

Influencia de la modelización en la precisión y eficiencia de una formulación de sistemas multicuerpo flexibles

Ruth Gutiérrez, Urbano Lugrís, Javier Cuadrado

*Escuela Politécnica Superior, Universidad de A Coruña,
Mendizábal s/n, 15403 Ferrol*

Tel: 981 337400, Fax:981 337410, E-mail: rutgut@udc.es

Resumen

Recientemente, los autores han desarrollado un método preciso, robusto, eficiente y de fácil implementación para el análisis en tiempo real de sistemas multicuerpo con componentes flexibles. La flexibilidad de componentes se introduce mediante la aproximación de sistema de referencia móvil, utilizando el método de superposición modal, con modos estáticos y dinámicos de deformación. En este método, el analista debe decidir el número de modos estáticos y dinámicos de deformación y cuales de ellos van a ser relevantes en el análisis. En este trabajo se estudia la influencia de la selección modal en la precisión y eficiencia del método. Las tendencias se estudian sobre un ejemplo sencillo, académico, y se confirman sobre otro ejemplo más complejo y realista, de interés industrial.

Palabras Clave: sistema multicuerpo flexible, selección modal, modos de deformación.

Abstract

Recently, the authors have developed an efficient, robust, accurate and easy-to-implement method for the real-time analysis of rigid-flexible multibody systems. The flexible bodies are modelled by means of the floating frame of reference formulation, along with modal superposition of both static and dynamic modes. In this method, the analyst must decide the number of static and dynamic deformation modes, and which of them are relevant for the analysis. This paper studies the influence of the modal selection on the accuracy and efficiency of the abovementioned method. A simple an academic example serves to study the trends of the method, and a complex and realistic example is used to confirm such trends in industrial problems.

Keywords: flexible multibody system, modal selection, deformation modes.

1. Introducción

En los últimos años, los autores han desarrollado un método para el análisis dinámico en tiempo real de sistemas multicuerpo con componentes rígidos y flexibles [1,2]. La facilidad para trabajar con una metodología es frecuentemente una de las claves que determina la difusión y el empleo de la misma, por lo que, en este momento, resulta interesante realizar un estudio de los parámetros de modelización, que ayude al analista a efectuar el proceso de selección modal para, empleando el método de los autores, obtener unos resultados óptimos en términos de precisión y eficiencia.

El método emplea coordenadas naturales, que establecen automáticamente el número de modos estáticos a emplear en la modelización de los componentes flexibles, aunque, a criterio del analista, cualquiera de ellos puede ser despreciado imponiendo la ecuación de restricción de amplitud correspondiente nula.

Los modos dinámicos completan el campo de deformaciones de los estáticos, y tanto su número como la selección de los más influyentes en el análisis queda a criterio del analista.

2. Análisis del proceso de modelización de la flexibilidad de componentes

El número de modos de deformación introducido y el proceso de selección modal condicionan la precisión y eficiencia del método.

Cuando se habla de modelización, la idea más extendida consiste en que, cuantos más modos se introduzcan, mayor precisión se obtiene en la simulación, pero esto no es exactamente así. La introducción de modos de frecuencias crecientes dificulta el proceso de integración, aumentando el error de los resultados de la simulación.

Asimismo, la introducción de un mayor número de modos disminuye la eficiencia de la simulación en dos sentidos: por el número de pasos de tiempo, al tener que reducir el paso para tener que integrar un sistema con frecuencias cada vez mayores, y por el tamaño de la discretización de Elementos Finitos (EF) necesaria para representar correctamente los modos de deformación.

En un trabajo previo [3], se ha analizado un sistema sencillo, en el que se ve que existe un número óptimo de modos dinámicos que conduce a los mejores resultados en términos de precisión. La inclusión de un número mayor de modos dinámicos no mejora necesariamente la precisión del método, aunque siempre empeora su eficiencia.

El proceso de selección modal no es sencillo. Cuando se trata de sistemas simples, se puede emplear el método de prueba y error, hasta quedarnos con un modelo preciso y eficiente. Cuando el sistema es complejo, el problema se complica. Recientemente, se ha propuesto el método de los Factores de Participación Modal (FPM), para disponer de una estimación inicial del número óptimo de modos dinámicos que influyen en la simulación de sistemas multicuerpo complejos con componentes flexibles [4].

3. Selección modal en la simulación de un vehículo automóvil

En [2] se presenta el análisis dinámico de un sistema multicuerpo complejo, de gran tamaño, como es un vehículo automóvil. El chasis se consideró flexible, pues se pretendía obtener las tensiones sufridas por el mismo durante el movimiento. Se trata de una estructura de barras que se apoya en las cuatro suspensiones, y que, a su vez, soporta el peso del motor, del asiento y del conductor. Se efectuó la simulación de una maniobra consistente en que el vehículo está inicialmente parado, acelera en línea recta, desciende un escalón de 8 cm que se halla perpendicular al avance, y posteriormente frena hasta detenerse, con una duración total de 15 s. Se obtuvieron los momentos flectores sufridos por dos puntos del chasis, p1 y p2, situados en la parte delantera, superior e inferior respectivamente.

