



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA  
INGENIERÍA CIVIL – ESTRUCTURAS

PROCEDIMIENTO PARA AUTOMATIZACIÓN DE METODOLOGÍAS DE  
IDENTIFICACIÓN DE SISTEMAS EN EL ANÁLISIS DE EDIFICIOS  
INSTRUMENTADOS

TESIS  
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
DOCTOR EN INGENIERÍA

PRESENTA:  
JOSÉ CAMARGO PÉREZ

TUTOR PRINCIPAL  
DAVID MURIÀ VILA, INSTITUTO DE INGENIERÍA UNAM

COMITÉ TUTOR  
LUIS A. ÁLVAREZ ICAZA LONGORIA, INSTITUTO DE INGENIERÍA UNAM  
JOSÉ ALBERTO ESCOBAR SÁNCHEZ, INSTITUTO DE INGENIERÍA UNAM  
JAIME GARCÍA PÉREZ, INSTITUTO DE INGENIERÍA UNAM  
ROBERTO MELI PIRALLA, INSTITUTO DE INGENIERÍA UNAM

MÉXICO, D. F. ENERO 2013



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

# Índice

Resumen .....	4
Abstract .....	5
Capítulo 1. Introducción .....	6
1.1 Antecedentes .....	7
1.2 Objetivos y alcances .....	7
1.3 Contribuciones del trabajo .....	8
Capítulo 2. Métodos de identificación de sistemas .....	9
2.1 Análisis espectral convencional .....	9
2.2 Ajuste de curvas con modelos matemáticos .....	10
2.3 Análisis amplitud-tiempo-frecuencia de señales .....	11
2.4 Planteamiento de espacio de estados .....	12
2.5 Minimización modal .....	14
2.6 Metodologías con algoritmos evolutivos .....	15
2.7 Comentarios .....	17
Capítulo 3. Implementación del algoritmo genético a la metodología de identificación .....	19
3.1 Definición de los parámetros del algoritmo genético .....	19
3.1.1 Codificación (genes y cromosomas) .....	19
3.1.2 Tamaño de la población .....	19
3.1.3 Selección de cromosomas .....	20
3.1.4 Cruzamiento .....	20
3.1.5 Mutación .....	22
3.1.6 Criterios de detención .....	22
3.2 Procedimientos de minimización .....	22
3.3 Procedimiento de automatización .....	26
Capítulo 4. Pruebas de implementación del algoritmo genético .....	28
4.1 Descripción de los modelos analíticos .....	28
4.2 Evaluación de parámetros del AG .....	29
4.2.1 Pruebas de robustez con codificación binaria .....	31
4.2.2 Pruebas para establecer los umbrales de los criterios de detención .....	33
4.3 Evaluación de procedimientos de minimización e intervalos de la población inicial .....	35
4.3.1 Pruebas de estimación de formas modales .....	45
4.4 Comparación del algoritmo genético y mínimos cuadrados .....	52
4.4.1 Problema 1 .....	52
4.4.2 Problema 2 .....	54

Capítulo 5. Validación de la nueva metodología.....	56
5.1 Descripción de las pruebas .....	56
5.1.1 Edificios instrumentados .....	57
5.2 Sistemas analíticos.....	58
5.2.1 Estimación de parámetros en sistemas planos .....	58
5.2.2 Estimación de parámetros en sistemas tridimensionales.....	60
5.2.3 Estimación de frecuencias en sistemas con ruido.....	62
5.2.4 Modelos ASCE.....	64
5.3 Aplicación a edificios reales.....	66
5.3.1 Edificio SIS.....	66
5.3.2 Edificio PC.....	71
5.3.3 Diferencias en la identificación entre edificios estudiados.....	78
Capítulo 6. Conclusiones .....	79
Referencias .....	81
Agradecimientos.....	87
Apéndice A. Gráficas de diferencia cuadrática .....	88

## Resumen

En esta tesis se presenta el procedimiento de automatización de una metodología de identificación de sistemas para el análisis de registros sísmicos en edificios instrumentados. El objetivo de este procedimiento es obtener de manera rápida y robusta los parámetros que definen el comportamiento estructural ante sollicitaciones dinámicas con el mínimo de procesos manuales que requieran intervención humana.

Se escogió una metodología paramétrica de identificación de sistemas basada en la minimización de errores entre las señales de aceleración medidas en la estructura y las calculadas con un modelo idealizado de esta. Esta metodología ha presentado muy buenos resultados en la estimación de propiedades dinámicas, no obstante para poder ser utilizada en el procedimiento automático se tuvieron que hacer adaptaciones y mejoras.

La principal contribución a la metodología fue el desarrollo e implementación de un método de convergencia basado en algoritmos genéticos. El uso de algoritmos genéticos facilitó la automatización del procedimiento y mejoró la robustez de la metodología. En la implementación de algoritmos genéticos, se evaluaron diferentes parámetros sugeridos en la literatura y se escogieron los que mejores resultados presentaron. También se establecieron límites en el proceso iterativo del algoritmo para adaptarlo al caso de identificación de sistemas y hacerlo más eficiente.

El procedimiento propuesto se validó con sistemas analíticos planos de uno y varios grados de libertad, además de sistemas tridimensionales con diferentes grados de acoplamiento entre sus modos. También se estudiaron registros sísmicos en dos edificios instrumentados en México.

Los resultados de la estimación de parámetros se compararon con metodologías de identificación de sistemas comunes en la literatura técnica, se tomaron en cuenta aspectos como la exactitud, robustez, velocidad y versatilidad del método.

Por último se comentan los resultados obtenidos con el procedimiento propuesto y la metodología modificada. Se discuten sus ventajas y limitantes, así como las contribuciones del trabajo en el campo de la dinámica estructural.

## Abstract

This thesis presents an automatic procedure with a system identification methodology for the analysis of seismic records in instrumented buildings. The objective is to obtain a robust and efficient estimation of the dynamic parameters through acceleration records, with minimal manual processes that require human intervention.

A parametric system identification methodology was chosen, which is based on the error minimization between the measured acceleration signals in the structure and the calculated ones from an idealized model of it. The methodology has shown very good results in estimating dynamic parameters, however, in order to be used in the automatic procedure adjustments, and improvements had to be made.

The main contribution to the methodology was the development and implementation of a convergence method based on genetic algorithms. The use of genetic algorithms facilitated the automation of the process and improved the robustness of the methodology. Different parameters suggested in the literature were evaluated in the implementation of genetic algorithms, and those that showed better results were chosen. Also, the iterative process of the algorithm was restricted to suit the system identification approach and to make it more efficient.

The proposed methodology was validated with analytical one-dimensional spring-mass models of one and multiple degrees of freedom. Also, tridimensional systems with different degrees of coupling between its components were modeled, and noise effect in the signals was simulated. Furthermore, the validation was complemented with the analysis of seismic records in two instrumented buildings in México.

The results of the estimated dynamic properties were compared with common system identification methodologies used in the literature for dynamic parameter identification in structures. This evaluation took into account parameters such as accuracy, robustness, speed of calculation and versatility.

Finally, the results of the proposed procedure with the modify methodology are commented. The advantages and limitations are discussed, as well as the contribution of this work to the structural dynamic field.

# Capítulo 1. Introducción

La identificación de sistemas es un problema muy recurrente en diferentes ramas de la ingeniería. Un caso particular, en la ingeniería civil, se refiere a la estimación de parámetros que definen el comportamiento de una estructura. Esta estimación se hace por medio del estudio de registros en estructuras instrumentadas. Las metodologías empleadas son muy variadas y existe un esfuerzo permanente en su desarrollo.

Un campo de aplicación de la identificación de sistemas es el deterioro de las propiedades dinámicas y su relación con el daño estructural (Doebbling *et al.*, 1996). Por lo que existe un reciente interés en el desarrollo de sistemas automatizados de monitoreo.

El desarrollo en la tecnología de sensores, avances en la computación y el interés en el monitoreo de salud estructural, han fomentado mejoras de las metodologías de identificación de sistemas y su automatización. No obstante existen retos y oportunidades en la identificación de sistemas, en especial lo relativo a la robustez de la metodología, es decir convergencia rápida y confiable, independiente del orden del modelo y las condiciones iniciales capaz de identificar modos de vibrar cercanos (Kijewski-Correa y Cycon, 2007).

Las metodologías de identificación pueden clasificarse en paramétricas y no paramétricas. Los métodos de tipo no paramétrico se refieren al análisis directo de los registros que describen la respuesta de una estructura sin recurrir a un modelo analítico de ella, la identificación de los parámetros se hace valiéndose de artificios matemáticos que permiten estimar las propiedades que se desean conocer. En los métodos paramétricos la identificación se hace a partir de un modelo idealizado, por medio del cual se busca reproducir la información que se ha obtenido experimentalmente.

La estimación paramétrica de propiedades dinámicas implica ventajas y desventajas con respecto a la metodología no paramétrica. A diferencia de la metodología no paramétrica es necesario la concepción de un modelo y un ajuste manual de sus propiedades, lo cual implica mayor dificultad en su estudio. Una ventaja de la identificación de parámetros con el uso de modelos es que es posible validar la estimación con la comparación entre las señales medidas y las calculadas por el modelo. De esta forma no solamente se obtienen parámetros dinámicos, también se calcula una medida de aproximación de estos parámetros.

El método de minimización modal propuesto por Beck y Jennings (1980) es una metodología paramétrica que ha presentado buenos resultados en casos complejos de identificación de propiedades dinámicas en edificios (Murià-Vila *et al.*, 2001; Camargo y Murià-Vila, 2009). El programa *MIMO* (Li y Mau, 1991) emplea esta metodología, sin embargo, el procedimiento de identificación es complicado y requiere la constante intervención del criterio humano. Se escogió esta metodología por su potencial de aplicabilidad al procedimiento de automatización y a la capacidad de identificar modos acoplados. A partir de la experiencia en el análisis de estructuras instrumentadas se identificó que uno de los retos en la estimación paramétrica de propiedades dinámicas es la convergencia a mínimos locales y un espacio de búsqueda reducido.

Una posible opción para la automatización es el uso de métodos heurísticos o de inteligencia artificial como los algoritmos genéticos. Estos, han sido una buena alternativa en diversos problemas de optimización (Matouš *et al.*, 2000) y han mostrado un gran aplicabilidad para la automatización de procesos.

Para automatizar la estimación se necesita plantear de manera adecuada el procedimiento a seguir. Se requiere anticipar los posibles problemas en la identificación y ajustarse a estos para lograr resultados aceptables en el menor tiempo posible. Además, adaptar las metodologías disponibles para obtener los mejores resultados de manera eficiente, con la mínima intervención y desarrollar los algoritmos para realizar los procesos manuales.

Por estas razones en este trabajo se propone la implementación de algoritmos genéticos en la metodología de minimización modal, con el objetivo de mejorar su desempeño y proporcionar un método eficiente y robusto de identificación que pueda ser empleado en un sistema automático de monitoreo estructural.

## 1.1 Antecedentes

La identificación de sistemas en la ingeniería civil surgió a la par del avance tecnológico en sistemas de monitoreo y registro. A raíz del sismo de San Fernando California, a principios de la década de los 70 surgieron los primeros escritos de identificación de parámetros dinámicos en edificios. Autores como Jennings (1971), Trifunac (1972), Beck (1978), Shinozuka *et al.* (1982), Celebi y Safak (1991), entre otros han sido precursores en la estimación de propiedades dinámicas en estructuras. En Japón, dado que cuenta con un gran número de edificios instrumentados, existen también varias publicaciones relacionadas con el tema (Tanaka *et al.*, 1969; Satake *et al.*, 2003).

En nuestro país existen varios estudios de las propiedades dinámicas de edificios (Rodríguez y Quaas, 1990; Mendoza *et al.*, 1991; González, 1995; Toro, 1997; Meli *et al.*, 1998; Zapata, 2001; Murià-Vila y Rodríguez, 2002; Palacios, 2003; Camargo, 2007; Murià-Vila, 2007). Estos trabajos, entre otros aspectos, se orientaron a la identificación de parámetros dinámicos por medio de diferentes metodologías comunes en la literatura.

Existen en la actualidad sistemas automáticos para la estimación de propiedades dinámicas (Iwan, 2002; Ventura *et al.*, 2002; Kohler *et al.*, 2005; Suzuki *et al.*, 2008; Boroschek y Carreno, 2011) que entre otros parámetros monitorean las propiedades dinámicas de estructuras instrumentadas. Murià-Vila *et al.* (2010) proponen un sistema automático para determinar el estado estructural en edificios instrumentados basado cinco indicadores. Uno de estos es la variación de frecuencias naturales de los componentes horizontales, para lo cual se emplea el análisis espectral convencional en la estimación de frecuencias. Este tipo de análisis ha dado buenos resultados pero tiene limitantes en casos complicados.

La metodología de minimización modal con algoritmos genéticos es un aspecto relativamente novedoso en esta investigación, aunque también existen otros trabajos en el campo de la ingeniería estructural que utilizan algoritmos evolutivos para la identificación de sistemas. Por ejemplo, en la detección de daño en modelos de elemento finito de vigas y marcos (Chou y Ghaboussi, 2001; Au *et al.*, 2003; Raich y Litzkai, 2007) así como ejemplos con modelos reales en laboratorio (Meruane y Heylen, 2010). También se han empleado en la estimación de rigideces de sistemas analíticos lineales (Koh *et al.*, 2003; Franco *et al.*, 2004; Marano *et al.*, 2011) y no lineales (Wang, 2009). En cuanto a la identificación de parámetros dinámicos, Perry *et al.* (2006) presentan ejemplos con sistemas teóricos masa-resorte de varios grados de libertad, por otra parte en el trabajo de Alimoradi *et al.* (2006), se aborda la identificación con modelos planos de diversos edificios instrumentados.

## 1.2 Objetivos y alcances

El objetivo de este trabajo es plantear un procedimiento rápido y robusto para realizar de manera automática un análisis detallado de los parámetros dinámicos de una estructura y sus variaciones, se seleccionará una metodología de identificación de sistemas y adaptarán algoritmos para automatizar el proceso.

Los alcances de esta investigación se enfocan a la identificación de propiedades dinámicas de edificios instrumentados a partir del análisis de registros sísmicos de aceleración. Los algoritmos y

procedimientos desarrollados se optimizarán para este propósito. Las pruebas, comentarios y conclusiones del trabajo se centrarán únicamente en los objetivos del trabajo. No obstante, el uso de la metodología propuesta puede ampliarse a la identificación de otro tipo de estructuras, e incluso cualquier sistema dinámico tomando en cuenta las siguientes restricciones:

- El sistema a identificarse es considerado como lineal e invariante en el tiempo. Para comportamiento no lineal o régimen no estacionario se puede hacer un análisis por intervalos de tiempo en los cuales sea relativamente aplicable esta hipótesis.
- Solamente será posible identificar los modos significativos de sistema, es decir, aquellos cuya contribución en la respuesta del sistema sea relevante y mayor al ruido en las mediciones.
- La identificación se hace por medio de señales de aceleración de entrada-salida. Por lo que es necesario al menos conocer una señal de entrada y una de salida del sistema a identificar.

### 1.3 Contribuciones del trabajo

El presente trabajo es el resumen de una investigación para automatizar la identificación de propiedades dinámicas en edificios instrumentados. Se escogió una metodología paramétrica basada en la minimización de errores y se comparó su desempeño con otros métodos. Para la automatización se desarrolló e implementó un nuevo método de convergencia basado en algoritmos genéticos. Además se plantea un procedimiento preliminar de análisis de registros sísmicos con la metodología modificada, los cuales pueden ser implementados en un sistema automático de monitoreo estructural. Entre las contribuciones originales se encuentran:

- El análisis y evaluación de diferentes metodologías de identificación de sistemas para determinar el potencial de aplicabilidad en la automatización de la estimación de propiedades dinámicas.
- La evaluación de los parámetros y operadores óptimos del algoritmo genético como método de convergencia en la metodología de minimización modal. Entre los cuales se incluyen criterios de detención que mejoraron la eficiencia de la metodología sin perder robustez.
- Un método de identificación de propiedades dinámicas que preserva las ventajas de la metodología en la cual se basa, pero tiene una menor tendencia a la convergencia a mínimos locales.
- Un procedimiento automatizado de análisis de registros sísmicos en edificios instrumentados empleando la metodología modificada y validado con las pruebas realizadas.

## Capítulo 2. Métodos de identificación de sistemas

La identificación de sistemas es un problema inverso de la ingeniería y consiste en obtener a partir de la respuesta de un sistema las características de este. En la dinámica estructural a estas características se les conoce como propiedades dinámicas y los parámetros a identificar son las frecuencias, amortiguamientos, formas modales, condiciones iniciales y factores de participación.

En la literatura existen diferentes metodologías de identificación de sistemas empleadas en la estimación de parámetros dinámicos. Para esta tesis se escogieron las más comunes para determinar, mediante pruebas con modelos analíticos y reales, las ventajas y limitantes en la identificación de propiedades dinámicas, así como su potencial de aplicación en el procedimiento automatizado.

### 2.1 Análisis espectral convencional

El análisis espectral convencional (AEC) consiste en obtener el contenido frecuencial de una señal por medio de la transformada de Fourier, y evaluar las frecuencias correspondientes al sistema por medio de cocientes espectrales seleccionando entre las frecuencias que corresponden a amplitudes máximas. También se hace uso de relaciones matemáticas adicionales como la función de coherencia, el ángulo de fase y el espectro cruzado (Bendat y Piersol, 1989).

La transformada de Fourier de una señal en el tiempo  $x(t)$  se encuentra dada por la ec. 2.1, o bien mediante la identidad de Euler como una expresión con parte real e imaginaria, ec. 2.2.

$$X(f) = \int_0^T x(t)e^{-i2\pi f t} dt \quad 2.1$$

$$X(f) = \int_0^T x(t)\cos(2\pi f t) dt + i \int_0^T x(t)\sen(2\pi f t) dt \quad 2.2$$

Una de las formas para expresar una señal  $x(t)$  en el dominio de la frecuencia consiste en calcular su función de densidad espectral, también conocida como espectro de potencia, que es una función que representa la distribución de potencia de la señal con respecto de la frecuencia. Esta función se define como:

$$S_{xx}(f) = X^*(f) \cdot X(f) \quad 2.3$$

donde,  $X(f)$  es la transformada de Fourier de la señal y  $X^*(f)$  el conjugado de la transformada de Fourier de la señal.

La información de las frecuencias negativas y positivas de la función de densidad espectral es la misma, debido a que dicha función es simétrica. Esto hace que sea más conveniente realizar el análisis de un sólo lado del espectro, así se tiene:

$$G_{xx}(f) = \begin{cases} 2S_{xx}(f) & \text{si } f > 0 \\ S_{xx}(f) & \text{si } f = 0 \\ 0 & \text{si } f < 0 \end{cases} \quad 2.4$$

Si se tienen dos señales de aceleración correspondientes a dos puntos de un estructura,  $x(t)$  y  $y(t)$ , sus transformadas de Fourier están dadas por:

$$X(f) = \int_0^T x(t)e^{-i2\pi f t} dt \quad 2.5$$

$$Y(f) = \int_0^T y(t)e^{-i2\pi ft} dt \quad 2.6$$

Se define el espectro cruzado entre las dos señales  $x(t)$  y  $y(t)$  a:

$$S_{XY}(f) = X^*(f) \cdot Y(f) \quad 2.7$$

procediendo de igual manera que con el espectro de potencia

$$G_{XY}(f) = \begin{cases} 2S_{XY}(f) & \text{si } f > 0 \\ S_{XY}(f) & \text{si } f = 0 \\ 0 & \text{si } f < 0 \end{cases} \quad 2.8$$

$$G_{XY}(f) = A_{XY}(f) + iB_{XY}(f) \quad 2.9$$

La función de coherencia es la relación que existe entre el espectro cruzado de potencia y el producto de los espectros de potencia de cada señal y se obtiene mediante la ec. 2.10.

$$C^2(f) = \frac{|G_{XY}(f)|^2}{G_{XX}(f)G_{YY}(f)} \quad 2.10$$

El ángulo de fase entre dos señales, ec. 2.11, se obtiene a partir el cociente entre la parte imaginaria del espectro cruzado  $B_{XY}(f)$  y la parte real del mismo  $A_{XY}(f)$ .

$$\tan \theta_{XY}(f) = \frac{B_{XY}(f)}{A_{XY}(f)} \quad 2.11$$

Para el análisis de esta metodología se empleó el algoritmo de la transformada rápida de Fourier (Stearns y Hustt, 1990) así como subrutinas desarrolladas para el análisis de edificios instrumentados (Camargo, 2007).

## 2.2 Ajuste de curvas con modelos matemáticos

Consiste en ajustar un modelo matemático a los datos de entrada-salida de un sistema por medio de estimadores, los cuales pueden ser funciones de respuesta en frecuencia o funciones espectrales. Entre los modelos matemáticos se encuentran los polinomios ortogonales de Forsythe o Chebyshev (Verboven *et al.*, 2005), así como funciones de Bell (Jacobsen *et al.*, 2008).

En este trabajo se abordará el procedimiento de ajuste con polinomios de Forsythe (1956) propuesto por Richardson y Formenti (1982). La identificación con polinomios se estudió a partir de las subrutinas y algoritmos programados por Huerta (2007) y adaptados por Aldama (2009).

Se parte de una función en el plano  $S$  de Laplace que relaciona las señales de respuesta con las excitaciones. La expresión general para un sistema de  $N$  grados de libertad sujeto a una excitación armónica está dada por la ec. 2.12, (Newland, 1989)

$$H(s) = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_0}{a_{2n} s^{2n} + a_{2n-1} s^{2n-1} + \dots + a_0} = \frac{\sum_{k=0}^m b_k s^k}{\sum_{k=0}^n a_k s^k} \quad 2.12$$

La variable  $s$  es compleja, y en consecuencia, los polinomios que componen la ec. 2.12 lo son. A esta expresión se le conoce como función de transferencia.

Si el denominador de la ec. 2.12 se iguala a cero,

$$a_{2n}s^{2n} + a_{2n-1}s^{2n-1} + \dots + a_0s^0 = \sum_{k=0}^m a_k s^k = 0 \quad 2.13$$

es posible encontrar los valores de  $s$  que son raíces del polinomio, a esas singularidades se les conoce como polos de la función. Cada valor de  $s$  está definido por una frecuencia de vibración y una fracción de amortiguamiento crítico.

$$s = -\xi\omega_N \pm i\omega = -\sigma \pm i\omega \quad 2.14$$

Donde  $\omega_N = \sqrt{k/m}$  es frecuencia circular de vibración,  $\omega = \omega_N \sqrt{1-\xi^2}$  es la frecuencia circular amortiguada,  $\xi$  es la fracción de amortiguamiento crítico y  $\sigma = \xi\omega_N$  es el coeficiente de amortiguamiento

Matemáticamente los polos se ubican en el plano  $S$  y sus coordenadas quedan definidas por los valores de frecuencia,  $i\omega$ , y el coeficiente de amortiguamiento,  $\sigma$

En la práctica se obtiene la función de transferencia para  $s=i\omega$ , a esta función se le denomina función de respuesta en frecuencia (FRF), y es posible construir un modelo dinámico en el dominio de la frecuencia similar al modelo en el dominio de Laplace, se reemplazan las funciones de transferencia con las funciones de frecuencia y se aplican la transformadas de Fourier.

$$H(i\omega) = \frac{\sum_{k=0}^m b_k (i\omega)^k}{\sum_{k=0}^n a_k (i\omega)^k} \quad 2.15$$

donde a y b son los coeficientes de los polinomios racionales

Otra forma de representar la FRF es como el cociente de una serie de polinomios ortogonales donde c y d son los coeficientes de los polinomios ortogonales, y  $\Phi$  y  $\theta$  son los polinomios ortogonales.

$$H(i\omega) = \frac{\sum_{k=0}^m c_k \Phi_{j,k}}{\sum_{k=0}^n d_k \theta_{j,k}} \quad j = 1, \dots, L \quad 2.16$$

### 2.3 Análisis amplitud-tiempo-frecuencia de señales

Estas metodologías se basan en el estudio de las señales de respuesta de un sistema en un plano amplitud-tiempo-frecuencia, donde además de obtenerse el contenido frecuencial de la señal se calcula una amplitud asociada en cada instante de tiempo. En este tipo de metodologías se encuentra la transformada *wavelet* (Mallat, 1989) y la transformada Hilbert-Huang (Huang *et al.*, 1998). La transformada *wavelet* ha sido empleada para el análisis de registros e identificación de daño, entre otras aplicaciones (Chang y Sun, 2005).

Los trabajos relativos a la transformada Hilbert-Huang (THH) en la ingeniería civil se enfocan principalmente en el campo de la ingeniería sísmica, pero también se emplean en la identificación de propiedades dinámicas y daño (Yang y Lei, 2000). La THH combina el análisis amplitud-tiempo-frecuencia de la transformada de Hilbert con la descomposición modal empírica. A través de esta metodología es posible determinar las propiedades de un sistema por medio del análisis de las señales de respuesta y extraer parámetros dinámicos como frecuencias de vibración. Para sistemas de más de un grado de libertad se recomienda filtrar de la señal de respuesta en las bandas correspondientes a los modos a identificar y posteriormente hacer la identificación (Yang *et al.*, 2002), aspecto que limita la identificación en el caso de modos acoplados. La THH se presenta como una de las pocas capaces de abarcar el comportamiento no lineal y datos aleatorios no estacionarios. Para la evaluación de la THH se programaron los algoritmos de descomposición modal empírica y la transformada de Hilbert.

La transformada Hilbert-Huang se basa en la descomposición modal empírica (DME) que permite representar señales no estacionarias en componentes llamadas funciones modales intrínsecas (FMI), la idea básica de la DME es construir envolventes superiores e inferiores de la señal.

Si se define a esta señal como  $x(t)$ , su transformada de Hilbert (HT) denotada como  $\tilde{x}(t)$  se encuentra dada por la expresión:

$$\tilde{x}(t) = \text{HT}(x(t)) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(\tau)}{\pi(t-\tau)} d\tau \quad 2.17$$

Una forma de describir una señal en tiempo y frecuencia simultáneamente es a través de su frecuencia instantánea. Para introducir este concepto, se define la señal analítica  $x_a(t)$  ec. 2.18.

$$x_a(t) = x(t) + i\tilde{x}(t) = A(t)e^{i\theta(t)} \quad 2.18$$

donde  $A(t)$  es la amplitud instantánea y  $i\theta(t)$  es la fase instantánea.

En el dominio de la frecuencia la transformada de Fourier  $X_a(f)$  de  $x_a(t)$  vale cero en las frecuencias negativas, y duplica el valor en las frecuencias positivas

La frecuencia  $\omega(t)$  instantánea de la señal es obtenida como:

$$\omega(t) = \frac{d\theta(t)}{dt} \quad 2.19$$

Si se calculan las amplitudes y frecuencias instantáneas de cada una de los N modos obtenidos mediante el algoritmo DME se puede observar la amplitud y la frecuencia instantánea de cada FMI en una gráfica tridimensional o en un plano tiempo-frecuencia.

## 2.4 Planteamiento de espacio de estados

Existen diferentes metodologías basadas en el planteamiento de espacio de estados, en estas, la solución de la ecuación de movimiento es planteada por medio de variables de estado (Ljung, 1987) y hay un auge en la aplicación del planteamiento de estado en estructuras civiles (Alvin *et al.*, 2003; Cauberghe, 2004).

Se escogió para su estudio el algoritmo de espacio de estados N4SID (Van Overschee y De Moor, 1994) y la identificación estocástica (Peeters y De Roeck, 1999) debido a los buenos resultados en la identificación de propiedades dinámicas en estructuras instrumentadas que se reportan en la literatura (Ventura *et al.*, 2002; Skolnik *et al.*, 2006; Deraemaekera *et al.*, 2008). En algoritmo

N4SID las ecuaciones diferenciales de movimiento se representan por una ecuación diferencial discreta de primer orden por medio de un cambio de variable (estados del sistema), las propiedades dinámicas se extraen de la matriz de estado. La identificación estocástica de sistemas (IE) abordada en este trabajo se enfoca al análisis de únicamente señales de salida con la técnica de componentes principales no ponderados, donde se considera que el sistema está excitado por un ruido blanco Gaussiano.

Las ecuaciones diferenciales de movimiento ec. 2.20 se pueden representar por un sistema de ecuaciones diferenciales de primer orden ec. 2.23.

$$M\ddot{Y} + C\dot{Y} + KY = -M\ddot{Y}g \quad 2.20$$

Los vectores de estado se definen como:

$$\begin{aligned} X_1 &= Y \\ X_2 &= \dot{X}_1 = \dot{Y} \end{aligned} \quad 2.21$$

por lo tanto se puede escribir 2.20 como:

$$\dot{X}_2 = -M^{-1}KX_1 - M^{-1}CX_2 - \ddot{Y}g \quad 2.22$$

de manera matricial

$$\begin{aligned} \dot{X} &= AX + B\ddot{Y}g \\ Y &= CX + D\ddot{Y}g \end{aligned} \quad 2.23$$

donde

$$X = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix}; \quad \dot{X} = \begin{bmatrix} \dot{X}_1 \\ \dot{X}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_2 \\ \dot{X}_2 \end{bmatrix} \quad 2.24$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ M^{-1}K & M^{-1}C \end{bmatrix} \quad 2.25$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ -I \end{bmatrix} \quad 2.26$$

$$C = I; \quad D = 0 \quad 2.27$$

La forma en tiempo discreto de la ec. 2.23 es:

$$\begin{aligned} X_{k+1} &= AX_k + BYg_k \\ Y_k &= CX_k + DYg_k \end{aligned} \quad 2.28$$

Los parámetros dinámicos se calculan a partir de los valores característicos ( $\lambda$ ) y vectores característicos ( $\psi$ ) de la matriz de estado A.

$$f = |\lambda| / 2\pi \quad 2.29$$

$$\xi = \text{Re}(\lambda) / 2\pi f \quad 2.30$$

$$\phi = |C\psi| \text{sig}(\text{Re}(C\psi)) \quad 2.31$$

Los valores característicos en las ecuaciones 2.29 y 2.30 corresponden a los polos de la transformada  $S$  de Laplace del sistema. La relación entre los polos de Laplace y los polos ( $\rho$ ) de la transformada discreta  $Z$  se establecen por medio de la siguiente expresión 2.32 que depende del intervalo de muestreo  $dt$ .

$$\rho(z) = e^{\lambda(s)dt} \quad 2.32$$

En el planteamiento de estado se requiere determinar el orden de los modelos representativos. Teóricamente el orden del modelo es igual al número de valores característicos no-singulares, en general un sistema de N grados de libertad se puede representar por un modelo de orden 2N. No obstante, debido a ruido en las mediciones y errores numéricos, se requiere modelos de orden mayor (Skolnik *et al.*, 2006) y posteriormente distinguir los polos del sistema físico. En este trabajo fue necesario hacer modelos de hasta dos veces el orden teórico para lograr resultados satisfactorios.

El algoritmo N4SID se estudió con el programa Matlab, además se desarrollaron subrutinas para generar los modelos, extraer los parámetros y realizar las gráficas de estabilización. Para la IE se utilizó el programa comercial *ARTMeIS Extractor* (Structural Vibration Solutions, 2008) enfocado al estudio de sistemas invariantes en el cual se analizan las señales por medio de promedios entre intervalos de tiempo.

## 2.5 Minimización modal

La minimización modal (Beck y Jennings, 1980) es una metodología de identificación de sistemas en la cual se estiman los parámetros dinámicos por medio de un modelo idealizado de la estructura. A partir de datos iniciales, se calcula una respuesta del modelo. Los parámetros del sistema se determinan al ajustar iterativamente la respuesta calculada del modelo con respecto a la respuesta real del sistema.

Aunque la metodología se basa en la hipótesis que el sistema a identificarse es invariante en el tiempo, mediante el análisis en intervalos de tiempo (ventanas), se pueden estudiar comportamiento no lineal y no estacionario, considerando que en el intervalo de tiempo analizado la estructura presenta un comportamiento lineal.

La metodología de minimización modal (MM) fue implementada en el programa *MIMO* por Li y Mau (Li y Mau, 1991) y ha demostrado buenos resultados para la identificación de propiedades dinámicas y efectos de interacción suelo-estructura (Durrani *et al.*, 1994; Li y Mau, 1997; Murià-Vila, 2007). Para el análisis de la metodología de minimización modal se empleó un programa (Cruz *et al.*, 2007) basado en los códigos de Li y Mau (1990).

La estructura se modela como un sistema de N ecuaciones diferenciales desacopladas de segundo orden, correspondientes a los modos clásicos de vibrar, ec. 2.33, y la respuesta se obtiene como la superposición de los modos, ec. 2.34

$$\ddot{u}_j + 2\xi_j\omega_j\dot{u}_j + \omega_j^2u_j = \sum_{k=1} p_{jk}a_{gk} \quad 2.33$$

$$a_i = \sum_{j=1} \phi_{ij}\ddot{u}_j \quad 2.34$$

donde  $\xi_j$  es la fracción de amortiguamiento crítico  $\omega_j$  es la frecuencia,  $p_{jk}$  es el factor de participación,  $a_{gk}$  es la aceleración de excitación,  $a_j$  es el vector de aceleraciones calculadas  $\ddot{u}_j$  es la respuesta y  $\phi_{ij}$  es la forma modal. Los subíndices  $i, j$  y  $k$  se refieren al grado de libertad, modo y número de excitación respectivamente.

Para el ajuste se minimiza una función de evaluación con respecto a los parámetros dinámicos a identificar hasta converger al valor estimado. La función de evaluación, ec. 2.35, se define como el

error cuadrático entre las señales de aceleración de referencia ( $a_R$ ) y las calculadas con el modelo ( $a_C$ ) en un intervalo  $t_i$  a  $t_f$ .

$$J = \int_{t_i}^{t_f} (a_R - a_C)^2 dt \quad 2.35$$

En esta metodología la estimación de la forma modal se calcula a partir del factor de repuesta por modo ( $FRM$ ). Este factor (Thomson, 1998) es el producto del factor de participación del modo  $j$  ( $FP_j$ ) y el vector de formas modales ( $\phi_{ij}$ ), ec. 2.36.

$$FRM_{ij} = FP_i \phi_{ij} \quad 2.36$$

En esta metodología se han usado diferentes métodos de convergencia para minimizar las diferencias entre las respuestas del modelo y el sistema. En el trabajo de Beck (1978) se hace una minimización unidimensional con los parámetros de frecuencia y amortiguamiento aplicando un proceso iterativo (Bekey, 1970), asimismo McVerry (1980) emplea un procedimiento similar pero en el dominio de la frecuencia. Por otra parte, Li y Mau (1991) emplean mínimos cuadrados con el método de Levenberg-Marquardt modificado (Marquardt, 1963).

Estos métodos comparten en común una limitante, la elección de los valores iniciales, la cual puede derivar en una estimación incorrecta debido a la convergencia a un mínimo local, aspecto que se enfatiza si en el proceso de convergencia se emplean criterios de detención que únicamente evalúen las diferencias entre una iteración y la anterior.

Para este trabajo de tesis se desarrolló y adaptó un método de minimización basado en algoritmos genéticos (AG) con el cual se busca ampliar el espacio de búsqueda y evitar la convergencia a mínimos locales. A diferencia de los métodos deterministas, en los AG se define un grupo de posibles soluciones y a partir de los operadores del AG se mejoran hasta obtener la solución óptima.

## 2.6 Metodologías con algoritmos evolutivos

La metodología de minimización modal con AG es un aspecto novedoso en esta investigación. Por otra parte, existen otros trabajos en el campo de la ingeniería estructural que también utilizan algoritmos evolutivos para la identificación de sistemas. En la tabla 2.1 se presenta un resumen de los métodos de identificación estructural con algoritmos evolutivos.

En el trabajo de Wang (2009) se presenta una metodología basada en la identificación de rigideces y amortiguamientos de un sistema NGL plano asumiendo conocidos los valores de masa. En este caso los autores abordan el problema desde el enfoque de la ecuación dinámica acoplada. Se emplean operadores y parámetros del AG comunes en la literatura y similares a los que se propusieron para este trabajo de investigación. Un aspecto relevante son las pruebas que hacen de un sistema analítico no lineal, donde obtienen buenos resultados en la identificación de los parámetros del sistema, incluidos los relacionados a la curva histerética.

Las estrategias evolutivas de identificación estructural (Franco, 2003; Franco *et al.*, 2004) son un método de identificación de parámetros estructurales basado en la estimación de las matrices de masa, rigidez y amortiguamiento. En las estrategias evolutivas, a diferencia de los AG, siempre se emplea codificación por valor y los individuos o potenciales soluciones son variables aleatorias caracterizadas por dos vectores: uno que contiene los valores de los parámetros y otro las desviaciones estándar. En los trabajos mencionados anteriormente se evalúan sistemas planos de 3GL y 10GL, sin y con ruido, además de los modelos de un prueba de desempeño.

Tabla 2.1. Metodologías que emplean algoritmos evolutivos en la identificación de sistemas estructurales

	Kho	Wang	Franco	Alimoradi	Marano	Camargo
Ecuación dinámica	Modal	Acoplada	Acoplada	Modal	Acoplada	Modal
Codificación	Binaria	Por valor	Por valor	-	Por valor	Por valor
Función de ajuste	Diferencias cuadráticas normalizadas de aceleración	Diferencias cuadráticas relativas de aceleración	Diferencias cuadráticas normalizadas de aceleración	Diferencias cuadráticas ponderadas de acel., vel., y des.	Diferencias cuadráticas normalizadas de aceleración	Diferencias cuadráticas normalizadas de aceleración
Tamaño de la población	-	100	35	10-20	-	20
Intervalo población inicial	-	8 a 110%	10 a 200%	-	-	30 a 400%
Selección	-	Método de selección truncado	Mejores 2 hijos + mejor padre	-	Método de torneo por rangos con elitismo	Muestreo simple con remplazo y elitismo
Cruzamiento	Simple y uniforme tasa 64%	Recombinación tasa 10%	Panmixia intermedia recombinación 1:7	Tasa 55 a 75%	Promedio de banda cruzada tasa 70%	Aritmético tasa 100%
Mutación	Regeneración aleatoria tasa 25%	Tasa 1%	Perturbación normal estándar	Tasa 5%	Uniforme tasa 30%	Perturbación de gen 2% del valor, tasa 5%
Criterios de convergencia	-	-	10,000 generaciones máximas	Generaciones máximas 100 a 200	30 generaciones máximas, umbrales en media y desviación estándar de la población	200 generaciones máximas $CV_{población} < 0.45\%$ Repetición del mejor cromosoma 10 veces
Modelos	Analítico 10GL plano	Analíticos planos 1GL y 3GL Analítico no lineal 1GL	Analítico 3GL y 10GL plano con ruido, <i>benchmark</i> ASCE	Edificios reales	Analítico 10GL plano con ruido	Analíticos planos 1GL 3GL y 5GL Analíticos 3D 3GL 15GL Edificios reales

Marano *et al* (2011) emplean AG en la identificación de parámetros estructurales destacando el caso de mediciones en pocos grados de libertad. El AG utilizado trabaja con subpoblaciones y un operador de migración. También se emplean métodos de reducción del espacio de búsqueda y se evalúan diferentes operadores de cruzamiento y mutación. El ejemplo de aplicación es un modelo analítico plano de 10GL con ruido.

En (Alimoradi *et al.*, 2006) se presenta una metodología de identificación de parámetros dinámicos con AG empleando el modelo plano de flexión-cortante (Miranda y Taghavi, 2005). El método emplea la ecuación dinámica desacoplada y además de identificarse frecuencias y amortiguamientos también se estima la relación de rigidez adimensional. Se presenta la estimación de propiedades de algunos edificios.

Otro planteamiento estudiado fue la metodología híbrida de identificación estructural (Koh *et al.*, 2003; Perry *et al.*, 2006). En esta metodología se combinan algoritmos evolutivos con métodos tradicionales para la identificación de sistemas estructurales. Los autores proponen emplear AG

para una búsqueda global y posteriormente una búsqueda local con mínimos cuadrados. Para la evaluación de la metodología se emplea un sistema plano de 10GL.

En general estos trabajos presentan muchos aspectos similares al AG implementado en la metodología de minimización modal. Con excepción de las estrategias evolutivas de Franco, las demás metodologías, al igual que la propuesta en esta investigación, toman como base el algoritmo genético simple.

La ecuación dinámica con la que se aborda el problema depende de los parámetros a identificar, en los estudios de Franco, Wang y Marano el objetivo es obtener rigideces y amortiguamiento, por lo cual escogen el planteamiento directo. En este trabajo al igual que Kho y Alimoradi, el objeto de estudio son los parámetros modales y por lo tanto se trabaja con la ecuación desacoplada.

El tamaño de la población utilizado en este trabajo es del orden al que usan Franco y Alimoradi mientras que comparado con el de Wang es menor. En comparación estos valores contrastan con el número de generaciones máximas. Si se multiplica el número de generaciones máximas por el tamaño de la población se puede obtener el número máximo posible de individuos evaluados. Comparado estos valores, los algoritmos con mayor semejanza al propuesto en esta tesis son los de Alimoradi y Marano.

Los operadores de cruzamiento son diferentes en cada metodología, por el contrario el operador de mutación fue similar, variando solamente la tasa empleada por cada autor. De los criterios de convergencia el más común, es el de generaciones máximas donde los valores límite son muy variados, hay metodologías con 30 generaciones y otras hasta con 10,000. En los casos de sistemas analíticos estudiados en la tesis se establecieron 50 generaciones como límite y en sistemas reales hasta 200.

En cuanto a las pruebas realizadas en la mayoría de los casos se limitan a modelos planos y sistemas analíticos. Por otra parte, hay que mencionar que aspectos como el ruido y la identificación con mediciones en pocos grados de libertad son tomados en cuenta con estas metodologías.

## 2.7 Comentarios

En el Capítulo 5 de este trabajo se evaluaron y compararon los resultados de la estimación de parámetros dinámicos con el análisis espectral convencional (AEC), el ajuste con polinomios de Forsythe (APF), la transformada de Hilbert-Huang (THH), el método de minimización modal (MM), el algoritmo de estado de espacios N4SID y la identificación estocástica (IE), de estas pruebas se llega a las siguientes conclusiones:

La THH es una metodología muy práctica en el análisis de señales y como muchos autores mencionan es útil para el comportamiento no lineal y no estacionario (Worden y Tomlinson, 2001; Huang y Shen, 2005). Esta metodología se ha usado para el análisis de registros sísmicos (García *et al.*, 2006; Huang *et al.*, 2008), sin embargo, como metodología de identificación de sistemas tiene sus limitantes. El inconveniente radica en que sirve para el análisis del contenido frecuencial de una señal, pero para adaptar el análisis a la estimación de parámetros de un sistema se requieren procedimientos adicionales que complican el cálculo y cuyos resultados no son tan buenos como con otras metodologías.

Los resultados de la identificación con APF fueron mejores en comparación con el AEC y THH, por otro lado tiene limitantes comparado con N4SID y MM. Las principales ventajas de esta metodología son su rapidez y la facilidad para su implementación. En cuanto a modos acoplados con esta metodología no se obtuvieron buenos resultados.

En sistemas analíticos sin ruido tanto MM como N4SID presentaron muy buenos resultados en la identificación de frecuencias; sin embargo, los errores con N4SID fueron ligeramente menores. En los sistemas reales no se tiene un valor teórico para comparar los resultados y las diferencias de las frecuencias identificadas con ambos métodos fue mínima, aunque hubo una mayor dificultad en la estimación con N4SID. En los modelos del sistema 3D-15GL los errores en la identificación de frecuencias con ambas metodologías fueron del mismo orden y para amortiguamientos ligeramente menores con N4SID. En los modelos con ruido la estimación de frecuencias con MM fue mejor que con N4SID y en la identificación de amortiguamientos las dos tuvieron errores similares. En la estimación con N4SID la implementación de gráficas de estabilización (necesarias para la identificación de sistemas reales) complica la automatización del proceso e incrementan el tiempo de procesamiento. Además, cabe mencionar que en el sistema real con modos acoplados estos no se pudieron identificar con certeza.

## Capítulo 3. Implementación del algoritmo genético a la metodología de identificación

Los algoritmos genéticos (AG) son modelos para la solución de problemas inspirados en la evolución y son usados frecuentemente como metodologías de optimización. Los primeros trabajos presentados en este aspecto fueron los desarrollados por Holland (1975) y actualmente se han difundido en diversas ramas de la ciencia e ingeniería y los resultados presentados son tan buenos como con métodos tradicionales.

En este capítulo se presenta el algoritmo genético desarrollado para su implementación en la metodología de minimización modal. Se describen los parámetros y operadores empleados así como los procedimientos de estimación de propiedades dinámicas.

### 3.1 Definición de los parámetros del algoritmo genético

Los AG se definen por los siguientes parámetros y operadores: codificación, tamaño de la población, función de ajuste, selección, cruzamiento, mutación, y criterios de detención. En la implementación de AG es necesario definir los parámetros y operadores óptimos para el tipo de problema. Para la adaptación a la metodología de minimización modal se estudiaron diferentes propuestas recomendadas en la literatura y se probaron con sistemas analíticos para escoger las más adecuadas.

#### 3.1.1 Codificación (genes y cromosomas)

En los AG los genes son la codificación de los parámetros a identificar, cada gen puede representar el valor numérico de un parámetro, o una parte de él, los cromosomas son conjuntos de genes. En este trabajo se estudió la codificación por valor y binaria.

En la codificación binaria (empleada únicamente en pruebas con sistemas de un grado de libertad) se definió un cromosoma de 26 genes. Para la frecuencia se empleó una cadena binaria de 16 *bits*. En un intervalo entre 0 y 50 Hz, con estos valores se obtiene una resolución relativa de la cadena binaria un poco mayor a 1/1300, como referencia el equivalente en el análisis espectral convencional con el mismo intervalo de frecuencias correspondería a cadenas binarias entre 10 y 13 *bits*. Para el amortiguamiento, dado que el intervalo de posibles valores es menor (de 0 a 0.1), se empleó una cadena de 10 *bits* en la codificación de este parámetro, obteniéndose una resolución relativa al intervalo de aproximadamente 1/10000. Estos valores de resolución se refieren a la mínima diferencia de los valores de dos cadenas binarias consecutivas, calculados con la ec. 3.3.

En la codificación por valor se definió un cromosoma donde cada gen representa el valor de uno de los parámetros a identificar.

#### 3.1.2 Tamaño de la población

El tamaño de la población corresponde al número de cromosomas en cada generación y es el número de posibles soluciones. Algunos autores (Mitchell, 1996), recomiendan que el tamaño de la población sea igual al número de genes, y poblaciones entre 20 y 50 cromosomas presentan buenos resultados. Para la codificación por valor, en los ejemplos estudiados el número de parámetros a estimar por modo fue menor a 15 y en los modelos con codificación binaria el número de genes fue 26. Por lo cual, se trabajará con poblaciones de 20 y 30 cromosomas para la codificación por valor y binaria respectivamente.

