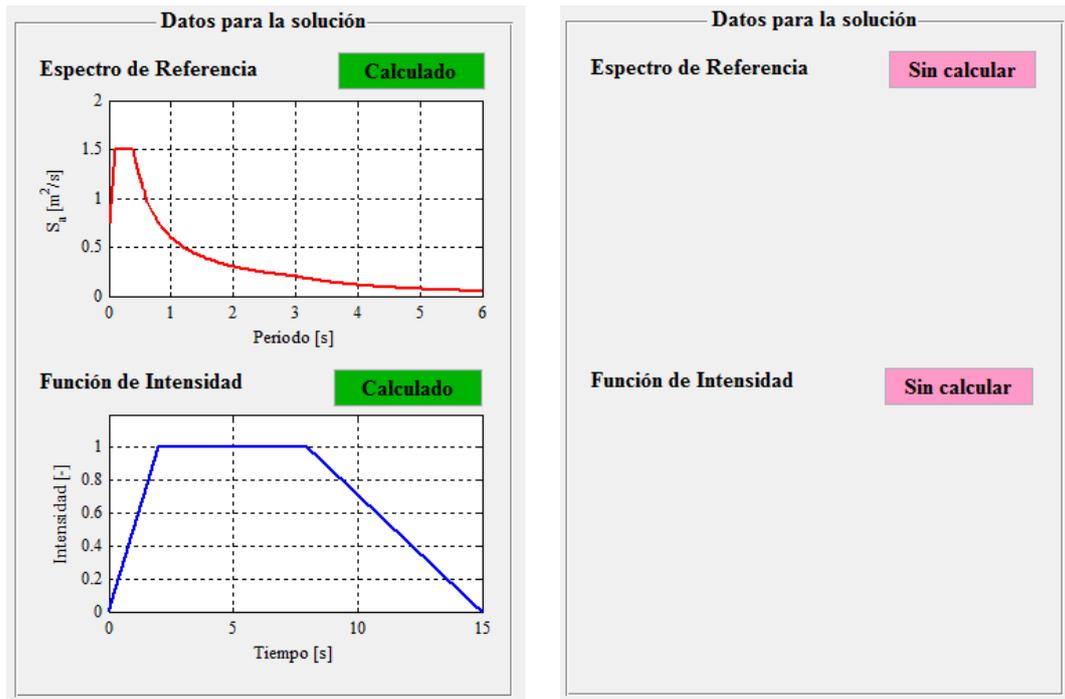


Figura 4.15. Zona A del Módulo 2: datos calculados (izquierda) y datos sin calcular (derecha). Fuente: Elaboración propia.

4.4.2 ZONA B: CONTROL DE LA SOLUCIÓN

En la zona B se establecen varios aspectos necesarios para el cálculo de la señal artificial. En primer lugar, se definen los ajustes de la señal que se quieren realizar (según se vio en el Apartado 2.2); por defecto, el programa selecciona los tres ajustes. Para el tercer ajuste, referente a la respuesta espectral de la señal, es necesario definir un número de iteraciones máximas (por defecto 10) y un error relativo medio máximo admisible en el cálculo de la solución (por defecto 10%). Los botones de ayuda abren ventanas con información acerca de los diferentes parámetros descritos. Todo ello se muestra en la **Figura 4.16**.

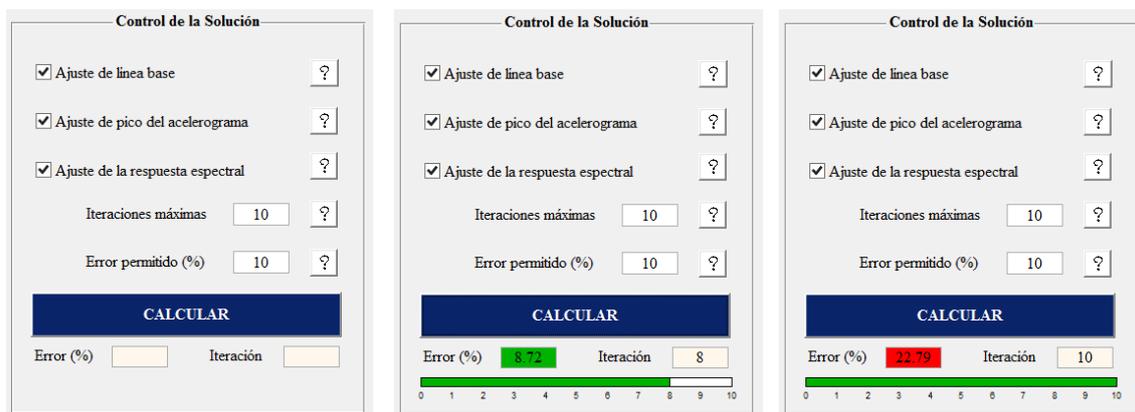


Figura 4.16. Zona B del Módulo 2: antes de calcular (izquierda), después de cálculo exitoso (centro) y después de cálculo fallido (derecha). Fuente: Elaboración propia.