Para el análisis de este sistema no se ha realizado ningún proceso de selección modal: se han incluido todos los modos estáticos y dinámicos que, razonablemente, podrían influir en el comportamiento dinámico del sistema. Así, se han discriminado únicamente los modos estáticos que producen deformaciones elásticas despreciables (porque van en la dirección axial de alguna de las barras del chasis), y se han incluidos modos dinámicos hasta una frecuencia de 100 Hz. Los resultados obtenidos han sido contrastados con medidas experimentales, por lo que se puede afirmar que la base modal seleccionada permite modelizar correctamente el sistema.

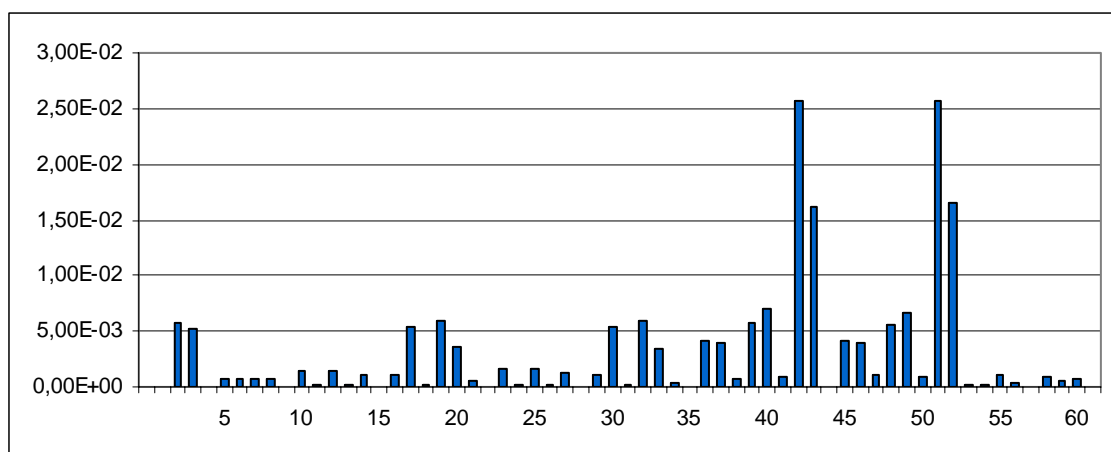


Figura 1. Amplitud máxima de cada uno de los modos estáticos de deformación

Para estudiar el proceso de selección modal en sistemas complejos, se va a aplicar el método de los FPM a la base modal, con el objetivo de, discriminando los modos de deformación poco influyentes, obtener un nuevo modelo de vehículo automóvil, igual de preciso pero más eficiente. En este caso, los FPM se pueden obtener directamente a través de la amplitud de los modos de deformación en los instantes más desfavorables, que son 5.67 s, 6.81 s y 8.04 s, ya que marcan los picos de tensión en el chasis, en la simulación efectuada en [2]. En cada uno de estos instantes críticos de tiempo, se recogen las amplitudes modales, obteniendo para cada modo tres valores de amplitud; se selecciona el máximo de los tres y se representa en la Figura 1. Así, dicha figura muestra de forma gráfica los modos estáticos de deformación más importantes. A partir de estas amplitudes, se pueden obtener directamente los FPM, en tanto por ciento, que se muestran en la Tabla 1. Estos aportan la misma información que la Figura 1 pero de forma numérica.

Tabla 1. Factores de Participación Modal (FPM)

M	FPM (%)	M	FPM (%)	M	FPM (%)	M	FPM (%)	M	FPM (%)	M	FPM (%)
1	0	11	1	21	2	31	0	41	4	51	100
2	22	12	6	22	0	32	23	42	100	52	64
3	20	13	1	23	6	33	14	43	63	53	1
4	0	14	4	24	1	34	2	44	0	54	0
5	3	15	0	25	6	35	0	45	16	55	4
6	2	16	4	26	1	36	16	46	16	56	1
7	3	17	21	27	5	37	15	47	4	57	0
8	2	18	0	28	0	38	3	48	22	58	3
9	0	19	23	29	4	39	22	49	26	59	2
10	6	20	14	30	21	40	27	50	4	60	3

El proceso de selección modal se establece en función del valor del FPM de cada modo.