La población inicial, o primera generación, se forma a partir de valores aleatorios uniformemente distribuidos en un intervalo específico para cada parámetro. Estos valores definen el espacio de búsqueda inicial, el cual se amplía o reduce conforme se van produciendo nuevas generaciones. En la codificación binaria existe una diferencia entre el intervalo de los límites de la codificación y el intervalo de los valores iniciales, lo cual significa que no pueden existir soluciones fuera de los límites de la codificación, pero si del intervalo de valores iniciales.

### 3.1.3 Selección de cromosomas

En ambas codificaciones, la selección de cromosomas se hizo por medio de muestreo estocástico con remplazo (Goldberg, 1989). La probabilidad de selección se calcula con la ec. 3.2 y depende del valor de la función de ajuste, ec. 3.1. Además se aplica elitismo de los dos mejores cromosomas (Mitchell, 1996).

La función de ajuste tiene que ser real-positiva y representativa de la correspondencia entre la respuesta teórica o medida, y la respuesta calculada con el cromosoma en evaluación. Resulta conveniente calcularla como el inverso de la función de evaluación definida en el capítulo anterior, ec. 2.35. De esta manera además se tiene un parámetro de comparación entre el método de convergencia original con mínimos cuadrados y el propuesto con AG.

$$A = \frac{1}{J} \quad 3.1$$

$$P_n = \frac{A_n}{\sum_{n=1} A_n} \quad 3.2$$

La función de ajuste fue la misma en ambos tipos de codificación, solamente que para la codificación binaria los parámetros tienen que convertirse de cadena binaria a su valor real, ec. 3.3.

$$v = v_{\min} + \frac{v_{bin}}{2^L - 1} (v_{\max} - v_{\min}) \quad 3.3$$

donde  $v_{bin}$  es el valor decimal de la cadena binaria,  $v_{\max}$  es el límite superior del intervalo de la codificación,  $v_{\min}$  es el límite inferior del intervalo de la codificación y  $L$  es número de bits.

### 3.1.4 Cruzamiento

Para la codificación por valor se empleó cruzamiento aritmético (Gen y Chen, 2000), en el cual los genes del cromosoma hijo ( $G_c$ ) se calcularán como el valor promedio de los genes de los cromosomas padres ( $G_{P1}$  y  $G_{P2}$ ), ec. 3.4.

$$G_c = \frac{G_{P1} + G_{P2}}{2} \quad 3.4$$

Para la codificación binaria se estudiaron tres tipos de cruzamiento (Chambers, 1999): cruzamiento aleatorio de un punto, cruzamiento de puntos fijos y cruzamiento uniforme.

En el cruzamiento aleatorio de un punto a partir de un par de cromosomas padres se escoge un punto de cruzamiento de manera aleatoria. El cromosoma hijo está compuesto de la primera parte de la cadena binaria del cromosoma padre 1 hasta el punto de cruzamiento, la segunda parte desde el punto de cruzamiento hasta el final de la cadena binaria del cromosoma padre 2 (figura 3.1).

Para el cruzamiento de puntos fijos se escogen varios puntos de cruzamiento significativos, usualmente corresponden a la cadena binaria que representa alguno de los parámetros codificados o a las cifras significativas de estos, y los cromosomas padres se combinan en estos puntos. En las pruebas con sistemas de un grado de libertad el punto de cruzamiento se escogió después del gen 16 (la frontera entre los genes de frecuencia y los genes de amortiguamiento), la cadena binaria resultante sería equivalente a un cromosoma con la frecuencia del padre 1 y el amortiguamiento del padre 2 (figura 3.1).

El cruzamiento uniforme consiste en copiar sistemáticamente uno a uno los genes de los cromosomas padres en el cromosoma hijo (figura 3.1).

En ambos tipos de codificación se usó una tasa de cruzamiento de 100% (Goldberg, 1989).

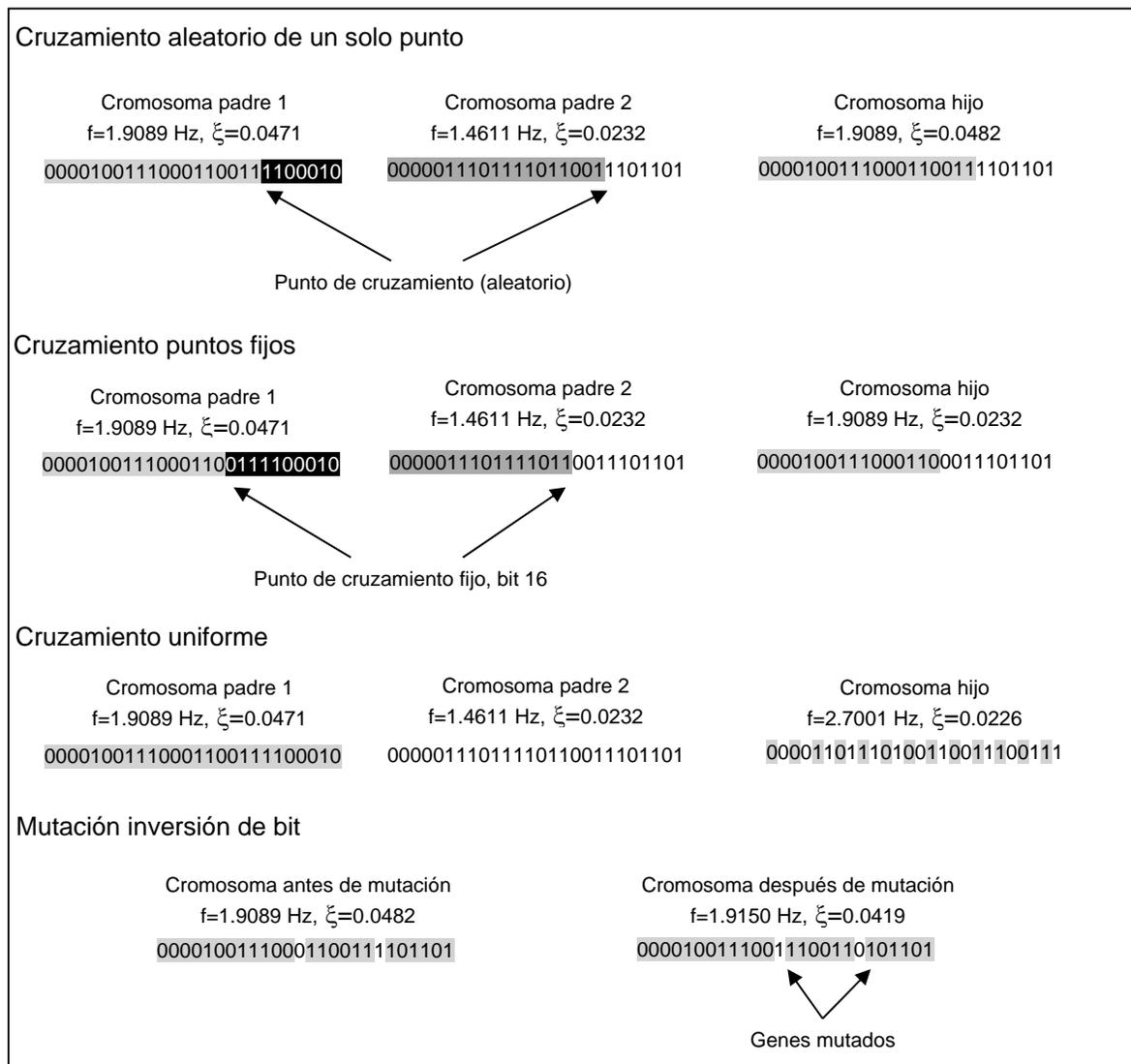


Figura 3.1. Cruzamiento y mutación codificación binaria

### 3.1.5 Mutación

Para la codificación por valor el operador de mutación se definió como una perturbación del valor del cromosoma (Gen y Chen, 2000) en la cual el gen mutado ( $G_m$ ) se calcula sumando o restando al gen cruzado ( $G_c$ ) un porcentaje de su valor ( $m$ ), ec. 3.5. Se empleó una probabilidad de mutación entre 5 y 15%, dependiendo del número de parámetros a identificar. El porcentaje de mutación fue de 2%.

$$G_m = G_c \pm mG_c \quad 3.5$$

Para la codificación binaria se escogió mutación de inversión de bit (figura 3.1), con probabilidad de mutación de 5% (Chambers, 1999). En comparación con la codificación por valor, se estableció una menor probabilidad de mutación para que en ambas codificaciones el número de parámetros con genes mutados fuera similar.

### 3.1.6 Criterios de detención

Se escogieron tres criterios comunes en otros trabajos de optimización con AG (Safe *et al.*, 2004) que fueran adecuados a las características del problema. Dado que los umbrales sugeridos en la literatura y los procedimientos para estimarlos en general conducen a valores relativamente grandes, para la aplicación en la metodología de minimización modal fue necesario establecer estos valores.

En pruebas preliminares con modelos analíticos de un grado de libertad se empleó el criterio de generaciones máximas con valores hasta de 500. Se observó que los parámetros convergían a su valor final antes de 50 generaciones, por lo que en pruebas posteriores se empleó este valor como máximo y en algunas pruebas con codificación binaria hasta 100.

El valor de 50 generaciones máximas también se empleó en modelos planos de varios grados de libertad, sin embargo, para hacer más eficiente el algoritmo sin limitar el espacio de búsqueda se propusieron otros dos criterios. Por repetición del cromosoma: si el mejor cromosoma de cada generación se repite al menos un determinado número de generaciones consecutivas. Por homogeneidad de la población: si en una generación el promedio de los coeficientes de variación de los genes de todos los cromosomas es menor que el umbral definido.

El primer criterio sirve para comprobar si ha convergido a un valor y con el segundo se evitan iteraciones innecesarias cuando se ha llegado a una población con poca diversidad genética. Cabe resaltar que aunque los criterios adoptados son comunes en la literatura, los umbrales fueron determinados con base en pruebas con modelos analíticos planos de 3 y 5 grados de libertad presentados más adelante (figura 4.5). Posteriormente se comprobó que los parámetros estimados convergieran a los mismos resultados (figura 4.6), de esta forma el algoritmo es más eficiente y se adapta a las condiciones particulares del trabajo desarrollado.

## 3.2 Procedimientos de minimización

Para la minimización con AG se genera una población inicial (primera generación) con valores aleatorios dentro de intervalos establecidos para cada parámetro. Cada cromosoma es una posible solución y en él están contenidos los parámetros dinámicos en forma de genes. Con estos cromosomas y las señales de excitación se calculan las respuestas correspondientes. Las señales de referencia y las calculadas se comparan entre sí mediante las funciones de evaluación y ajuste. Si no se cumplen los criterios de ajuste se procede a formar una nueva generación mediante los operadores de selección, cruzamiento y mutación, y se repite el proceso. Si se cumplen los

Los criterios de convergencia los parámetros identificados corresponden al mejor cromosoma de esa generación.

Dada la capacidad de convergencia multidimensional del AG y para aprovechar la relación lineal de algunos parámetros con la respuesta del sistema, se evaluaron diferentes procedimientos de minimización de los parámetros a identificar con la metodología de minimización modal y el AG:

- Minimización de todos los parámetros y de todos los modos, (MinT)
- Minimización por modos (MinM)
- Minimización por parámetros (MinP)
- Minimización por modos con estimación independiente de formas modales (MinM-EI), en este tipo de minimización se emplearon dos opciones de estimación de formas modales.

El procedimiento MinT consiste en minimizar la función de evaluación mediante la variación de todos los parámetros de todos los modos a identificar, es decir, que en cada generación se estiman simultáneamente los valores de frecuencia, amortiguamiento y forma modal de todos los modos.

En el procedimiento MinM se minimiza la función de evaluación mediante la variación de todos los parámetros de solamente un modo, por lo que, en cada generación se estiman simultáneamente la frecuencia, amortiguamiento y forma modal de un sólo modo. Posteriormente, una vez procesado el primer modo, se minimiza la función de evaluación variando todos los parámetros del siguiente modo y así sucesivamente. En este caso, la respuesta calculada se obtiene con los parámetros del modo en evaluación y los parámetros identificados previamente.

La minimización con el procedimiento MinP se hace con la variación de solamente un grupo de parámetros. En cada generación los valores de los parámetros del grupo serán los que varíen y minimicen simultáneamente, los demás permanecerán fijos. Una vez que converja el primer grupo de parámetros se continúa con el siguiente y se realizarán tantos procesos como grupos de parámetros se escojan. Cabe mencionar que la minimización MinM sería un caso particular de la minimización MinP si los grupos se forman con los parámetros de cada uno de los modos. Para este procedimiento en cada modo se agruparon los genes de frecuencia y amortiguamiento, otro grupo de condiciones iniciales, y finalmente uno con los genes del factor de respuesta por modo (FRM).

El procedimiento MinM-EI es un método combinado en el cual se minimizan simultáneamente por modo los parámetros de frecuencia, amortiguamiento y condiciones iniciales con el AG empleando señales de respuesta normalizadas. Las formas modales y factor de participación se estiman independientemente con otra metodología. Se estudiaron dos opciones para la estimación independiente. En la primera opción (EI-AE) las formas modales se calculan independientemente a partir de las amplitudes espectrales y ángulos de fase de las señales de respuesta teóricas. En la segunda opción (EI-AL) se hace un ajuste lineal con mínimos cuadrados entre las señales calculadas con los parámetros identificados con el AG y las señales de respuesta de referencia para obtener el FRM, a partir del cual se estiman las formas modales y factores de participación.

En los procedimientos MinM y MinM-EI para la identificación de más de un modo de vibrar se minimiza la función de evaluación mediante la variación de todos los parámetros de solamente un modo. Posteriormente, una vez identificado ese modo, se minimizará mediante la variación de todos los parámetros del siguiente y así sucesivamente. En la función de evaluación se toma en cuenta la contribución de los modos ya identificados. En el procedimiento MinP se hace una minimización unidimensional por parámetro a identificar, dejándose un valor fijo para los demás parámetros, el orden de la minimización fue el mismo sugerido en el planteamiento original de la metodología (Beck, 1978) solamente que se emplea el AG para la minimización.

En las figuras 3.2 a 3.5 se presentan los diagramas de flujo para los diferentes procedimientos de minimización.

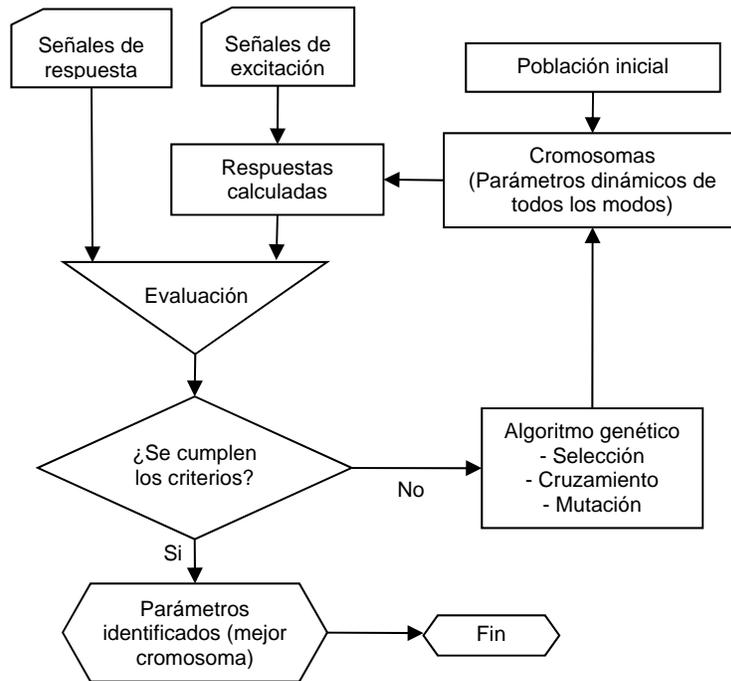


Figura 3.2. Diagrama de flujo procedimiento MinT

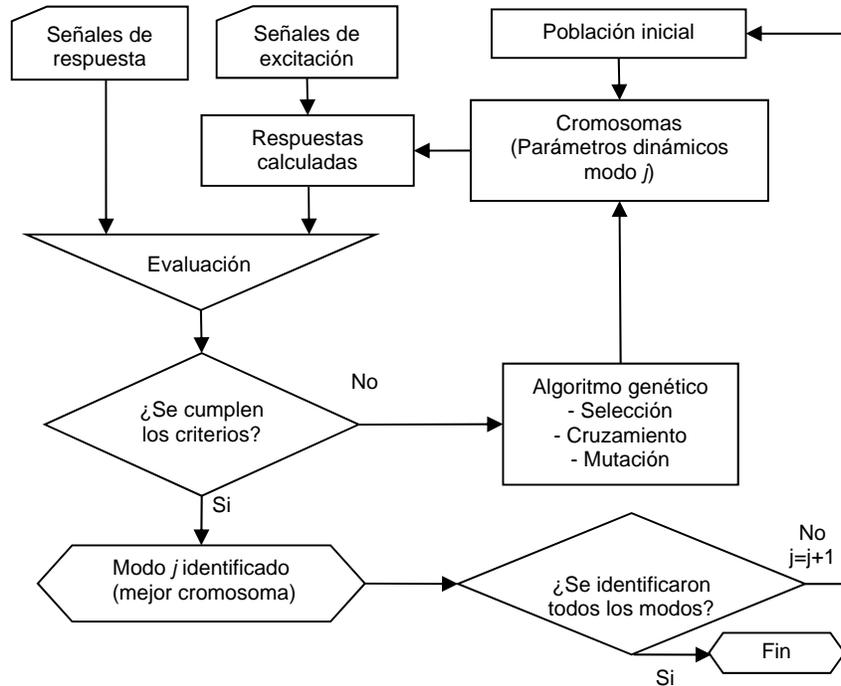


Figura 3.3. Diagrama de flujo procedimiento MinM

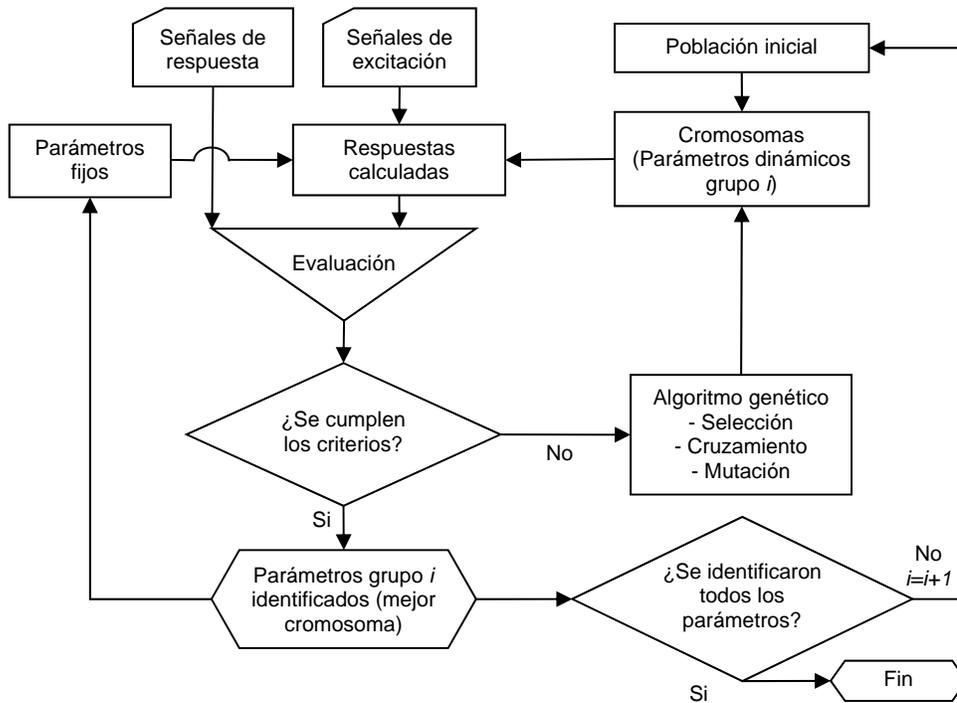


Figura 3.4. Diagrama de flujo procedimiento MinP

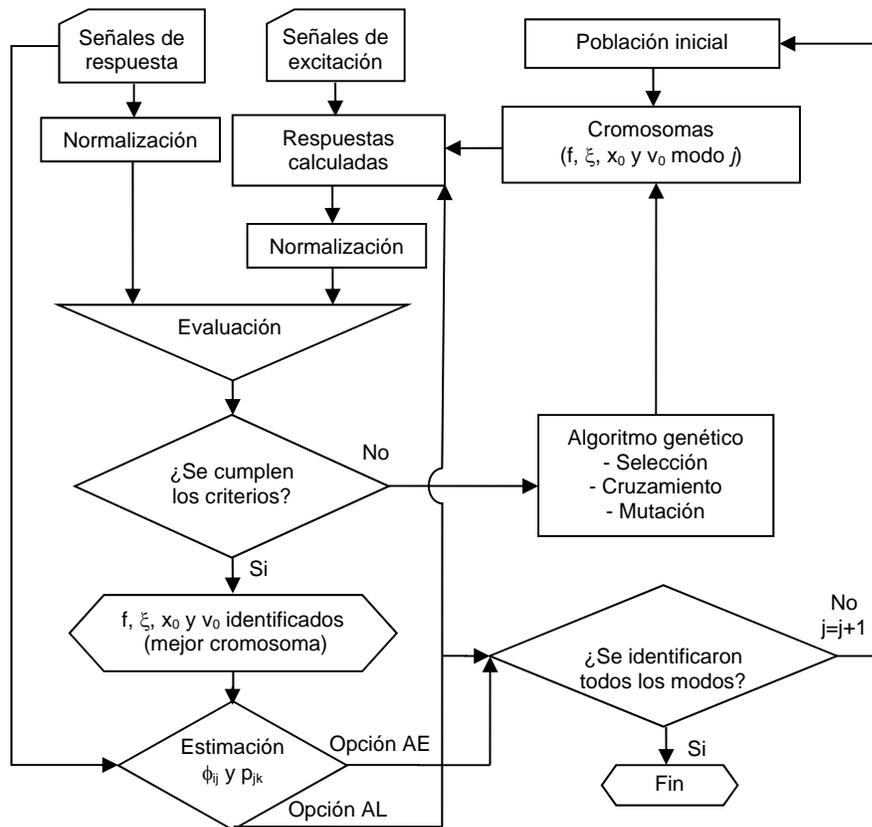


Figura 3.5. Diagrama de flujo procedimiento MinM-EI

### 3.3 Procedimiento de automatización

En la figura 3.6 se muestra un esquema del proceso automatizado de identificación empleando la metodología de minimización modal con algoritmos genéticos (MMAG). El primer paso corresponde al análisis de la señal completa, donde se determina las características del evento y se hace una primera identificación de propiedades dinámicas. A partir del análisis inicial y dependiendo de la calidad de los registros e información previa se determina el número de ventanas y su duración.

Un aspecto importante del proceso automático es la elección del número de ventanas y su duración. Mientras mayor sea el número de ventanas se podrá apreciar mejor la variación de parámetros, por otra parte, entre menos ventanas a procesar más rápido será la obtención de resultados. Como el análisis por ventanas se hace con modelos invariantes en el tiempo se usan ventanas de corta duración donde se pueda suponer comportamiento lineal; sin embargo, la duración de la ventana tiene que ser lo suficientemente grande para una adecuada identificación. Es conveniente emplear ventanas de al menos tres veces el periodo fundamental de la estructura además de tomar en cuenta la amplitud de la respuesta.

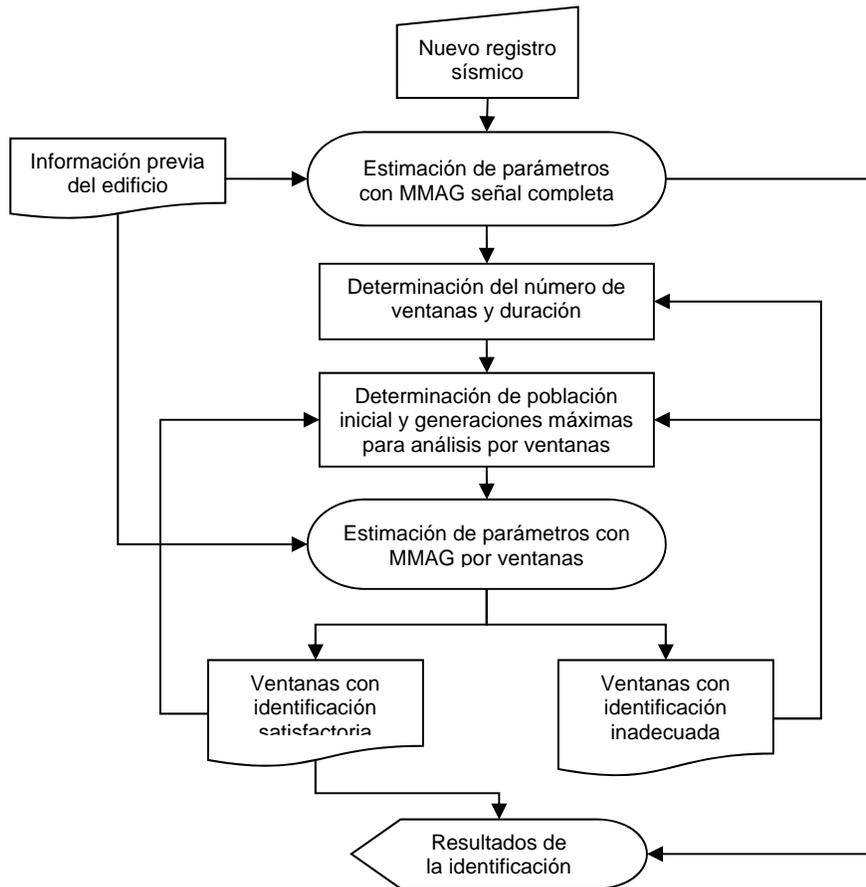


Figura 3.6. Esquema de análisis procedimiento automatizado

El siguiente paso consiste en la identificación por ventanas, donde se emplea información previa del edificio. Primero se hace una estimación con los mismos parámetros del algoritmo genético para todas las ventanas y se analizan los valores estimados. Si en la ventana se cumplen los criterios de ajuste (comparación entre señales medidas y calculadas, relevancia y congruencia de los parámetros identificados) se dice que en la ventana hubo una identificación adecuada y esta información puede ser usada para el ajuste de otras ventanas.

Posteriormente, si en la ventana no se cumplen con los criterios, se reprocesa y de continuar esta tendencia se modifica el tamaño de la ventana. Para el reprocesamiento se utilizará un intervalo más cerrado de valores para la población inicial, tomando en cuenta los valores estimados en ventanas con un ajuste adecuado. Si el criterio de convergencia del algoritmo genético que rigió en estas ventanas haya sido el de generaciones máximas, se aumentara el número de generaciones para el reprocesamiento, y se mantendrán los mismos umbrales para los otros criterios.

## Capítulo 4. Pruebas de implementación del algoritmo genético

En este capítulo se presentan las pruebas realizadas para implementación de algoritmos genéticos (AG) a la metodología de minimización modal. Las pruebas se realizan con sistemas analíticos de uno y varios grados de libertad, con ellos se prueban los diferentes parámetros del AG y se establecen los umbrales de los criterios de detención. También se evalúan los procedimientos de minimización planteados en el capítulo anterior, enfocándose en la estimación de formas modales. Por último se presenta una comparación entre los AG y el método de mínimos cuadrados, empleando dos problemas típicos de minimización.

Con estas pruebas se evaluó el uso de AG y se definieron los parámetros óptimos para emplearse en la identificación de propiedades dinámicas en edificios instrumentados.

### 4.1 Descripción de los modelos analíticos

Las pruebas con sistemas analíticos consistieron en modelos masa-resorte planos y tridimensionales de uno y cinco niveles, que se muestran en la figura 4.1:

- Seis sistemas planos de un nivel y un grado de libertad (1GL) con frecuencias de vibración de 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 y 1.2 Hz y 0.03 de fracción de amortiguamiento crítico.
- Un sistema plano de cinco niveles (5GL, un grado de libertad por nivel), con frecuencia fundamental de 0.45 Hz y con fracciones de amortiguamiento crítico modales de 0.03.
- Un sistema plano de tres niveles (3GL, un grado de libertad por nivel), con frecuencia fundamental de 0.71 Hz y con fracciones de amortiguamiento crítico modales de 0.03.
- Tres sistemas tridimensionales de un nivel y tres grados de libertad (3D-3GL, traslación en los componentes longitudinal y transversal, y rotación alrededor del centro geométrico). Variando los parámetros de rigidez y excentricidad en este sistema se modelaron tres diferentes grados de acoplamiento entre los modos (sin acoplamiento, acoplado y fuertemente acoplado). Las frecuencias de vibración en los componentes traslacionales de estos sistemas se encuentran entre 8 y 10 Hz y las de torsión entre 15 y 17 Hz, y con una fracción de amortiguamiento crítico modal de 0.03. El grado de acoplamiento se refiere la cercanía de los valores de frecuencia entre los modos acoplados, así como la participación de un componente con otro. Estas características están relacionados con la complejidad y número de elementos diferentes de cero en la matriz de rigidez; aunque, puede haber sistemas cuyos elementos de la matriz de rigidez estén acoplados pero sus frecuencias sean muy distintas. En este trabajo se estudió el primer caso, ya que es el más desfavorable para la identificación.
- Un sistema tridimensional de cinco niveles y 15 grados de libertad (3D-15GL, tres grados de libertad por cada nivel). Los parámetros se establecieron para representar un edificio de cortante de igual masa y rigidez en todos los entresijos. En este sistema se consideró amortiguamiento proporcional de Rayleigh, con fracciones de amortiguamiento modal entre 0.02 y 0.07.

Los parámetros de los sistemas analíticos se establecieron para simular las características dinámicas de edificios (Murià-Vila y González, 1995). En estos sistemas se utilizaron como excitación los registros del sismo de 1985 en la estación SCT. Las señales de respuesta se calcularon resolviendo la ecuación dinámica de movimiento con el método de descomposición modal y el método de las ocho constantes de Jaramillo (Chopra, 1995).

En algunos modelos se contaminaron las señales de respuesta con un ruido blanco (Smith, 1997) para evaluar la susceptibilidad de las metodologías ante el ruido. La relación señal-ruido (RSR) se define como el cociente entre la media cuadrática de la señal y la media cuadrática del ruido, se calcula el valor del cociente en decibelios (dB). Para estas pruebas se eligieron dos niveles de ruido, el primero con una RSR mayor a 20 dB y el segundo entre 20 y 6 dB. El primer nivel de ruido también ha sido usado por otros autores en estudios similares con metodologías de identificación de sistemas. El segundo nivel de ruido es muy poco común en sistemas de adquisición de datos pero permitió probar las metodologías ante estos casos extremos.

En los sistemas planos se calcularon directamente las señales de respuesta en todos los grados de libertad. En los sistemas tridimensionales, por cada nivel, se calcularon dos señales de respuesta de traslación en los componentes horizontales, y una señal de giro alrededor del eje vertical. Las señales de respuesta para la identificación en los componentes longitudinal (L) y transversal (T) fueron las señales horizontales, y la señal de respuesta de torsión (R) se calcula como la traslación del centro de torsión más la traslación debida al giro.

Para determinar el componente del modo identificado en modelos tridimensionales se toman en cuenta los parámetros dinámicos relacionados con los valores y vectores característicos (frecuencias y formas modales) y también la contribución del modo en las señales de respuesta. Con estos parámetros y con la relación entre la frecuencia del modo fundamental y los modos superiores para una estructura de corte o de flexión, se puede determinar el componente al cual corresponde el modo identificado. Únicamente con la matriz de formas modales no es evidente a que componente corresponde cada modo, a menos que sea un sistema con muy poco acoplamiento, donde la amplitud modal en los grados de libertad que no correspondan al componente del modo identificado tienen valores muy cercanos a cero.

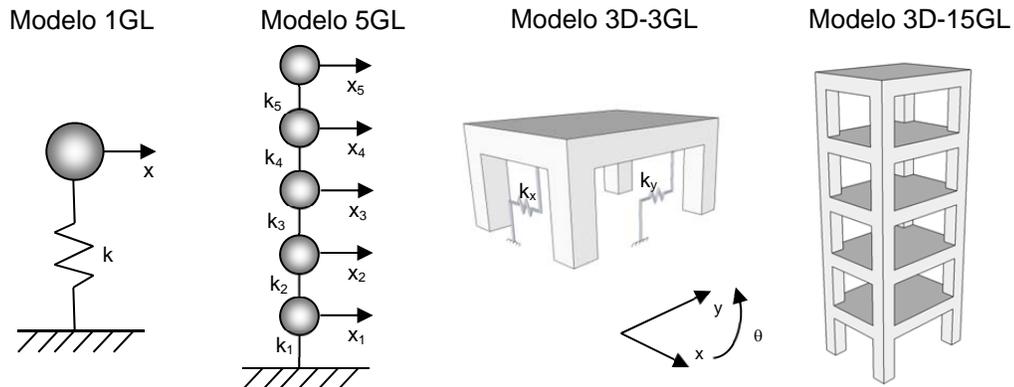


Figura 4.1. Modelos analíticos

## 4.2 Evaluación de parámetros del AG

Para la evaluación de los operadores del AG se hicieron pruebas con sistemas analíticos de un grado de libertad empleando codificación por valor y binaria.

Se hicieron pruebas de desempeño del nuevo método de convergencia con AG en la metodología de minimización modal (MMAG) con codificación por valor y binaria, y se comparan con los resultados de la metodología original con mínimos cuadrados (MMMC). Se emplearon seis sistemas 1GL y se evaluó el tiempo de procesamiento, el número de iteraciones (para el AG corresponde a la generación en la cual los mejores cromosomas convergen al valor final) y el valor de la función de evaluación  $J$ , ec. 2.35. Los resultados se presentan en la tabla 4.1

La población inicial se formó con valores aleatorios uniformemente distribuidos entre 0.2 y 1.5 Hz para la frecuencia, y con valores entre 0.01 y 0.05 para la fracción amortiguamiento. En la codificación binaria hay que acentuar que existe una diferencia entre el intervalo de los límites de la codificación y el intervalo de los valores iniciales.

Tabla 4.1. Comparación mínimos cuadrados y algoritmo genético modelos 1GL

Modelo	MMMC			MMAG (codificación por valor)			MMAG (codificación binaria)		
	t (s)	Iteraciones	J (ec. 2.35)	t (s)	Iteraciones	J (ec. 2.35)	t (s)	Iteraciones	J (ec. 2.35)
1	3.7	15	1.27	13.5	11	1.00	12.1	10	1.63
2	3.6	15	1.33	9.8	9	2.29	19.3	17	1.52
3	3.6	14	1.17	23.0	20	4.28	16.2	13	4.51
4	3.7	15	2.69	22.5	19	4.33	17.6	14	2.37
5	3.7	13	2.45	10.8	7	0.65	11.8	9	5.19
6	4.4	15	2.26	17.6	13	1.93	17.1	15	3.51

En la figura 4.2, para ejemplificar los resultados de los modelos de 1GL, se muestra las frecuencias y amortiguamientos estimados con el mejor cromosoma de cada generación y en línea continua el valor teórico. En la figura 4.3 se muestra la comparación de la señal de aceleración teórica calculada con los parámetros del sistema y la señal calculada con los parámetros estimados. En el apéndice A se presenta la gráfica de la diferencia cuadrática entre las amplitudes de las dos señales. En la figura 4.4 se presentan los espectros de Fourier de estas señales y se indica con una línea vertical punteada la frecuencia del sistema.

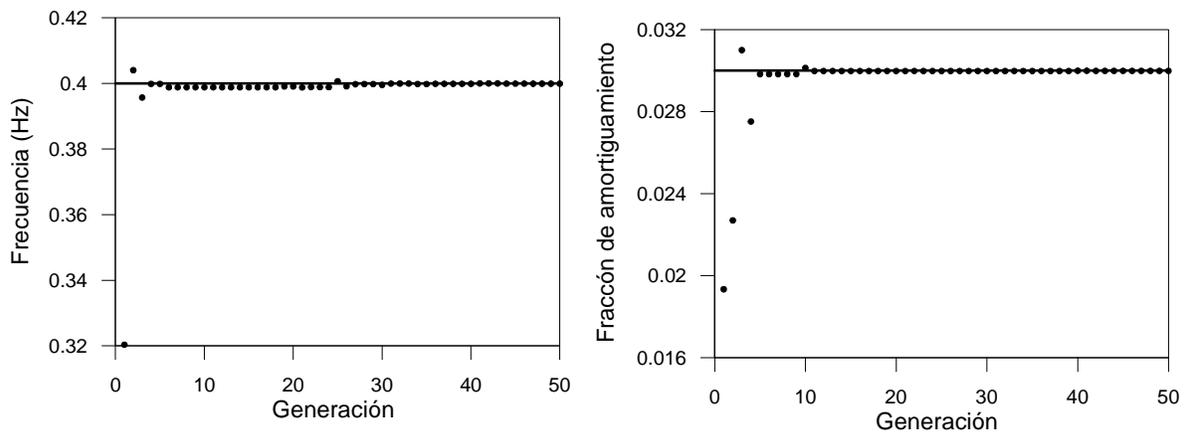


Figura 4.2. Estimación de frecuencias y amortiguamiento por generación modelo 1GL  $f=0.4$  Hz

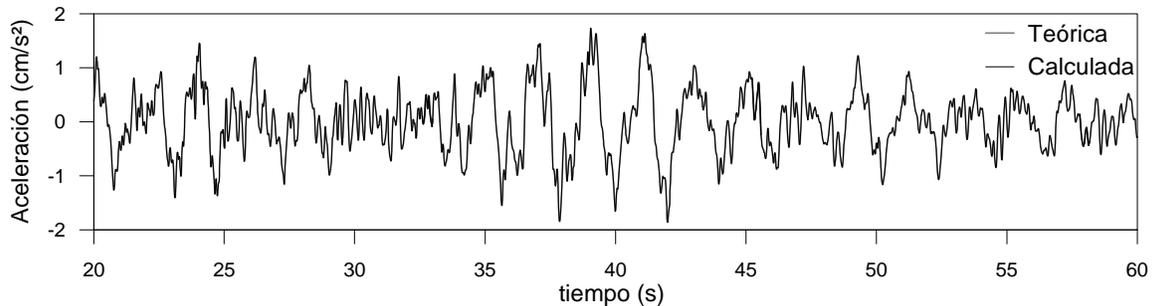


Figura 4.3. Comparación de señales teóricas y calculadas modelo 1GL

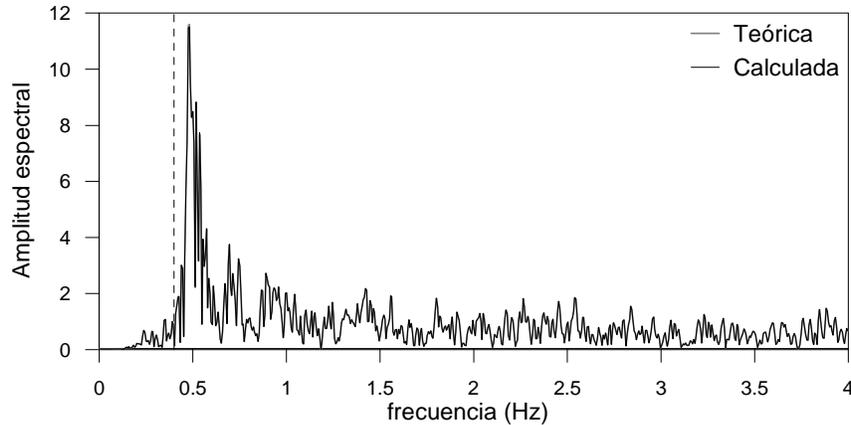


Figura 4.4. Comparación de espectros de Fourier señales teóricas y calculadas modelo 1GL

Con mínimos cuadrados se obtuvieron menores tiempos de procesamiento que con el AG empleando la codificación por valor o binaria. Se determinó que el mayor tiempo se consume en la evaluación de los cromosomas. En cuanto al número de iteraciones, a diferencia de mínimos cuadrados, con el AG los valores son muy variables y depende principalmente de la población inicial. La función de evaluación se encuentra en el mismo intervalo de valores con ambos métodos de convergencia.

En la codificación binaria hubo algunos modelos donde no se convergía al valor teórico y fue necesario reprocesar. Se descartan errores de precisión debido al número de bits escogidos, también un mayor número de generaciones no mejoró la identificación. El principal problema está en la población inicial, ya que, en el reprocesamiento se mejoraron los resultados aumentando su tamaño o reduciendo el intervalo de sus valores iniciales.

#### 4.2.1 Pruebas de robustez con codificación binaria

Con el objetivo de mejorar los resultados con codificación binaria, se modificaron cuatro parámetros del AG que pudieran dar mayor robustez: se incrementó el tamaño de la población de 30 a 50 cromosomas, se aumentó el límite de generaciones máximas de 50 a 100, se estableció una tasa de mutación de 15% en vez de 5%, y se probó cruzamiento sin elitismo. Se empleó siempre la misma población inicial (un caso con problemas en la identificación) y cuando se aumentó la población se repitieron los mismos elementos. Los resultados se compararán con los obtenidos utilizando los parámetros originales.

En la tabla 4.2 se presentan los resultados de las pruebas de los diferentes cruzamientos de la codificación binaria variando los parámetros del AG antes mencionados. Se estudiaron tres aspectos: la generación en la cual los mejores cromosomas convergen al valor final, el error del mejor cromosoma de la última generación calculado con la función de evaluación y la dispersión del gen de frecuencia, medida como el coeficiente de variación (CV) de los mejores cromosomas de cada generación.

Con respecto a los diferentes tipos de cruzamiento, el valor de la función de evaluación con las variaciones de los parámetros del AG, fue similar entre el cruzamiento aleatorio y el cruzamiento de punto fijo, mientras que con el cruzamiento uniforme el valor fue un 4% mayor. En el cruzamiento de punto fijo se convergió al valor final de los parámetros dinámicos en generaciones menores que en los demás.

En cuanto a los parámetros del AG, no hubo diferencias al aumentar el número máximo de generaciones, ya que, salvo los modelos sin elitismo se convergió al valor final en las primeras 20 generaciones. El elitismo es un parámetro importante para la convergencia y sin éste se producen valores más dispersos. En los modelos donde se incrementó la probabilidad de mutación no se

mejoraron los resultados. En estas pruebas, donde se emplea la misma población inicial, aumentar el tamaño de esta no mejoró la robustez. Las mejoras mencionadas anteriormente en los reprocesamientos de algunos modelos se explican debido a que, en esos modelos, al incrementar el tamaño de la población también se modificaron sus elementos.

Tabla 4.2. Resultados de las pruebas de variación de parámetros AG con diferentes cruzamientos

Cruzamiento	Generación de convergencia			Función de evaluación $J$ (ec. 2.35)			CV(%) gen de frecuencia		
	Aleatorio	Punto fijo	Uniforme	Aleatorio	Punto fijo	Uniforme	Aleatorio	Punto fijo	Uniforme
Parámetros originales	16	10	12	117.7	117.8	123.2	0.90	0.87	0.57
Población 50 cromosomas	13	10	11	117.5	117.2	117.7	0.43	0.25	0.32
Probabilidad de mutación 15%	15	12	14	122.0	117.9	122.9	0.54	0.76	0.73
Sin elitismo	>50	38	>50	117.9	117.5	123.1	2.05	1.59	1.39
Generaciones máximas 100	16	10	12	117.7	117.8	123.2	0.90	0.87	0.57

Una opción en la codificación binaria es aplicar los operadores de cruzamiento y mutación independientemente a los segmentos de la cadena binaria que representen cada uno de los parámetros dinámicos. Con el objetivo de estudiar esta opción se hicieron pruebas con cruzamiento y mutación independiente para cada parámetro. Los resultados se comparan con la codificación binaria empleando los operadores en toda la cadena binaria y con la codificación por valor, para cada opción se evaluaron 50 modelos. La mutación para la codificación binaria fue de inversión de bit, y en la codificación por valor se empleó cruzamiento aritmético y mutación de perturbación del valor del cromosoma.

Los resultados a comparar son, la generación de convergencia, el valor promedio y máximo de la función de evaluación, así como el coeficiente de variación de las frecuencias y amortiguamientos identificados (tabla 4.3). También se presenta el número de modelos con identificación adecuada y errónea, para el primer caso los errores relativos en la estimación de parámetros dinámicos fue menor al 2% y el caso contrario los errores fueron mayores a 50%.

Tabla 4.3. Resultados de las pruebas de opciones de aplicación de cruzamientos

Opción de Cruzamiento (Codificación)	Generación de convergencia	Función de evaluación $J$ (ec. 2.35)		CV(%) frecuencia	CV(%) amortiguamiento	Modelos con identificación	
		Promedio	Máx.			Adecuada	Errónea
Aritmético (por valor)	8 a 20	2.71	4.7	0.08	1.31	50	0
Aleatorio, operadores por parámetro (binaria)	9 a 18	3.12	5.3	0.55	8.91	50	0
Aleatorio, operadores a toda la cadena (binaria)	8 a 50	39.73	294.4	1.25	18.53	44	6
Uniforme, operadores a toda la cadena (binaria)	9 a 50	30.26	215.5	1.14	17.60	42	8
Uniforme, operadores por parámetro (binaria)	8 a 50	47.48	359.0	1.16	18.02	39	11

En el cruzamiento aleatorio de un punto, aplicar los operadores de cruzamiento y mutación por parámetro resultó en mejoras generales. La dispersión de las frecuencias estimadas fue casi 1% menor, y el valor medio de la función de evaluación también disminuyó. Además en todos los modelos hubo una buena identificación de los parámetros, a diferencia de los procesos aplicando

los operadores a toda la cadena, donde en seis modelos no se pudieron identificar correctamente los parámetros.

En el cruzamiento uniforme, aunque los valores de comparación son ligeramente menores a las pruebas donde se aplicaron los operadores a toda la cadena binaria, las diferencias no son significativas. Con este cruzamiento emplear los operadores por parámetros no evitó que hubieran modelos que no convergieran al valor teórico.

No obstante que emplear los operadores por parámetros fue una mejora en la codificación binaria, los resultados de la codificación por valor en cuanto a robustez siguen siendo mejores, ya que hay una menor dispersión de los parámetros identificados para diferentes procesos con el mismo modelo. La diferencia radica en el operador de cruzamiento, ya que en el aleatorio, de punto fijo y uniforme, se trabaja con la cadena binaria del cromosoma, por lo que no se tienen en cuenta el valor del parámetro codificado en ella.