El botón "CALCULAR" incluido en la zona B permite la generación de las señales sísmicas artificiales. Al pulsarlo, se habilita la barra de progreso del cálculo; en el cuadro de texto "Iteración" se muestra la iteración actual en la que se encuentra el cálculo, mientras que en el cuadro de texto "Error" se muestra el error relativo medio obtenido en dicha iteración.

El cálculo finaliza una vez se alcanza el error máximo admisible o cuando se llega al número máximo de iteraciones. Al finalizar el cálculo, pueden aparecer los mensajes que se muestran en la **Figura 4.17**:

- **Mensaje de éxito:** el error obtenido es menor al admisible, por lo que la solución es aceptable de acuerdo a los términos establecidos por el usuario. En este caso, el cuadro de texto “Error” refleja el error obtenido y queda marcado en color verde.
- **Mensaje de advertencia:** el error obtenido es mayor al admisible, por lo que la solución no cumple con los términos establecidos por el usuario. En este caso, el cuadro de texto “Error” refleja el error obtenido y queda marcado en color rojo. Cuando se produzca esta incidencia, se recomienda al usuario repetir el cálculo hasta alcanzar valores aceptables; el hecho de que se produzca este “fallo” subyace en el carácter aleatorio de la señal, siendo difícil en algunos casos conseguir un error reducido.

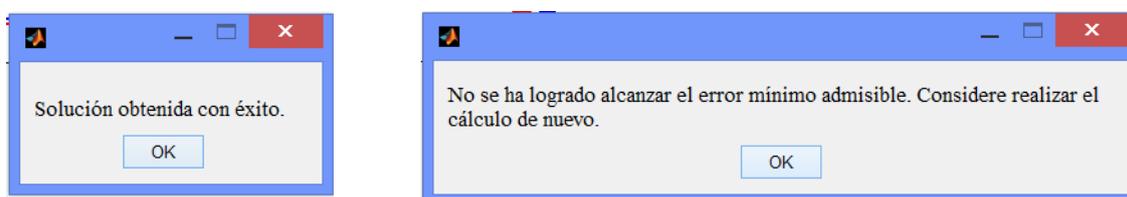


Figura 4.17. Mensajes de aviso al usuario tras solución exitosa (izquierda) y solución fallida (derecha). Fuente: *Elaboración propia.*

4.4.3 ZONA C: AJUSTE DE LA RESPUESTA ESPECTRAL

La zona C (ver **Figura 4.18**) permite visualizar gráficamente el ajuste de la respuesta espectral de la señal artificial generada con respecto al espectro de referencia definido en el menú (S). Se muestran ambos espectros en términos de aceleraciones, velocidades y desplazamientos.