En la primera columna de la Tabla 2 se distinguen cuatro modelos diferentes del vehículo automóvil, cada uno de los cuales incluye un número distinto de modos de deformación para el chasis. El criterio de selección modal se muestra en la segunda columna de la tabla, y el número de modos incluidos aparece en la tercera columna. Con estos cuatro modelos se efectúan cuatro simulaciones del movimiento del vehículo

automóvil, sometiéndolo a la maniobra descrita en [2]; en cada caso, se recoge el tiempo de CPU requerido, registrado en la cuarta columna de la Tabla 2, y el error cometido en el cálculo del momento flector en dos puntos del chasis, p1 y p2, datos que se reflejan en las columnas quinta y sexta de la Tabla 2. Este error se establece para cada simulación, comparando los resultados de la variación temporal del momento flector con los mismos resultados producidos por una simulación de referencia. Dicha simulación de referencia se realiza con un modelo de chasis que incluye todos los modos de deformación estáticos y dinámicos, y sus resultados han sido contrastados con medidas experimentales [2].

Para cada simulación, el error en momentos flectores se calcula con la siguiente expresión:

$$error = \left(\frac{1}{1501} \frac{1}{|z|_{\max}} \sum_{i=0}^{1500} |z_i - z_i^*| \right) \times 100 \quad (1)$$

siendo 1501 el número de valores considerados (pasos cada 1 cs durante 15 s de simulación), z_i representa el momento flector en el punto de medida p1 o p2, para la simulación actual, z_i^* es el mismo valor pero de la simulación de referencia, y $|z|_{\max}$ es el máximo valor absoluto del momento flector durante la simulación. Los resultados de error se expresan en porcentajes.

Tabla 2. Modelos de cálculo y resultados de las simulaciones efectuadas

Modelo	Criterio de selección	Modos incluidos	Tiempo CPU (s)	Error p1 (%)	Error p2 (%)
Referencia	Comparación con medidas experimentales	5 dinámicos y 60 estáticos	55	0.00	0.00
1	Sólo modos estáticos	0 dinámicos y 60 estáticos	44	0.31	0.04
2	Modos con FPM > 1%	0 dinámicos y 43 estáticos	30	0.43	1.49
3	Modos con FPM > 10%	0 dinámicos y 20 estáticos	15	0.61	22.85
4	Modos con FPM > 20%	0 dinámicos y 6 estáticos	10	12.30	53.57