Los resultados en las tablas 4.2 y 4.3 muestran que la codificación por valor es más robusta que la codificación binaria, aun modificando parámetros del AG y aplicando los operadores a toda la cadena. Por lo que las siguientes pruebas se enfocarán a la codificación por valor con los parámetros y operadores de AG que presentaron los mejores resultados, los cuales fueron: población de 20 cromosomas, selección con elitismo, cruzamiento aritmético (tasa 100%), mutación de perturbación del 2% del valor del cromosoma (probabilidad de mutación de 5%).

Ya que el proceso de identificación se hace por modos y se aplica el principio de superposición, en pruebas posteriores con sistemas de más de un grado de libertad se emplearon los mismos parámetros y operadores del AG establecidos anteriormente. Salvo los criterios de detención (donde el factor de participación es importante en la obtención de los umbrales de este parámetro) las observaciones hechas sobre el AG con modelos 1GL se aplican al caso de modelos de varios grados de libertad.

#### 4.2.2 Pruebas para establecer los umbrales de los criterios de detención

Se hicieron pruebas con modelos analíticos planos de tres grados de libertad (3GL) y cinco grados de libertad (5GL). Con estas pruebas se obtuvieron las características de la generación de convergencia y se determinaron los umbrales de los criterios de detención de repetición de cromosoma (RC) y homogeneidad de la población (HP). El umbral del criterio de generaciones máximas (GM) se mantuvo en 50.

En estas pruebas (figura 4.5), el mejor cromosoma se repitió al menos cinco veces antes de la generación de convergencia y, salvo un dato extraordinario, el promedio del coeficiente de variación de todos los genes de la generación en cuestión fue menor mayor a 0.45%. Por lo tanto estos valores se toman como los umbrales de los criterios de repetición de cromosoma y homogeneidad de la población, respectivamente.

En la identificación de parámetros, se obtuvieron los mismos resultados empleando los criterios de detención adicionales y solamente el de generaciones máximas. Los valores de la función de evaluación fueron similares y el tiempo de procesamiento se redujo. Con estas pruebas se demuestra que los umbrales de los criterios de detención son adecuados y sirven para optimizar el procedimiento.

En la figura 4.6 se grafican los valores del gen de frecuencia correspondientes al mejor cromosoma de cada generación en cuatro modelos. En los primeros dos (uno de 5GL y otro de 3GL) solamente se empleó el criterio de generaciones máximas y en los dos siguientes se emplearon adicionalmente los criterios de repetición de cromosoma y homogeneidad de la población con los umbrales establecidos anteriormente. En estas gráficas también se presenta en línea continua las frecuencias teóricas del sistema, el valor final de la función de evaluación, y en los dos últimos

modelos la generación de convergencia y el criterio que rigió. Para el modo fundamental el criterio que rigió fue el de repetición de cromosoma y en los modos superiores el de generaciones máximas u homogeneidad de la población.

Cabe mencionar que a partir de la décima generación el valor del gen de frecuencia tiene un error menor al 3% con respecto al teórico. Lo cual significa que estos modelos pudieron tener una aproximación aceptable en 30 o 50 segundos, dependiendo del número de modos a identificar. No obstante, las generaciones adicionales permiten hacer una mejor exploración del espacio de búsqueda y refinar la estimación de parámetros.

El valor del criterio de repetición de cromosoma establecido con modelos analíticos se modificó para ajustarse a los casos reales. Inicialmente se consideró que la repetición de cinco veces el mejor cromosoma podría considerarse como la convergencia del algoritmo, sin embargo, en los modelos de edificios reales no fue suficiente. En las pruebas con modelos tridimensionales de edificios posteriormente se utilizó un valor de 10 para el criterio de repetición del mejor cromosoma, el cual resultó adecuado (aunque, como en los modelos de sistemas analíticos, generalmente rige el criterio de homogeneidad de la población). Además en estas pruebas también se aumentó el número de generaciones máximas a 100.

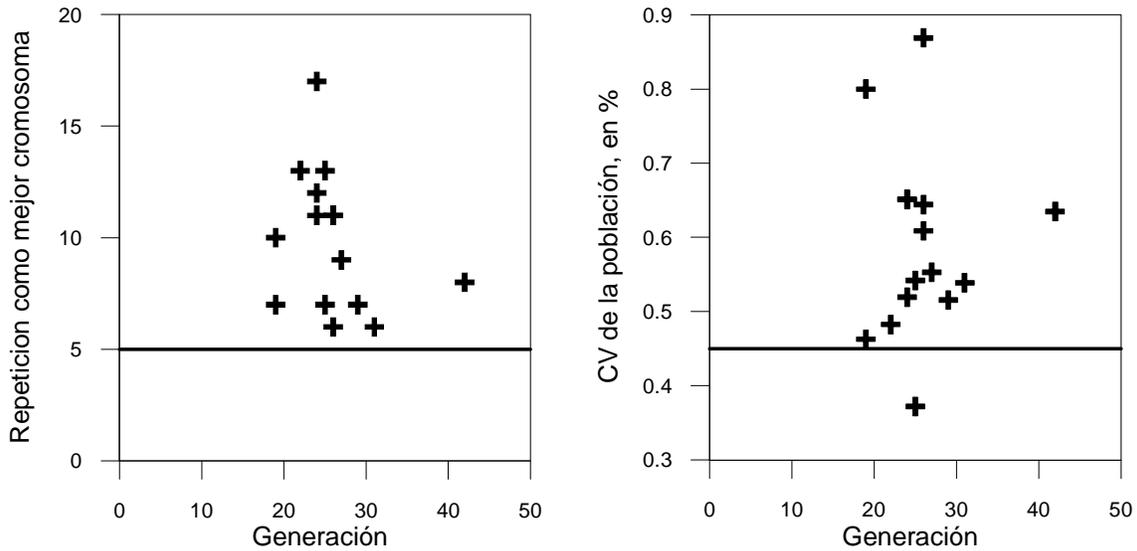


Figura 4.5. Generación de convergencia y propiedades de la población

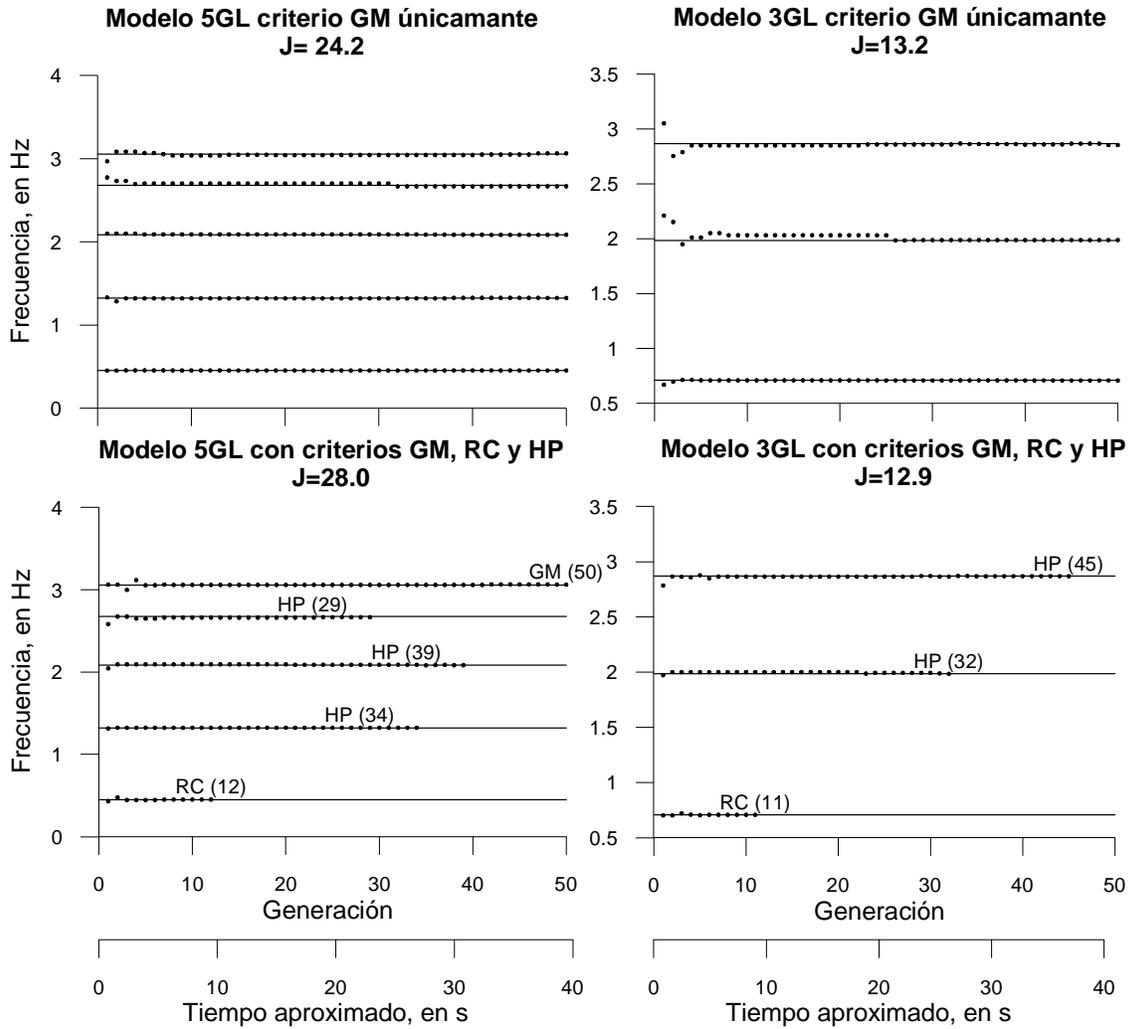


Figura 4.6. Comparación procesos con criterios de convergencia

### 4.3 Evaluación de procedimientos de minimización e intervalos de la población inicial

En la evaluación de los procedimientos de minimización se trabajó con los sistemas planos de tres y cinco grados de libertad (3GL y 5GL). Con estos sistemas se hicieron modelos variando el número de señales de respuesta (identificados con la letra R) y el número de modos a identificar (identificados con la letra M). También se evaluaron diferentes niveles de ruido en las señales de respuesta.

Para cada parámetro las poblaciones iniciales se generaron aleatoriamente dentro de dos intervalos de valores. El intervalo 1 es relativamente amplio ya que se empleó el mismo para todos los modos. Para el intervalo 2 se emplearon valores diferentes en cada modo. Los valores de estos intervalos se presentan en las tablas 4.4 y 4.5.

Tabla 4.4. Intervalo de valores para la población inicial modelos 5GL

	Modo	Frecuencia (Hz)	Fracción de amortiguamiento	FRM
Intervalo 1	1-5	0.2 – 3.5	0.01 – 0.05	-0.4 – 1.5
Intervalo 2	1	0.1 – 0.7	0.01 – 0.05	0.1 – 1.5
	2	1.0 – 1.6	0.01 – 0.05	-0.4 – 0.4
	3	1.7 – 2.3	0.01 – 0.05	-0.4 – 0.4
	4	2.3 – 3.0	0.01 – 0.05	-0.4 – 0.4
	5	2.7 – 3.3	0.01 – 0.05	-0.4 – 0.4

Tabla 4.5. Intervalo de valores para la población inicial modelos 3GL

	Modo	Frecuencia (Hz)	Fracción de amortiguamiento	FRM
Intervalo 1	1-3	0.2 – 3.5	0.01 – 0.05	-0.4 – 1.5
Intervalo 2	1	0.4 – 0.1	0.01 – 0.05	0.1 – 1.5
	2	1.7 – 2.3	0.01 – 0.05	-0.4 – 0.4
	3	2.5 – 3.1	0.01 – 0.05	-0.4 – 0.4

Los resultados de los modelos más representativos se presentan en las figuras 4.7 a 4.27. En estas figuras, para cada modelo, se muestra la identificación de frecuencias en una gráfica con los valores teóricos en línea continua y los valores estimados en cada generación con el mejor cromosoma. Cuando se emplean varias señales de respuesta también se calcula la forma modal y se presenta el valor correspondiente al mejor cromosoma de la última generación. Además, se muestra la comparación entre las señales de respuesta teóricas y las calculadas, así como los respectivos espectros de Fourier de estas señales, graficados junto al valor teórico de las frecuencias del sistema con línea vertical discontinua. También se grafican en las figuras A.2 a A.8 del apéndice A, la diferencia cuadrática entre las señales teóricas y las calculadas.

En los modelos con población inicial en el intervalo 1 y procedimiento MinT la identificación no fue muy buena. Como ejemplo se presentan el modelo 3GL-3R-3M, intervalo 1, procedimiento MinT, en el cual, aunque la frecuencia del primer modo se pudo identificar, los demás parámetros no y hubo diferencias significativas entre las señales teóricas y calculadas.

Empleando un intervalo de valores para la población inicial menos amplio y definido para cada modo a identificar hubo una mejora en los resultados (modelo 3GL-3R-3M, intervalo 2, procedimiento MinT). Se identificó adecuadamente el primero y segundo modo, además la diferencia entre señales teóricas y calculadas fue menor que en los modelos con intervalo 1.

Al identificar solamente el modo fundamental y procedimientos MinT se suele obtener mejores resultados que identificar todos los modos, y los resultados mejoran considerablemente en modelos con intervalo 2. En el procedimiento MinM no hay diferencia si solamente se identifica el modo fundamental, ya que la estimación de los parámetros de cada modo es independiente. Las diferencias entre el procedimiento MinT y MinM son más notorias en los modelos 5GL.

En pocos modelos se obtuvo una buena estimación de las formas modales, y si bien se mejoró en los modelos con intervalo 2 y procedimiento MinM, aún no se logran los niveles de precisión que con otras metodologías de identificación.

En el dominio del tiempo se obtiene una buena correspondencia entre las señales teóricas y calculadas, especialmente en los procedimientos MinM, incluso en los modelos 1M (modelo 3GL-3R-1M, intervalo 2, procedimiento MinT). Salvo los modelos donde no hubo una buena identificación, con los parámetros dinámicos estimados se reproduce adecuadamente la señal de respuesta teórica del sistema.

En cuanto al contenido frecuencial, los espectros de las señales teóricas y calculadas son muy similares en la vecindad de la frecuencia fundamental, en las frecuencias de modos superiores en general las señales calculadas tienen una menor amplitud.

La identificación con una sola señal de respuesta (modelos 1R), con los dos intervalos de valores iniciales y en ambos procedimientos, es muy similar a cuando se emplean las señales en todos los grados de libertad.

En los modelos con ruido, los resultados de la identificación de parámetros dinámicos fueron muy similares a los casos sin ruido. Con lo cual se confirma que la metodología MMAG es poco susceptible al ruido. De hecho, dadas otras pruebas con niveles más altos de ruido y con el método de mínimos cuadrados (Camargo y Murià-Vila, 2009) es probable que la poca susceptibilidad al ruido de esta metodología sea independiente al método de convergencia.

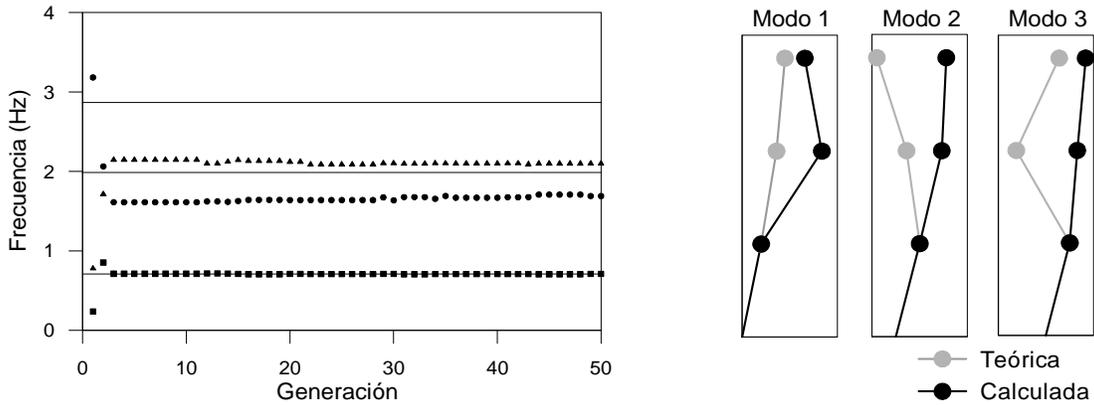


Figura 4.7. Estimación de frecuencias y formas modales modelo 3GL-3R-3M, intervalo 1, procedimiento MinT

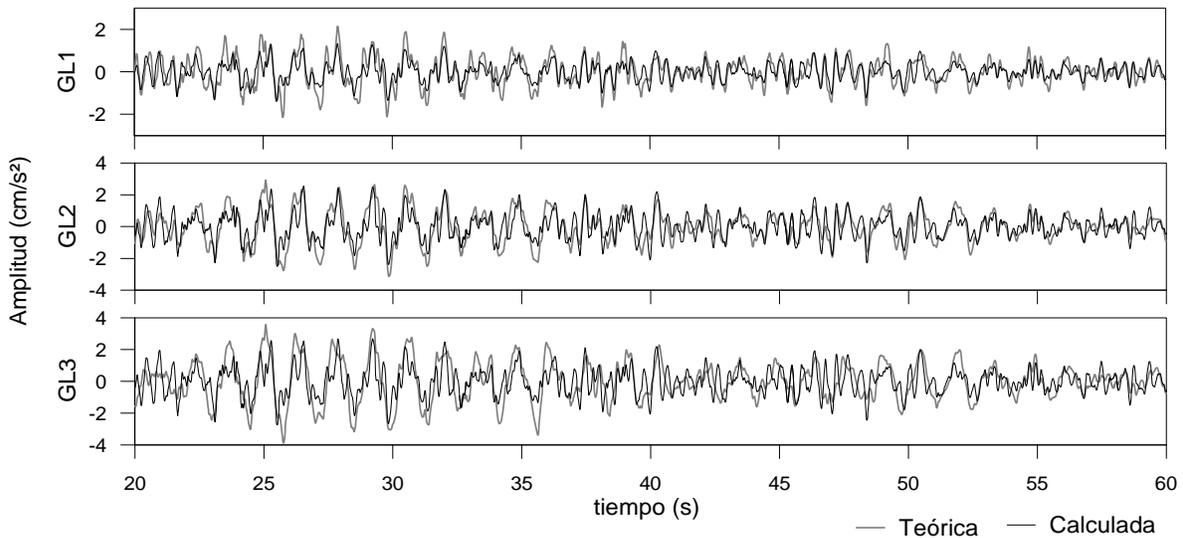


Figura 4.8. Comparación de señales, modelo 3GL-3R-3M, intervalo 1, procedimiento MinT

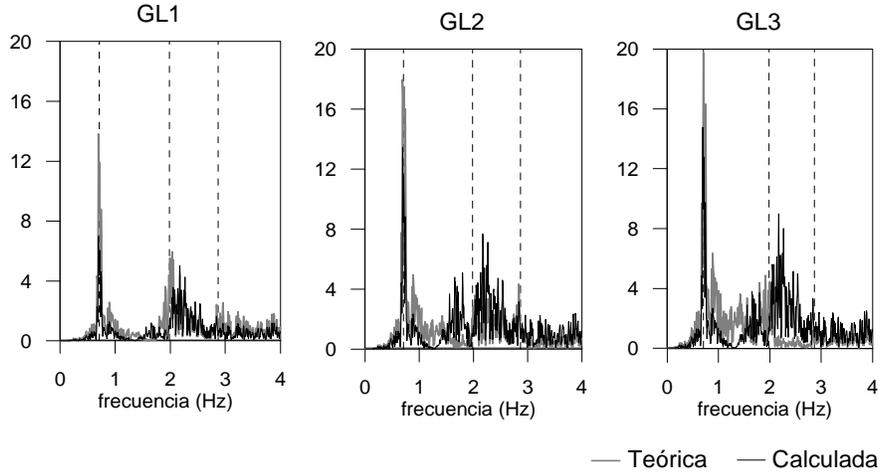


Figura 4.9. Comparación de espectros de Fourier, modelo 3GL-3R-3M, intervalo 1, procedimiento MinT

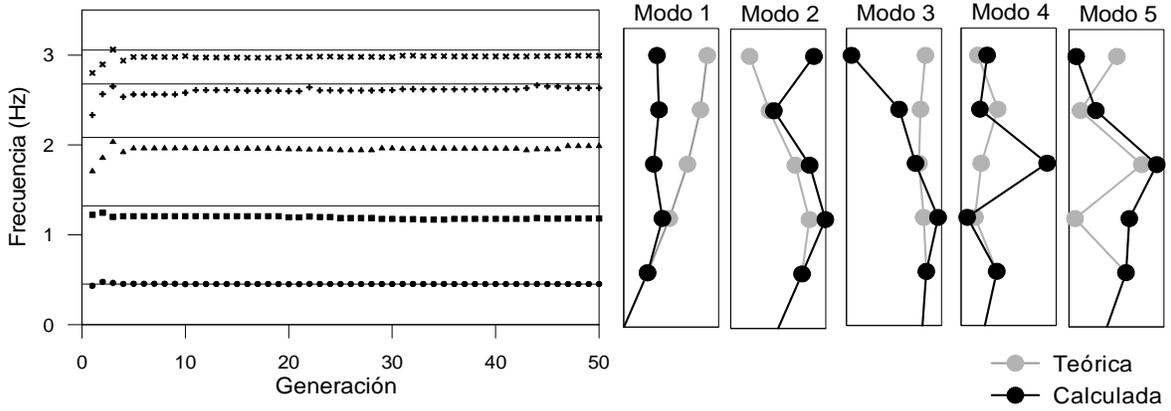


Figura 4.10. Estimación de frecuencias y formas modales modelo 5GL-5R-5M, intervalo 2, procedimiento MinT

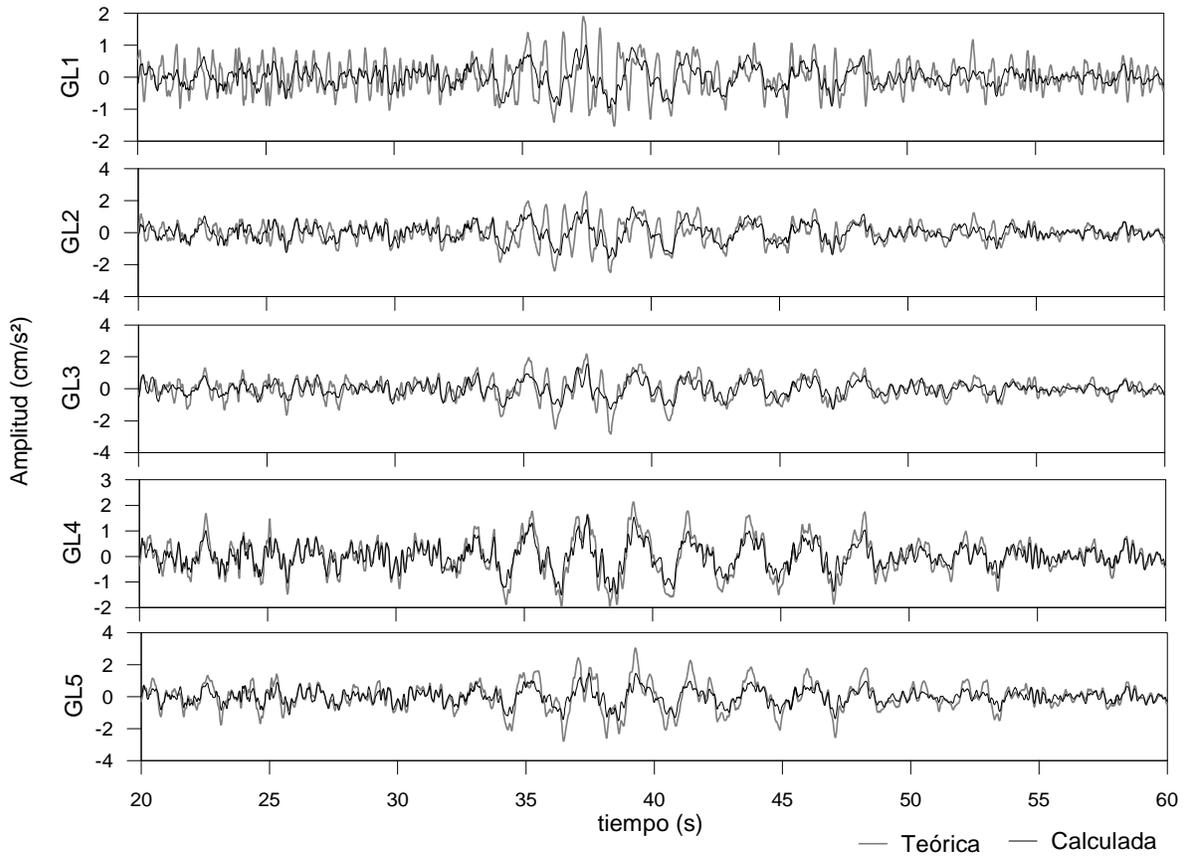


Figura 4.11. Comparación de señales, modelo 5GL-5R-5M, intervalo 2, procedimiento MinT

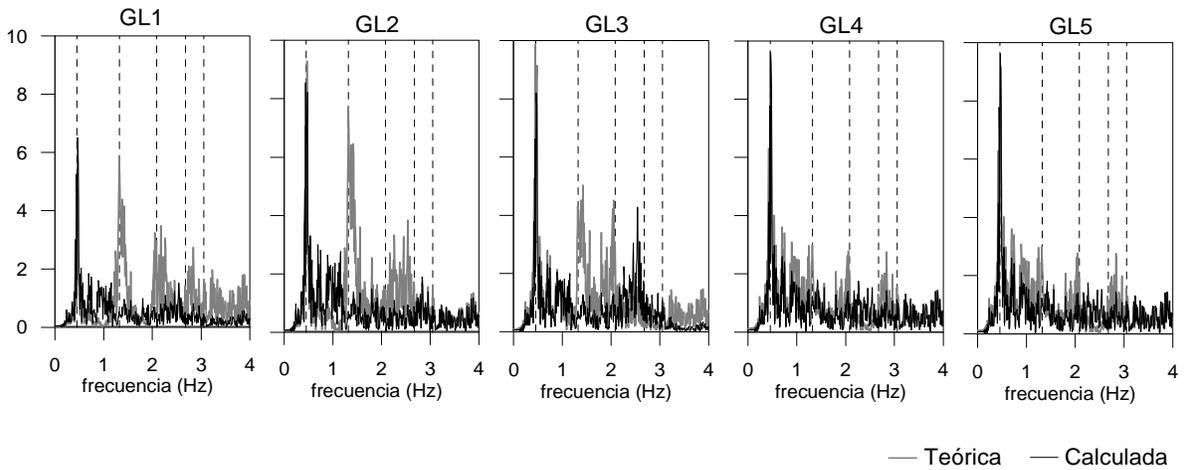


Figura 4.12. Comparación de espectros de Fourier, modelo 5GL-5R-5M, intervalo 2, procedimiento MinT

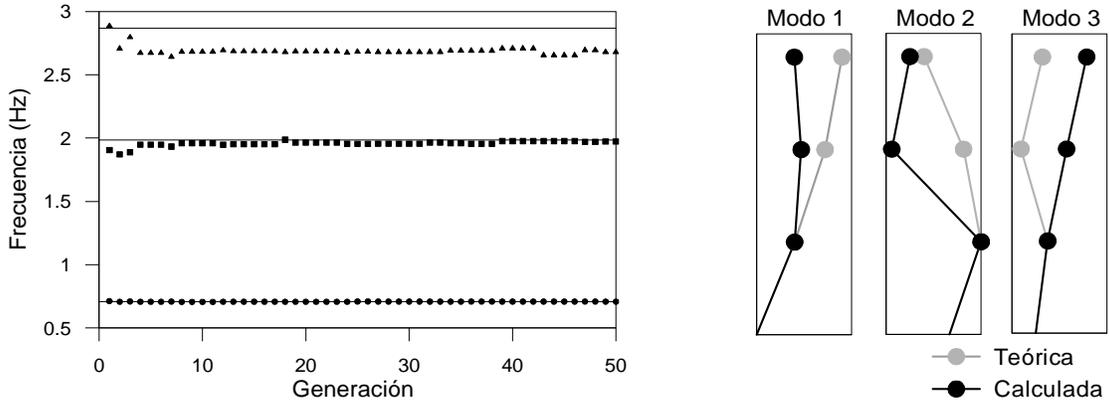


Figura 4.13. Estimación de frecuencias y formas modales modelo 3GL-3R-3M, intervalo 2, procedimiento MinT

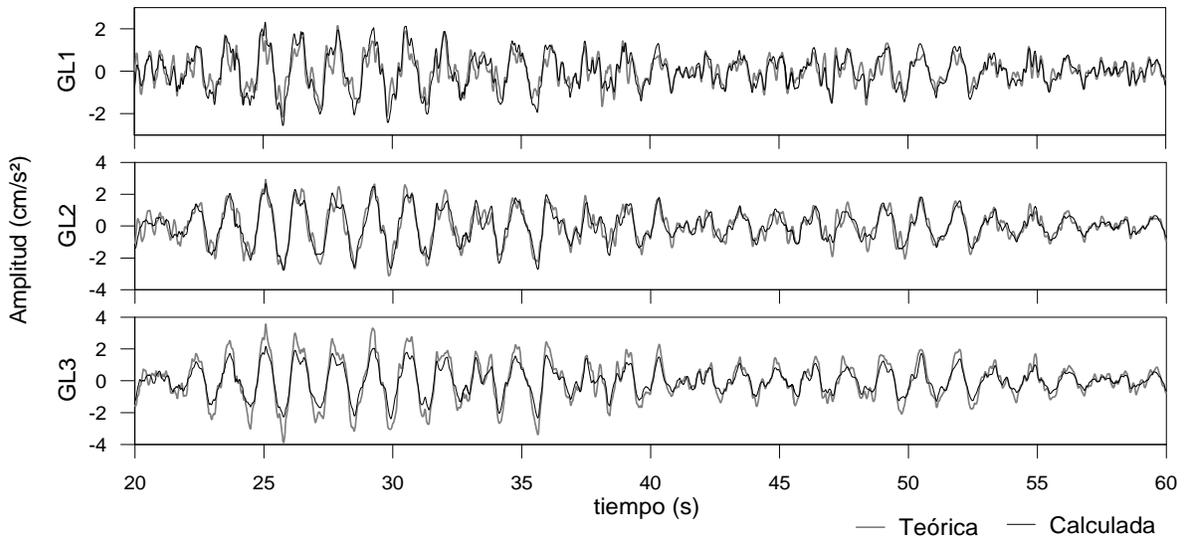


Figura 4.14. Comparación de señales, modelo 3GL-3R-3M, intervalo 2, procedimiento MinT

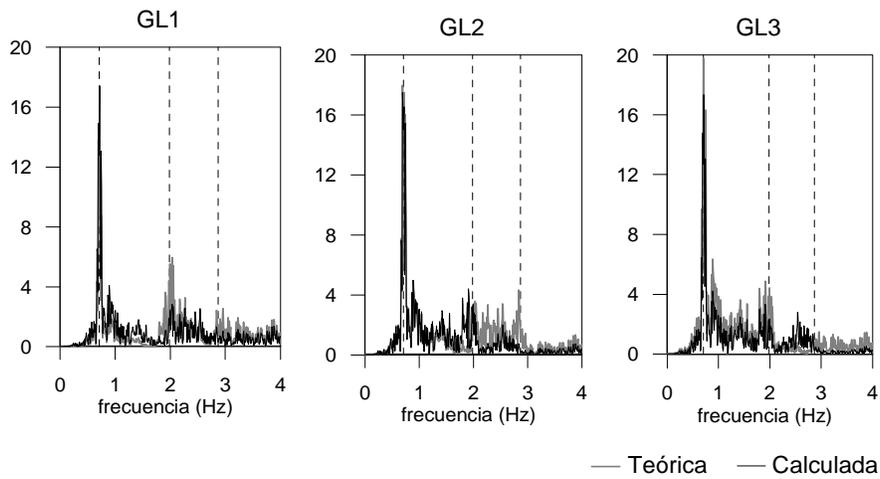


Figura 4.15. Comparación de espectros de Fourier, modelo 3GL-3R-3M, intervalo 2, procedimiento MinT

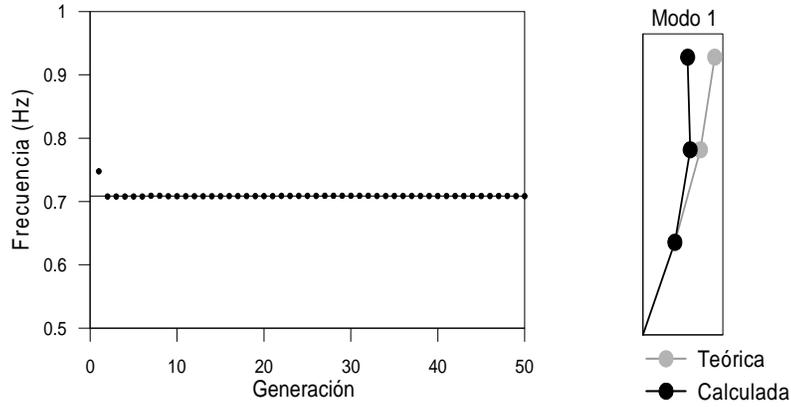


Figura 4.16. Estimación de frecuencias y formas modales modelo 3GL-3R-1M, intervalo 2, procedimiento MinT

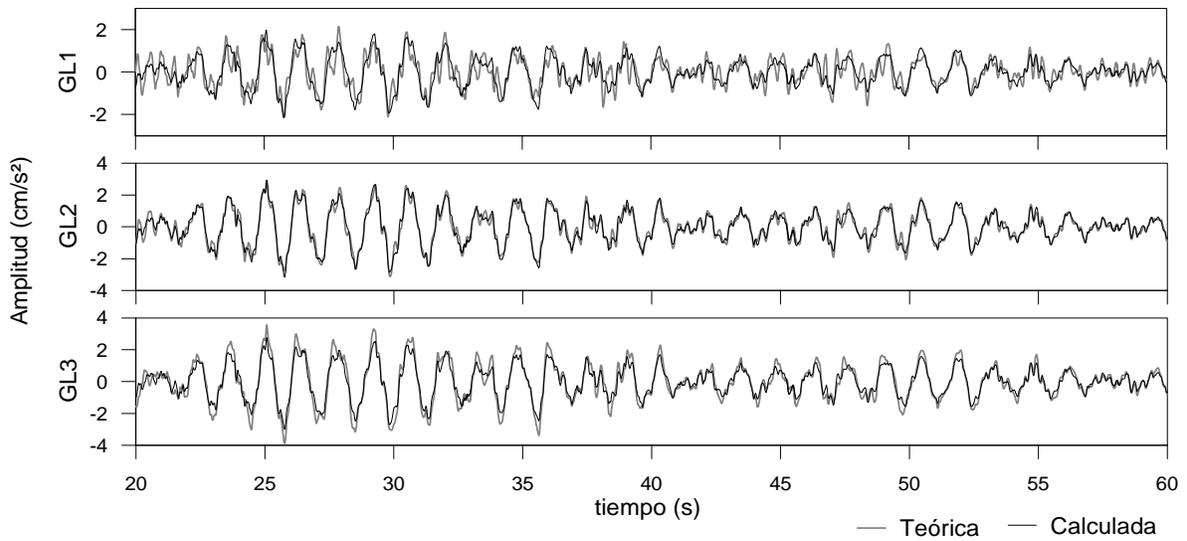


Figura 4.17. Comparación de señales, modelo 3GL-3R-1M, intervalo 2, procedimiento MinT

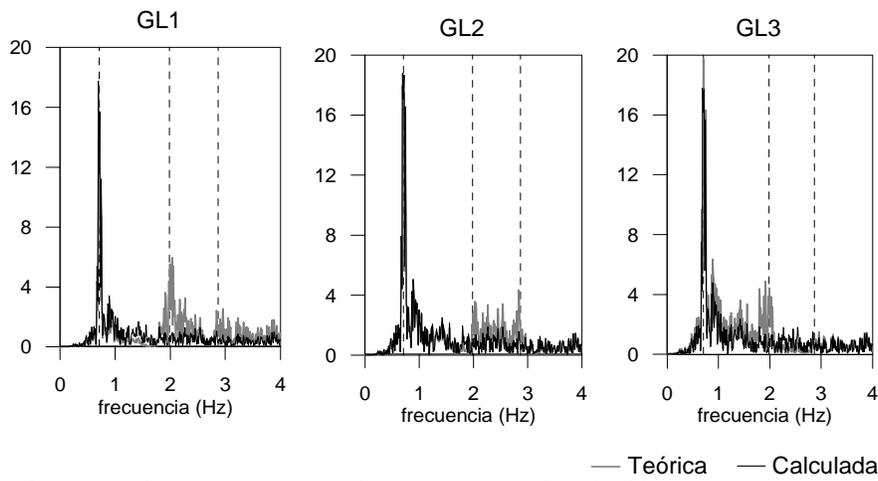


Figura 4.18. Comparación de espectros de Fourier, modelo 3GL-3R-1M, intervalo 2, procedimiento MinT

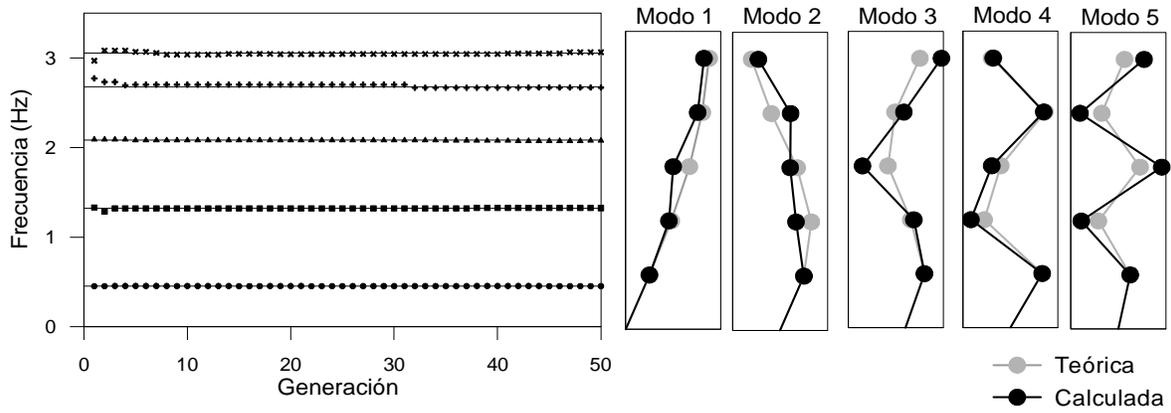


Figura 4.19. Estimación de frecuencias y formas modales modelo 5GL-5R-5M, intervalo 2, procedimiento MinM

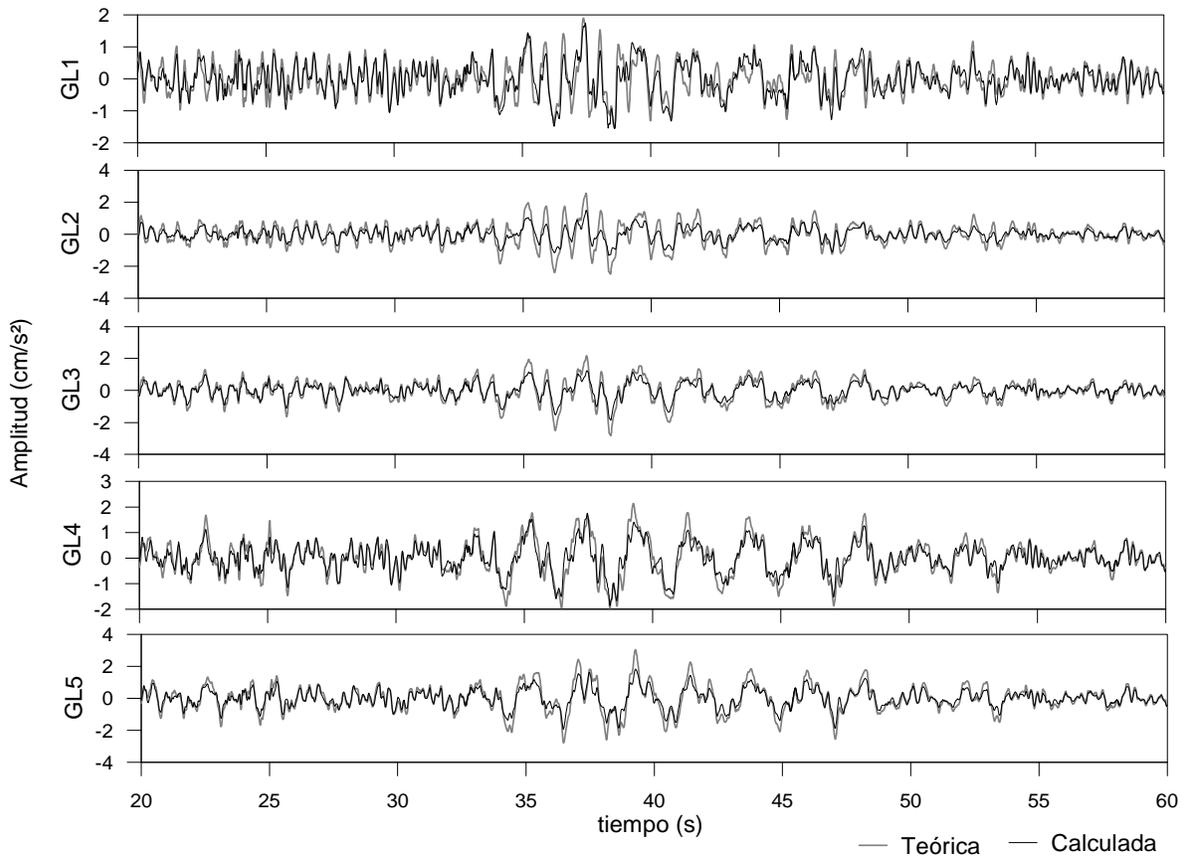


Figura 4.20. Comparación de señales, modelo 5GL-5R-5M, intervalo 2, procedimiento MinM

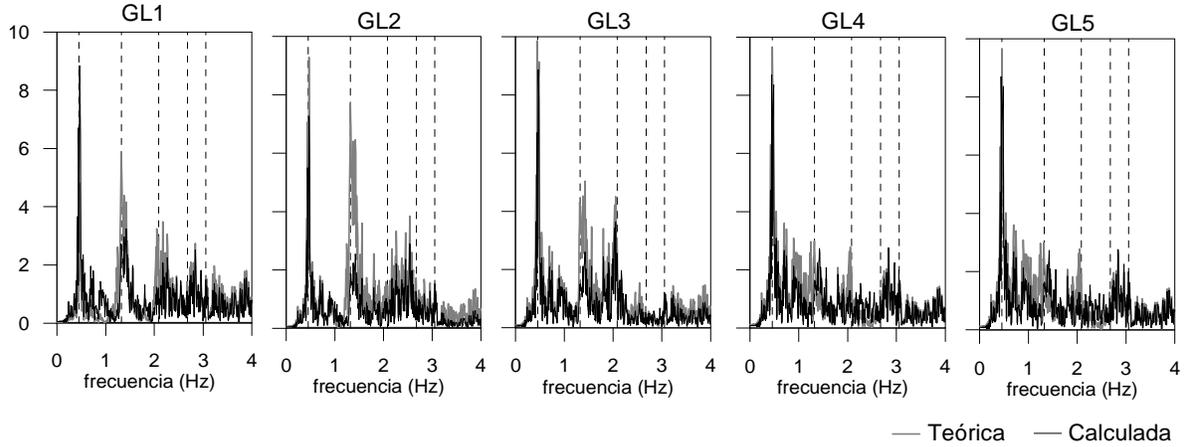


Figura 4.21. Comparación de espectros de Fourier, modelo 5GL-5R-5M, intervalo 2, procedimiento MinM

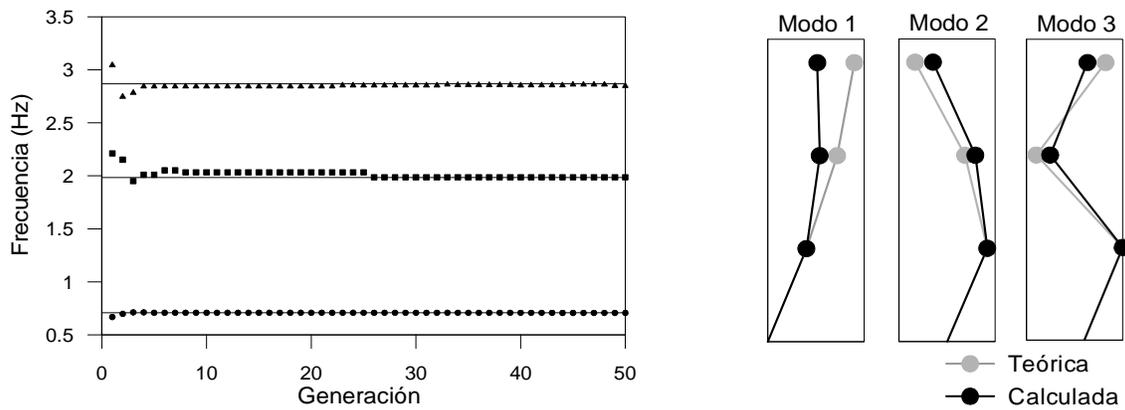


Figura 4.22. Estimación de frecuencias y formas modales modelo 3GL-3R-3M, intervalo 2, procedimiento MinM

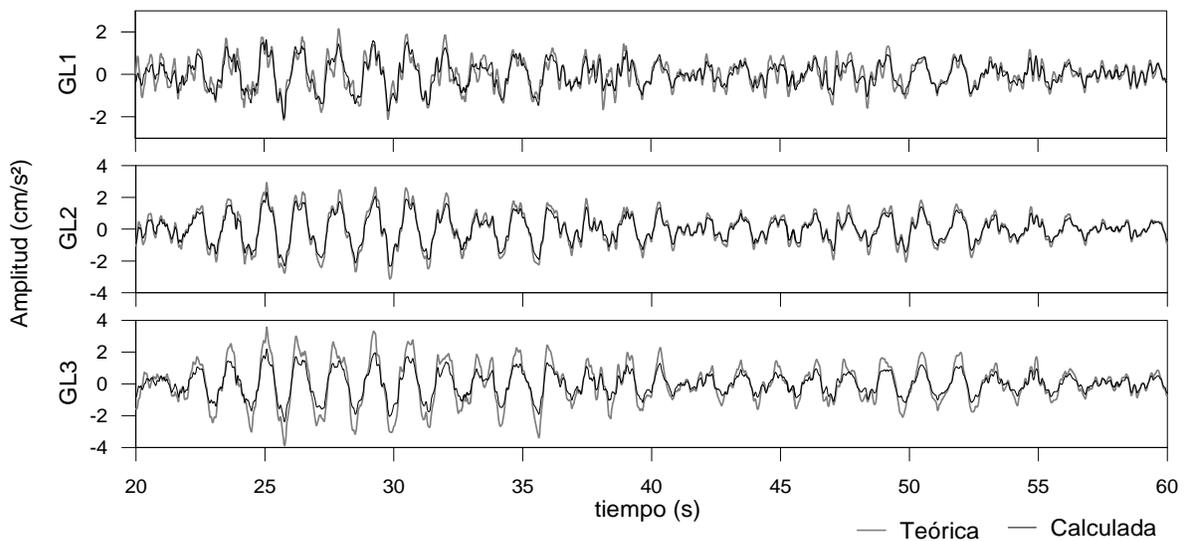


Figura 4.23. Comparación de señales, modelo 3GL-3R-3M, intervalo 2, procedimiento MinM