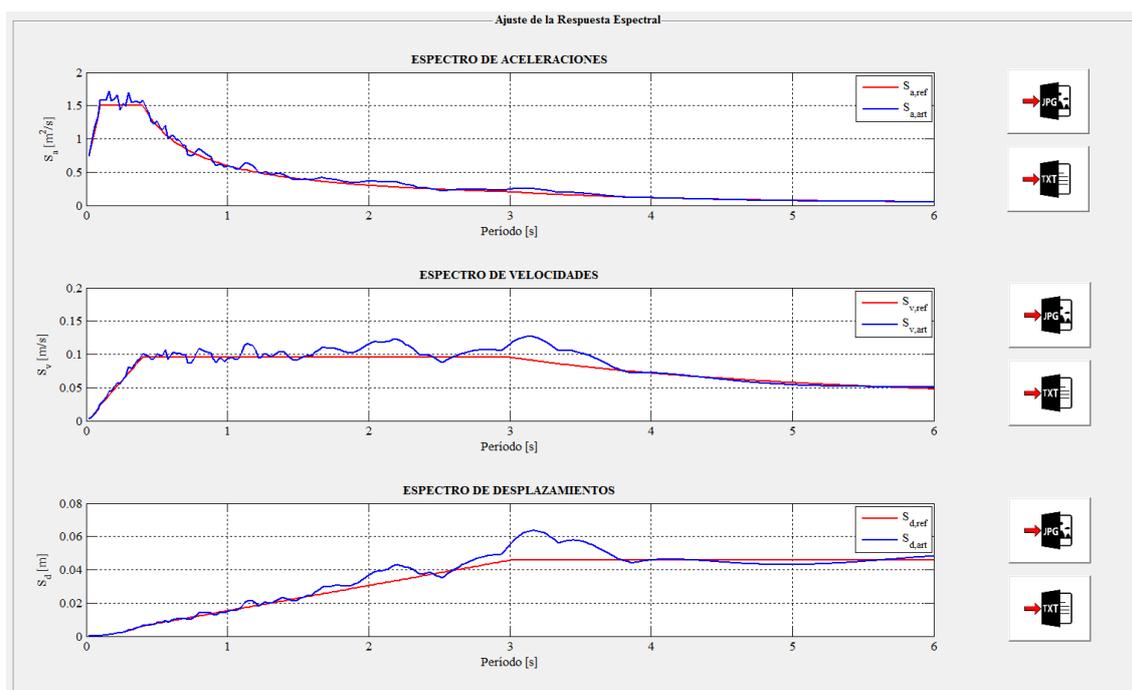
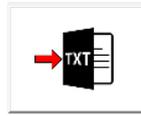


Figura 4.18. Zona C del Módulo 2. Fuente: *Elaboración propia.*

El usuario también puede exportar los valores de ambos espectros (espectro de referencia y espectro calculado a partir de la señal artificial) a partir de los siguientes botones:



Exportación de imágenes a formato .jpg.



Exportación de resultados a formato .txt.

4.5 MÓDULO 3. POST-PROCESO

Los componentes del Módulo 3. Post-proceso se muestran en la **Figura 4.19**, donde se aprecian dos zonas diferenciadas:

- **Zona A:** Propiedades de la señal generada y parámetros de interés.
- **Zona B:** Forma de la señal.



Figura 4.19. Componentes del Módulo 3. Fuente: Elaboración propia.

4.5.1 ZONA A: PROPIEDADES DE LA SEÑAL GENERADA

En la zona A se muestran, a modo de resumen, las definiciones, ajustes y resultados más significativos utilizados en la generación de la señal sísmica artificial. Los parámetros expuestos son los siguientes (ver **Figura 4.20**):

- Espectro de referencia utilizado.
- Función de intensidad utilizada.
- Error relativo medio obtenido en tanto por ciento.

- Iteraciones realizadas.
- Ajustes realizados y no realizados.
- Duración de la señal generada en s.
- Aceleración máxima obtenida en m/s^2 .
- Velocidad máxima obtenida en m/s.
- Desplazamiento máximo obtenido en m.
- Intensidad de Arias en m/s.
- Duración significativa en s.
- Velocidad Absoluta Acumulada en m/s.
- Intensidad de Housner en m/s.
- Gráfica de la función de Husid.

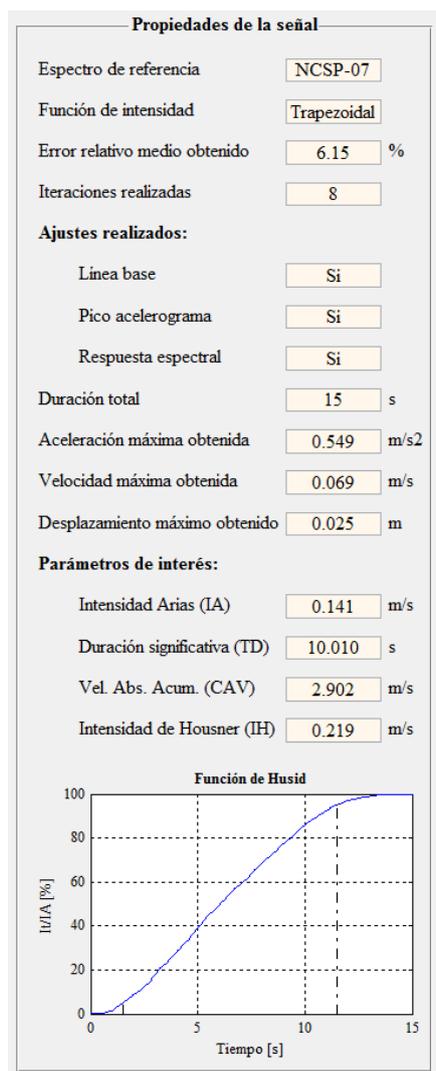


Figura 4.20. Zona A del Módulo 3. Fuente: Elaboración propia.