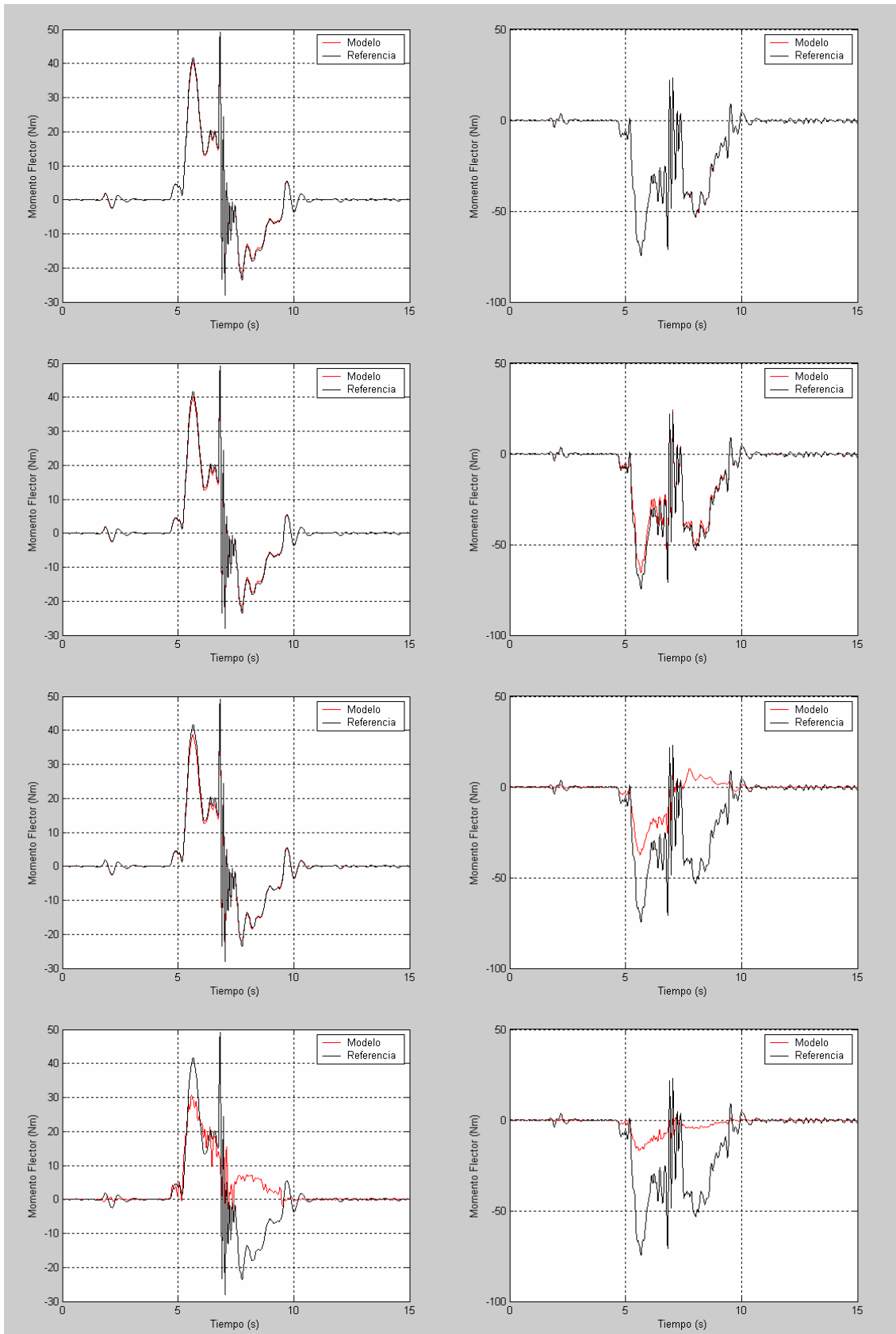


Figura 2. Comparación de resultados entre los modelos 1, 2, 3 y 4, y el modelo de referencia

La variación temporal del momento flector en los puntos superior e inferior, para las cuatro simulaciones, se muestra en la Figura 2. Las gráficas situadas a la izquierda corresponden al punto p1 mientras que las de la derecha corresponden al punto p2. En todas las gráficas se comparan los resultados de las simulaciones con la simulación de referencia. En las gráficas de la simulación #1 se aprecia que los modos dinámicos no influyen en los resultados. La simulación #2 indica que el empleo de 43 modos estáticos en lugar de 60 conduce a resultados similares en precisión, que no en eficiencia. El tiempo de CPU empleado en el cálculo en un AMD Athlon XP 2600 a 1.92 GHz es un 45 % menor. La simulación 3, que incluye 20 modos estáticos, es suficiente para captar los momentos flectores que se producen en la barra superior, pero se cometen errores importantes en la predicción de los momentos flectores en la barra inferior; en esta simulación se consigue tiempo real. Finalmente, los resultados de la simulación #4 indican que el modelo correspondiente resulta insuficiente.

4. Conclusiones

- a) Recientemente, los autores han propuesto un método para el análisis en tiempo real de sistemas multicuerpo con componentes flexibles, en el que el analista debe decidir el valor del número de modos de deformación, así como cuáles de ellos es conveniente incluir en la modelización.
 - b) La selección de los modos estáticos y dinámicos de deformación condiciona los resultados en términos de precisión y eficiencia. Para un problema concreto, la introducción de modos adicionales siempre conlleva una pérdida de eficiencia, aunque no necesariamente implique un aumento en la precisión.
 - c) La selección de modos estáticos de deformación debe tener en cuenta la situación de las fuerzas significativas en cuanto a deformación del componente flexible considerado, que fundamentalmente provienen de los enlaces, aplicadas y de inercia, para, siempre según nuestro método, introducir el punto y/o vector correspondientes, y considerar el modo de deformación estático asociado. Se puede emplear el método de los FPM para seleccionar los modos estáticos de deformación más influyentes, si bien, el criterio clásico del 1% puede resultar algo conservador.
-

- d) Los modos dinámicos que más influyen no tienen porque ser los de más baja frecuencia, pudiendo emplearse el método de los FPM para disponer de una selección modal inicial.

5. Referencias

1. J. Cuadrado, R. Gutiérrez, M.A. Naya, P. Morer, A comparison in terms of accuracy and efficiency between a MBS dynamic formulation with stress analysis and a nonlinear FEA code, *Int. J. for Numerical Methods in Engineering*, **51**(9) (2001), 1033-1052.
2. J. Cuadrado, R. Gutiérrez, M.A. Naya, M. González, Experimental validation of a flexible MBS dynamic formulation through comparison between measured and calculated stresses on a prototype car, *Multibody System Dynamics*, **11**(2) (2004), 147-166.
3. R. Gutiérrez y J. Cuadrado, Influencia de la modelización y de los parámetros numéricos en una formulación para el análisis eficiente de sistemas multicuerpo, *Actas de Métodos Computacionais em Engenharia*, Lisboa, (2004).
4. O. Wallrapp, S. Wiedemann, Simulation of Deployment of a Flexible Solar Array, *Multibody System Dynamics*, **7**(1) (2002), 101-125.

6. Agradecimientos

Esta investigación ha sido financiada por Ministerio de Educación y Ciencia (Proyecto DPI2003-05547-C02-01) y por la Dirección General de Investigación y Desarrollo de la Xunta de Galicia (Proyecto PGIDT04PXIC16601PN)