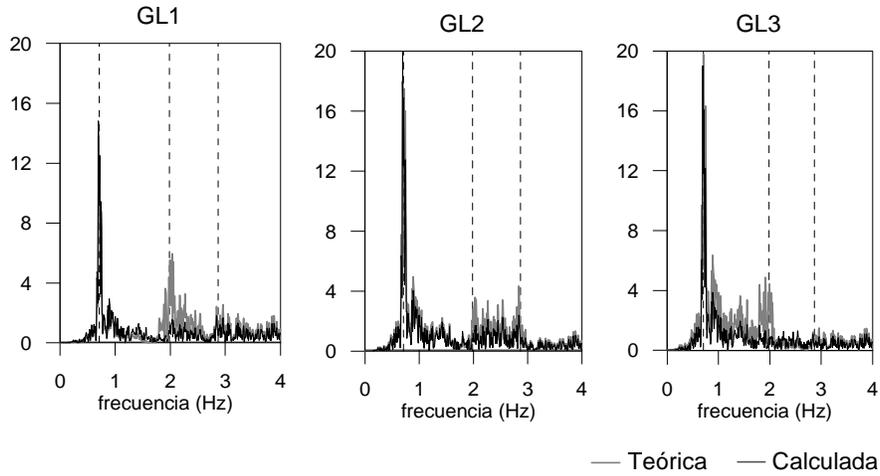


Figura 4.24. Comparación de espectros de Fourier, modelo 3GL-3R-3M, intervalo 2, procedimiento MinM

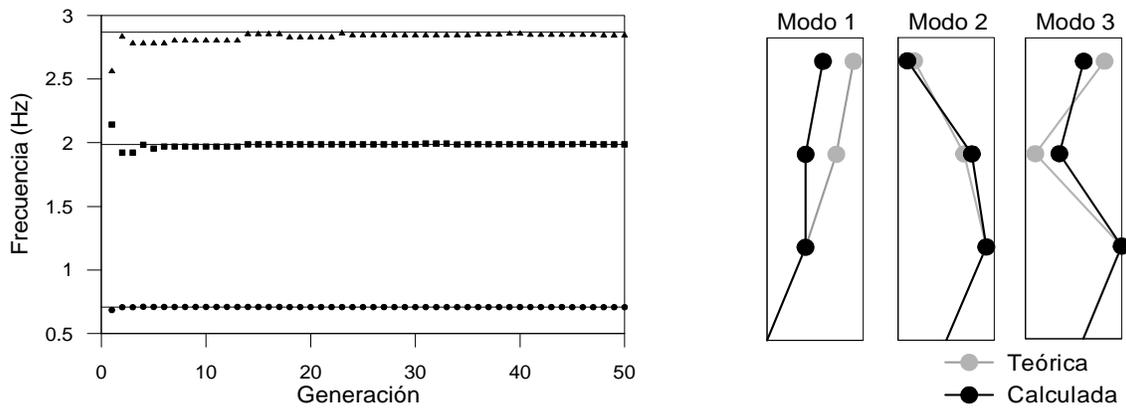


Figura 4.25. Estimación de frecuencias y formas modales modelo 3GL-3R-3M, intervalo 2, procedimiento MinM, RSR>10 dB

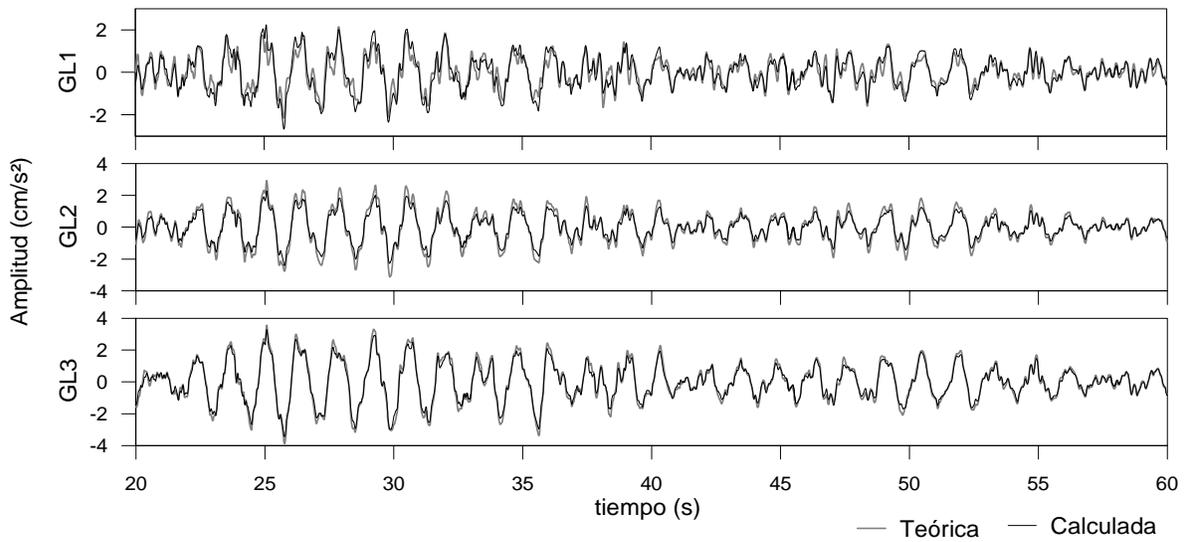


Figura 4.26. Comparación de señales, modelo 3GL-3R-3M, intervalo 2, procedimiento MinM, RSR>10 dB

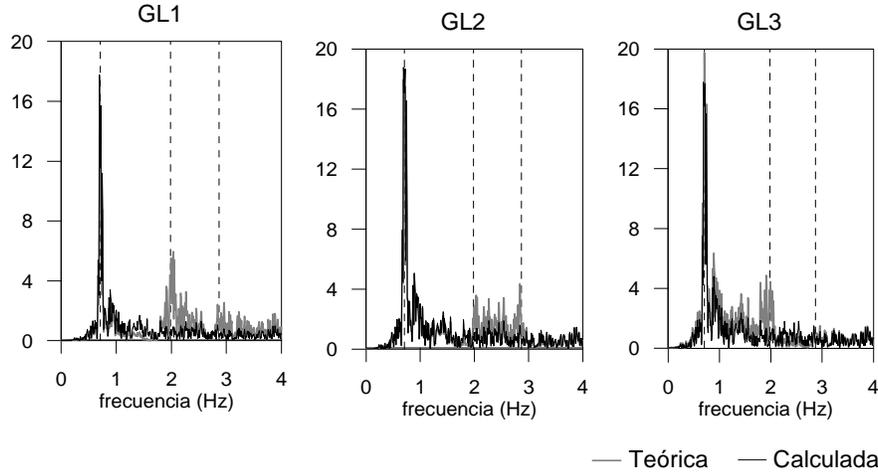


Figura 4.27. Comparación espectros de Fourier, modelo 3GL-3R-3M, intervalo 2, procedimiento MinM, RSR>10 dB

### 4.3.1 Pruebas de estimación de formas modales

En las pruebas anteriores se estudiaron dos procedimientos de minimización de los parámetros a identificar: la minimización de todos los parámetros y de todos los modos (MinT) y la minimización por modos (MinM). Adicionalmente como alternativa de estimación de formas modales, se plantea la minimización por parámetros (MinP) y la minimización de parámetros por modo con estimación independiente de formas modales (MinM-EI). En la tabla 4.6 se presenta una comparación entre los diferentes procedimientos de minimización.

Tabla 4.6. Comparación de procedimientos de minimización

	MinT	MinM	MinP	MinM-EI
Parámetros estimados simultáneamente	Todos	$f_j \xi_j x_{oj} v_{oj} \phi_{ij} FRM_{ij}$	Grupo A: $f_j \xi_j$ Grupo B: $x_{oj} v_{oj}$ Grupo C: $\phi_{ij} FRM_{ij}$	$f_j \xi_j x_{oj} v_{oj}$
Genes por cromosoma	$N_M(4+N_E+N_R)$	$4+N_E+N_R$	Grupo A: 2 Grupo B: 2 Grupo C: $N_E+N_R$	$4+N_E$
Parámetros fijos	No hay	Los de los modos identificados anteriormente	Los que no estén dentro del grupo de parámetros a minimizar	Los de los modos identificados anteriormente
Respuesta calculada	Con todos los modos	Con el modo en evaluación y modos identificados	Con los parámetros en evaluación y parámetros fijos	Con el modo en evaluación y modos identificados

GL i, Modo j,  $N_M$ : Número de modos,  $N_E$ : Número de señales de excitación,  $N_R$ : Número de señales de respuesta

En la figura 4.28 se presenta la comparación de estimación de formas modales con los diferentes procedimientos para el sistema 3GL. Con el procedimiento MinT la estimación es bastante mala, con MinM se obtienen una mejor aproximación y con MinP los resultados mejoran ligeramente. Para el sistema 5GL (figura 4.29) los resultados son similares, aunque en estos modelos las posibles mejoras en la estimación del procedimiento MinP no son tan evidentes como en el sistema 3GL.

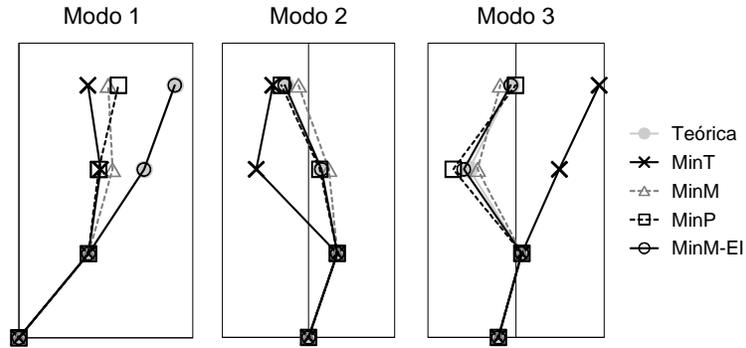


Figura 4.28. Estimación de formas modales sistema plano 3GL

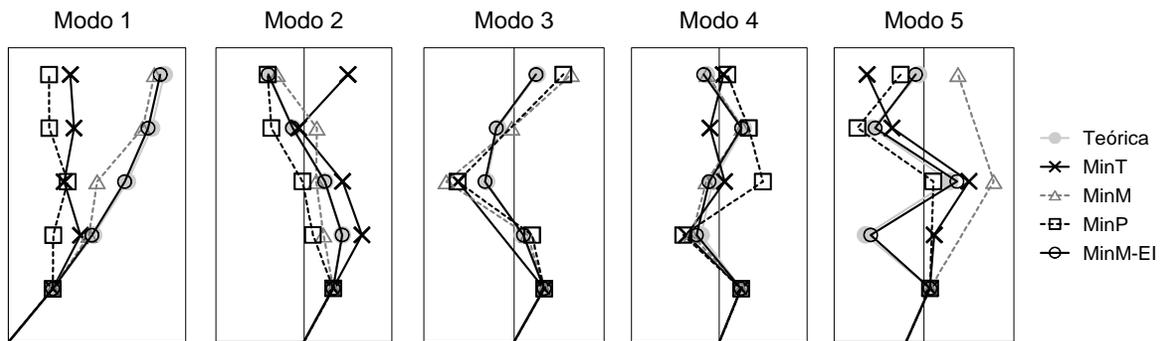


Figura 4.29. Estimación de formas modales sistema plano 5GL

En los dos sistemas el procedimiento MinM-EI mejora significativamente la estimación de formas modales siendo muy similares a los valores teóricos. Para evaluar la relación entre señales teóricas y calculadas con los procedimientos MinM y MinM-EI en la tabla 4.7 se presentan los valores de la función de evaluación  $J$  definida en el capítulo 2. La comparación entre las señales de respuesta se presenta en las figuras 4.30 a 4.37 y la diferencia cuadrática en el apéndice A, figuras A.9 a A.16.

Tabla 4.7. Valor de la función de evaluación con procedimientos MinM y MinM-EI

Grado de libertad	Modelo			
	5GL MinM	5GL MinM-EI	3GL MinM	3GL MinM-EI
1	7.6665	3.9814	4.8341	1.7485
2	6.6294	4.8180	4.5501	3.2192
3	4.0415	3.7552	5.1145	6.6063
4	4.9018	4.1145	-	-
5	6.5658	5.7106	-	-

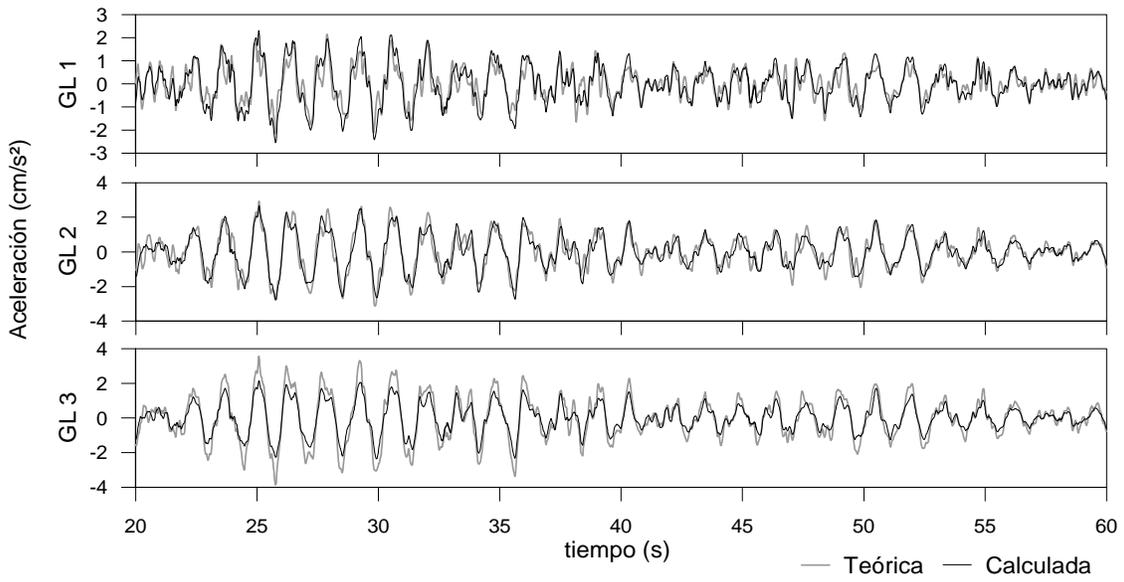


Figura 4.30. Señales teóricas y calculadas modelo 3GL MinT

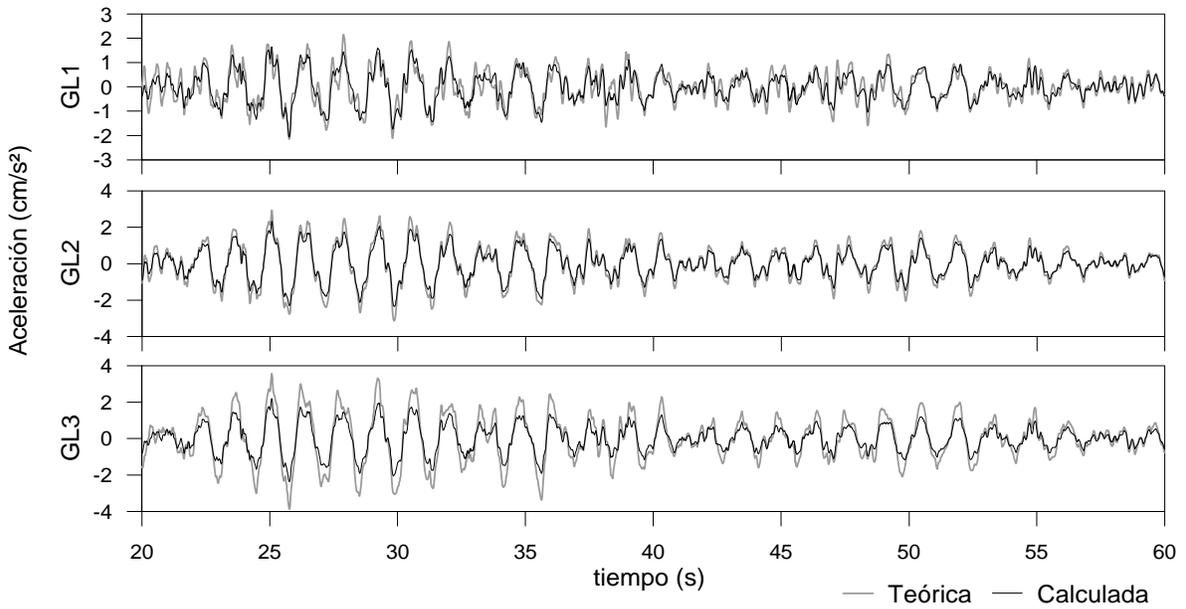


Figura 4.31. Señales teóricas y calculadas modelo 3GL MinM

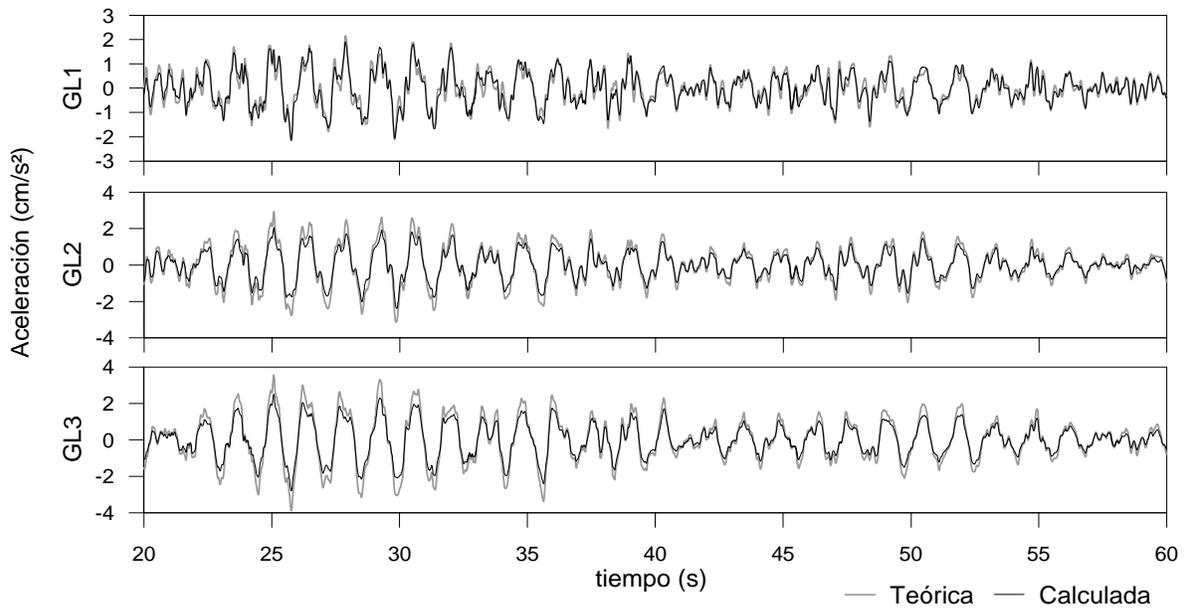


Figura 4.32. Señales teóricas y calculadas modelo 3GL MinP

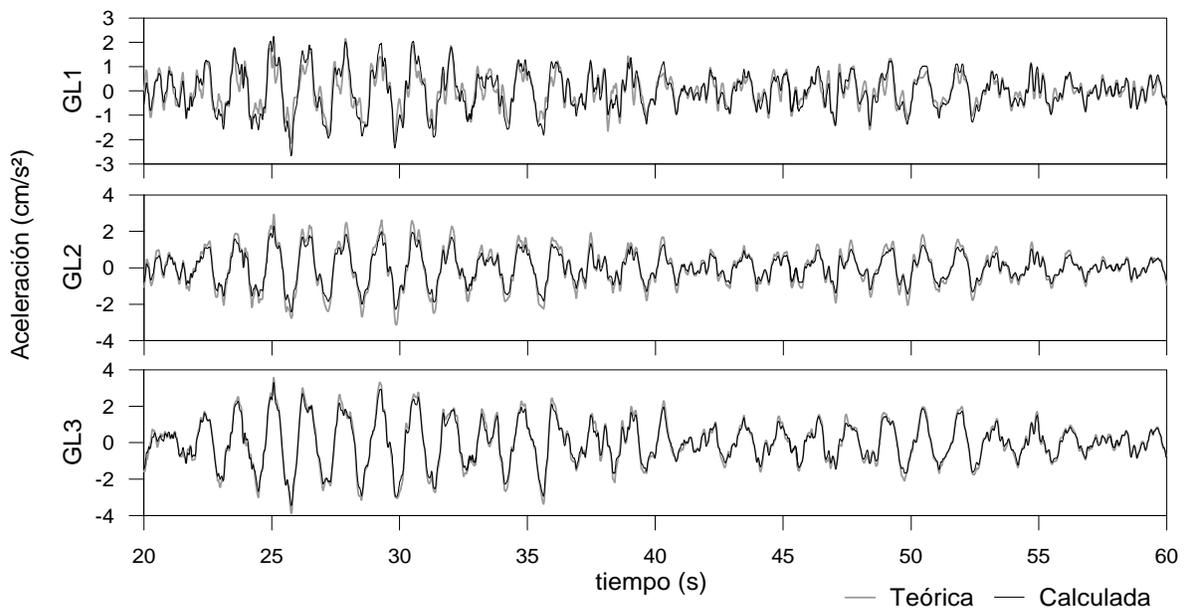


Figura 4.33. Señales teóricas y calculadas modelo 3GL MinM-EI

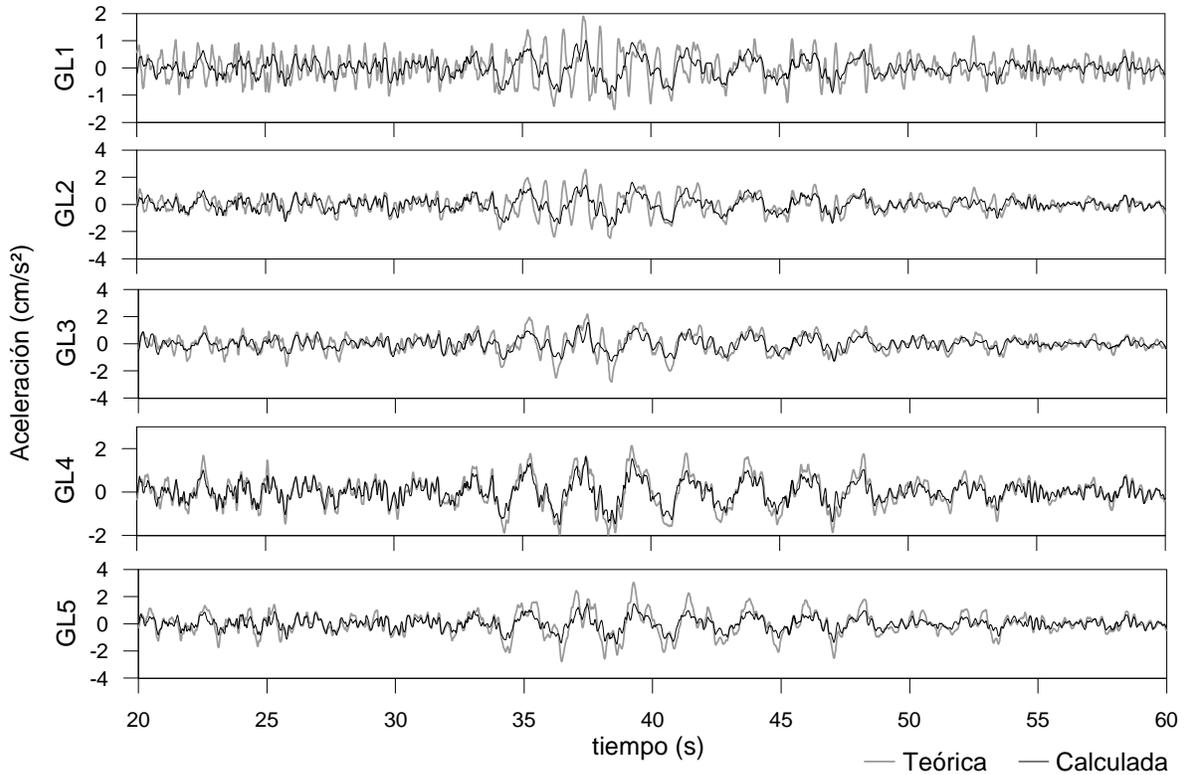


Figura 4.34. Señales teóricas y calculadas modelo 5GL MinT

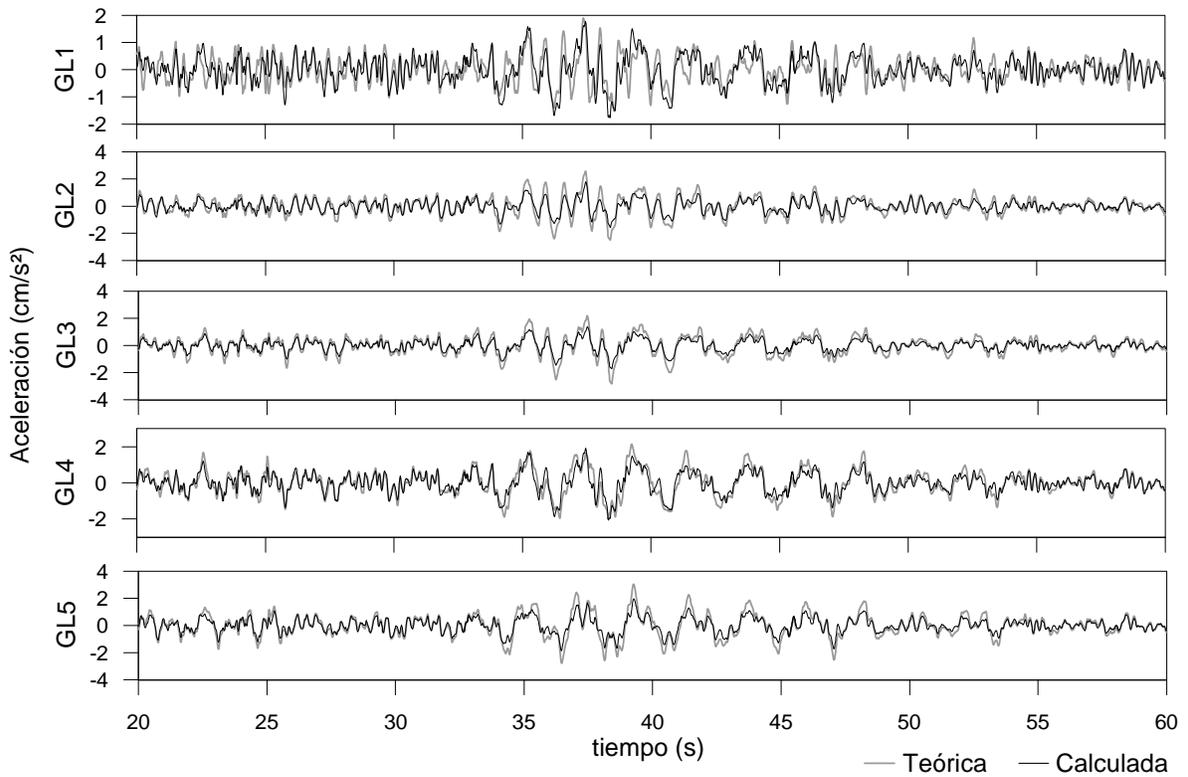


Figura 4.35. Señales teóricas y calculadas modelo 5GL MinM

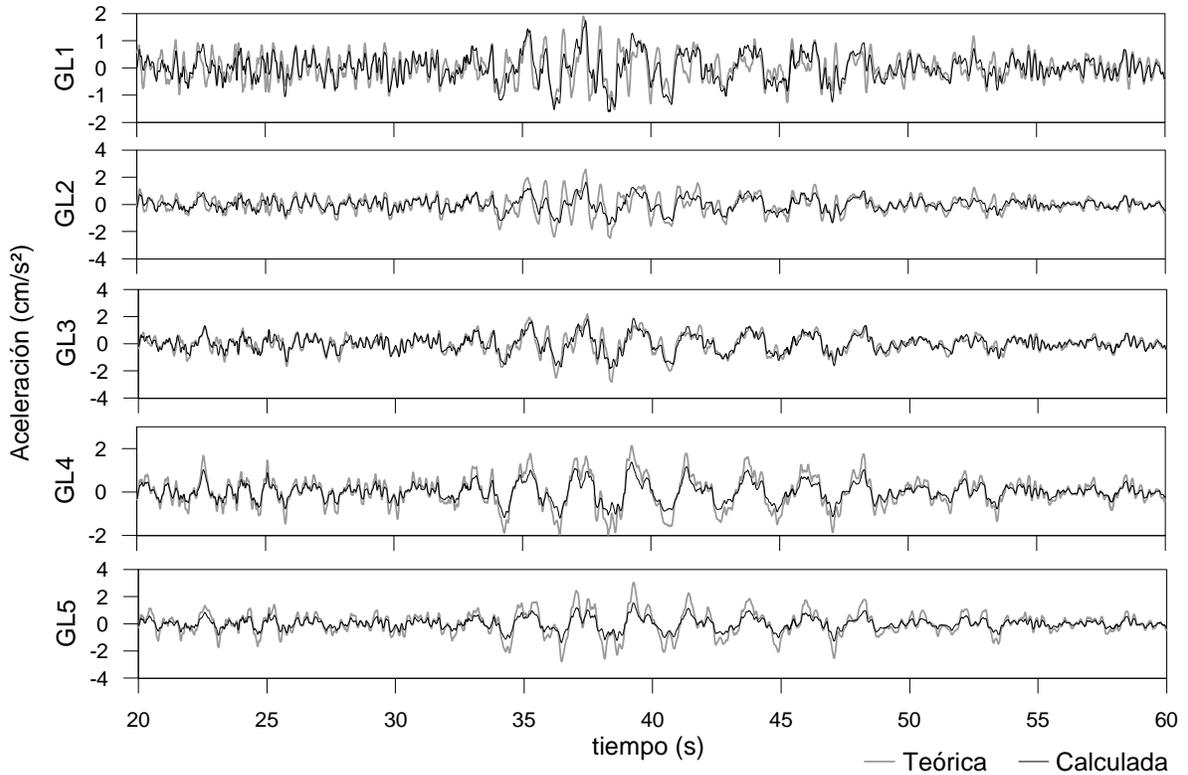


Figura 4.36. Señales teóricas y calculadas modelo 5GL MinP

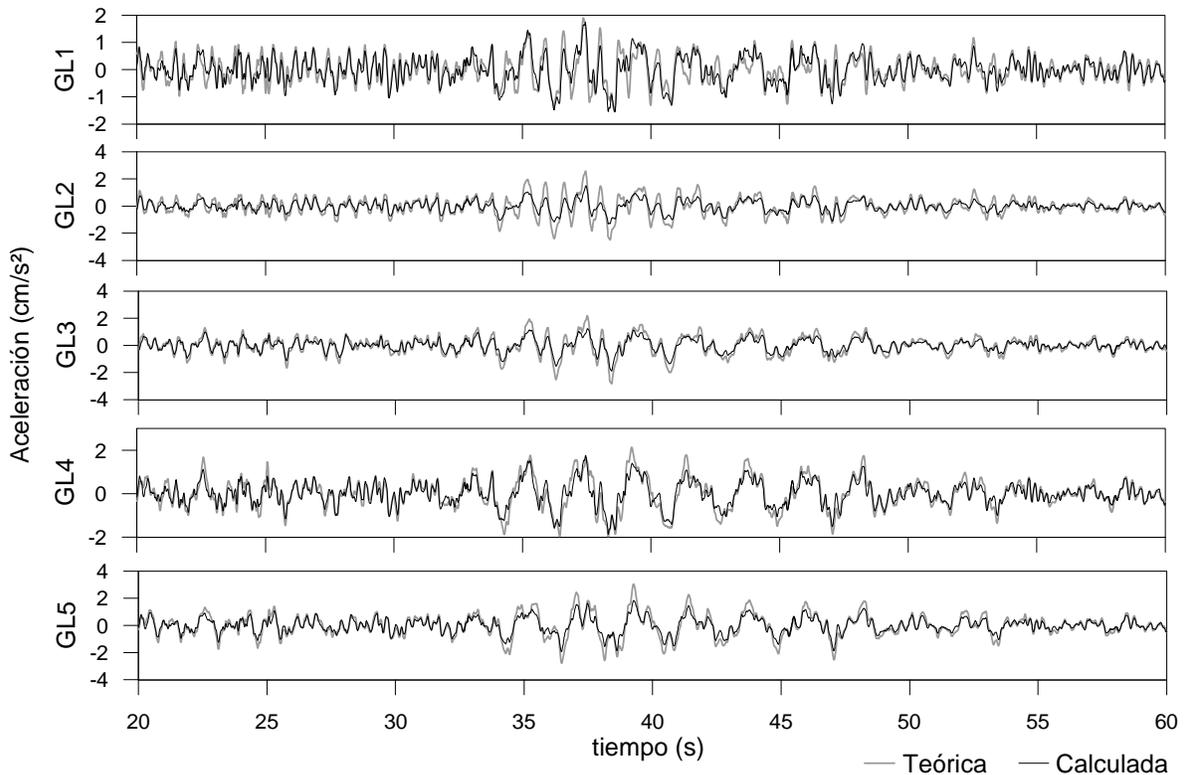


Figura 4.37. Señales teóricas y calculadas modelo 5GL MinM-EI

El procedimiento MinM-EI fue el que presentó mejores resultados en la estimación de formas modales en los sistemas planos. Sin embargo, para el caso de modelos tridimensionales fue necesario evaluar dos opciones de estimación independiente de formas modales, mediante amplitudes espectrales (AE) y con un ajuste lineal (AL). Estas opciones del procedimiento MinM-EI se comparan con el procedimiento de minimización por modos MinM empleando mínimos cuadrados (MC) y el algoritmo genético (AG).

En las figuras 38 a 40 se presenta la comparación de formas modales obtenidas con los diferentes procedimientos para los componentes L, T y R del sistema 3D-15GL.

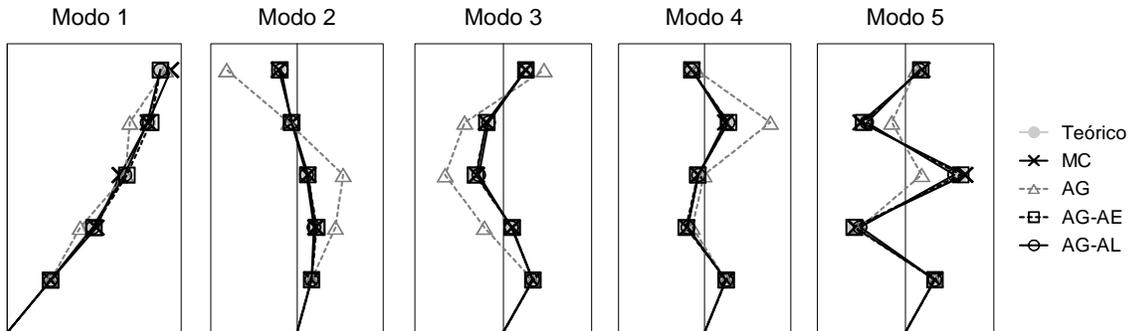


Figura 4.38. Comparación formas modales modelos 3D-15GL componente L

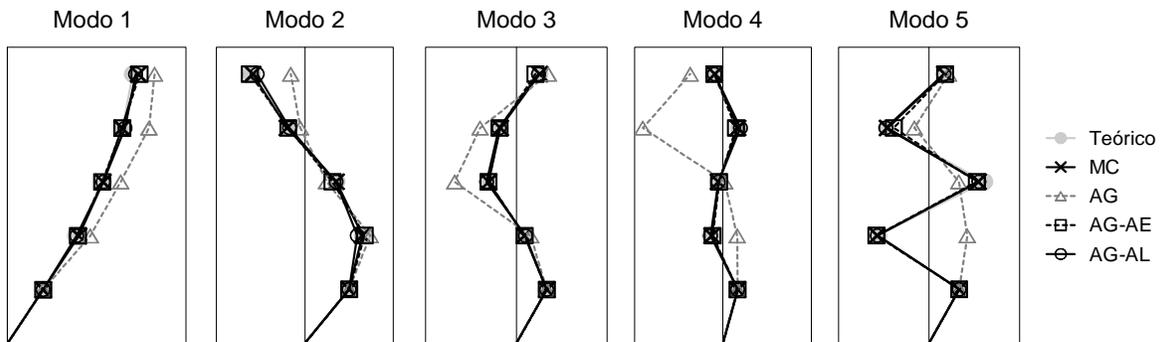


Figura 4.39. Comparación formas modales modelos 3D-15GL componente T

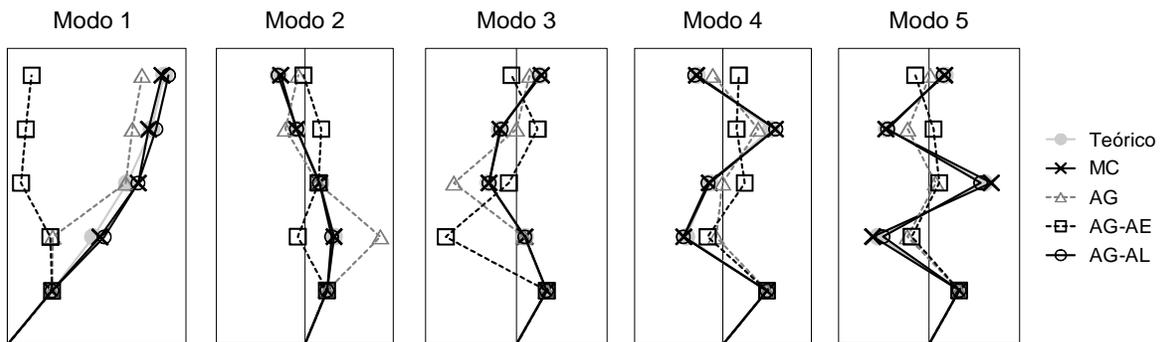


Figura 4.40. Comparación formas modales modelos 3D-15GL componente R

Para los procedimientos AG, AG-EA y AG-AL el proceso de identificación de frecuencias, amortiguamientos y condiciones iniciales es el mismo y los resultados solamente difieren por los procesos aleatorios del algoritmo genético. En cuanto a la estimación de las formas modales, para los modos de traslación los procedimientos MC, AG-AE y AG-AL tuvieron una buena aproximación al valor teórico y con el procedimiento AG hubo mayores diferencias. Para los modos de torsión el

procedimiento AG-AE no presentó buenos resultados y con los otros procedimientos la identificación fue similar a los componentes L y T. Estos resultados son consistentes con los obtenidos de los modelos planos 3GL y 5GL.

En comparación con el procedimiento MC, AG presenta buenos resultados, sin embargo, cuando se incrementa el número de parámetros a identificar (el caso de varios niveles), la estimación de formas modales es menos exacta que MC. Comparado AG-AE con MC hay una buena correspondencia entre las formas modales de los componentes traslacionales, pero en el componente de torsión no se identifican adecuadamente. AG-AL presenta resultados similares a MC y las pocas diferencias se deben a la estimación de los otros parámetros (frecuencias, amortiguamientos y condiciones iniciales).

Con estos resultados se comprueba que de los procedimientos de minimización por modos propuestos: AG, AG-AE y AG-AL, este último presenta los mejores resultados en la estimación de formas modales. En general con este procedimiento se obtienen una buena identificación de todos los parámetros, y es el que se empleará de manera definitiva en la adaptación de la metodología de minimización modal con algoritmos genéticos.

#### 4.4 Comparación del algoritmo genético y mínimos cuadrados

Dada la diferencia de métodos de convergencia fue necesario validar el uso del AG comparándolo con el método de mínimos cuadrados (MC). Se emplean como ejemplo dos problemas de minimización típicos. El primero es un problema de minimización bidimensional y el segundo un problema de ajuste de parámetros a una serie de datos, ambos relacionados con el procedimiento de minimización de la metodología de identificación adoptada.

El método de MC (Dennis y Schnabel, 1983) se estudió por medio de la librería numérica IMSL de Fortran 90 basada en el método de Levenberg-Marquardt modificado (Marquardt, 1963), y se adaptó un código en Matlab 7.1 con fines de comparación de tiempos de procesamiento. Para el AG se desarrollaron subrutinas en Matlab similares a las empleadas para la estimación de propiedades dinámicas. El equipo de cómputo donde se realizaron las pruebas tiene un procesador x86-64 a 2.8 GHz y 4 GB de memoria RAM.

El número de operaciones de punto flotante realizadas en cada algoritmo (MC y AG) es proporcional a la dimensión de espacio de búsqueda (número de muestras), el número de iteraciones y en el caso del AG se incrementa con el tamaño de la población. Una estimación aproximada del número de operaciones de punto flotante, en el caso de las pruebas de identificación de parámetros dinámicos presentadas anteriormente, es entre uno y tres millones para MC y entre 5 y 10 veces mayor para el AG. Para los problemas de ejemplo el valor es menor a los 100 mil con MC y 500 mil con el AG.

Como en Matlab los tiempos de procesamiento son poco consistentes, (por ser un lenguaje interpretado y depender de los recursos del equipo de cómputo disponibles al momento del cálculo), y también dado que el AG no es un método determinista, se hicieron 100 pruebas para cada problema y se calcularon los valores promedio de los parámetros de comparación.

##### 4.4.1 Problema 1

Consiste en minimizar la ecuación:

$$\min_{x \in \mathfrak{R}^2} \frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 f_i(x)^2 \quad 4.1$$

donde

$$f_1(x) = 10(x_2 - x_1^2) \quad 4.2$$

$$f_2(x) = (1 - x_1) \quad 4.3$$

Las funciones forman una superficie con un mínimo global como la mostrada en la figura 4.41. El valor mínimo es de 0 para los valores de  $x_1=1$  y  $x_2=1$ .

Para MC los valores iniciales de las variables independientes fueron de 2.5. En el AG se empleó una población inicial con valores entre -10 y 10, los parámetros y operadores fueron: codificación por valor, población de 20 cromosomas, selección muestreo simple con remplazo, cruzamiento aritmético, mutación de perturbación de gen y 100 generaciones máximo.

En la tabla 4.8 se presenta los resultados de la estimación con MC programado en una subrutina compilada en Fortran y en una subrutina en Matlab, así como el AG en Matlab. Se comparan los tiempos de procesamiento promedio, el número de iteraciones máximas y mínimas así como el promedio.

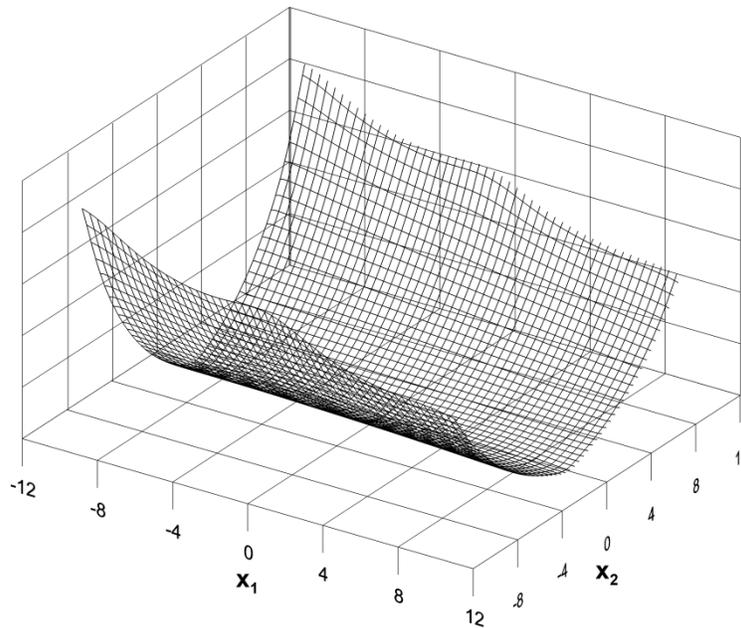


Figura 4.41. Función a minimizar problema 1

Tabla 4.8. Desempeño de metodologías de optimización problema 1

	Tiempo de procesamiento		No de iteraciones		
	Promedio (ms)	CV (%)	Máximo	Mínimo	Promedio
MC Fortran	15.6	1	32	32	32
MC Matlab	21.8	21	30	30	30
AG Matlab	59.3	62	100	22	26

#### 4.4.2 Problema 2

Se presenta un ejemplo de ajuste de curvas a una serie de datos. En este problema se emplearán los valores teóricos de un polinomio de tercer grado, ec. 4.4, y a partir de las metodologías de minimización se estimaran los valores de los coeficientes.