4.5.2 ZONA B: FORMA DE LA SEÑAL

La zona B muestra los resultados finales del cálculo que pueden ser usados para análisis dinámicos estructurales. Se aportan resultados gráficos de la historia de aceleraciones, velocidades y desplazamientos de la señal sísmica artificial generada (ver **Figura 4.21**).

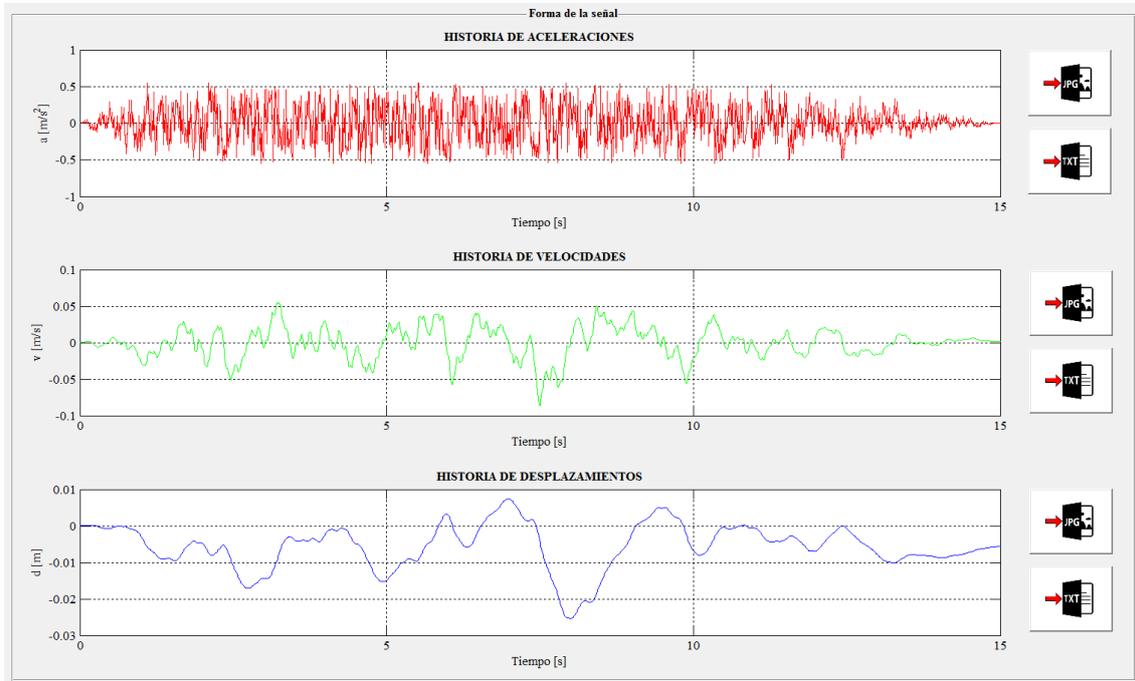
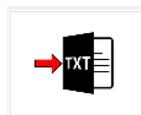


Figura 4.21. Zona B del Módulo 3. Fuente: Elaboración propia.

El usuario también puede exportar los valores de la señal artificial generada a partir de los siguientes botones:



Exportación de imágenes a formato .jpg.



Exportación de resultados a formato .txt.

4.5.3 GUARDAR Y CARGAR RESULTADOS DE LA SEÑAL GENERADA

Una vez calculada la señal sísmica artificial siguiendo las instrucciones mostradas en los apartados anteriores, es posible **guardar** los datos para su uso en sesiones posteriores. Para ello se usaría el siguiente botón, situado al lado derecho del título del menú:



Guardar los datos que definen la señal en formato .mat.

En una sesión posterior de SimulAcel© es posible recuperar los datos guardados a partir del siguiente botón de **cargar**:



Cargar los datos que definen la señal en formato .mat.