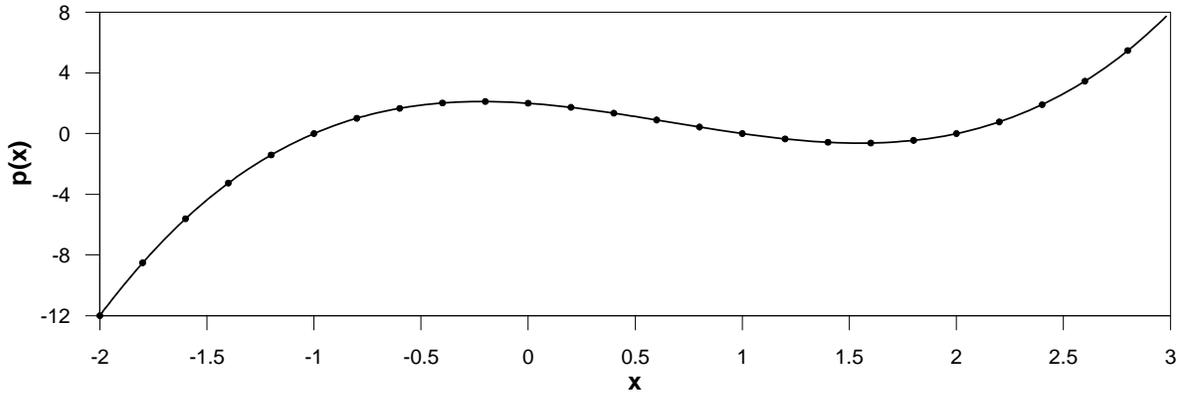


Figura 4.42. Polinomio y datos a ajustar

$$p(x) = x^3 - 2x^2 - x + 2 \quad 4.4$$

Se tomarán valores para  $x$  entre -2 y 3, en un intervalo  $dx=0.02$ , se evaluará el polinomio en estos puntos y se obtendrán los datos teóricos. La función que define el problema de optimización será:

$$f_i = C_1x_i^3 + C_2x_i^2 + C_3x_i + C_4 - p(x_i) \quad 4.5$$

donde  $C_j$  son los parámetros a estimar

Para el método de MC se emplearán valores iniciales de 1 y para el AG la población inicial se generará entre -5 y 5. Los resultados de este ejemplo se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 4.9. Desempeño de metodologías de optimización problema 2

	Tiempo de procesamiento		No de iteraciones		
	Promedio (ms)	CV (%)	Máximo	Mínimo	Promedio
MC Fortran	31.2	<1	4	4	4
MC Matlab	46.8	45	4	4	4
AG Matlab	78.0	123	100	19	27

El uso de un lenguaje de programación interpretado como el Matlab influye en el desempeño de las rutinas, siendo para estos ejemplos aproximadamente 1.5 veces más rápida la rutina compilada. La diferencia entre MC y el AG en el mismo lenguaje es menor a 3.

En cuanto al número de iteraciones, en promedio para el problema 1, el AG convergió más rápidamente, pero también existieron casos en los que el número de iteraciones fue mucho mayor. Para el problema 2, MC convergió más rápidamente en todas las pruebas. El algoritmo de MC en Fortran y Matlab es el mismo, por lo que el número de iteraciones fue aproximadamente el mismo, difiriendo probablemente debido a la precisión en las variables y subrutinas adicionales.

Los errores relativos entre los valores teóricos y los estimados con las dos metodologías, en los dos problemas y en todas las pruebas fueron menores 0.01%.

Cabe mencionar la importancia de los valores iniciales en el método de mínimos cuadrados, ya que como cualquier otro algoritmo determinista de minimización numérica, este solamente converge al mínimo global si los valores iniciales están cerca.

Tomando en cuenta solamente estos problemas, la velocidad de MC es mejor que la del AG; sin embargo, se tratan de ejemplos sencillos (comparados con la identificación de sistemas) donde evidentemente no se aprecian los posibles beneficios del AG que mencionan varios autores en problemas de optimización (Matouš *et al.*, 2000). Otro aspecto que pone en desventaja al AG es que no se usaron los parámetros y operadores óptimos para los problemas, como en la identificación de sistemas estos se deben escoger y adaptar para cada problema en particular. La principal ventaja del AG es que el espacio de búsqueda es mucho mayor que con MC, y se evita la convergencia a mínimos locales. Los problemas presentados no ilustran estas características, por otra parte, las pruebas con sistemas analíticos han demostrado que al menos se obtienen resultados similares que con MC.

Con estos problemas típicos se obtuvieron resultados del desempeño de los métodos de minimización. Se confirman que la precisión y robustez del AG es similar a la de métodos tradicionales y que las diferencias en tiempo no son tan grandes como para descartar este método.

## Capítulo 5. Validación de la nueva metodología

La metodología de minimización modal con algoritmos genéticos (MMAG) propuesta en este trabajo se validó comparando los resultados de la estimación de parámetros dinámicos con seis metodologías de identificación de sistemas empleadas frecuentemente en la literatura para la estimación de propiedades dinámicas en estructuras instrumentadas. Estas metodologías, presentadas en el capítulo 2 son: El análisis espectral convencional (AEC), el ajuste con polinomios de Froisythe (APF), la identificación estocástica (IE), el algoritmo de estado de espacios N4SID, la transformada Hilbert Huang (THH) y como referencia principal, la metodología de minimización modal con mínimos cuadrados como algoritmo de convergencia (MMMC).

Las metodologías se evaluaron con dos tipos de pruebas: las primeras con sistemas analíticos y señales de respuesta simuladas, y las segundas con sistemas reales y con señales de registros sísmicos. Se utilizaron cuatro diferentes tipos de señales como excitación en los sistemas analíticos, una señal sinusoidal con frecuencia de 1Hz y amplitud unitaria, un ruido blanco estacionario con valor medio cuadrático de 1 y los registros del sismo de 1985 en la estación SCT de la ciudad de México, y para la estimación de amortiguamientos con la THH una señal de impulso (Chen y Xu, 2002). La señal de ruido y sinusoidal tuvieron una tamaño de 1600 puntos y el registro sísmico de 18351 puntos, todas las señales se calcularon a 100 muestras por segundo. Se dice que una señal cuasi estacionaria es persistente de orden  $n$ , si su función de densidad espectral es positiva definida en al menos  $n$  frecuencias diferentes (Soderstrom y Stoica, 1989). Por su contenido frecuencial el ruido blanco y la señal sísmica cumplen con el teorema de excitación persistente de la identificación de sistemas, la señal sinusoidal es persistente de orden 1 y el impulso no es persistente en ningún orden. La condición de excitación persistente garantiza la convergencia en métodos de identificación regresivos.

Con el propósito de tener resultados que sean comparables con estudios similares y realizar pruebas con datos acreditados por otros investigadores, se estudiaron las metodologías mediante un modelo de referencia ampliamente difundido en la literatura de una prueba de desempeño (*benchmark*) para detección de daño estructural (Johnson *et al.*, 2004).

### 5.1 Descripción de las pruebas

Para pruebas con modelos analíticos se emplearon los sistemas planos 1G, 5GL y los sistemas tridimensionales descritos en el capítulo 4. Además para complementar las pruebas de estimación de amortiguamiento se hicieron pruebas adicionales con diez sistemas 1GL con 1 Hz de frecuencia de vibración y fracción de amortiguamiento crítico de 0.01 a 0.1. Con estos nuevos modelos se evaluaron valores de amortiguamientos comunes en edificios.

La estimación de amortiguamientos con AEC y APF se complementó con una metodología basada en amplitudes espectrales y factores de participación (Taborda, 2003), empleando las frecuencias identificadas con las metodologías en cuestión. Cabe mencionar que este método también se empleó en los modos de torsión para los sistemas tridimensionales y se usaron los factores de participación teóricos de los sistemas estudiados.

La prueba de desempeño utilizada para este trabajo consiste en una serie de modelos analíticos propuestos y publicados por el grupo de monitoreo de salud estructural de la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles (Johnson *et al.*, 2004). Esta prueba ha sido empleada por otros autores en estudios de identificación de propiedades dinámicas y su relación con el daño (Yang *et al.*, 2002; Caicedo *et al.*, 2004; Yuen *et al.*, 2004; Li y Zhang, 2006; Su y Kijewski-Correa, 2007).

Los modelos propuestos corresponden a un marco tridimensional simétrico de 4 niveles y 2 crujeas (3D-12GL), donde por medio de elementos diagonales se varía la rigidez lateral del sistema, para así simular diferentes niveles de daño.

Para el análisis con las metodologías se escogió el caso 0 de la prueba (con todas las diagonales), y el caso 1 (sin diagonales en el primer entrepiso). La señal de excitación es un ruido blanco y las señales de respuesta se calculan con el algoritmo Nigam-Jennings (1969) en las columnas 2, 6, 8 y 4 (Figura 5.1). El amortiguamiento modal fue de 0.03 para todos los modos.

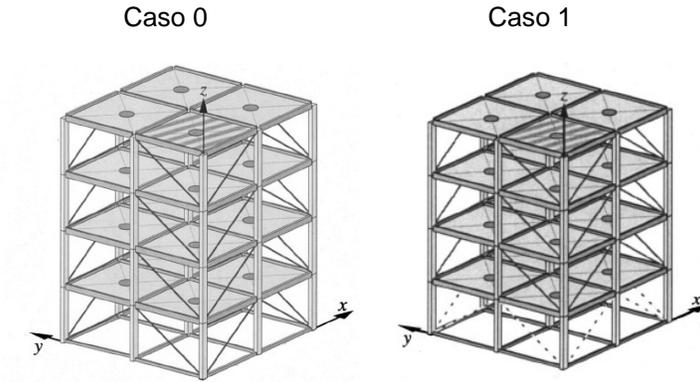


Figura 5.1. Modelos analíticos ASCE 3D-12GL

### 5.1.1 Edificios instrumentados

Las pruebas con sistemas reales se refieren al análisis de los registros sísmicos en dos edificios instrumentados (figura 5.2), el edificio SIS en la ciudad de Acapulco, y el edificio PC en la ciudad de México.

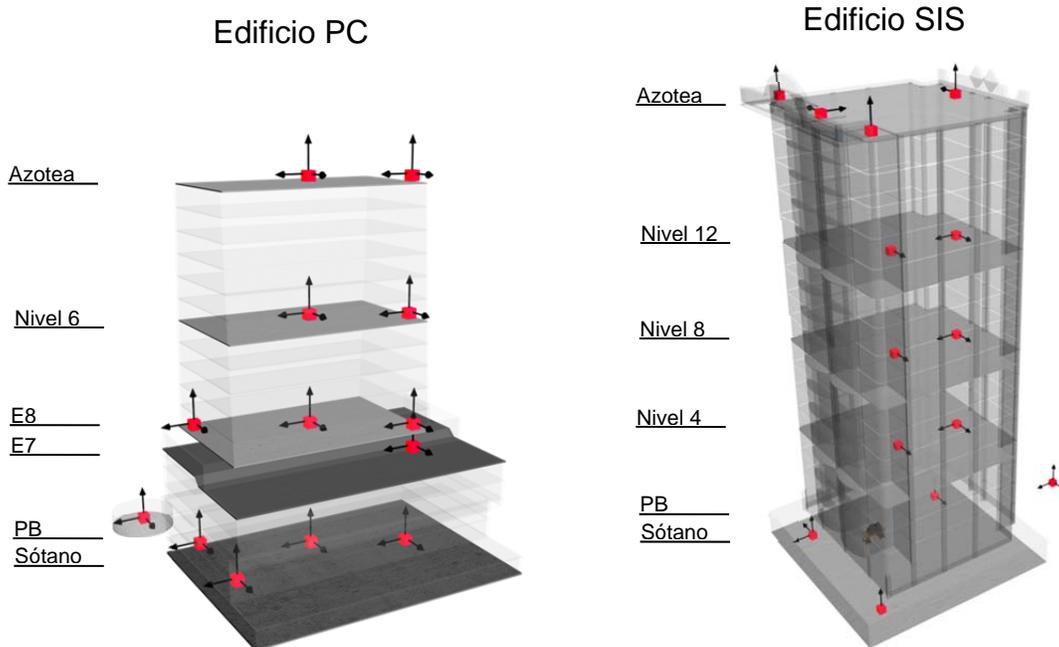


Figura 5.2. Edificios estudiados

El edificio SIS es una estructura de concreto reforzado en Acapulco sin daño aparente y con poco acoplamiento en sus modos (Murià-Vila *et al.*, 2004). La cimentación es con base en un cajón apoyado en pilas de fricción, la base tiene una dimensión de 32.9 por 37.5 m. Tiene 17 niveles, cuatro de los cuales están instrumentados además del sótano y el terreno. Los sensores están dispuestos para medir los movimientos horizontales de traslación y torsión de cada planta, así como los movimientos de cabeceo de la base.

El edificio PC es una estructura con base en marcos y muros de concreto reforzado, cuenta con una planta baja y cuatro niveles de estacionamiento seguidos de una torre de 12 niveles. La estructura está desplantada en la zona de terreno blando en el valle de México por medio de un cajón de cimentación y 266 pilotes de fricción. El edificio ha sufrido daños en eventos sísmicos importantes, como el sismo del 85 y ha sido rehabilitado en una ocasión. También existe un acoplamiento evidente entre los componentes longitudinal y transversal (Murià-Vila *et al.*, 2000). La instrumentación consta de 13 acelerómetros triaxiales, ubicados uno en terreno, cuatro en el sótano, cuatro en los entresijos E7-E8, y en la torre dos en el nivel 6 y dos en azotea. Igualmente, se pueden medir los movimientos horizontales de traslación y torsión de cada planta, así como los movimientos de cabeceo de la base.

En ambos edificios se escogió el evento sísmico de mayor intensidad registrado hasta el momento, (aceleración máxima de terreno de 102 cm/s<sup>2</sup> e intensidad de Arias de 16 cm/s para el SIS y 27 cm/s<sup>2</sup> y 21 cm/s en el PC). Se emplearon como excitaciones las señales de aceleración de la estación de campo y como respuesta las señales de aceleración de los niveles instrumentados. Se hizo un análisis con la señal completa y en intervalos de tiempo (ventanas), los cuales se escogieron de acuerdo a la intensidad del movimiento en la ventana.

Dados los resultados de los modelos analíticos, la estimación de parámetros en los edificios reales se enfocará a la estimación de frecuencias y amortiguamientos con las metodologías AEC, N4SID, MMMC y MMAG. En los análisis por ventanas solamente se comparan los resultados de MMMC y MMAG.

En el edificio SIS se identificaron cuatro modos en cada componente, con estos modos se logró reproducir adecuadamente las señales de respuesta y su contribución total fue mayor al 99%. En el edificio PC con dos modos en cada componente se reprodujo el 98% de las señales de respuesta de traslación y el 95% de la señal de torsión. En ambos casos la contribución de un mayor número de modos es insignificante y se tendría una mayor incertidumbre en la identificación de estos modos debido a su pobre contribución.

## 5.2 Sistemas analíticos

### 5.2.1 Estimación de parámetros en sistemas planos

Con respecto a la estimación de frecuencias de los sistemas 1GL y 5GL (tablas 5.1 y 5.3 respectivamente) se obtuvieron buenos resultados con todas las metodologías. En el caso de N4SID, MMMC y MMAG, los errores fueron los menores y la THH presentó los valores más altos. Con el AEC y el APF los errores fueron similares y ligeramente menores que con IE.

En la identificación de amortiguamientos de sistemas analíticos 1GL (tabla 5.2), N4SID presenta los menores errores, seguido de MMAG, MMMC, APF y AEC con errores del mismo orden, obteniéndose los mayores con IE. Para la estimación de amortiguamientos del sistema de 5GL los resultados son similares (tabla 5.4).

Con la THH no fue posible identificar directamente los parámetros modales del sistema de 5GL a partir de la frecuencia instantánea, por lo que se realizó un filtrado de la señal de respuesta en las

bandas correspondientes a los modos a identificar (Yang y Lei, 2000). Posteriormente se aplicó la THH a las señales filtradas y se hizo la identificación de manera normal. Para este modelo no fue posible identificar los amortiguamientos.

Los resultados de los modelos analíticos de un grado de libertad corresponden a la identificación ante una excitación sísmica, con un ruido blanco los resultados son similares. Sin embargo, usando un armónico como excitación los errores con las metodologías de AEC, APF y IE son mayores en un 1 a 10%; con N4SID, MMMC y MMAG no hay diferencias significativas.

Tabla 5.1. Estimación de frecuencias, sistemas 1GL con excitación sísmica

Teórica	Frecuencia (Hz)							Error (%)						
	AEC	APF	IE	N4SID	THH	MMMC	MMAG	AEC	APF	IE	N4SID	THH	MMMC	MMAG
0.2	0.19	0.20	0.20	0.2	0.18	0.2	0.2	3.87	2.07	2.00	<0.01	10.79	<0.01	<0.01
0.4	0.39	0.40	0.41	0.4	0.43	0.4	0.4	2.34	0.94	2.00	<0.01	8.87	<0.01	<0.01
0.6	0.59	0.59	0.59	0.6	0.54	0.6	0.6	1.33	1.15	1.17	<0.01	9.79	<0.01	<0.01
0.8	0.79	0.79	0.81	0.8	0.85	0.8	0.8	1.58	0.99	1.00	<0.01	6.16	<0.01	<0.01
1.0	0.99	1.00	1.02	1.0	0.88	1.0	1.0	0.82	0.29	1.60	<0.01	11.62	<0.01	<0.01
1.2	1.19	1.19	1.18	1.2	1.08	1.2	1.2	1.07	0.64	1.42	<0.01	9.91	0.02	<0.01

Tabla 5.2. Estimación de amortiguamientos, sistemas 1GL con excitación sísmica (THH impulso)

Teórico	Fracción de amortiguamiento							Error (%)						
	AEC	APF	IE	N4SID	THH	MMMC	MMAG	AEC	APF	IE	N4SID	THH	MMMC	MMAG
0.010	0.010	0.010	0.009	0.010	0.009	0.010	0.010	3.27	3.160	11.000	<0.01	6.38	1.023	0.500
0.020	0.020	0.020	0.023	0.020	0.021	0.020	0.020	1.975	1.075	12.500	<0.01	5.882	0.192	0.250
0.030	0.030	0.030	0.028	0.030	0.031	0.030	0.029	0.377	0.527	6.667	<0.01	3.780	0.268	0.533
0.040	0.040	0.040	0.043	0.040	0.038	0.040	0.040	0.520	0.780	7.250	<0.01	4.660	0.389	0.450
0.050	0.050	0.050	0.048	0.050	0.047	0.050	0.050	0.020	0.602	3.200	<0.01	5.654	0.195	0.240
0.060	0.060	0.060	0.058	0.060	0.057	0.060	0.060	0.117	0.503	3.833	<0.01	4.435	0.267	0.200
0.070	0.070	0.070	0.067	0.070	0.067	0.070	0.070	0.341	0.304	4.000	<0.01	4.167	0.243	0.500
0.080	0.080	0.080	0.085	0.080	0.084	0.080	0.080	0.602	0.500	6.250	<0.01	4.634	0.272	0.425
0.090	0.089	0.090	0.085	0.090	0.095	0.090	0.090	0.878	0.529	5.556	<0.01	5.126	0.154	0.378
0.100	0.098	0.101	0.108	0.100	0.104	0.099	0.100	2.276	0.743	8.400	<0.01	3.700	0.970	0.490

Tabla 5.3. Estimación de frecuencias, sistema 5GL plano con excitación sísmica

Modo	Frecuencia (Hz)							Error (%)							
	Teórica	AEC	APF	IE	N4SID	THH	MMMC	MMAG	AEC	APF	IE	N4SID	THH	MMMC	MMAG
1	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.42	0.45	0.45	0.38	0.20	0.20	<0.01	6.54	<0.01	<0.01
2	1.32	1.32	1.32	1.33	1.32	1.21	1.32	1.32	0.30	0.09	0.28	<0.01	8.53	<0.01	<0.01
3	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08	1.91	2.08	2.08	0.30	0.14	0.02	<0.01	8.51	<0.01	<0.01
4	2.68	2.67	2.67	2.66	2.68	2.41	2.68	2.68	0.40	0.15	0.81	<0.01	9.85	<0.01	<0.01
5	3.05	2.99	3.05	3.05	3.05	3.28	3.06	3.06	1.98	0.07	0.70	<0.01	7.34	0.07	0.05

Tabla 5.4. Estimación de amortiguamientos, sistema 5GL plano con excitación sísmica

Modo	Fracción de amortiguamiento							Error (%)						
	Teórico	AEC	APF	IE	N4SID	MMMC	MMAG	AEC	APF	IE	N4SID	MMMC	MMAG	
1	0.030	0.031	0.031	0.031	0.030	0.031	0.030	3.67	3.95	3.33	<0.01	1.16	1.30	
2	0.030	0.030	0.029	0.032	0.030	0.032	0.030	1.33	2.29	6.00	<0.01	1.67	1.13	
3	0.030	0.030	0.030	0.028	0.030	0.028	0.031	2.33	1.73	6.33	<0.01	2.26	2.07	
4	0.030	0.029	0.029	0.029	0.030	0.029	0.030	2.33	3.01	5.00	<0.01	2.56	1.40	
5	0.030	0.030	0.031	0.032	0.030	0.032	0.031	2.67	3.36	7.33	<0.01	2.62	1.40	

En el sistema 5GL también se estimaron las formas modales con AEC, N4SID, MMMC y MMAG. Los resultados y el valor teórico se presentan en la figura 5.3.

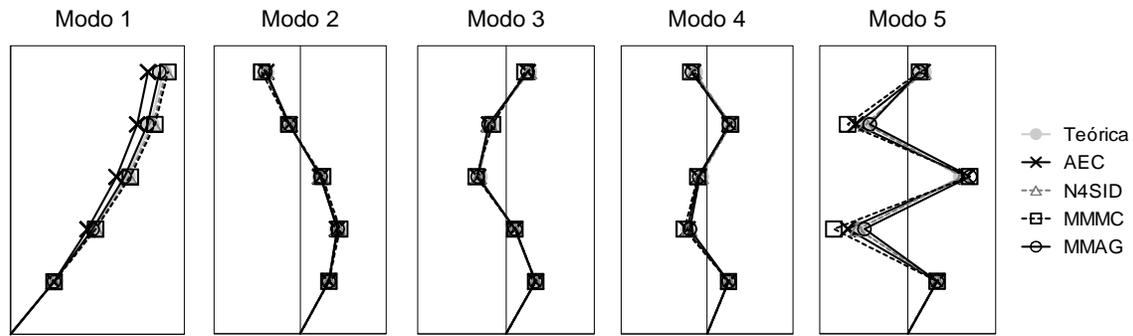


Figura 5.3. Estimación de formas modales sistema 5GL plano con las diferentes metodologías

### 5.2.2 Estimación de parámetros en sistemas tridimensionales

En las tablas 5.5 a 5.7 se comparan los valores de frecuencia estimados con las diferentes metodologías para el sistema analítico 3D-3GL con modos no acoplados, acoplados y fuertemente acoplados, respectivamente.

En cuanto a los sistemas 3D-3GL no acoplado y acoplado, los errores en la identificación de frecuencias de los modos de traslación fueron similares a los sistemas planos. Los errores para los modos de torsión fueron de 10 a 20% mayores a los de traslación. En comparación con los otros sistemas, en el fuertemente acoplado se identifica el mismo valor de frecuencia para los componentes de traslación con AEC, APF y IE, en cambio con N4SID, MMMC y MMAG se diferencian las frecuencias identificadas de cada componente, a pesar de ser valores muy cercanos.

Tabla 5.5. Estimación de frecuencias, sistema 3D-3GL no acoplado

Modo	Frecuencia (Hz)							Error (%)							
	Teórica	AEC	APF	IE	N4SID	THH	MMMC	MMAG	AEC	APF	IE	N4SID	THH	MMMC	MMAG
L	7.47	7.57	7.58	7.55	7.47	7.64	7.53	7.44	1.27	1.49	0.97	<0.01	2.22	0.75	0.41
T	10.49	10.62	10.61	10.58	10.49	10.77	10.56	10.51	1.24	1.13	0.80	<0.01	2.64	0.68	0.21
R	17.22	17.49	17.42	17.38	17.22	14.34	17.37	17.28	1.57	1.13	0.90	<0.01	16.7	0.87	0.35

Tabla 5.6. Estimación de frecuencias, sistema 3D-3GL acoplado

Modo	Frecuencia (Hz)							Error (%)							
	Teórica	AEC	APF	IE	N4SID	THH	MMMC	MMAG	AEC	APF	IE	N4SID	THH	MMMC	MMAG
L	9.42	9.55	9.50	9.37	9.42	9.70	9.45	9.48	1.34	0.90	0.58	<0.01	2.94	0.29	0.65
T	9.97	9.86	10.07	10.05	9.97	9.76	10.04	10.00	1.07	0.97	0.80	<0.01	2.11	0.70	0.30
R	17.57	17.22	17.78	17.43	17.57	20.23	17.55	17.50	1.99	1.18	0.82	<0.01	15.1	0.14	0.42

Tabla 5.7. Estimación de frecuencias, sistema 3D-3GL fuertemente acoplado

Modo	Frecuencia (Hz)							Error (%)							
	Teórica	AEC	APF	IE	N4SID	THH	MMMC	MMAG	AEC	APF	IE	N4SID	THH	MMMC	MMAG
L	8.55	8.68	8.63	8.69	8.55	8.79	8.59	8.51	1.46	0.94	1.64	<0.01	2.79	0.45	0.48
T	8.63	8.68	8.64	8.69	8.63	8.78	8.68	8.59	0.52	0.04	0.71	<0.01	1.64	0.50	0.48
R	15.00	15.32	15.24	14.87	15.00	17.89	15.11	15.02	2.13	1.58	0.86	<0.01	19.3	0.76	0.14

Los resultados de la identificación de frecuencia para el modelo 3D-15GL se muestran en la tabla 5.8. Con todas las metodologías se identificaron al menos los primeros tres modos en los componentes de traslación y el primero de torsión, los cuales representan el 99% de la participación. El cuarto y quinto modo de traslación, así como los modos superiores de torsión, cuya participación es menor al 1%, fueron identificados con los métodos N4SID, MMMC y MMAG,

pero cuando se emplean los métodos AEC, APF y IE se tuvieron dificultades en su identificación o no se pudieron identificar. Con la THH, aplicando el mismo procedimiento que en el sistema 5GL se identificaron los modos fundamentales en cada componente y el segundo modo en los componentes de traslación.

En la identificación de frecuencias con modelos N4SID y IE únicamente con las señales de respuesta en el último nivel, no se pudieron estimar correctamente los modos superiores. Al emplear las 15 señales de respuesta con N4SID se identificaron todos los modos, y con IE se identificaron tres modos traslacionales y dos de torsión. Cabe mencionar que en el sistema 3D-15GL, a diferencia de los otros sistemas analíticos, algunos errores en la identificación de frecuencias con N4SID son mayores que los obtenidos con MMMC o MMAG.

Tabla 5.8. Estimación de frecuencias, sistema 3D-15GL

Modo	Frecuencia (Hz)								Error (%)						
	Teórica	AEC	APF	IE	N4SID	THH	MMMC	MMAG	AEC	APF	IE	N4SID	THH	MMMC	MMAG
1L	2.13	2.12	2.11	2.03	2.12	2.177	2.12	2.12	0.44	0.68	4.76	0.28	2.34	0.49	0.33
2L	6.21	6.14	6.32	6.19	6.33	6.381	6.15	6.25	1.16	1.72	0.26	1.92	2.77	0.90	0.65
3L	9.79	9.46	9.84	9.42	10.00	8.90	9.71	9.85	3.38	0.57	3.72	2.17	9.07	0.79	0.63
4L	12.57	12.77	12.45	13.24	12.35	NI	12.73	12.62	1.57	0.98	5.30	1.75	NI	1.20	0.36
5L	14.34	14.60	14.19	NI	14.45	NI	14.22	14.47	1.82	1.05	NI	0.76	NI	0.86	0.90
1T	2.99	2.97	3.01	3.00	2.98	2.892	2.96	2.97	0.45	0.91	0.54	0.17	3.13	0.70	0.51
2T	8.72	8.72	8.87	8.90	8.64	9.151	8.64	8.77	0.07	1.77	2.16	0.89	5.00	0.88	0.65
3T	13.74	13.05	13.68	14.02	13.58	NI	13.83	13.69	5.00	0.44	2.03	1.12	NI	0.67	0.36
4T	17.65	18.23	17.34	NI	17.78	NI	17.52	17.78	3.29	1.74	NI	0.74	NI	0.71	0.76
5T	20.13	20.72	19.75	NI	20.52	NI	20.37	19.92	2.92	1.89	NI	1.92	NI	1.17	1.04
1R	4.90	4.84	4.98	5.13	4.94	4.479	4.86	4.92	1.33	1.57	4.73	0.83	8.63	0.89	0.41
2R	14.31	14.60	14.08	NI	14.60	NI	14.24	14.38	2.06	1.62	NI	2.05	NI	0.48	0.52
3R	22.56	22.82	22.91	NI	23.15	NI	22.74	22.71	1.17	1.56	NI	2.64	NI	0.82	0.68
4R	28.98	29.59	29.23	NI	28.51	NI	29.07	28.85	2.13	0.86	NI	1.60	NI	0.33	0.43
5R	33.05	32.87	33.34	NI	32.22	NI	32.64	33.44	0.53	0.88	NI	2.51	NI	1.25	1.18

NI: No identificado

Tabla 5.9. Estimación de amortiguamientos, sistema 3D-15GL

Modo	Fracción de amortiguamiento							Error (%)					
	Teórico	AEC	APF	IE	N4SID	MMMC	MMAG	AEC	APF	IE	N4SID	MMMC	MMAG
1L	0.030	0.030	0.031	0.032	0.030	0.029	0.031	1.44	1.99	5.30	0.70	1.71	3.50
2L	0.039	0.038	0.038	0.031	0.040	0.037	0.036	1.53	2.32	21.15	2.55	4.68	6.42
3L	0.070	0.042	0.042	0.038	0.070	0.041	0.071	40.00	40.39	46.37	0.77	41.08	1.33
4L	0.057	0.059	0.059	0.046	0.059	0.057	0.058	3.28	2.53	20.44	2.56	0.43	2.06
5L	0.052	0.072	0.072	NI	0.053	0.051	0.055	37.09	38.41	NI	1.53	1.89	4.60
1T	0.030	0.029	0.029	0.035	0.030	0.029	0.030	3.97	3.26	18.27	0.84	1.69	1.57
2T	0.054	0.053	0.053	0.045	0.055	0.054	0.056	2.59	1.99	16.22	2.04	0.11	3.77
3T	0.056	0.058	0.057	0.046	0.056	0.056	0.059	3.33	2.42	17.84	0.58	0.66	4.27
4T	0.057	0.167	0.165	NI	0.059	0.017	0.060	191.26	188.81	NI	2.93	70.44	4.78
5T	0.033	0.089	0.090	NI	0.033	0.052	0.034	167.28	168.69	NI	1.56	56.22	1.81
1R	0.064	0.077	0.078	0.066	0.064	0.069	0.067	19.83	20.92	2.06	0.55	7.09	3.52
2R	0.076	0.026	0.026	NI	0.074	0.096	0.078	66.59	66.33	NI	3.17	25.41	2.16
3R	0.050	0.089	0.089	NI	0.049	0.078	0.051	78.22	77.31	NI	0.92	56.68	2.92
4R	0.057	0.064	0.064	NI	0.059	0.006	0.055	12.52	11.79	NI	2.59	89.13	3.81
5R	0.051	0.063	0.062	NI	0.049	0.406	0.048	24.23	23.19	NI	2.42	704.03	5.65

NI: No identificado

En la tabla 5.9 se presenta la identificación de amortiguamientos para el sistema 3D-15GL ante una excitación sísmica. Con todas las metodologías se obtuvo una adecuada estimación del amortiguamiento para los primeros tres modos de traslación y al menos del primer modo de torsión. En cambio, en los modos superiores, cuya participación despreciable, se obtuvieron errores muy altos en la estimación de amortiguamiento con AEC, APF y MMMC, y con IE no se pudieron identificar estos valores. Con THH dadas las características del método no se estimaron amortiguamientos.

### 5.2.3 Estimación de frecuencias en sistemas con ruido

Se hicieron pruebas con el sistema 3D-3GL acoplado adiciónado ruido dentro de los intervalos de 20 y 6 dB. En las tablas 5.10 y 5.11 se presentan los resultados de la estimación de frecuencias y amortiguamientos de los modelos con ruido moderado (RSR de 22.9 21.9 y 25.4 en las señales de respuesta en L, T y R respectivamente) y en las tablas 5.12 y 5.13 se presentan los resultados de los modelos con mayor ruido (RSR de 6.8 6.1 y 6.5 en las mismas señales).

Tabla 5.10. Estimación de frecuencias, sistema 3D-3GL acoplado RSR > 20 dB

Modo	Frecuencia (Hz)							Error (%)					
	Teórica	AEC	APF	IE	N4SID	MMMC	MMAG	AEC	APF	IE	N4SID	MMMC	MMAG
L	9.42	9.77	9.59	9.64	9.43	9.39	9.35	3.67	1.86	2.32	0.06	0.33	0.72
T	9.97	9.85	9.81	10.13	9.97	9.90	9.91	1.19	1.57	1.61	0.05	0.72	0.58
R	17.57	15.66	15.77	NI	17.70	17.72	17.72	10.88	10.25	-	0.75	0.44	0.86

NI: No identificado

Tabla 5.11. Estimación de amortiguamientos, sistema 3D-3GL acoplado RSR > 20 dB

Modo	Fracción de amortiguamiento							Error (%)					
	Teórico	AEC	APF	IE	N4SID	MMMC	MMAG	AEC	APF	IE	N4SID	MMMC	MMAG
L	0.030	0.032	0.032	0.038	0.029	0.027	0.031	6.50	5.83	27.23	3.04	8.44	5.67
T	0.030	0.033	0.033	0.029	0.031	0.029	0.028	9.13	10.06	1.73	3.46	2.00	1.61
R	0.030	0.017	0.017	NI	0.021	0.034	0.031	43.39	42.95	-	31.60	14.86	4.12

NI: No identificado

Tabla 5.12. Estimación de frecuencias, sistema 3D-3GL acoplado 20 dB > RSR > 6 dB

Modo	Frecuencia (Hz)							Error (%)					
	Teórica	AEC	APF	IE	N4SID	MMMC	MMAG	AEC	APF	IE	N4SID	MMMC	MMAG
L	9.42	9.851	9.642	9.661	9.435	9.304	9.36	4.58	2.36	2.56	0.16	1.22	0.67
T	9.97	10.986	9.634	10.770	9.990	10.143	10.05	10.19	3.36	8.03	0.20	1.74	0.85
R	17.57	18.689	18.800	NI	31.38	17.197	17.26	6.34	6.97	-	78.58	2.15	1.80

NI: No identificado

Tabla 5.13. Estimación de amortiguamientos, sistema 3D-3GL acoplado 20 dB > RSR > 6 dB

Modo	Fracción de amortiguamiento							Error (%)					
	Teórico	AEC	APF	IE	N4SID	MMMC	MMAG	AEC	APF	IE	N4SID	MMMC	MMAG
L	0.030	0.032	0.032	0.038	0.029	0.027	0.032	6.50	5.83	27.23	3.04	8.44	6.29
T	0.030	0.033	0.033	0.029	0.031	0.029	0.028	9.13	10.06	1.73	3.46	2.00	5.60
R	0.030	0.017	0.017	NI	0.021	0.034	0.028	43.39	42.95	-	31.60	14.86	6.24

NI: No identificado

Para el sistema 3D-15GL también se hizo una prueba con ruido. En este caso, solamente se analizará el primer intervalo de ruido. En las tablas 5.14 y 5.15 se presenta la identificación de frecuencias y amortiguamientos para este sistema con RSR entre 20.1 y 24.4 dB en las señales de respuesta.

Tabla 5.14. Estimación de frecuencias, sistema 3D-15GL RSR>20 dB

Modo	Frecuencia (Hz)							Error (%)					
	Teórica	AEC	APF	IE	N4SID	MMMC	MMAG	AEC	APF	IE	N4SID	MMMC	MMAG
1L	2.13	2.11	2.11	2.08	2.15	2.14	2.14	0.58	1.03	2.24	0.89	0.77	0.78
2L	6.21	6.31	6.34	6.45	6.36	6.28	6.17	1.59	2.02	3.94	2.45	1.09	0.62
3L	9.79	9.50	9.93	NI	10.14	9.65	9.66	2.95	1.44	NI	3.64	1.45	1.34
4L	12.57	12.37	12.45	NI	11.46	12.66	12.71	1.59	1.01	NI	8.88	0.65	1.05
5L	14.34	14.64	14.08	NI	13.98	14.12	14.53	2.07	1.81	NI	2.50	1.55	1.33
1T	2.99	3.00	3.00	3.14	2.99	3.03	2.97	0.47	0.53	5.20	0.38	1.64	0.55
2T	8.72	8.75	8.75	8.43	8.64	8.64	8.84	0.39	2.52	3.32	0.90	0.85	1.43
3T	13.74	14.29	14.29	NI	13.98	13.90	13.63	3.99	2.58	NI	1.78	1.14	0.78
4T	17.65	18.35	18.35	NI	17.41	17.84	17.89	3.98	1.23	NI	1.38	1.08	1.38
5T	20.13	19.41	20.61	NI	NI	20.44	19.84	3.60	2.40	NI	NI	1.56	1.46
1R	4.90	4.78	4.83	NI	4.94	4.96	4.85	2.57	1.51	NI	0.85	1.23	1.01
2R	14.31	14.64	14.44	NI	NI	14.52	14.40	2.31	0.94	NI	NI	1.46	0.63
3R	22.56	22.82	22.24	NI	NI	22.96	22.80	1.17	1.42	NI	NI	1.78	1.09
4R	28.98	28.38	28.38	NI	28.32	28.69	29.25	2.07	2.33	NI	2.27	1.00	0.96
5R	33.05	32.30	32.54	NI	NI	33.62	32.69	2.27	1.53	NI	NI	1.73	1.09

NI: No identificado

Tabla 5.15. Estimación de amortiguamientos, sistema 3D-15GL RSR>20 dB

Modo	Fracción de amortiguamiento							Error (%)					
	Teórico	AEC	APF	IE	N4SID	MMMC	MMAG	AEC	APF	IE	N4SID	MMMC	MMAG
1L	0.030	0.033	0.032	0.038	0.033	0.028	0.031	9.77	7.85	27.33	9.57	7.56	4.53
2L	0.039	0.040	0.040	0.054	0.042	0.042	0.037	3.79	2.47	37.79	8.81	7.71	5.73
3L	0.070	0.047	0.046	NI	0.093	0.037	0.076	33.22	34.28	NI	32.83	47.02	7.80
4L	0.057	0.066	0.067	NI	0.059	0.066	0.053	15.26	16.94	NI	3.55	15.18	7.78
5L	0.052	0.079	0.077	NI	0.048	0.005	0.050	51.08	47.92	NI	8.46	90.74	4.77
1T	0.030	0.028	0.028	0.059	0.034	0.028	0.030	8.17	6.93	97.00	14.55	7.64	1.63
2T	0.054	0.048	0.047	0.017	0.060	0.051	0.057	10.93	12.32	69.48	11.42	6.11	6.00
3T	0.056	0.062	0.061	NI	0.071	0.061	0.054	10.12	8.10	NI	27.11	8.26	4.28
4T	0.057	0.014	0.015	NI	0.074	0.020	0.056	74.86	74.47	NI	28.95	64.32	2.69
5T	0.033	0.077	0.075	NI	NI	0.442	0.033	129.22	123.93	NI	NI	1222.82	1.23
1R	0.064	0.077	0.076	NI	0.055	0.061	0.068	18.87	17.54	NI	15.09	5.79	5.57
2R	0.076	0.023	0.023	NI	NI	0.088	0.073	69.93	69.47	NI	NI	15.54	4.66
3R	0.050	0.095	0.094	NI	NI	0.104	0.051	90.37	87.29	NI	NI	109.18	2.13
4R	0.057	0.062	0.060	NI	0.079	0.723	0.060	7.66	5.32	NI	37.67	1163.31	5.53
5R	0.051	0.069	0.067	NI	NI	0.006	0.049	35.83	32.61	NI	NI	87.49	3.02

NI: No identificado

En los sistemas 3D-3GL y 3D-15GL con ruido, con los métodos AEC, APF, N4SID, MMMC y MMAG, se logra identificar todos los modos significativos, en estos modos los errores en la estimación de frecuencias se incrementaron de 1 a 5% con respecto a los modelos sin ruido y hasta 8% en los demás modos.

En los sistemas 3D-3GL y 3D-15GL con ruido, solamente con AEC, APF, MMMC y MMAG se identificaron todas las frecuencias y con THH no se pudieron identificar en ningún modelo con ruido. En los sistemas 3D-3GL con N4SID para el primer nivel de ruido se identificó el modo de torsión y para mayor ruido no se pudo identificar, con IE no se pudo identificar en ninguna prueba con ruido. Para el sistema 3D-15GL con ruido, con N4SID se identificaron todos los modos de traslación (con excepción de quinto modo en T) y el primery cuarto modo de torsión; con IE se identificaron únicamente los primeros dos modos traslacionales.

En cuanto a la identificación de amortiguamientos en los modelo 3D-3GL con ruido moderado se identificaron adecuadamente los valores de los modos traslacionales con todas las metodologías, y el amortiguamiento del modo de torsión con N4SID, MMMC y MMAG. En el caso de mayor ruido, para el mismo sistema, los errores en los modos de traslación se incrementaron y no se pudo identificar correctamente el modo de torsión con N4SID. Para el sistema 3D-15GL con ruido, los mayores errores en la estimación del amortiguamiento fueron AEC, APF y MMMC, en los modos superiores. Cabe destacar MMAG, con la cual se estimaron los amortiguamientos con un error menor al 10% en todos los modos .

### 5.2.4 Modelos ASCE

Los resultados de la identificación de frecuencias de los modelos ASCE se presentan en las tablas 5.16 y 5.17 para el caso 0 y el caso 1, respectivamente. De igual manera, la estimación de amortiguamientos se presenta en las tablas 5.18 y 5.19. Debido a que la IE presentó resultados pobres en comparación con AEC, APF, N4SID, MMMC y MMAG, y no se contempla para el proceso de automatización, se consideró innecesaria la evaluación de este método con los modelos ASCE. Además, con esta evaluación no se hubiera llegado a conclusiones diferentes.

Tabla 5.16. Estimación de frecuencias sistema ASCE caso 0

Modo	Frecuencia (Hz)							Errores (%)					
	Teórica	AEC	APF	THH	N4SID	MMMC	MMAG	AEC	APF	THH	N4SID	MMMC	MMAG
1L	11.79	11.77	11.83	11.23	11.64	11.88	11.75	0.20	0.35	4.79	1.26	0.74	0.32
2L	32.01	32.18	31.51	33.65	31.91	31.73	32.29	0.54	1.56	5.13	0.31	0.86	0.89
3L	48.44	48.68	49.25	NI	47.77	48.66	48.74	0.49	1.66	NI	1.39	0.45	0.61
4L	60.15	61.18	58.67	NI	60.72	60.31	60.62	1.71	2.47	NI	0.96	0.26	0.78
1T	9.41	9.52	9.39	9.11	9.55	9.36	9.46	1.18	0.27	3.24	1.48	0.54	0.51
2T	25.54	25.50	25.30	24.18	25.30	25.72	25.79	0.16	0.95	5.35	0.95	0.70	0.94
3T	38.66	38.57	38.89	NI	38.21	38.83	38.99	0.23	0.59	NI	1.16	0.44	0.84
4T	48.01	48.68	48.91	NI	47.55	47.85	47.56	1.40	1.88	NI	0.95	0.33	0.92
1R	16.38	16.86	16.47	NI	16.25	16.49	16.32	2.94	0.52	NI	0.83	0.67	0.40
2R	44.64	NI	NI	NI	45.31	44.46	45.02	NI	NI	NI	1.49	0.41	0.85
3R	67.48	NI	NI	NI	66.63	67.75	67.13	NI	NI	NI	1.26	0.40	0.51

NI: No identificado

Tabla 5.17. Estimación de frecuencias sistema ASCE caso 1

Modo	Frecuencia (Hz)							Errores (%)					
	Teórica	AEC	APF	THH	N4SID	MMMC	MMAG	AEC	APF	THH	N4SID	MMMC	MMAG
1L	9.91	9.96	9.85	10.18	9.87	9.93	9.94	0.53	0.55	2.70	0.37	0.20	0.27
2L	28.92	29.10	29.40	30.08	28.66	28.81	29.06	0.64	1.68	4.02	0.89	0.39	0.49
3L	47.34	47.46	47.72	NI	47.91	47.76	47.75	0.26	0.82	NI	1.22	0.90	0.88
4L	59.99	60.64	60.48	NI	60.75	60.34	59.55	1.08	0.82	NI	1.25	0.57	0.74
1T	6.24	6.30	6.28	6.07	6.21	6.28	6.22	0.93	0.66	2.68	0.55	0.56	0.36
2T	21.53	21.63	21.29	22.69	21.74	21.35	21.33	0.46	1.13	5.38	0.98	0.83	0.95
3T	37.37	37.70	36.71	NI	36.99	37.09	37.52	0.86	1.77	NI	1.02	0.77	0.39
4T	47.83	48.68	47.66	NI	47.50	48.15	47.97	1.79	0.34	NI	0.68	0.67	0.30
1R	11.73	11.57	11.61	NI	11.86	11.78	11.64	1.35	1.03	NI	1.09	0.45	0.80
2R	38.28	NI	NI	NI	38.55	38.65	37.95	NI	NI	NI	0.71	0.99	0.86
3R	65.31	NI	NI	NI	64.85	64.61	64.52	NI	NI	NI	0.70	1.07	1.20

NI: No identificado

Tabla 5.18. Estimación de amortiguamientos sistema ASCE caso 0

Modo	Fracción de amortiguamiento						Error (%)				
	Teórico	AEC	APF	N4SID	MMMC	MMAG	AEC	APF	N4SID	MM	MMAG
1L	0.030	0.031	0.031	0.030	0.029	0.031	4.11	3.28	0.81	4.33	2.40
2L	0.030	0.028	0.028	0.030	0.031	0.029	7.25	8.02	1.04	3.58	2.83
3L	0.030	0.038	0.039	0.030	0.029	0.029	27.45	28.40	1.15	4.43	1.93
4L	0.030	0.042	0.042	0.031	0.021	0.031	40.06	41.14	2.13	30.77	3.93
1T	0.030	0.032	0.032	0.031	0.031	0.030	6.42	5.33	1.77	3.45	1.50
2T	0.030	0.033	0.033	0.029	0.031	0.031	8.42	9.37	2.80	3.61	2.10
3T	0.030	0.038	0.038	0.030	0.038	0.030	25.28	26.11	1.56	25.95	1.23
4T	0.030	0.038	0.039	0.031	0.009	0.029	27.76	28.61	2.90	71.12	3.53
1R	0.030	NI	NI	0.030	0.033	0.030	NI	NI	1.01	8.48	1.57
2R	0.030	NI	NI	0.029	0.021	0.029	NI	NI	2.16	30.45	1.97
3R	0.030	NI	NI	0.031	0.052	0.031	NI	NI	3.24	74.72	2.03

NI: No identificado

Tabla 5.19. Estimación de amortiguamientos sistema ASCE caso 1

Modo	Fracción de amortiguamiento						Error (%)				
	Teórico	AEC	APF	N4SID	MMMC	MMAG	AEC	APF	N4SID	MM	MMAG
1L	0.030	0.028	0.028	0.030	0.028	0.031	6.86	6.11	1.13	6.58	2.67
2L	0.030	0.031	0.031	0.030	0.032	0.030	4.94	3.82	1.20	6.12	1.20
3L	0.030	0.036	0.036	0.029	0.036	0.029	19.81	21.08	1.83	21.27	2.50
4L	0.030	0.038	0.038	0.030	0.022	0.029	25.59	26.81	1.17	25.66	4.63
1T	0.030	0.029	0.029	0.029	0.032	0.030	4.17	3.18	2.31	8.04	1.13
2T	0.030	0.029	0.029	0.029	0.033	0.029	3.70	4.88	2.34	10.90	3.17
3T	0.030	0.042	0.042	0.031	0.032	0.031	40.81	39.23	2.75	7.05	3.43
4T	0.030	0.051	0.051	0.031	0.132	0.030	70.90	69.39	2.94	341.06	1.30
1R	0.030	NI	NI	0.029	0.038	0.029	NI	NI	2.57	27.22	3.03
2R	0.030	NI	NI	0.030	0.086	0.031	NI	NI	1.28	187.67	2.63
3R	0.030	NI	NI	0.030	0.019	0.031	NI	NI	1.36	38.30	2.03

NI: No identificado

En ambos casos del modelo ASCE se identificaron las cuatro frecuencias de traslación con AEC, APF, N4SID, MMMC y MMAG, con THH solamente se identificaron las primeras dos. Para los modos de torsión hubo mayor dificultad en la identificación, estimándose tres frecuencias con N4SID, MMMC y MMAG, y la frecuencia fundamental de torsión con AEC y APF. Existe la posibilidad de identificar más modos de torsión pero se requieren cálculos adicionales que no se consideraron necesarios. Los resultados de la identificación de frecuencias fueron similares al modelo 3D-15GL, con N4SID, MMMC y MMAG se obtuvieron las mejores estimaciones seguidas de APF y AEC y por último THH.

De igual manera, la estimación de amortiguamientos para los casos 0 y 1 fue similar al modelo 3D-15GL aunque con mejores resultados en la identificación de modos superiores. Para los modos de traslación los menores errores se obtuvieron con N4SID seguidos de MMAG, MMMC, APF y AEC. En cuanto a torsión solamente con N4SID, MMMC y MMAG se pudo estimar adecuadamente el amortiguamiento. Nuevamente, cabe mencionar que los mayores errores corresponden a modos con participación insignificante y poca influencia en la respuesta, en los modos significativos los errores fueron menores al 10%.

### 5.3 Aplicación a edificios reales

#### 5.3.1 Edificio SIS

Se escogió un evento de intensidad moderada ( $I_{Arias}=16.4$  cm/s) y se hizo un análisis con la señal completa y en intervalos de tiempo (ventanas), se emplearon modelos tridimensionales con únicamente las señales de azotea.

Los parámetros del AG fueron los que dieron mejores resultados en los modelos de sistemas analíticos:

- Codificación por valor
- Tamaño de la población 20 cromosomas
- Intervalo de valores iniciales por modo
- Selección muestreo aleatorio con remplazo
- Cruzamiento aritmético, tasa 100%
- Mutación perturbación de gen, 2% del valor del cromosoma, probabilidad de mutación 5%
- Minimización por modos con estimación independiente de formas modales

Para el gen de frecuencia, el intervalo de valores para la población inicial se definió de acuerdo a los valores mínimos y máximos en la identificación de frecuencias hecha en otros trabajos, el intervalo de valores para la fracción de amortiguamiento fue entre 0.01 y 0.05 en todos los modos. Para el factor de respuesta modal (FRM) los valores fueron entre 0.1 y 1.5 para el modo fundamental y de -0.4 a 0.4 para los modos superiores.

Tabla 5.20. Intervalo de valores para la población inicial edificio SIS

Modo	Gen de frecuencia (Hz)	
	Componente L	Componente T
1	0.7–1.3	0.5–1.1
2	3.5–4.1	2.4–3.0
3	7.6–8.6	4.5–5.1
4	11.7–13.8	6.9–7.5

En todos los modelos se tuvo una buena identificación de los parámetros dinámicos, los valores convergieron a los resultados con MC con algunas diferencias, especialmente en los modos superiores.

En la tabla 5.21 se presenta la comparación de frecuencias estimadas con AEC, N4SID, MMMC y MMAG con la señal completa, la diferencia relativa es calculada con respecto a MMAG. En las metodologías paramétricas, por cada señal de respuesta del modelo se calculó con N4SID, MMMC y MMAG el valor de la función de evaluación (ec. 2.35) con todos los modos identificados, los resultados se muestran en la tabla 5.22. Para el AEC no se calcula este valor porque no es una metodología paramétrica y con IE tampoco, ya que no es una metodología de estimación a partir de señales de entrada-salida.

En la figura 5.4 se presenta la estimación de frecuencias en los tres componentes con la señal completa y por ventanas con las metodologías MMMC y MMAG. Los valores de las frecuencias estimadas son similares, para el primer y segundo modo las diferencias fueron menores al 5%, cabe mencionar que estos modos representan más del 90% de la participación en las señales de respuesta. En los modos superiores las diferencias no excedieron el 10%.

Tabla 5.21. Estimación de frecuencias edificio SIS señal completa

Modo	Frecuencia (Hz)					Diferencia (%)			
	AEC	N4SID	IE	MMMC	MMAG	AEC	N4SID	IE	MMMC
1L	0.99	0.99	0.93	0.99	0.99	0.40	0.20	6.38	0.20
2L	3.75	3.92	3.90	3.94	4.02	6.85	2.53	3.07	1.91
3L	8.00	7.98	7.85	8.05	8.21	2.52	2.77	4.37	1.94
4L	11.78	12.59	13.25	12.59	12.27	4.02	2.65	7.99	2.62
1T	0.78	0.79	0.80	0.79	0.79	0.88	0.25	1.39	0.13
2T	2.66	2.69	2.61	2.67	2.68	0.60	0.37	2.50	0.34
3T	4.75	4.89	4.75	4.91	4.94	3.87	0.97	3.75	0.45
4T	6.94	7.11	7.78	7.13	7.15	2.92	0.52	8.87	0.34
1R	1.30	1.30	1.31	1.30	1.30	0.13	0.28	0.64	0.36
2R	3.99	4.04	4.30	4.04	4.03	0.87	0.17	6.77	0.12
3R	6.61	6.82	6.48	6.64	6.46	2.40	5.54	0.39	2.79

Tabla 5.22. Valor de la función de evaluación con metodologías paramétricas edificio SIS

Componente	J (Gal <sup>2</sup> ) análisis señal completa			J (Gal <sup>2</sup> ) análisis por ventanas	
	N4SID	MMMC	MMAG	MMMC	MMAG
	L	3377	3246	3578	2964
T	5859	5180	4949	4930	4232
R	2749	2801	2935	2467	2616

En cuanto a amortiguamientos (figura 5.5) se obtuvieron valores muy variados y las diferencias fueron mayores, principalmente en modos superiores. Sin embargo, su influencia en la respuesta es mucho menor que otros parámetros como la frecuencia, y existen limitantes en su estimación, por lo que las variaciones podrían considerarse dentro de las incertidumbres de la identificación.

Cabe mencionar que con MC en algunas ventanas hubo errores numéricos en la identificación de amortiguamientos, ya que el valor estimado al que convergía era inapropiado para el tipo de estructura. En estos casos, para la identificación de los demás parámetros, se fijó el amortiguamiento a un valor más adecuado tomando como referencia otras ventanas y la intensidad del movimiento, situación que ya se ha abordado en otros trabajos (Camargo, 2007). Una de las ventajas del AG es una menor tendencia a la convergencia de mínimos locales, aspecto que se ve reflejado en la estimación de amortiguamientos de sistemas reales ya que en todas las ventanas con convergió a valores razonables.

En las figuras 5.6 a 5.8 se presenta, por cada componente, la comparación entre las señales de aceleración medidas y las calculadas con la metodología de minimización modal empleando MC y AG, en las figuras A.17 a A.19 se grafica la diferencia cuadráticas entre estas señales.

Las diferencias entre las señales medidas y calculadas con el AG son similares a las calculadas con MC, y con ambos métodos hay un buen ajuste con la señal medida, las mayores diferencias se presentan en la señal de torsión.

Otro aspecto que se abordó con los modelos de edificios reales fueron los umbrales de los criterios de convergencia. El valor del criterio de repetición de cromosoma establecido con modelos analíticos se modificó para ajustarse a los sistemas reales. Inicialmente se consideró que la repetición de 5 veces el mejor cromosoma podría considerarse como la convergencia del algoritmo; sin embargo, en los modelos de edificios reales no fue suficiente. En las pruebas con modelos tridimensionales del edificio SIS se consideró un umbral de 10 para el criterio de repetición del mejor cromosoma, el cual resultó adecuado (aunque, como en los modelos de sistemas analíticos, generalmente rige el criterio de homogeneidad de la población).

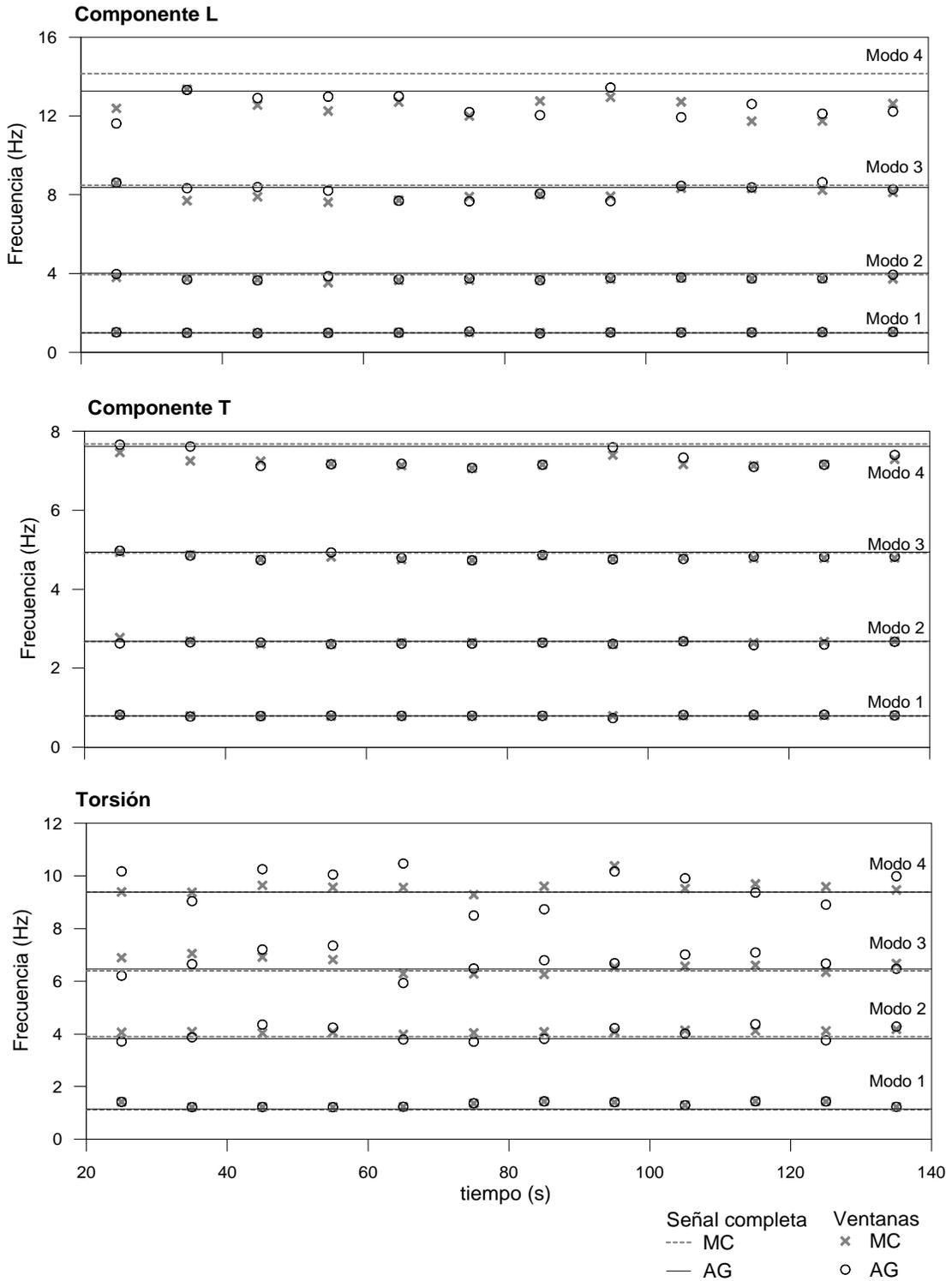


Figura 5.4. Gráficas de estimación de frecuencias por ventanas edificio SIS

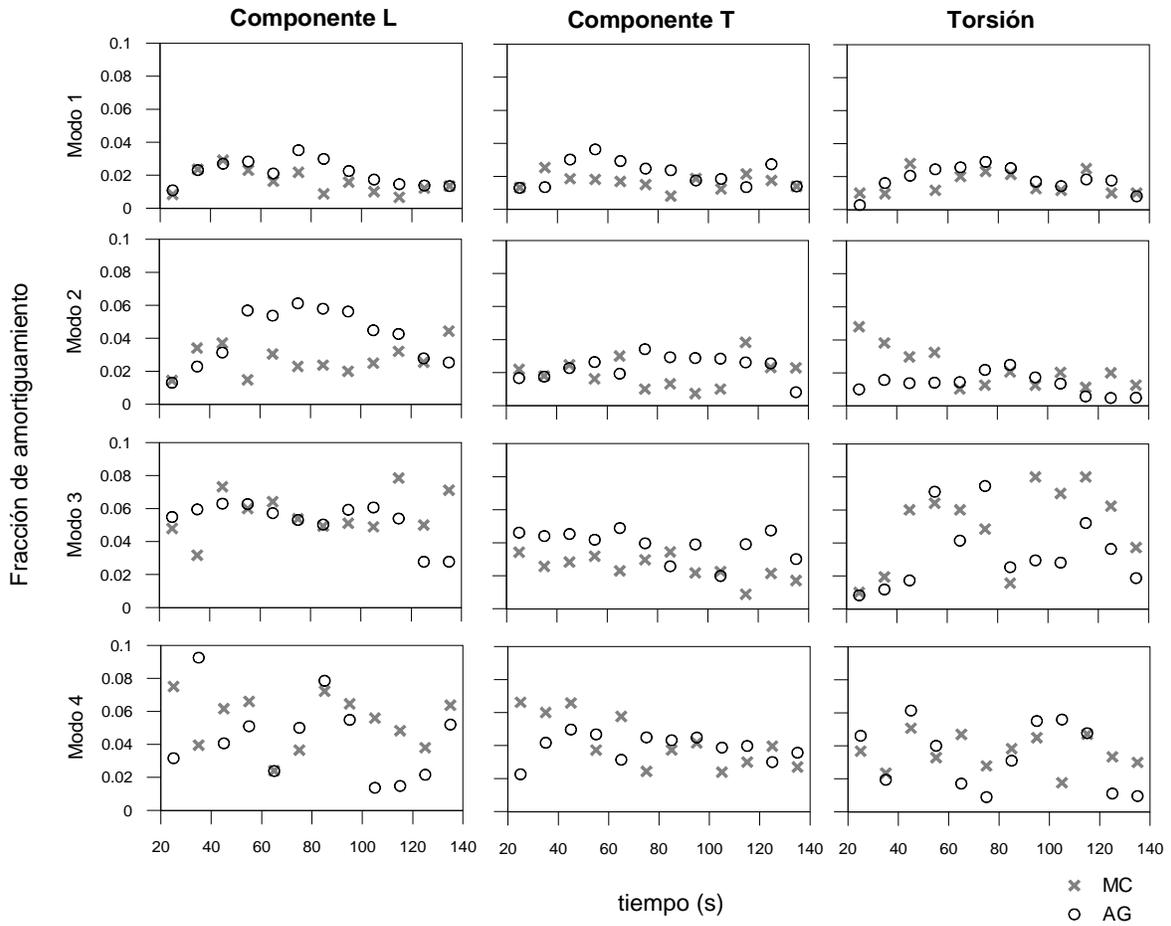


Figura 5.5. Gráficas de estimación de amortiguamientos por ventanas edificio SIS

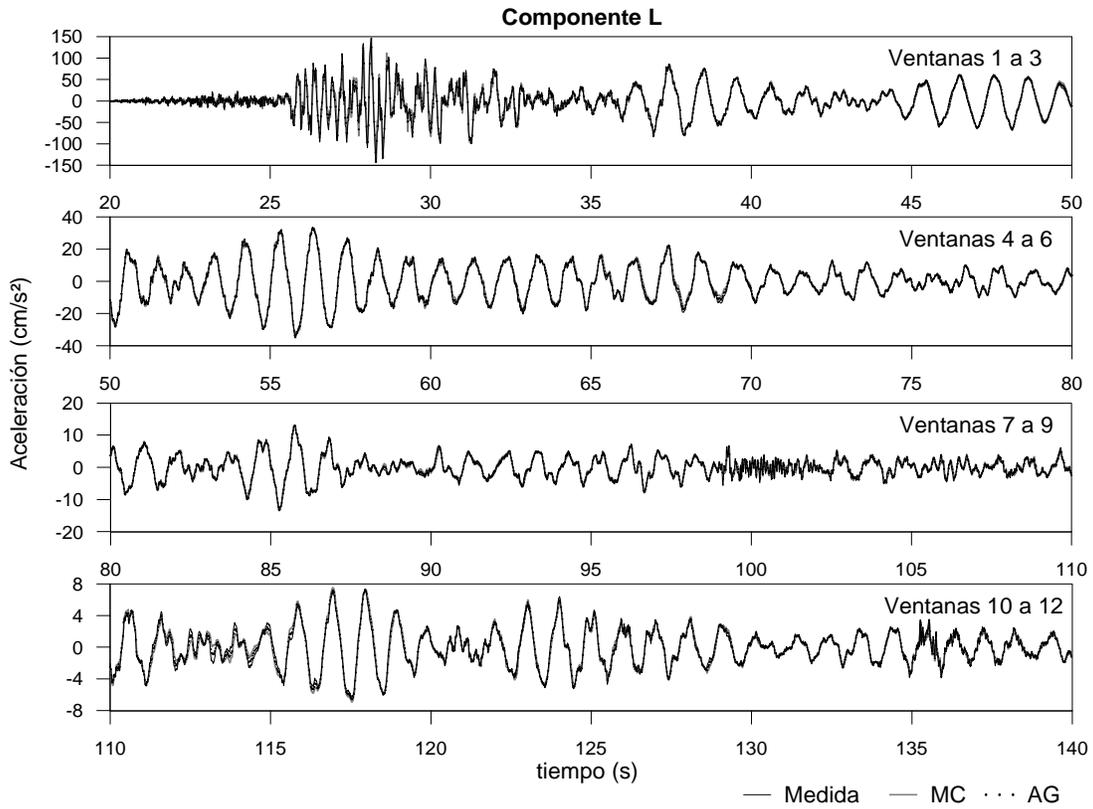


Figura 5.6. Comparación de señales medidas y calculadas, componente L edificio SIS

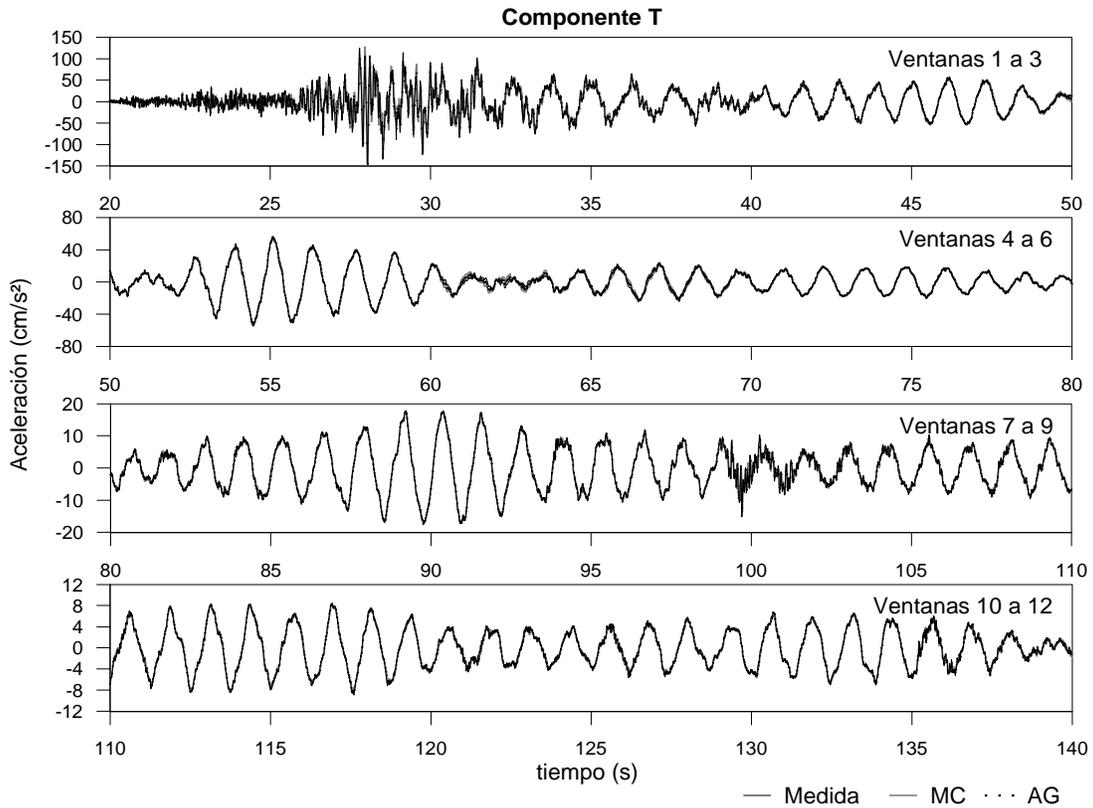


Figura 5.7. Comparación de señales medidas y calculadas, componente T edificio SIS

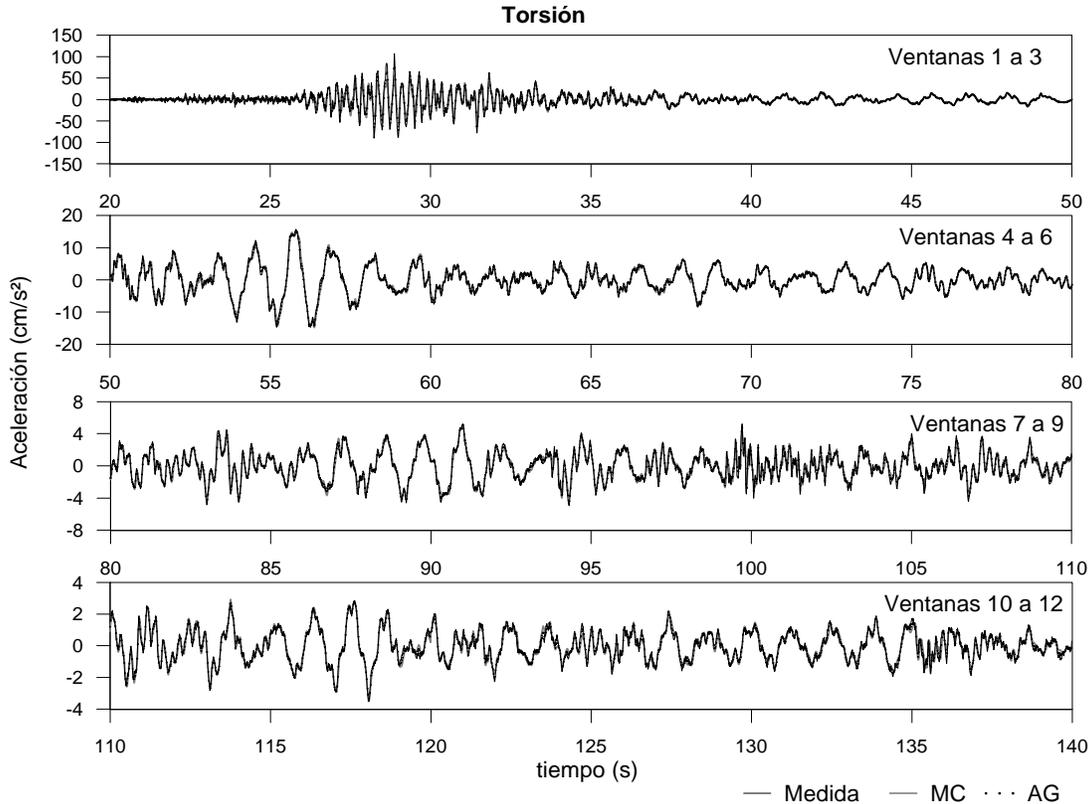


Figura 5.8. Comparación de señales medidas y calculadas, torsión edificio SIS

### 5.3.2 Edificio PC

Para el análisis se escogió el evento sísmico de mayor intensidad registrado hasta el momento ( $I_{Arias}=20.88$  cm/s) y se hizo un análisis con la señal completa y en intervalos de tiempo (ventanas). Se emplearon modelos tridimensionales usando como señales de excitación los registros de terreno y como respuesta los registros de azotea. Los intervalos de tiempo se escogieron de acuerdo a la intensidad del movimiento en la ventana.

Los parámetros del algoritmo genético fueron los establecidos a partir de las pruebas en el edificio SIS, los cuales a su vez fueron los que dieron mejores resultados en los modelos de sistemas analíticos.

En cuanto a los umbrales de los criterios de convergencia se emplearon los valores ajustados con el edificio SIS. Los cuales fueron: valor medio del coeficiente de variación 0.45%, repetición de mejor cromosoma en 10 generaciones consecutivas y un máximo de 100 generaciones (salvo algunas ventanas donde se aumentó el número de generaciones).

Para el gen de frecuencia, el intervalo de valores para la población inicial se definió de acuerdo a los valores mínimos y máximos en la identificación de frecuencias hecha en otros trabajos (Palacios, 2003; Correa, 2005; Murià-Vila *et al.*, 2007). El intervalo de valores para la fracción de amortiguamiento fue entre 0.01 y 0.10 en todos los modos. En la tabla 5.23 se presenta el intervalo de valores de la población inicial escogido para cada ventana y marcados con asterisco los casos donde se aumentó el número máximo de generaciones a 200.

Tabla 5.23. Intervalo de valores para la población inicial gen de frecuencia edificio PC

Ventana (s)	Frecuencias (Hz)					
	Modo					
	1L	2L	1T	2T	1R	2R
10-20	0.25-0.5	1 -1.3	0.25-0.5	1.1-1.8	0.35-0.55	0.35-0.45
20-30	0.25-0.5	1-1.3	0.25-0.5	1.2-1.6	0.35-0.55	0.35-0.45
30-40	0.25-0.5	0.9-1.3	0.25-0.5	1.1-1.8	0.35-0.55	1.3-1.55
40-50	0.25-0.5	0.9-1.3	0.25-0.5	1.1-1.8	0.35-0.55	1.3-1.55
50-60	0.25-0.5	0.9-1.3	0.25-0.5	1.1-1.8	0.35-0.55	1.3-1.55
60-70	0.25-0.5	0.9-1.3	0.25-0.5	1.1-1.8	0.35-0.55	1.3-1.55
65-85	0.25-0.5	1-1.3*	0.3-0.45	1.1-1.8	0.35-0.55	1.3-1.55
75-95	0.25-0.5	0.9-1.3	0.25-0.5	1.1-1.8	0.35-0.55	1.3-1.55
90-100	0.25-0.5	0.9-1.3	0.3-0.45	1.1-1.8	0.35-0.45	1.3-1.55
90-110	0.25-0.5	0.9-1.3	0.25-0.5	1.1-1.8	0.35-0.55	1.3-1.55
115-125	0.25-0.5	0.9-1.3	0.25-0.5	1.1-1.8	0.35-0.55	1.3-1.55
120-130	0.25-0.5	0.9-1.3	0.25-0.5	1.1-1.8	0.35-0.55	1.3-1.55
135-145	0.3-0.45	0.9-1.3	0.3-0.45	1.1-1.8	0.35-0.45	1.3-1.55
145-165	0.3-0.45	0.9-1.3	0.3-0.45	1.1-1.8	0.35-0.45	1.3-1.55
155-165	0.3-0.45	0.9-1.3	0.3-0.45	1.1-1.8	0.35-0.45	1.3-1.55
170-180	0.3-0.45	0.9-1.3	0.3-0.45	1.1-1.8	0.35-0.45	1.3-1.55
190-200	0.3-0.45	1-1.3*	0.3-0.45	1.1-1.8	0.35-0.45	1.3-1.55
205-215	0.25-0.5	0.9-1.3	0.25-0.5	1.1-1.8	0.35-0.55	1.3-1.55
215-235	0.3-0.45	0.9-1.3	0.3-0.45	1.1-1.8	0.3-0.45	1.3-1.55
230-250	0.3-0.45	1-1.3*	0.25-0.5	1.2-1.6*	0.35-0.55	1.3-1.55

\* Generaciones máximas 200

En todos los modelos se tuvo una buena identificación de los parámetros dinámicos, los valores convergieron a los resultados con MC con algunas diferencias, especialmente en el segundo modo.

La tabla 5.24 muestra la comparación de frecuencias estimadas con la señal completa, la diferencia relativa es calculada con respecto a MMAG, y en la tabla 5.25 se presenta el valor de la función de evaluación (ec. 2.35) con las metodologías paramétricas.

En las figuras 5.9 a 5.11 se presenta la estimación de frecuencias en los componentes L, T y torsión respectivamente. Los valores de las frecuencias estimadas son similares a los obtenidos con MC, para el primer modo las diferencias fueron menores al 10%, y para el segundo modo las diferencias no excedieron el 15%. Cabe mencionar que estos modos representan más del 95% de la participación en las señales de respuesta.

Tabla 5.24. Estimación de frecuencias edificio PC señal completa

Modo	Frecuencia (Hz)					Diferencia (%)			
	AEC	N4SID	ME	MMMC	MMAG	AEC	N4SID	ME	MMMC
1L	0.36	0.380	0.398	0.39	0.391	7.89	2.87	1.91	0.21
2L	1.19	1.213	1.330	1.235	1.248	4.66	2.79	6.53	1.05
1T	0.35	0.375	0.388	0.375	0.374	6.39	0.37	3.85	0.29
2T	1.34	1.486	1.529	1.455	1.472	8.98	0.94	3.89	1.17
1R	0.42	0.442	0.494	0.455	0.453	7.31	2.34	9.00	0.42
2R	1.4	1.486	1.642	1.486	1.511	7.33	1.63	8.71	1.63

Tabla 5.25. Valor de la función de evaluación con metodologías paramétricas edificio PC

Componente	J (Gal <sup>2</sup> ) análisis señal completa			J (Gal <sup>2</sup> ) análisis por ventanas	
	N4SID	MMMC	MMAG	MMMC	MMAG
L	7934	7710	7892	6777	6941
T	8106	7601	8057	6712	6924
R	10714	10637	10543	9768	9754

En las figuras 5.13 a 5.16 se presenta la comparación entre las señales de aceleración medidas y las calculadas con la metodología de minimización modal con MC y AG. En las figuras A.20 a A.19 se grafica la diferencia cuadrática entre las señales medidas y las calculadas.

Las diferencias entre las señales calculadas con el AG son similares a las calculadas con MC, y con ambos métodos hay un buen ajuste con la señal medida, las mayores diferencias se presentan en la señal de torsión.

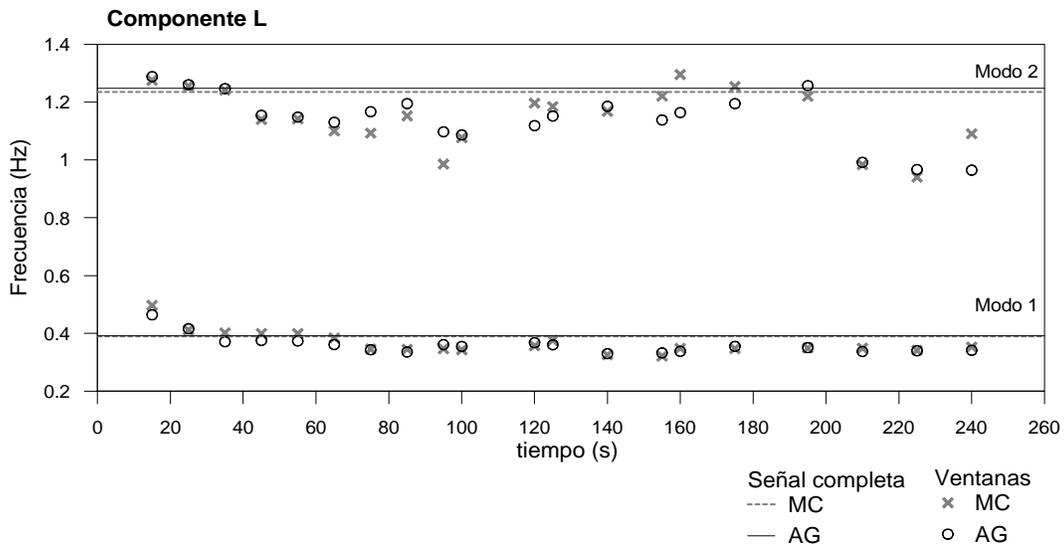


Figura 5.9. Frecuencias estimadas por ventanas componente L edificio PC

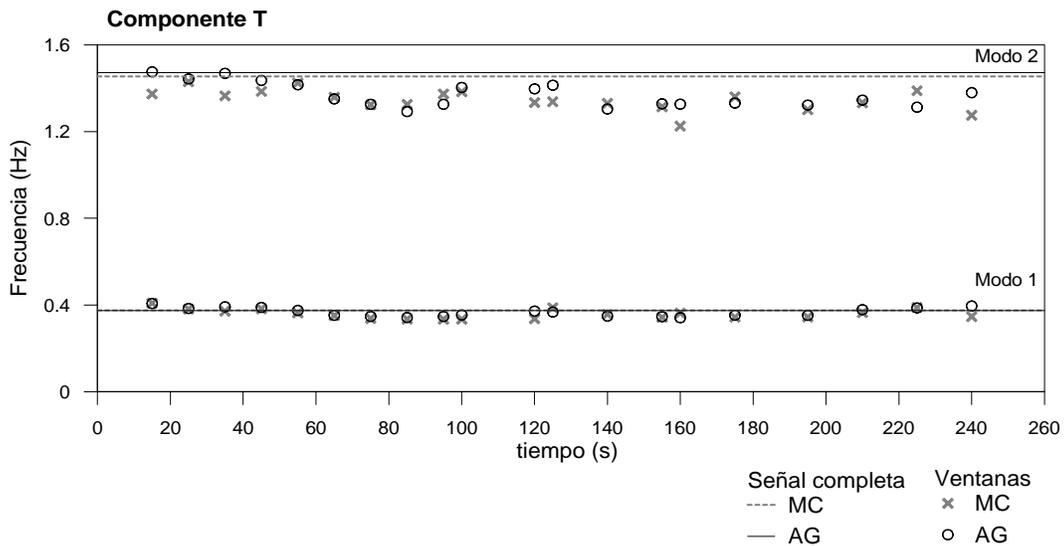


Figura 5.10. Frecuencias estimadas por ventanas componente T edificio PC

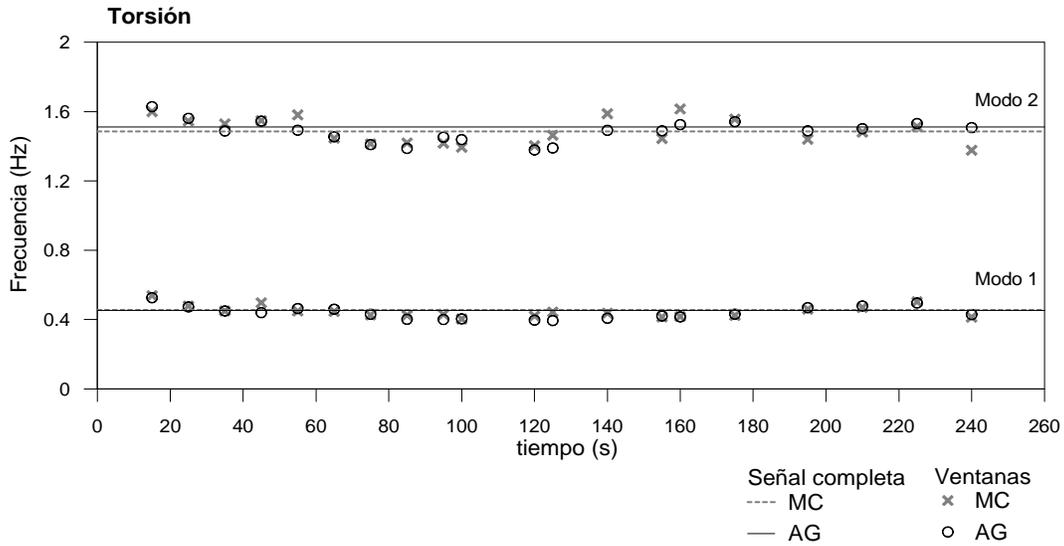


Figura 5.11. Frecuencias estimadas por ventanas componente de torsión edificio PC

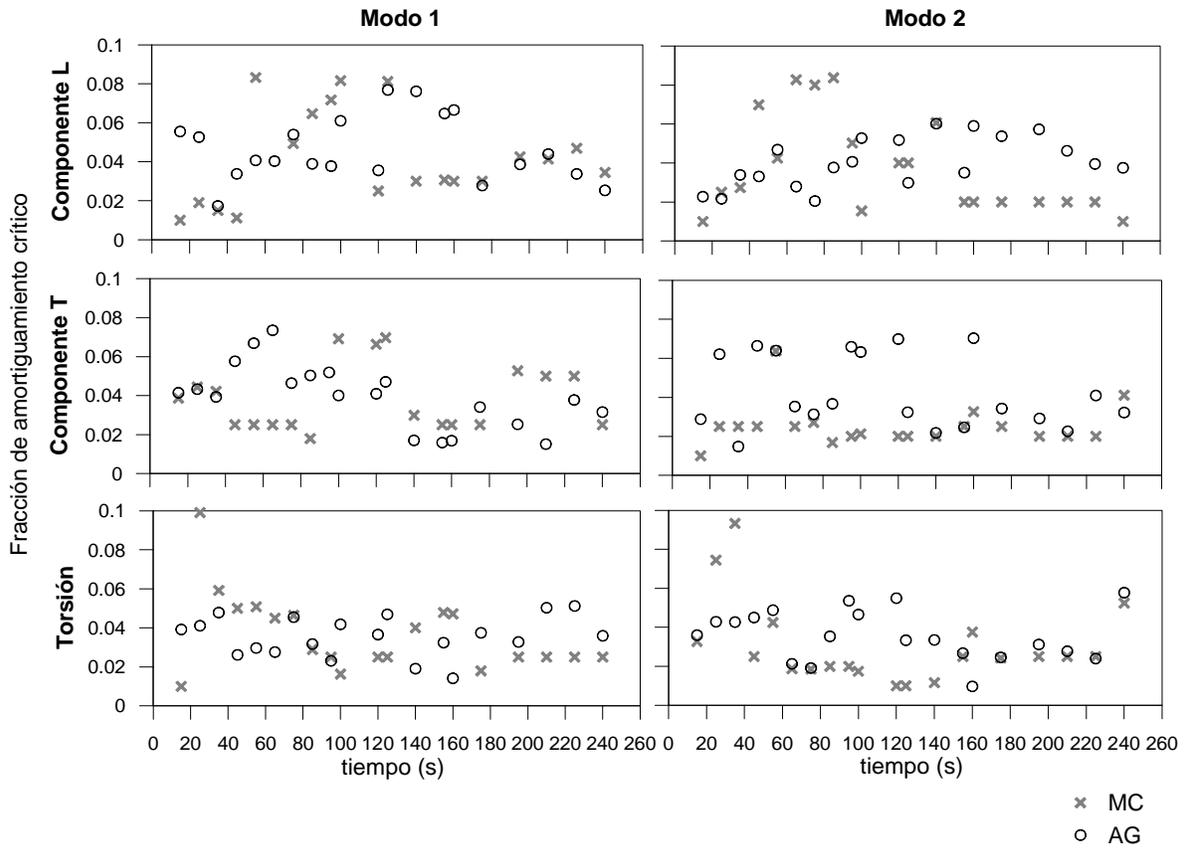


Figura 5.12. Estimación de amortiguamientos por ventanas edificio PC

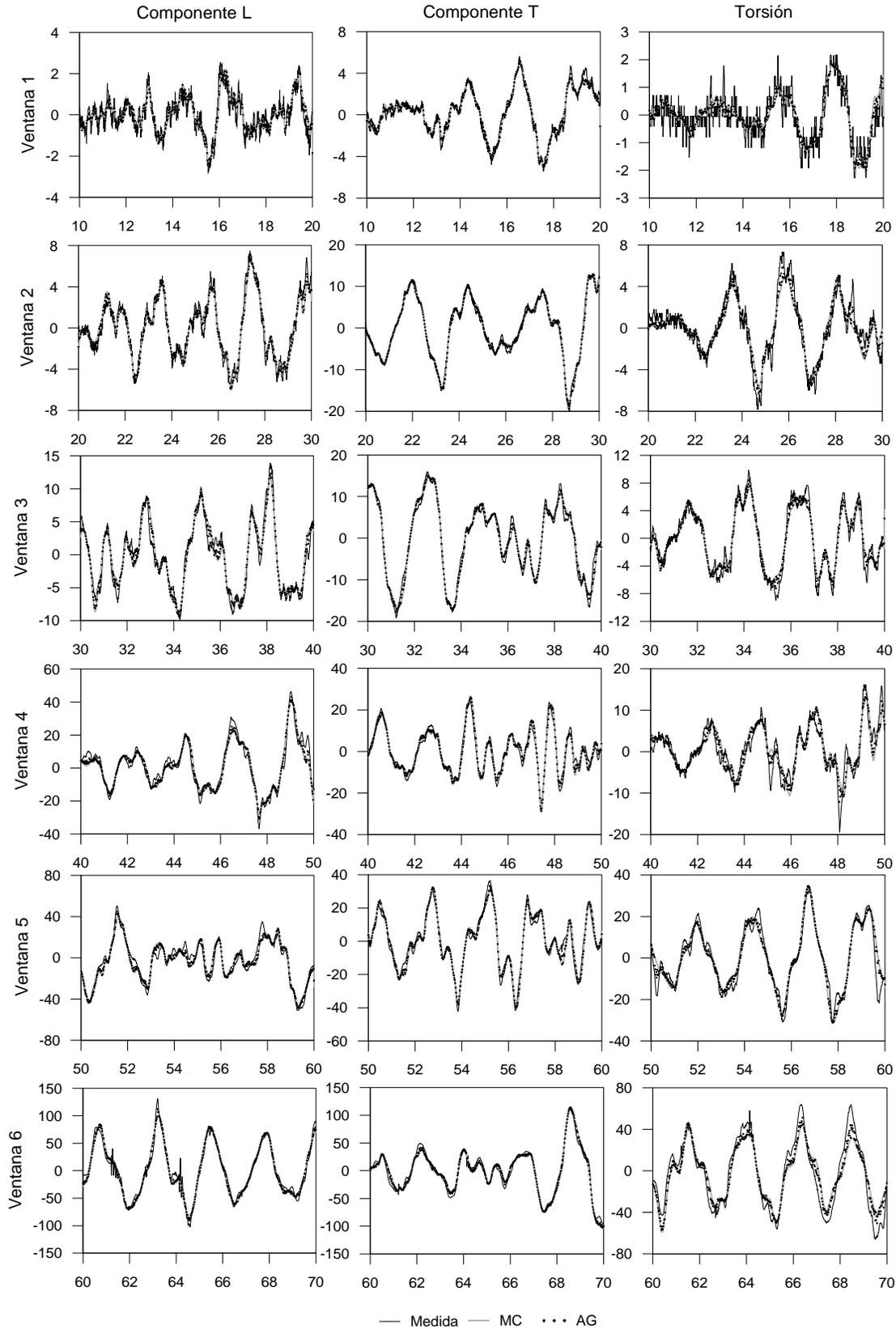


Figura 5.13. Comparación de señales medidas y calculadas ventanas 1 a 6 edificio PC

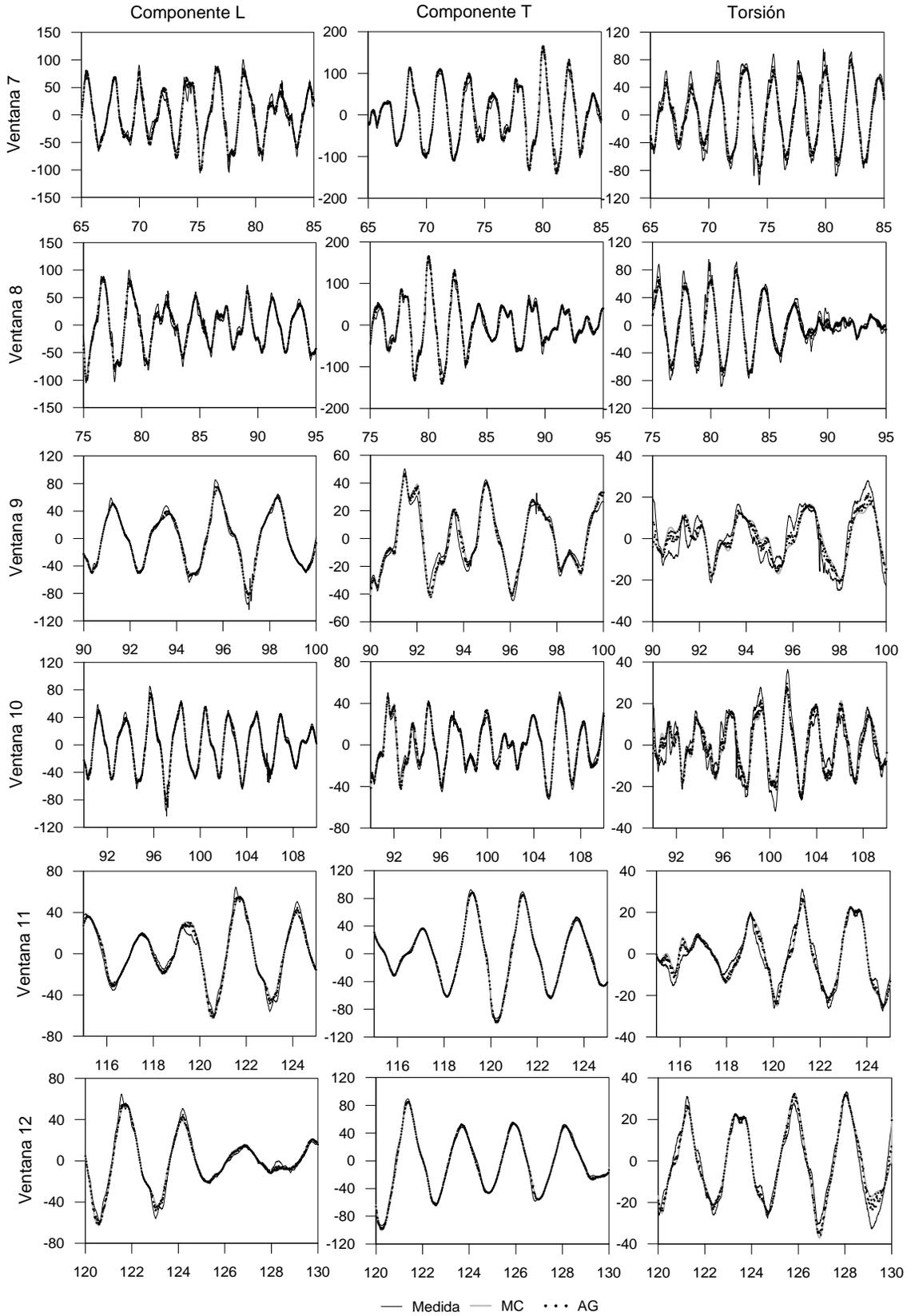


Figura 5.14. Comparación de señales medidas y calculadas ventanas 7 a 12 edificio PC