Estos botones agrupan todo el proyecto de cálculo de la señal, por lo que en una sesión posterior bastaría con utilizar el botón cargar del Módulo 3 para recuperar:

- Los datos que definen el espectro de referencia (Módulo 1: Menú (S)).
- Los datos que definen la función de intensidad (Módulo 1: Menú (I)).
- Los datos de cálculo de la señal y el ajuste respecto al espectro de referencia (Módulo 2).
- Los resultados de la señal artificial generada (Módulo 3).

4.6 AYUDA

Accediendo al menú de “Ayuda” (ver *Figura 4.22*) el usuario puede consultar el Manual de Usuario del programa SimulAcel©, tal y como se muestra en la *Figura 4.23*.

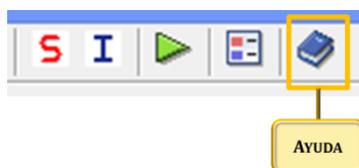


Figura 4.22. Acceso al menú de ayuda. Fuente: Elaboración propia.

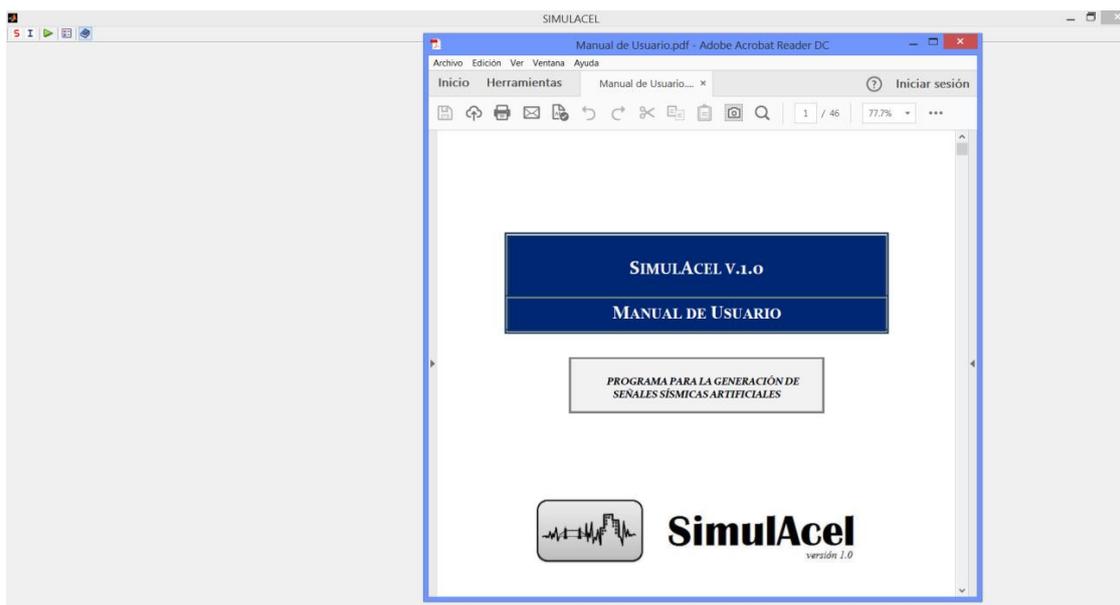


Figura 4.23. Visualización del Manual de Usuario de SimulAcel© dentro del programa. Fuente: Elaboración propia.

REFERENCIAS

Barbat, A.H. and Canet, J.M. (1994a) *Estructuras sometidas a acciones sísmicas: Cálculo por ordenador*, Barcelona: Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería.

Barbat, A.H., Orosco, L., Hurtado, J.E. and Galindo, M. (1994b) *Definición de la acción sísmica*, Barcelona: Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería.

Carreño, E., Brazo, B., Suárez, A. and Tordesillas, J.M. (1999) 'Registro y Tratamiento de Acelerogramas', *Física de la Tierra*, vol. 11, pp. 81-111.

Ministerio de Fomento (2008) *Norma de Construcción Sismorresistente: Puentes (NCSP-07)*, Centro de Publicaciones de la Secretaría General Técnica del Ministerio de Fomento.

Ministerio de Fomento (2009) *Norma de Construcción Sismorresistente: Parte general y edificación (NCSE-02)*, Centro de Publicaciones de la Secretaría General Técnica del Ministerio de Fomento.

Susagna, T., Cabañas, L., Goula, X., Alcalde, J.M. and Belvaux, M. (2012) 'Análisis de los parámetros de los acelerogramas registrados en los seísmos de Lorca, de interés para la Ingeniería', *Física de la Tierra*, vol. 24, Oct, pp. 213-234.