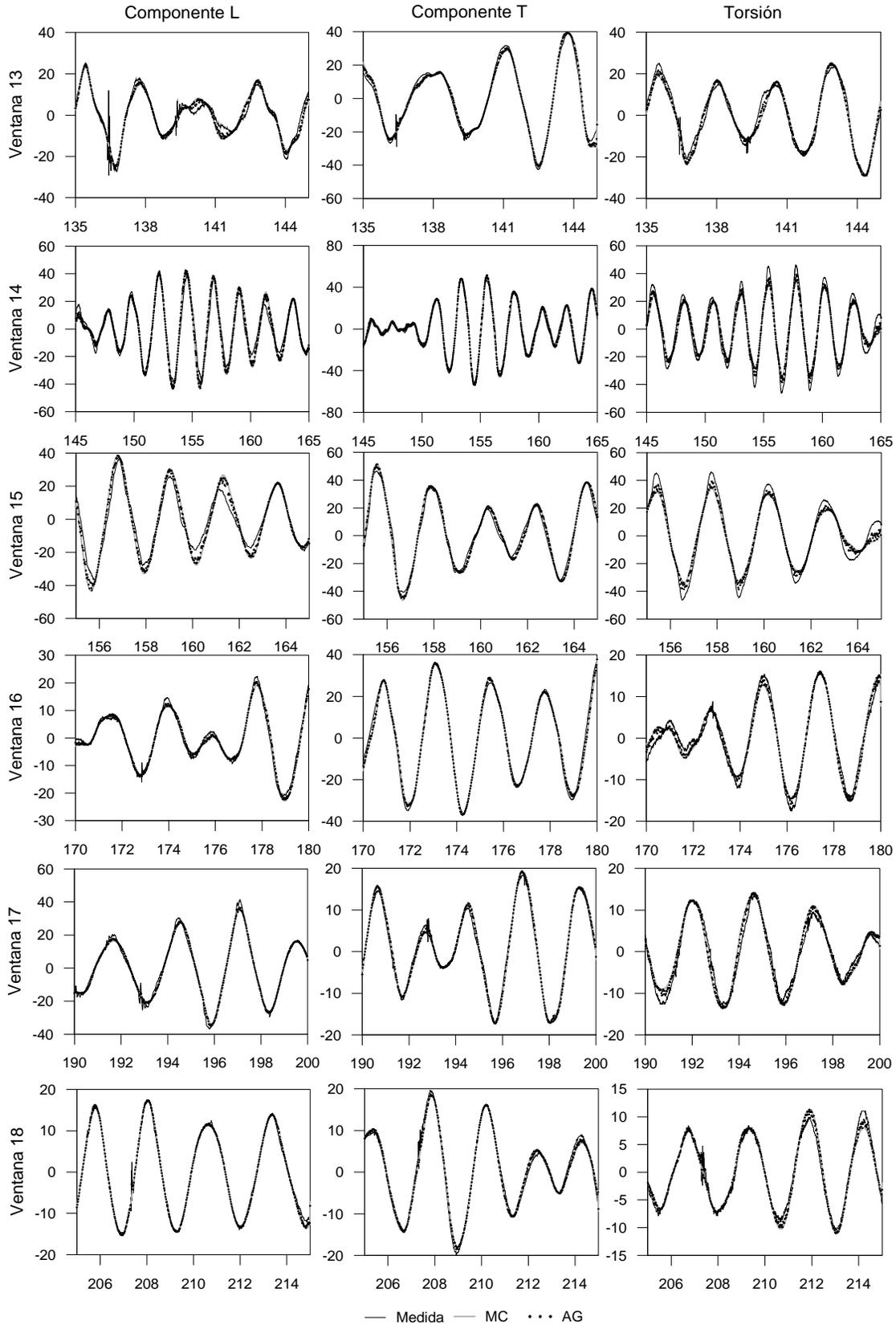


Figura 5.15. Comparación de señales medidas y calculadas ventanas 13 a 18 edificio PC

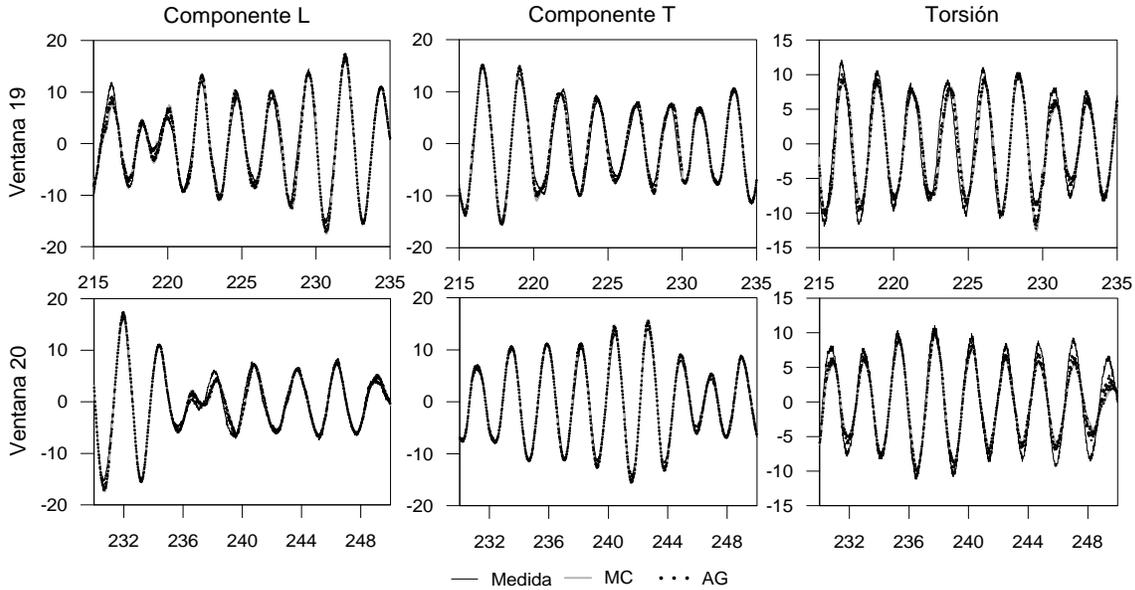


Figura 5.16. Comparación de señales medidas y calculadas, ventanas 19 y 20 edificio PC

### 5.3.3 Diferencias en la identificación entre edificios estudiados

En ambos edificios, se tuvo una buena identificación de los parámetros dinámicos. Para el edificio SIS, las diferencias entre las frecuencias estimadas con MMMC y MMAG fueron menores al 5% en el primero y segundo modo de cada componente. Para el edificio PC, en el primer modo las diferencias fueron menores al 10%, y para el segundo no excedieron el 15%.

Cabe destacar las diferencias en la identificación del edificio SIS y PC. Se debe recordar que el edificio PC es una estructura de los años 80 que presenta un elevado acoplamiento y ha sufrido daños moderados ante algunos sismos importantes, por otra parte el edificio SIS es una estructura del 2000, sin daño y con bajo acoplamiento. También hay que resaltar que la intensidad del evento analizado en el edificio PC fue mayor al del SIS, asimismo, dadas las características de los sismos y los edificios, la amplificación dinámica es mayor en el PC.

Estas particularidades se vieron reflejadas en el análisis, aparte de la comparación de parámetros estimados también hubo diferencias en la variación de frecuencias obtenida a partir del análisis por ventanas. En el edificio PC la variación con respecto al valor promedio fue de 2 a 15%, mientras que en el SIS fue de 0.5 a 10%.

El espacio de búsqueda, definido principalmente por el intervalo de valores de la población inicial para el MMAG y los valores iniciales para MMMC, fue más cerrado para el PC con respecto al SIS. Para obtener la frecuencia identificada con MMC, se tienen que dar valores iniciales entre 10 y 20% del valor estimado, mientras que con MMAG las diferencias entre los valores extremos de la población inicial y la frecuencia estimada son aproximadamente 30%.

Con MMMC se tuvieron que reprocesar muchas de las ventanas empleando diferentes valores iniciales de los parámetros, ya que estos no convergían a resultados consistentes con el análisis o presentaban errores muy altos. En cambio con MMAG, para el edificio SIS se empleó para todas las ventanas un mismo intervalo de la población inicial y no hubo necesidad de cambiarlo. En el edificio PC, dadas sus características se emplearon dos intervalos de población inicial, con los cuales se obtuvieron los resultados que se presentan.

## Capítulo 6. Conclusiones

En este trabajo se presentó una investigación sobre la automatización de la identificación de sistemas en edificios instrumentados. Se emplea la metodología de minimización modal, la cual ha mostrado buenos resultados para la estimación de parámetros dinámicos en estructuras, especialmente en casos complejos como modos acoplados y comportamiento no lineal.

A pesar de estas cualidades la metodología de identificación de sistemas escogida tiene algunas desventajas para su implementación en un procedimiento automático. Uno de ellos es la convergencia a mínimos locales, para lo cual es necesaria la intervención del criterio humano y el reprocesamiento de la información.

Para optimizar la metodología de minimización modal y adaptarla a un procedimiento automatizado se desarrolló e implementó un método de convergencia basado en algoritmos genéticos (AG), el cual permitió ampliar el espacio de búsqueda. La ventaja de la implementación de AG consiste en que se reducen las incertidumbres debidas a la elección de parámetros iniciales. Asimismo se pueden emplear criterios de convergencia que toman en cuenta otros parámetros del problema además de la diferencia de valores estimados en cada iteración. Por otra parte, la metodología propuesta tiene un gran potencial para adaptarse a un sistema automático para el monitoreo estructural.

Una contribución de esta investigación fue la elección de los parámetros óptimos del AG para su implementación como método de convergencia en la metodología de minimización modal. Se determinó que hay pocas diferencias entre emplear codificación por valor o binaria; sin embargo, la codificación por valor es más robusta. Se comprobó que con los valores y operadores sugeridos en la literatura se obtienen buenos resultados. Las posibles mejoras al emplear diferentes parámetros fueron poco significativas. También se evaluaron diferentes procedimientos de minimización, de los cuales, la minimización por modos con estimación independiente de formas modales presentó los mejores resultados.

Una parte importante de la nueva metodología con AG, en especial para la automatización, fue la elección de los criterios de detención y la determinación de los umbrales de estos. Los criterios adoptados en este trabajo son comunes en la literatura, pero los umbrales de estos se determinaron con modelos analíticos para hacer más eficiente el algoritmo y adaptarse a las condiciones particulares de la identificación. Además de optimizar el procedimiento, los valores determinados de los umbrales fueron adecuados ya que se comprobó que los parámetros estimados convergen a los mismos resultados que solamente con un límite relativamente alto de iteraciones.

En general el AG es más tardado que emplear un método determinista, y en las pruebas presentadas esta diferencia es mucho más notoria ya que se realizan en un lenguaje de programación interpretativo y se comparan con resultados de un programa compilado. No obstante la decisión de emplear el AG está fundamentada en las ventajas que este presenta en procedimiento de automatización del análisis.

Los resultados de la metodología de minimización modal con AG con respecto al planteamiento original con mínimos cuadrados, fueron muy similares. En la identificación de sistemas analíticos las diferencias fueron insignificantes y en los edificios reales se encuentran dentro de las incertidumbres inherentes. Igualmente se demostró que la metodología con AG es poco susceptible a niveles de ruido típicos en sistemas de captura y es posible identificar modos fuertemente acoplados. En la comparación con otras metodologías de identificación de propiedades dinámicas los resultados son congruentes.

La elección de la metodología de minimización modal y su adaptación con AG se validaron con modelos analíticos de diversas características (grados de libertad, acoplamiento de modos, ruido

en las mediciones), y se compararon los resultados de la estimación de parámetros dinámicos con otros métodos de identificación comunes en la literatura. En estas pruebas la metodología propuesta sobresalió por su robustez y precisión, los errores en la estimación de parámetros fueron los menores en modelos tridimensionales con varios grados de libertad, y en modelos sencillos sin ruido, los errores fueron ligeramente mayores que un metodología basada en espacio de estados.

La metodología propuesta para este trabajo es una de las pocas que toma en cuenta la identificación de modos acoplados y análisis en intervalos de tiempo. Aunque existen otras metodologías de identificación estructural que también emplean algoritmos evolutivos, la mayoría se centra en modelos planos y pruebas con sistemas analíticos.

Con respecto a la aplicación a dos edificios reales los resultados fueron satisfactorios, el valor de los parámetros estimados es consistente con la intensidad del movimiento y las características del evento sísmico. Además, hubo una buena correspondencia entre las señales de respuesta medidas y las calculadas. Cabe destacar el análisis del edificio PC que fue una prueba importante para la validación de la nueva metodología con algoritmos genéticos dadas las características de acoplamiento de esta estructura.

Cabe mencionar, que en el caso del análisis de sistemas reales por ventanas, la metodología de identificación con AG es más robusta, ya que a diferencia de mínimos cuadrados no se tuvieron que reprocesar muchas de las ventanas por resultados inconsistentes con el análisis o errores muy altos. Por otra parte el intervalo de valores iniciales con AG puede ser más amplio que con el planteamiento original y aun así converger a los mismos parámetros, correspondientes a una identificación adecuada.

Otro aspecto a resaltar de los modelos de sistemas reales es que con mínimos cuadrados en algunos casos el amortiguamiento converge a valores extremadamente atípicos para las características estructurales. Mientras que, para los pocos casos reales evaluados con el AG, siempre se obtuvieron valores adecuados de este parámetro.

En cuanto a la automatización del análisis de registros sísmicos en edificios instrumentados, se presenta un procedimiento empleando la metodología propuesta con AG, con la cual fue posible superar limitaciones del método de convergencia original de identificación de sistemas. Con este se puede hacer un análisis con el mínimo de procesos manuales y tomando en cuenta las posibles dificultades de la estimación. El procedimiento automatizado fue comprobado con la estimación de parámetros dinámicos de dos eventos sísmicos en dos edificios instrumentados.

El trabajo futuro de esta investigación corresponde a su implementación a un sistema de monitoreo de edificios instrumentados. El procedimiento automatizado con la metodología de minimización modal y AG propuesto es robusto, eficiente y ha presentado buenos resultados. No obstante, hay aspectos que todavía se pueden mejorar, como los tiempos de procesamiento. Por otra parte, los posibles alcances de la metodología de identificación son más amplios a los presentados en este trabajo, como la caracterización de los movimientos asociados a los efectos de interacción suelo-estructura o la identificación de parámetros dinámicos en otro tipo de estructuras.

## Referencias

Aldama B.D. (2009), "Proceso automatizado para determinar el estado estructural en edificios instrumentados", Tesis de Maestría, Posgrado UNAM.

Alimoradi A., Miranda E., Taghavi S. y Naeim F. (2006), "Evolutionary modal identification utilizing coupled shear-flexural response-implication for multistory buildings. Part I: Theory", *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, vol. 15, no. 1, pp. 56-61.

Alvin K. .F., Robertson A. .N., Reich G. .W. y Park K. .C. (2003), "Structural system identification: From reality to models", *Computers and Structures*, vol. 81, no. 12, pp. 1149-1176.

Au F.T. K., Cheng Y.S., Tham L.G. y Bai Z.Z. (2003), "Structural damage detection based on a micro-genetic algorithm using incomplete and noisy modal test data", *Journal of Sound and Vibration*, vol. 259, no. 5, pp. 1081-1094.

Beck J.L. (1978), "Determining models of structures from earthquake records", *Earthquake Engineering Research Laboratory*, no. Report EERL 78-01, June.

Beck J.L. y Jennings P.C. (1980), "Structural identification using linear models and earthquake records", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, vol. 8, no. 2, pp. 145-160.

Bekey G.A. (1970), "System identification an introduction and a survey", *Simulation*, Vol. 15, pp 151-166, vol. 15, pp. 151-166.

Bendat J.S. y Piersol A.G. (1989), "Random data. Analysis and measurement procedure", Wiley Interscience, New York.

Boroschek R.L. y Carreno R.P. (2011), "Period variations in a shear wall building due to earthquake Shaking", *Proceedings of the 5th International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure*, Cancún, México.

Caicedo J. M., Dyke S. J. y Johnson E. A. (2004), "Natural excitation technique and Eigensystem realization algorithm for phase I of the IASC-ASCE benchmark problem: Simulated data", *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 130, no. 1, pp. 49-60.

Camargo J. (2007), "Análisis de los registros sísmicos en un edificio alto cercano a la estación SCT", Tesis de Maestría, Posgrado UNAM.

Camargo J. y Murià-Vila D. (2009), "Análisis de metodologías de estimación de propiedades dinámicas en edificios instrumentados", *Memorias del XVII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, Puebla, México.

Cauberghe B. (2004), "Applied Frequency-Domain System Identification in the Field of Experimental and Operational Modal Analysis", Tesis de Doctorado, Universiteit Brussel, Faculteit Toegepaste Wetenschappen Vakgroep Werktuigkunde.

Celebi M. y Safak E. (1991), "Seismic response of Transamerica building. II: system identification", *Journal of structural engineering ASCE*, vol. 117, no. 8, p. 2405–2425.

Chambers L.D. (1999), "Practical handbook of genetic algorithms", CRC Press Inc., Boca Raton, FL.

Chang C.C. y Sun Z. (2005), "Structural damage localization using spatial wavelet packet signature", *Smart Structures and Systems*, vol. 1, no. 1, pp. 29-46.

- Chen J. y Xu Y. L. (2002), "Identification of modal damping ratios of structures with closely spaced modal frequencies", *Structural Engineering and Mechanics*, vol. 14, no. 4, pp. 417-434.
- Chopra A.K. (1995), "Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering", Prentice Hall, New Jersey.
- Chou J.H. y Ghaboussi J. (2001), "Genetic algorithm in structural damage detection", *Computers and Structures*, vol. 79, no. 14, pp. 1335-1353.
- Correa V.M. (2005), "Respuesta dinámica y efectos de interacción suelo-estructura en tres edificios instrumentados en México", Tesis de Maestría, Posgrado UNAM.
- Cruz C.A., Murià-Vila D. y Camargo J. (2007), "Implementación de un programa de estimación paramétrica modal con base en el programa MIMO", Instituto de Ingeniería, UNAM.
- Dennis J. E.J. y Schnabel R. B. (1983), "Numerical Methods for Unconstrained Optimization and Nonlinear Equations", Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- Deraemaekera A., Reynders E., De Roeck G. y Kullaac J. (2008), "Vibration-based structural health monitoring using output-only measurements under changing environment", *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 22, no. 1, pp. 34-56.
- Doebling S.W., Farrar C.R., Prime M.B. y Shevitz D.W. (1996), "Damage Identification and Health Monitoring of Structural and Mechanical Systems from Changes in Their Vibration Characteristics: A Literature Review", Los Alamos National Laboratory, no. LA-13070-MS.
- Durrani A.J., Mau S.T., Abou Hashish A.A. y Li Y. (1994), "Earthquake response of flat-slab buildings", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, vol. 120, no. 3, pp. 947-964.
- Forsythe G. .E. (1956), "Generation and use of orthogonal polynomials for data-fitting with a digital computer", *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*, vol. 5, no. 2, pp. 74-88.
- Franco G. (2003), "Application of evolutionary strategies of structural system identification and damage detection", Tesis de Doctorado, Columbia University, New York.
- Franco G., Betti R. y Lus H. (2004), "Identification of structural systems using an evolutionary strategy", *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, vol. 130, no. 10, p. 1125–1139.
- Garcia S.R., Romo M.P., Correa F.J. y Ortega M. (2006), "Hilbert-Huang spectral analysis of seismic ground response", *Proceedings of the 14 International conference in earthquake engineering*, Taipei Taiwan, octubre.
- Gen M. y Chen R. (2000), "Genetic algorithms and engineering optimization", Wiley-Interscience, New York.
- Goldberg D.E. (1989), "Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning", Addison-Wesley, Massachusetts.
- González R. (1995), "Análisis y predicción de comportamiento dinámico de estructuras usando identificación de sistemas y linealización equivalente", Tesis de Doctorado, División de estudios de Posgrado Facultad de Ingeniería UNAM.
- Holland J. (1975), "Adaptation in Natural and Artificial Systems", University of Michigan Press.
- Huang T.L., Ren W.X. y Lou M.L. (2008), "The Orthogonal Hilbert-Huang Transform and its Application in Earthquake Motion Recordings Analysis", *Proceedings of the 14 World Conference on Earthquake Engineering*, Beijing China, octubre.

Huang N.E. y Shen S.P. (2005), "Hilbert-Huang transform and its applications", World Scientific, New Jersey.

Huang N.E., Shen Z., Long S.R., Wu M.C., Shih H.H., Zheng Q., Yen N.h., Tung C.C. y Liu H.H. (1998), "The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis", *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 454.

Huerta C.H. (2007), "Método de estimación de parámetros modales de una estructura", Tesis de Maestría, Posgrado UNAM.

Iwan W.D. (2002), "R-SHAPE: A Real-Time Structural Health and Performance Evaluation System", *Proceedings of the US-Europe workshop on sensors and smart structures technologies*, Como and Somma Lombardo, Italy, April.

Jacobsen N. J., Andersen P. y Brincker R. (2008), "Applications of Frequency Domain Curve-fitting in the EFDD Technique", *Proceedings of the 26th International Modal Analysis Conference*, Orlando, Florida.

Jennings P.C., Housner G.W., Hudson D.E., Trifunac M.D., Frazier G.A., Wood J.H., Scott R.F. y Iwan W. (1971), "San Fernando Earthquake of February 9 1971", Technical report, EERL California Institute of technology, no. 71-02, Pasadena.

Johnson E.A., Lam H.F., Katafygiotis L.S. y Beck J.L. (2004), "Phase I IASC-ASCE Structural Health Monitoring Benchmark Problem Using Simulated Data", *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 130, no. 1, pp. 3-15.

Kijewski-Correa T. y Cycon J. (2007), "System Identification Of Constructed Buildings: Current State-Of-The-Art And Future Directions", *Proceedings of the 3rd International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure*, Vancouver, British Columbia, Canada.

Koh C.G., Chen Y.F. y Liaw C.Y. (2003), "A hybrid computational strategy for identification of structural parameters", *Computers and Structures*, vol. 81, no. 2, pp. 107-117.

Kohler M.D., Davis P.M. y Safak E. (2005), "Earthquake and Ambient Vibration Monitoring of the Steel-Frame UCLA Factor Building", *Earthquake Spectra*, vol. 21, no. 3, pp. 715-736.

Li Y. y Mau S.T. (1990), "A computer program for multiple input - multiple output system identification using building seismic records", Research Report UHCEE 90-07, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Houston.

Li Y. y Mau S.T. (1991), "A case study MIMO system identification applied to building seismic records", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, vol. 20, no. 11, pp. 1045-1064.

Li Y. y Mau S.T. (1997), "Learning from recorded earthquake motion of buildings", *Journal of Structural Engineering, ASCE*, vol. 123, no. 1, pp. 62-69.

Li J. y Zhang Y. (2006), "Prediction error method-based second-order structural identification algorithm in stochastic state space formulation", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, vol. 35, no. 6, pp. 761-779.

Ljung L. (1987), "System Identification - Theory for the User", Prentice-Hall , Englewood Cliffs, New Jersey.

Mallat S. .G. (1989), "Theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 11, no. 7, pp. 674-693.

- Marano G.C., Quaranta G. y Monti G. (2011), "Modified Genetic Algorithm for the Dynamic Identification of Structural Systems Using Incomplete Measurements", *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, vol. 26, no. 2, p. 92–110.
- Marquardt D. (1963), "An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters", *SIAM Journal on Applied Mathematics*, vol. 11, pp. 431-441.
- Matouš K., Lepš M., Zeman J. y Šejnoha M. (2000), "Applying genetic algorithms to selected topics commonly encountered in engineering practice", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 190, no. 13-14, pp. 1629-1650.
- McVerry G.H. (1980), "Structural identification in the frequency domain from earthquake records", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, vol. 8, no. 2, p. 161–180.
- Meli R., Faccioli E., Murià-Vila D., Quaas R. y Paolucci R. (1998), "Study of site effects and seismic response of an instrumented building in Mexico City", *Journal of Earthquake Engineering*, vol. 2, no. 1, pp. 89-111.
- Mendoza L., Reyes A. y Luco J.E. (1991), "Ambient vibration tests of the Mexicali General Hospital", *Earthquake Spectra*, vol. 7, no. 2, pp. 281-300.
- Meruane V. y Heylen W. (2010), "Damage detection with parallel genetic algorithms and operational modes", *Structural Health Monitoring*, vol. 9, no. 6, pp. 481-496.
- Miranda E. y Taghavi S. (2005), "Approximate floor acceleration demands in multistory buildings I: Formulation", *Journal of Structural Engineering*, vol. 131, no. 2, pp. 203-211.
- Mitchell M. (1996), "An introduction to genetic algorithms", MIT Press, Massachusetts.
- Murià-Vila D. (2007), "Experiencia mexicana sobre la respuesta sísmica de edificios instrumentados", Coloquio de ingreso a la Academia Mexicana de ingeniería.
- Murià-Vila D., Aldama B.D. y Loera S. (2010), "Structural warning for instrumented buildings", *Proceedings of the 14th European Conference on Earthquake Engineering*, Ohrid, Macedonia, September.
- Murià-Vila D., Camargo J., Aldama B.D. y Domínguez A. (2007), "Análisis de la respuesta del edificio PC ante el sismo del 13 de abril del 2007", *Series del Instituto de Ingeniería*, Instituto de Ingeniería, UNAM, no. 7546.
- Murià-Vila D. y González R. (1995), "Propiedades dinámicas de edificios de la ciudad de México", *Revista Ingeniería Sísmica*, vol. 51, pp. 25-45.
- Murià-Vila D., Macias M.A., Rodríguez G. y Soto U. (2000), "Análisis de los registros sísmicos obtenidos en el edificio PC de 1990 a 1999", *Instituto de Ingeniería*, UNAM, no. 0520, octubre.
- Murià-Vila D. y Rodríguez G. (2002), "Análisis de los registros sísmicos obtenidos de 1993 a 98 en el edificio JAL", *Series del Instituto de Ingeniería*, Instituto de Ingeniería, UNAM, no. 541.
- Murià-Vila D., Rodríguez G., Zapata A. y Toro A. M. (2001), "Seismic response of a twice-retrofitted building", *ISET Journal of Earthquake Technology*, India, vol. 38, no. 2-4, pp. 67-92.
- Murià-Vila D., Taborda R. y Zapata A. (2004), "Soil structure interaction effects in two instrumented tall buildings", *Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, B.C., Canada, August.
- Newland D.E. (1989), "Mechanical vibration analysis and computation", 1a. ed, Longman scientific and technical, New York.

- Nigam N.C. y Jennings P.C. (1969), "Calculation of response spectra from strong-motion earthquake records", *Bulletin of Seismological Society of America*, vol. 59, no. 2, pp. 909-922.
- Palacios C. (2003), "Estimación de los parámetros dinámicos del edificio PC", Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería, UNAM.
- Peeters B. y De Roeck G. (1999), "Reference-based stochastic subspace identification for output-only modal analysis", *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 13, no. 6, pp. 855-878.
- Perry M. J., Koh C. G. y Choo Y. S. (2006), "Modified genetic algorithm strategy for structural identification", *Computers and Structures*, vol. 84, no. 8, pp. 529-540.
- Raich A. M. y Liskai T. R. (2007), "Improving the performance of structural damage detection methods using advanced genetic algorithms", *Journal of Structural Engineering*, vol. 133, no. 3, pp. 449-461.
- Richardson M. .H. y Formenti D. .L. (1982), "Parameter estimation from frequency response measurements using rational fraction polynomials", *Proceedings of the 1st International Modal Analysis Conference*, Orlando, FL, noviembre.
- Rodríguez N. y Quaas R. (1990), "Respuesta estructural de un edificio instrumentado en la ciudad de México durante sismos recientes", *Memorias del Seminario Internacional sobre Instrumentación Sísmica y uso de Elementos Disipadores de Energía en el Comportamiento Estructural*, México, DF.
- Safe M., Carballido J., Ponzoni I. y Brignole N. (2004), "On Stopping Criteria for Genetic Algorithms", *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 3171, pp. 405-413.
- Satake N., Suda K., Arakawa T., Sasaki A. y Tamura Y. (2003), "Damping evaluation using full-scale data of buildings in Japan", *Journal of Structural Engineering*, vol. 129, no. 4, pp. 470-477.
- Shinozuka M., Yun C. y Imai H. (1982), "Identification of linear structural dynamic systems", *Journal of Engineering Mechanics ASCE*, vol. 108, no. 6, p. 1371-1390.
- Skolnik D., Lei Y., Yu E. y Wallace J. (2006), "Identification, Model Updating, and Response Prediction of an Instrumented 15-Story Steel-Frame Building", *Earthquake Spectra*, vol. 22, no. 3, pp. 781-802.
- Smith S.W. (1997), ""The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing"", California Technical Publishing, San Diego, CA.
- Soderstrom T. y Stoica P. (1989), "System identification ", Prentice Hall, New York.
- Stearns S.D. y Hustt D.R. (1990), "Digital signal analysis", Prentice Hall, Englewood Cliffs.
- Structural Vibration Solutions (2008), "ARTEMIS Extractor, Release 4.1", Denmark.
- Su S. y Kijewski-Correa T. (2007), "On the use of a bivariate regressive adaptive index for structural health monitoring", *Proceedings of the 3rd International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure*, Vancouver, British Columbia, Canada.
- Suzuki Y., Koshika N., Yamada A., Orui S. y Shimizu K. (2008), "Real-time Building Damage Estimation System based on Observed Building Response", *Proceedings of the 14 World Conference on Earthquake Engineering*, Beijing, China.
- Taborda R. (2003), "Respuesta dinámica y efectos de interacción suelo-estructura de un edificio instrumentado en Acapulco", Tesis de Maestría, Posgrado UNAM.

- Tanaka T., Yoshizawa S., Y O. y Morishita T. (1969), "Period and damping of vibration in actual buildings during earthquakes", Bulletin of Earthquake Research Institute, University of Tokyo, vol. 47, no. 6, pp. 1073-1092.
- Thomson W.T. (1998), "Theory of vibration with applications", Prentice Hall , New Jersey.
- Toro A.M. (1997), "Estimación de parámetros estructurales de un edificio instrumentado aplicando una técnica de identificación paramétrica modal", Tesis de Maestría, División de estudios de Posgrado Facultad de Ingeniería UNAM.
- Trifunac M.D. y Udwadia F. (1972), "Studies of Strong Earthquake Motions and Microtremor Processes", Proceedings of the International Conference of Microzonation, Seattle, Washington.
- Van Overschee P. y De Moor B. (1994), "N4SID: Subspace algorithms for the identification of combined deterministic-stochastic systems", Automatica, vol. 30, no. 1, pp. 75-93.
- Ventura C.E., Lord J.F. y Simpson R.D. (2002), "Effective Use of Ambient Vibration Measurements for Modal Updating of a 48 Storey Building In Vancouver", Proceedings of the 3rd International Conference on Structural Dynamics Modeling - Test, Analysis, Correlation and Validation, Madeira Island, Portugal, June.
- Verboven P., Guillaume P., Cauberghe B., Vanlanduit S. y Parloo E. (2005), "A comparison of frequency-domain transfer function model estimator formulations for structural dynamics", Journal of Sound and Vibration, vol. 279 , no. 3, pp. 775-798.
- Wang G.S. (2009), "Application of hybrid genetic algorithm to system identification", Structural Control and Health Monitoring, vol. 16, no. 2, pp. 125-153.
- Worden K. y Tomlinson G.R. (2001), "Nonlinearity in structural dynamics: detection, identification and modeling", Institute of Physics Publishing, Bristol Philadelphia.
- Yang J.N. y Lei Y. (2000), "System identification of linear structures using Hilbert transform and empirical mode decomposition", Proceedings of the 18th International Modal Analysis Conference on Structural Dynamics, San Antonio, TX.
- Yang J.N., Lin S. y Pan S. (2002), "Damage identification for structures using Hilbert-Huang spectral analysis", Proceedings of the US-Europe workshop on sensors and Smart structures technologies, Como and Somma Lombardo, Italy, abril.
- Yuen K. V., Au S. K. y Beck J. L. (2004), "Two-stage structural health monitoring approach for phase I benchmark studies", Journal of Engineering Mechanics, vol. 130, no. 1, pp. 16-33.
- Zapata A. (2001), "Estudio de la respuesta dinámica de un edificio instrumentado", Tesis de Maestría, Posgrado UNAM.

## Agradecimientos

Este trabajo fue realizado en la coordinación de Estructuras y Materiales del Instituto de Ingeniería, UNAM; bajo la dirección del Dr David Murià Vila, a quien deseo agradecer por el tiempo y la disposición dedicados a este trabajo. También por su apoyo, paciencia, guía y todo lo que pude aprender de él a nivel profesional y personal.

Se agradece la asesoría del Dr Luis Agustín Álvarez Icaza Longoria durante el desarrollo del algoritmo genético, así como sus observaciones en las diferentes pruebas para su implementación. Al igual que a los demás miembros del comité tutorial: Dr José Alberto Escobar Sánchez, Dr Jaime García Pérez y Dr Roberto Meli Piralla, por los valiosos comentarios y sugerencias que permitieron lograr un trabajo con la calidad académica deseada.

La realización de este trabajo no hubiera sido posible sin la cooperación y el apoyo de los propietarios de los edificios estudiados, que proporcionaron todas las facilidades para la instrumentación. De igual forma desempeñó un papel indispensable la Coordinación de Instrumentación Sísmica del Instituto de Ingeniería, UNAM.

Expreso mi gratitud por el apoyo económico del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología durante los estudios. Y el apoyo de mi tutor a través del programa de becas del Instituto de Ingeniería durante la fase final de este trabajo.

Especial mención merecen aquellos profesores que a lo largo de mi carrera me han inspirado para ser un mejor ingeniero: Ing. Erik Castañeda de Isla Puga, M.I. Gerardo Rodríguez Gutiérrez, Ing. José Manuel Covarrubias Solís, M.I. Jorge Ávila Rodríguez, Dr David Murià Vila, Dr Mario Ordaz Schroeder y Dr Luis Agustín Álvarez Icaza Longoria.

Agradezco a mi familia que siempre me apoyó en todos los momentos. Mi padre Jesús Camargo López, mi madre Agustina del Carmen Pérez Gutiérrez, mis hermanas Gloria y Sara, mis tías Alma y Rosalinda Pérez Gutiérrez. Igualmente a Juan Antonio Ruiz Ortiz.

Doy gracias a mis amigos y colegas M.I. Baruo Daniel Aldama Sánchez, M.I. Carlos Humberto Huerta Carpizo, así como a mis compañeros los ingenieros: Irepani Adolfo López Cirigo, Raúl Eduardo Carrillo Cruz, Mariane Planchais, Raúl Bazán García, Marco Antonio Mendoza Salas, Daniel Morales Cruz, Julián Andrés Suárez Arango, Yoatzin López Casillas, Omar André Ochoa Valdés y Alberto Mauricio Vásquez Galán. Con quienes he compartido grandes experiencias tanto académicas como personales.

Finalmente agradezco a todas las personas que distraídamente no he mencionado y de alguna forma colaboraron en la realización este trabajo, y a aquellos investigadores que indirectamente contribuyeron gracias a sus excelentes trabajos.

## Apéndice A. Gráficas de diferencia cuadrática

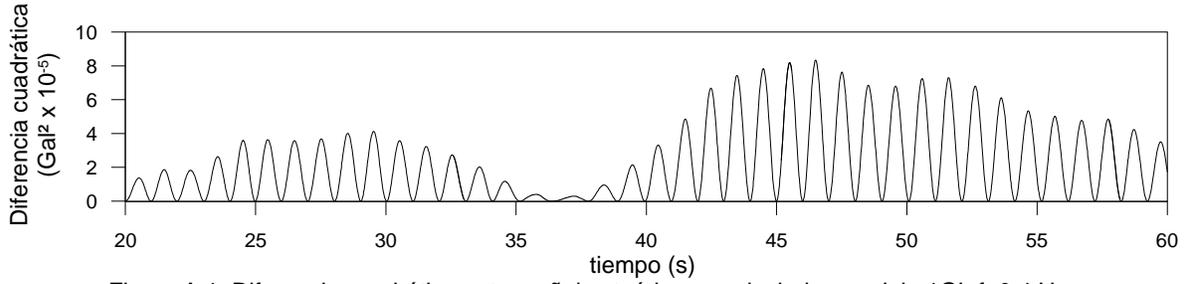


Figura A.1. Diferencia cuadrática entre señales teóricas y calculadas modelo 1GL  $f=0.4$  Hz

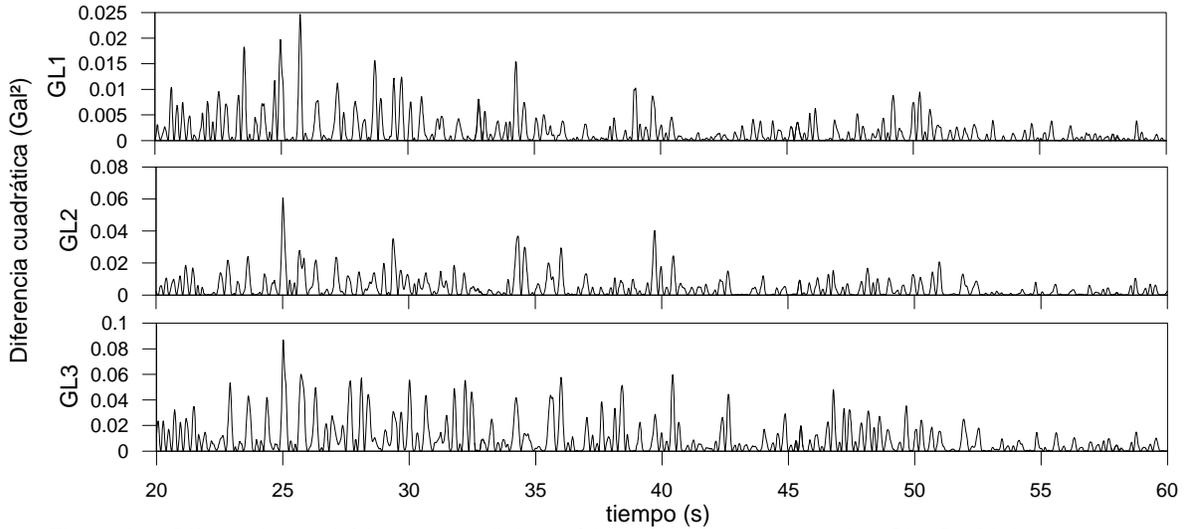


Figura A.2. Diferencia cuadrática entre señales teóricas y calculadas, modelo 3GL-3R-3M, intervalo 1, procedimiento MinT

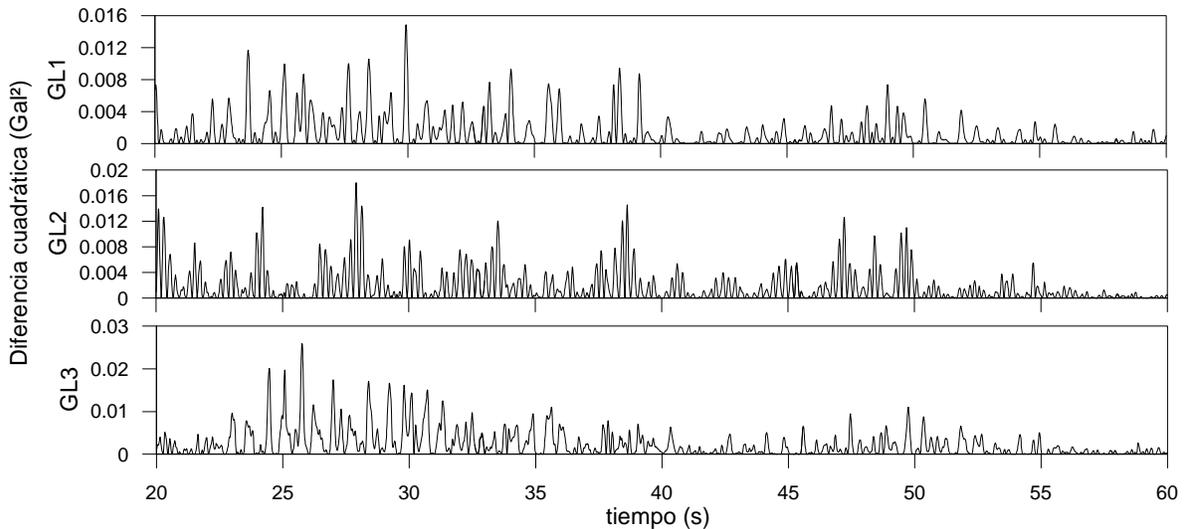


Figura A.3. Diferencia cuadrática entre señales teóricas y calculadas, modelo 3GL-3R-3M, intervalo 2, procedimiento MinT

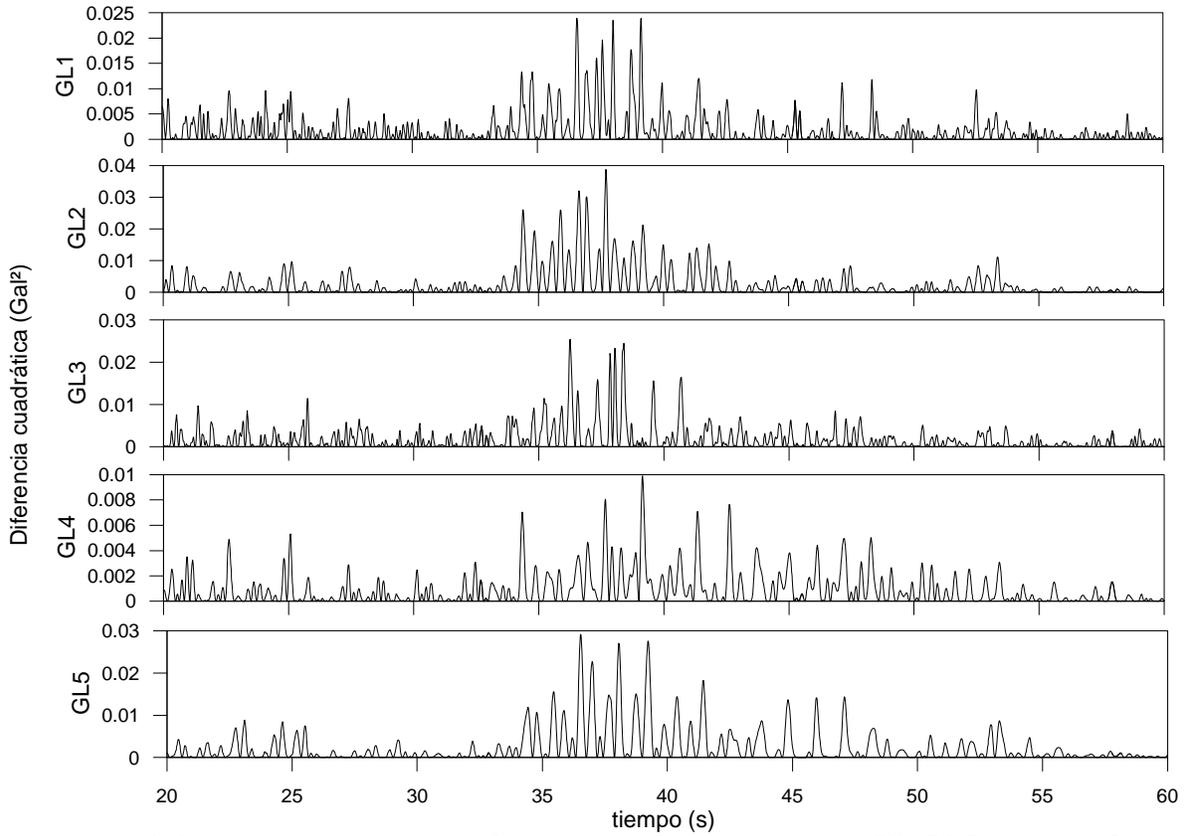


Figura A.4. Diferencia cuadrática entre señales teóricas y calculadas, modelo 5GL-5R-5M, intervalo 2, procedimiento MinT

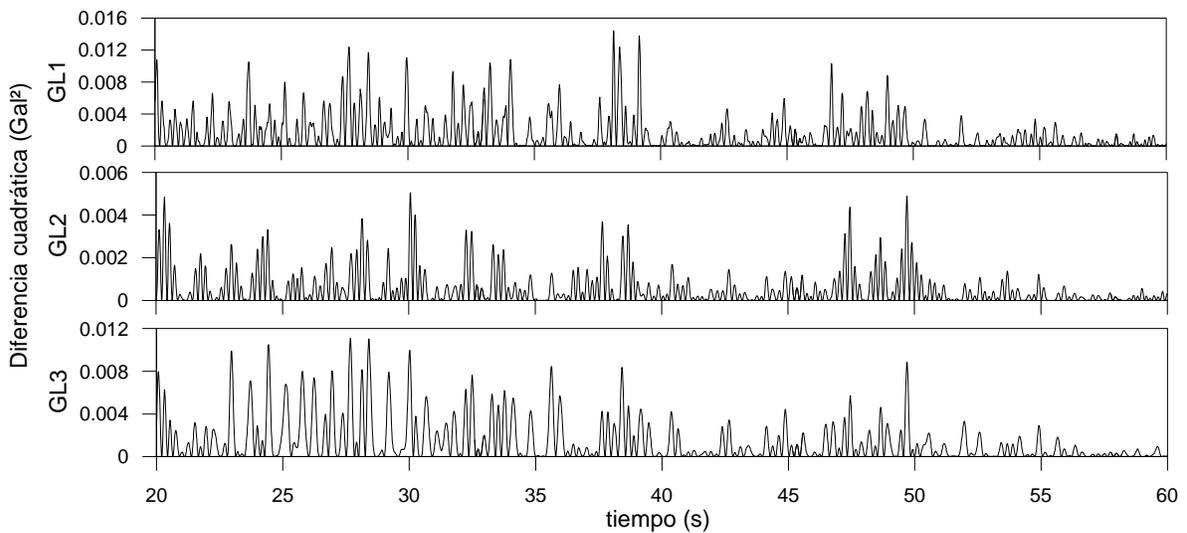


Figura A.5. Diferencia cuadrática entre señales teóricas y calculadas, modelo 3GL-3R-1M, intervalo 2, procedimiento MinT

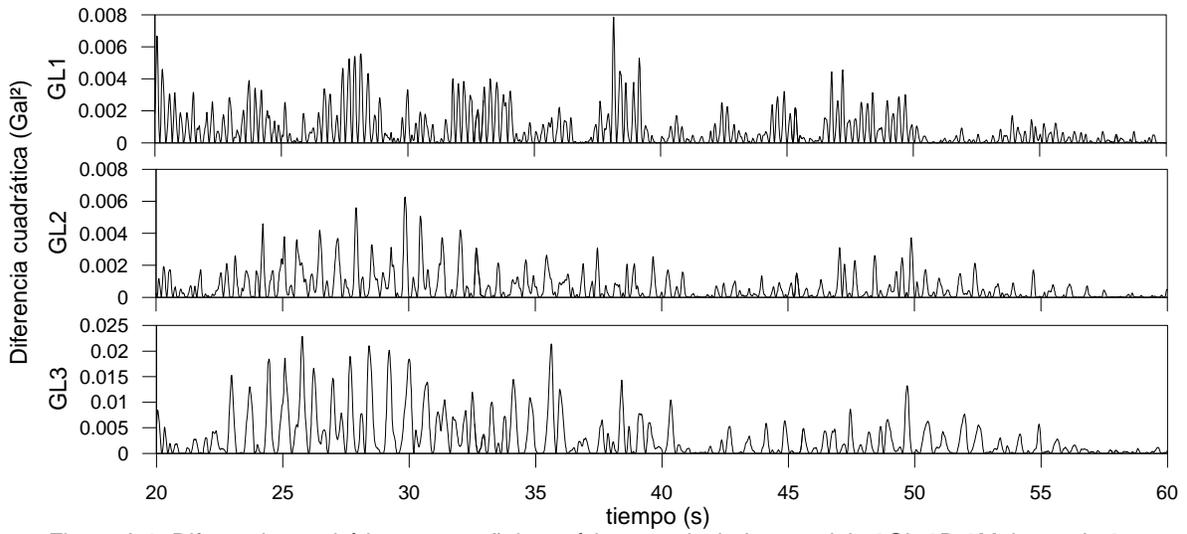


Figura A.6. Diferencia cuadrática entre señales teóricas y calculadas, modelo 3GL-3R-3M, intervalo 2, procedimiento MinM

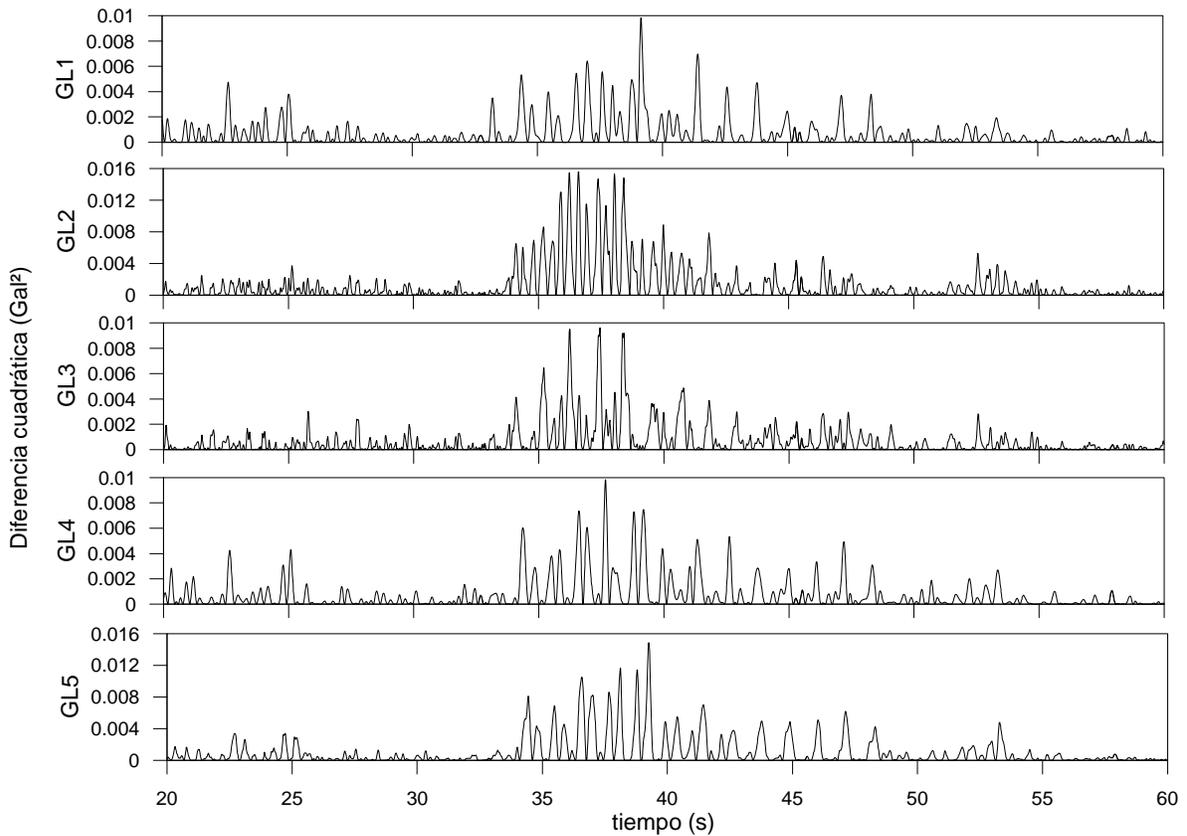


Figura A.7. Diferencia cuadrática entre señales teóricas y calculadas, modelo 5GL-5R-5M, intervalo 2, procedimiento MinM

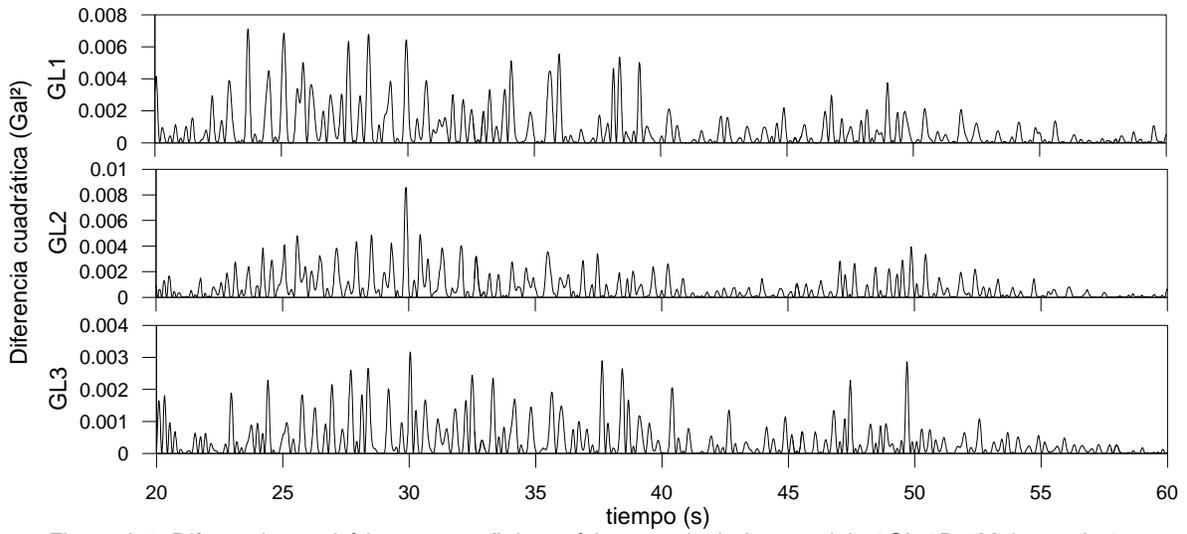


Figura A.8. Diferencia cuadrática entre señales teóricas y calculadas, modelo 3GL-3R-3M, intervalo 2, procedimiento MinM, RSR>10 dB

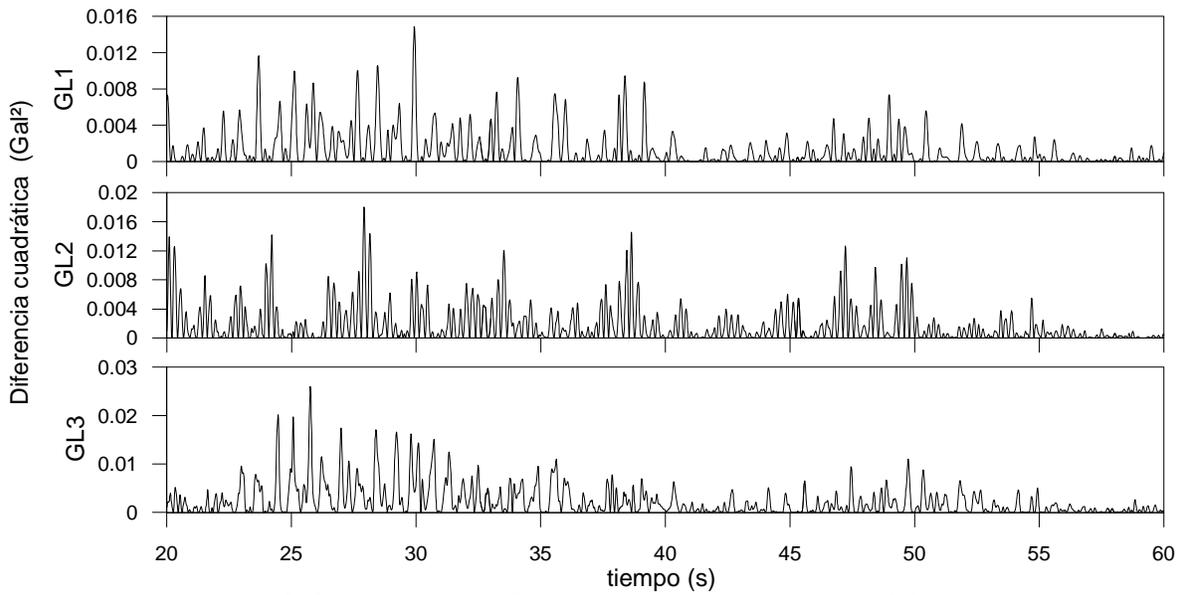


Figura A.9. Diferencia entre señales teóricas y calculadas modelo 3GL MinT

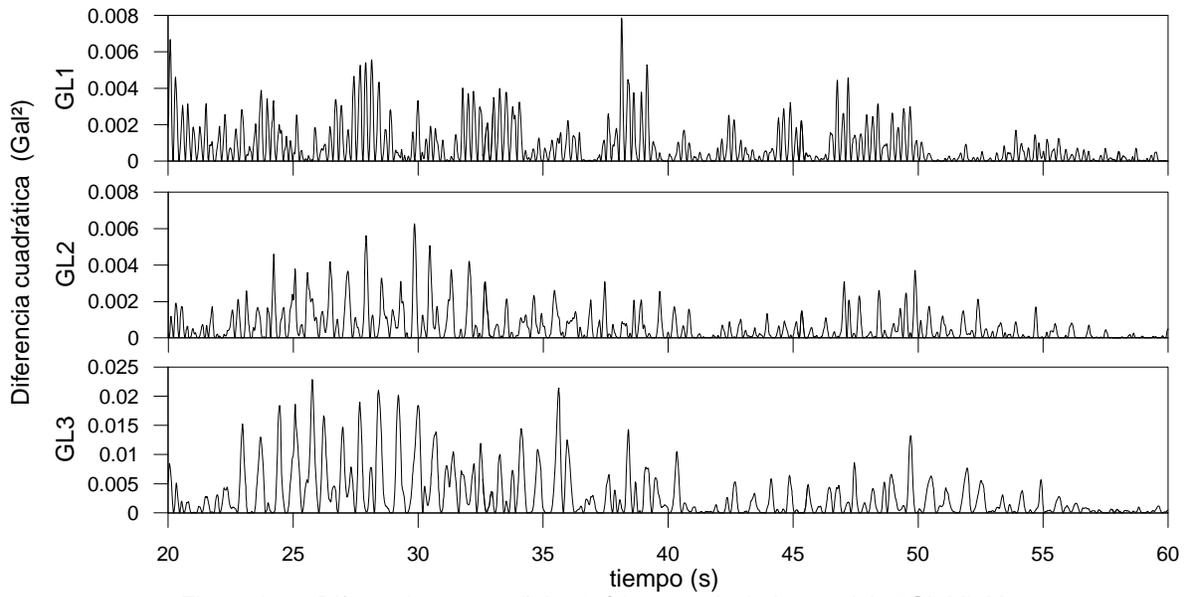


Figura A.10. Diferencia entre señales teóricas y calculadas modelo 3GL MinM

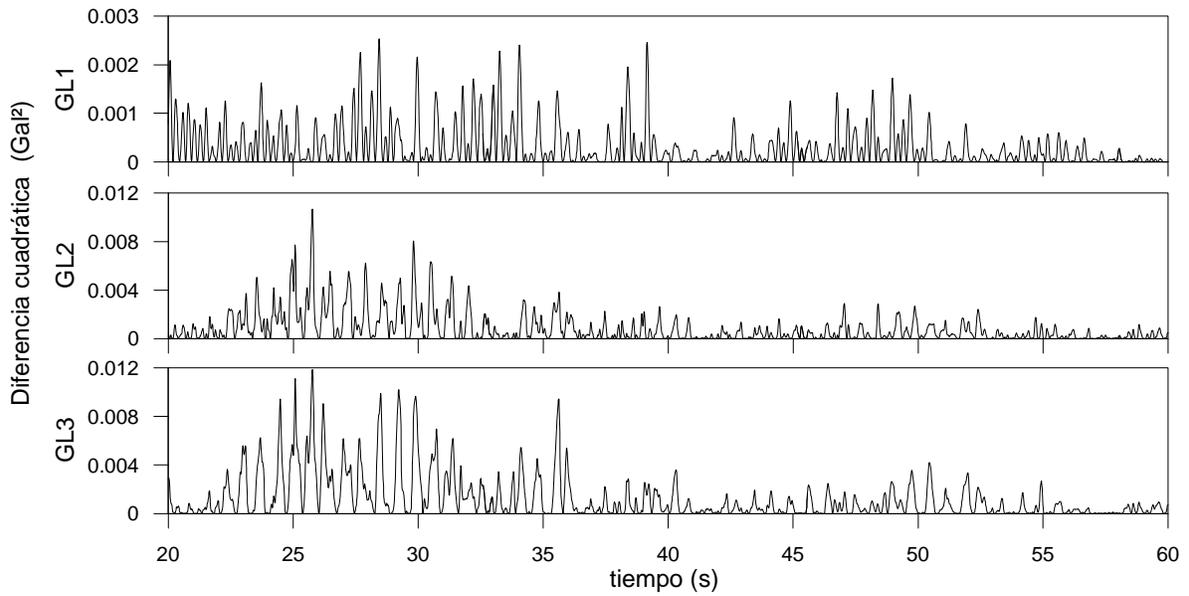


Figura A.11. Diferencia entre señales teóricas y calculadas modelo 3GL MinP

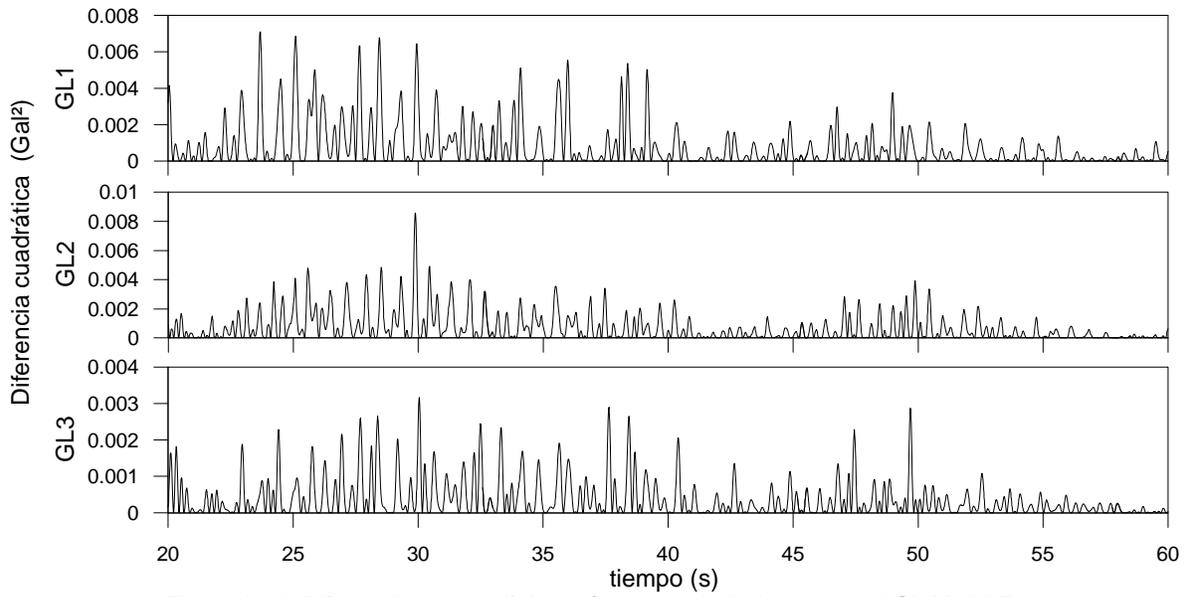


Figura A.12. Diferencia entre señales teóricas y calculadas modelo 3GL MinM-EI

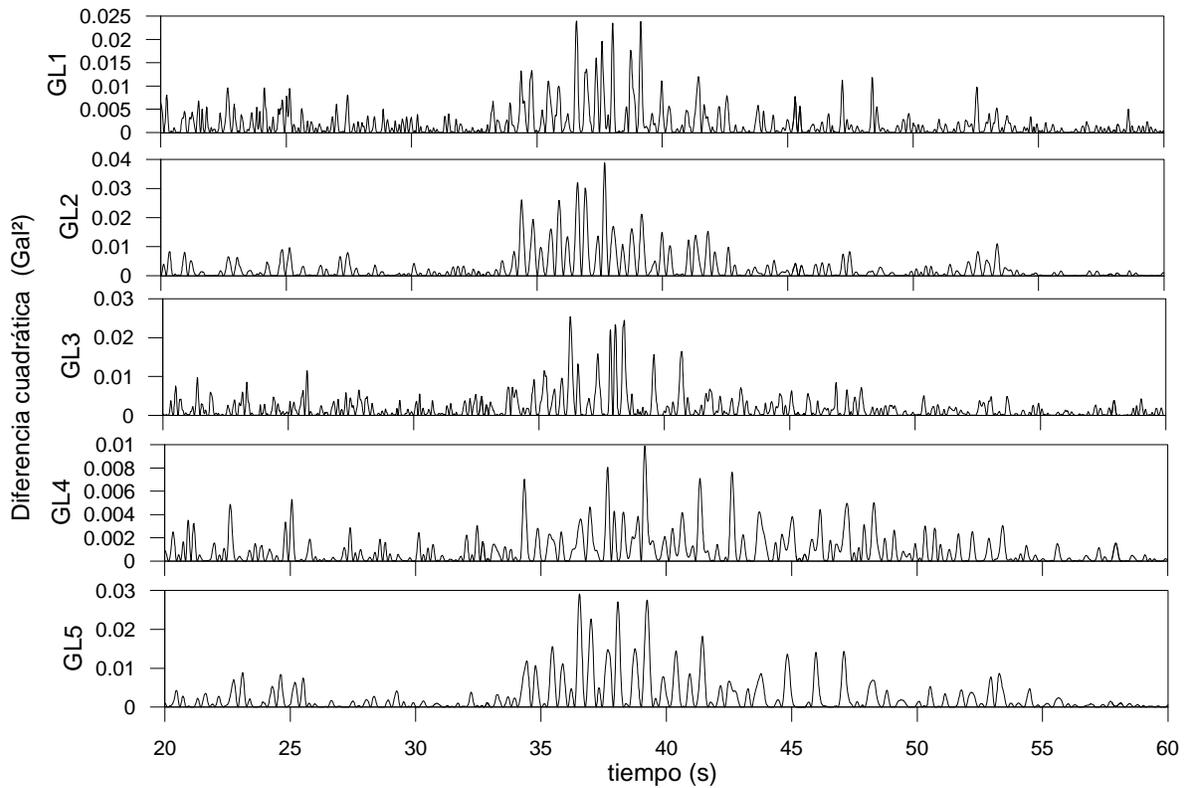


Figura A.13. Diferencia entre señales teóricas y calculadas modelo 5GL MinT

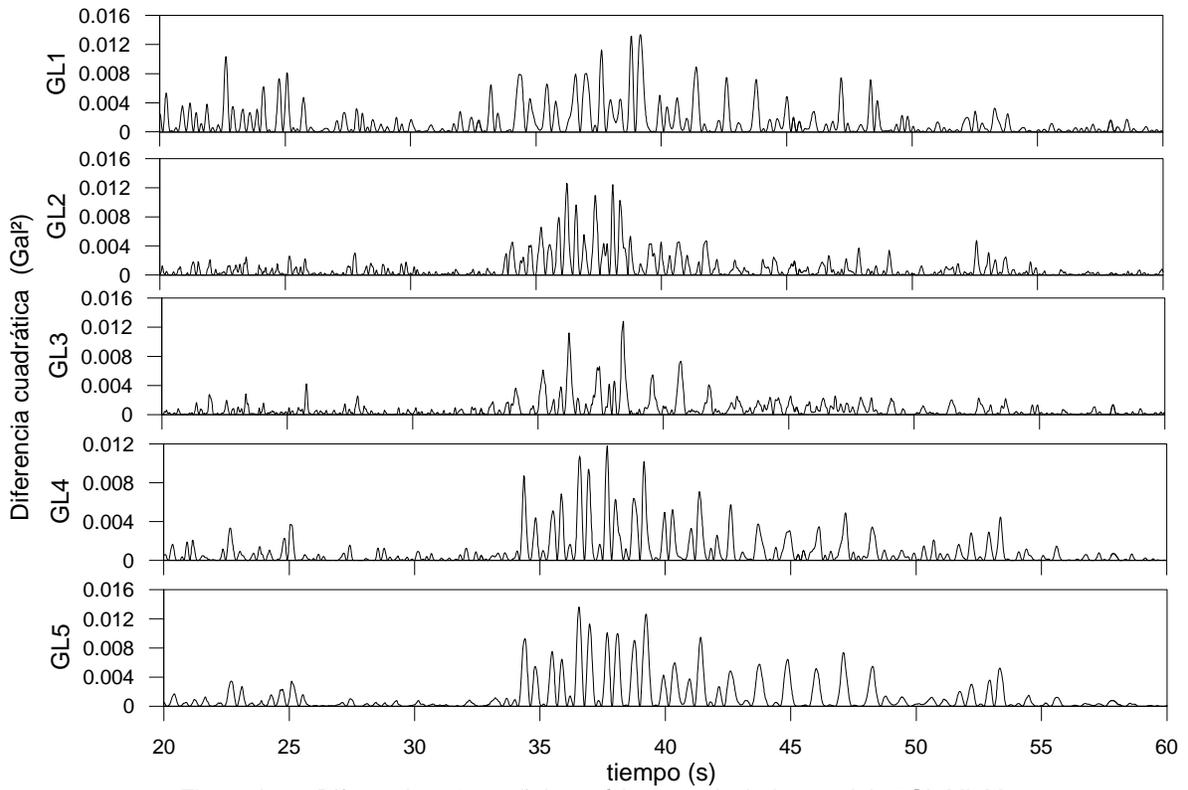


Figura A.14. Diferencia entre señales teóricas y calculadas modelo 5GL MinM

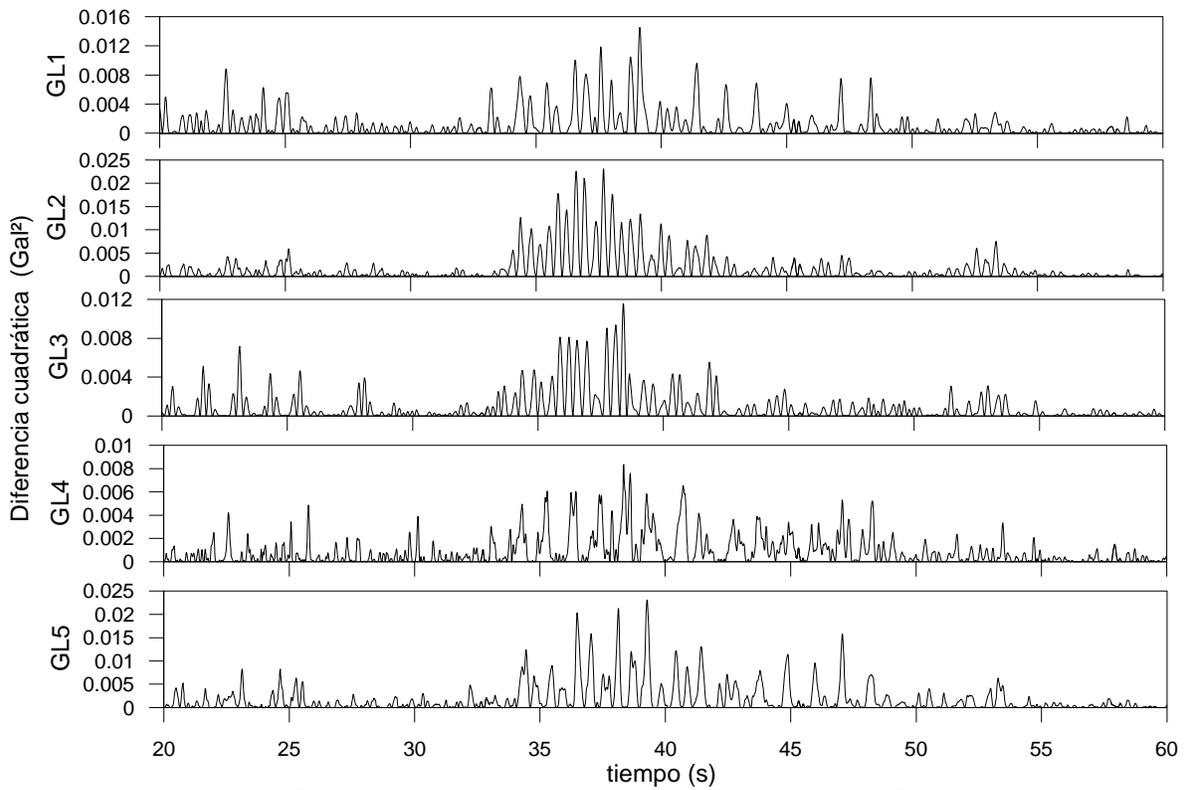


Figura A.15. Diferencia entre señales teóricas y calculadas modelo 5GL MinP

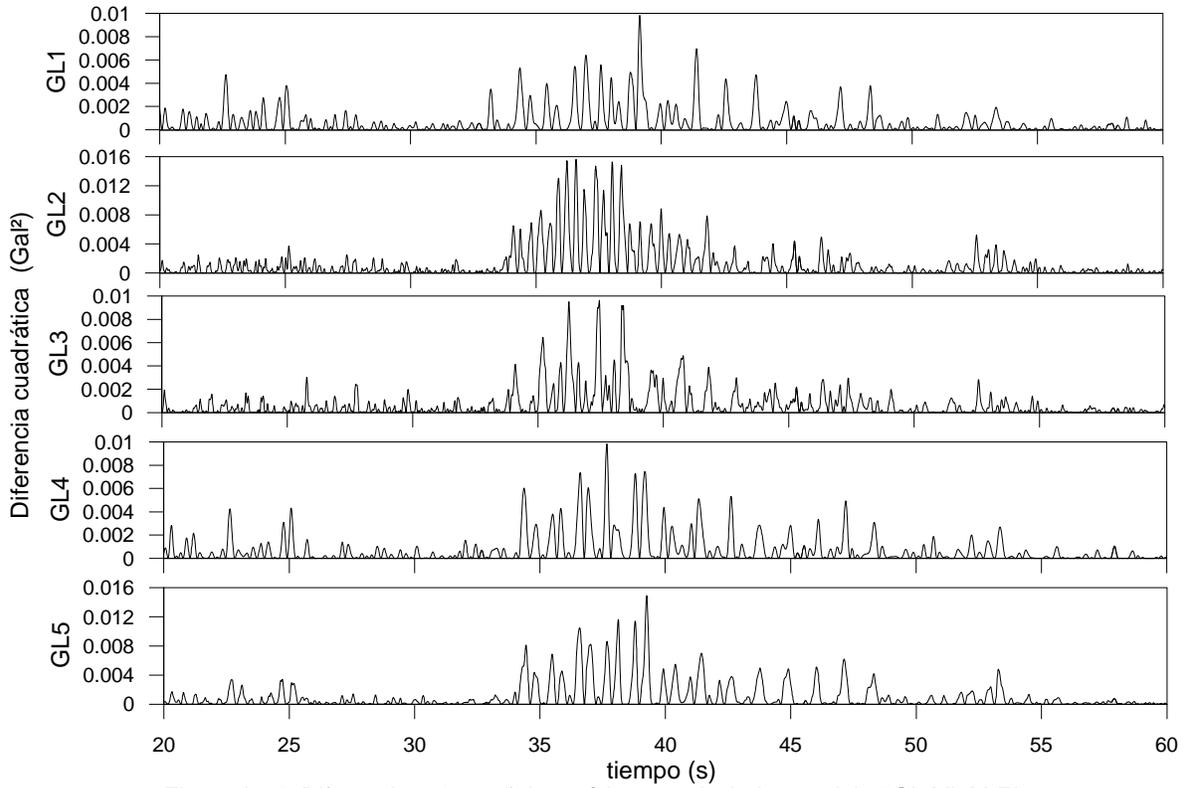


Figura A.16. Diferencia entre señales teóricas y calculadas modelo 5GL MinM-EI

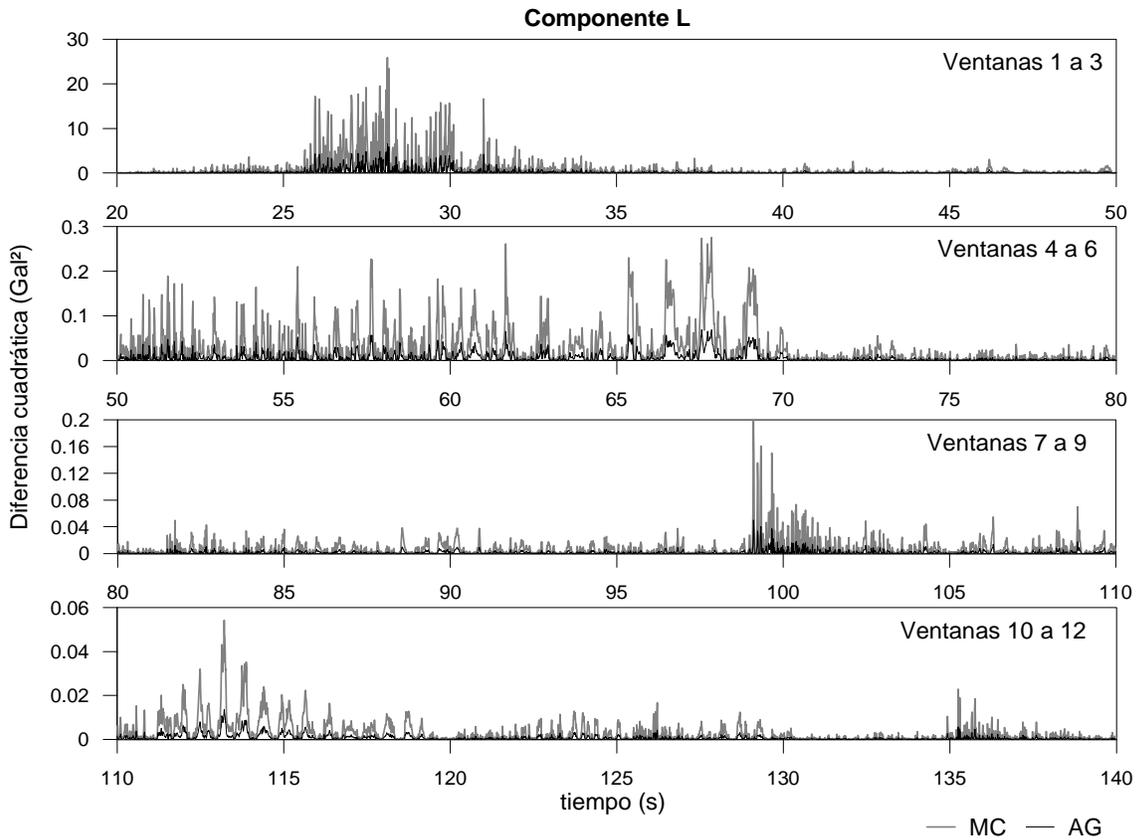


Figura A.17. Diferencia cuadrática entre señales medidas y calculadas, componente L edificio SIS

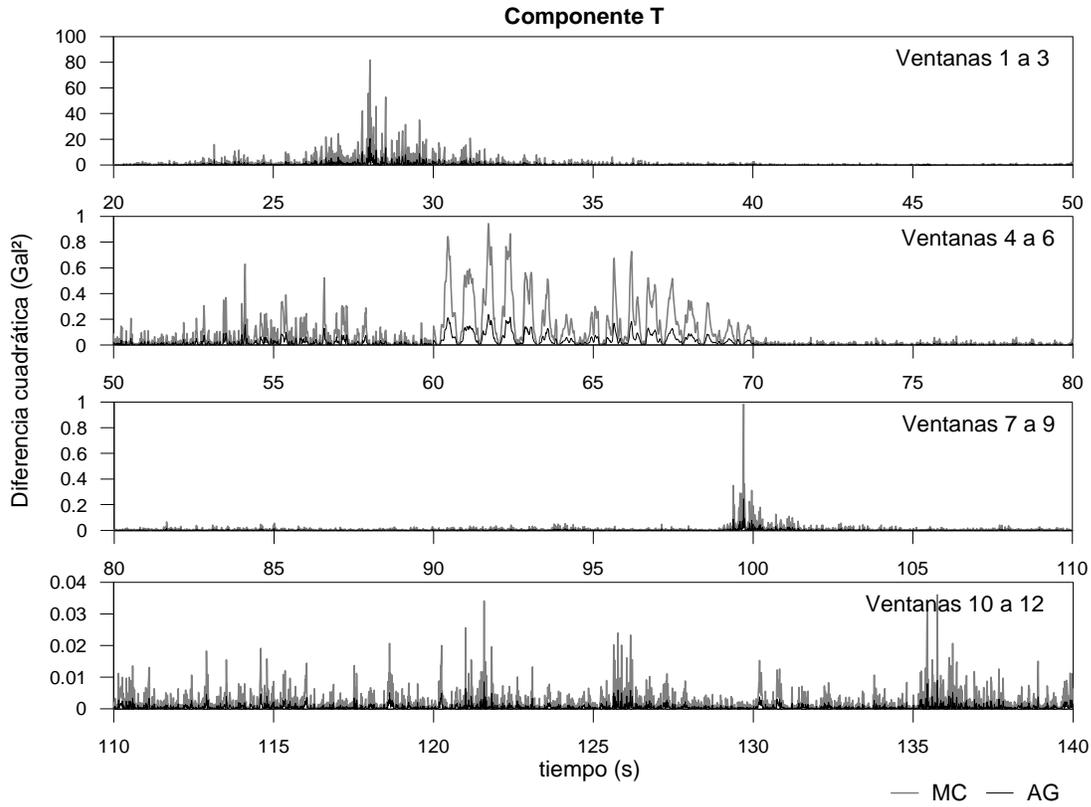


Figura A.18. Diferencia cuadrática entre señales medidas y calculadas, componente T edificio SIS

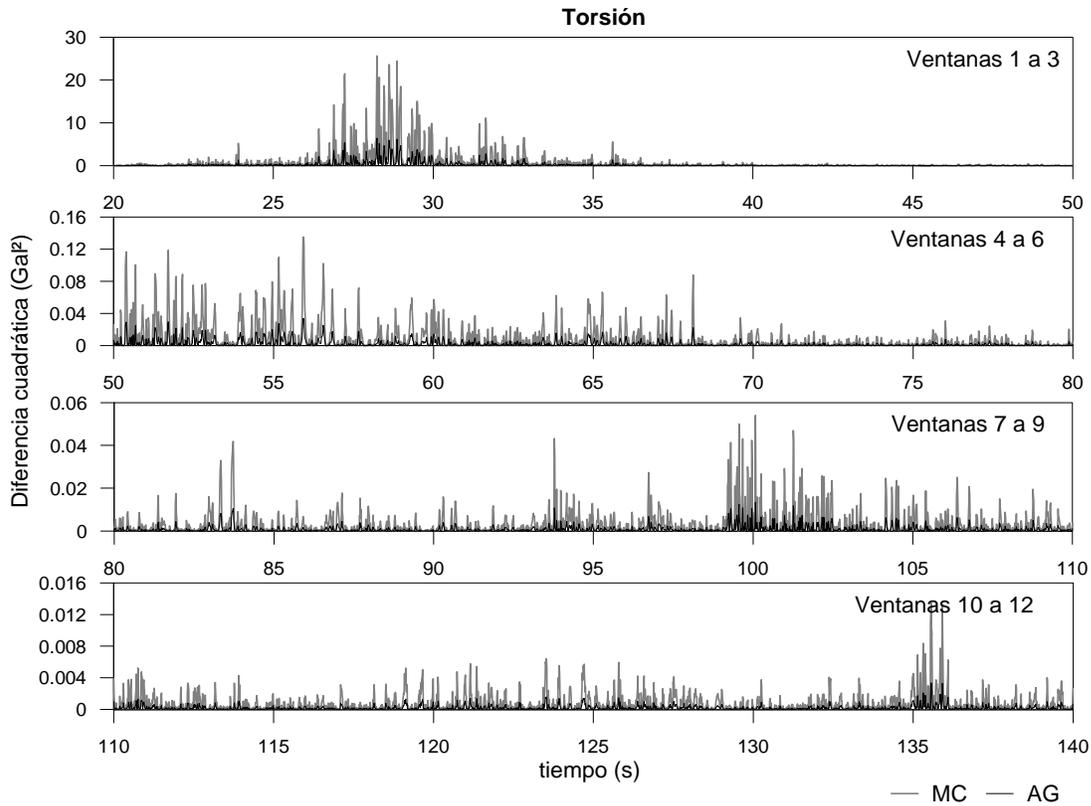


Figura A.19. Diferencia cuadrática entre señales medidas y calculadas, torsión edificio SIS

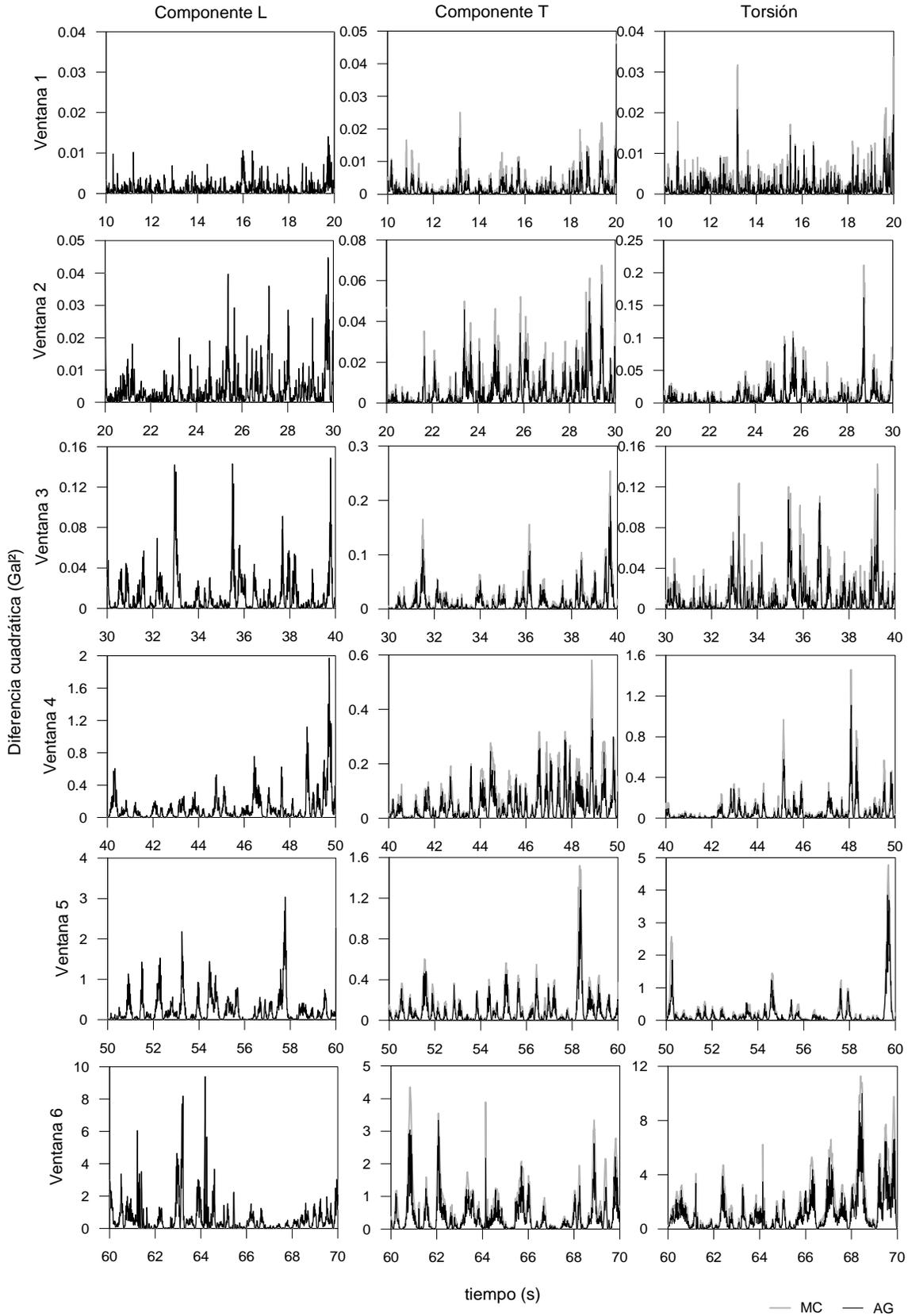


Figura A.20. Diferencia cuadrática entre señales medidas y calculadas, ventanas 1 a 6 edificio PC

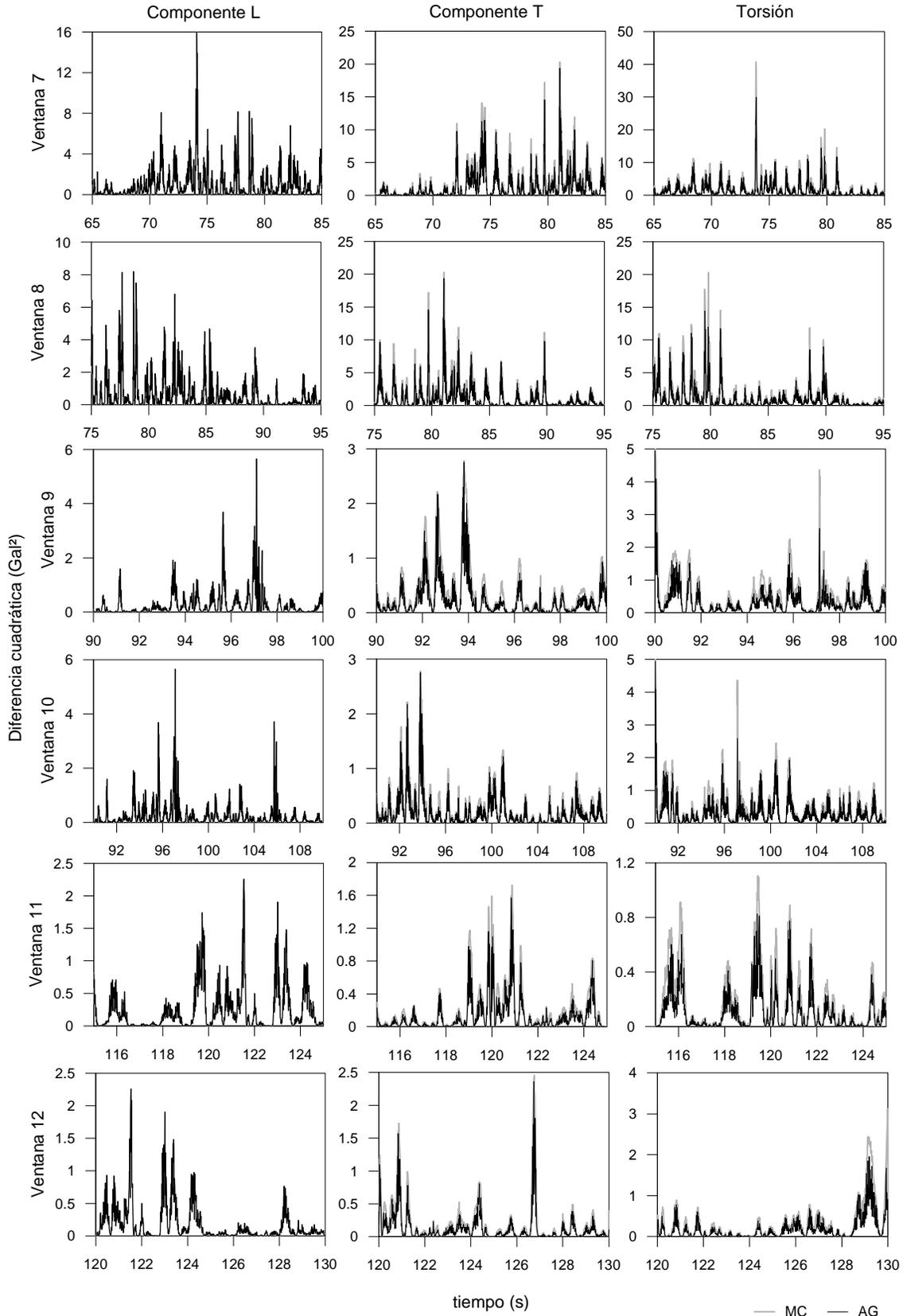


Figura A.21. Diferencia cuadrática entre señales medidas y calculadas, ventanas 7 a 12 edificio PC

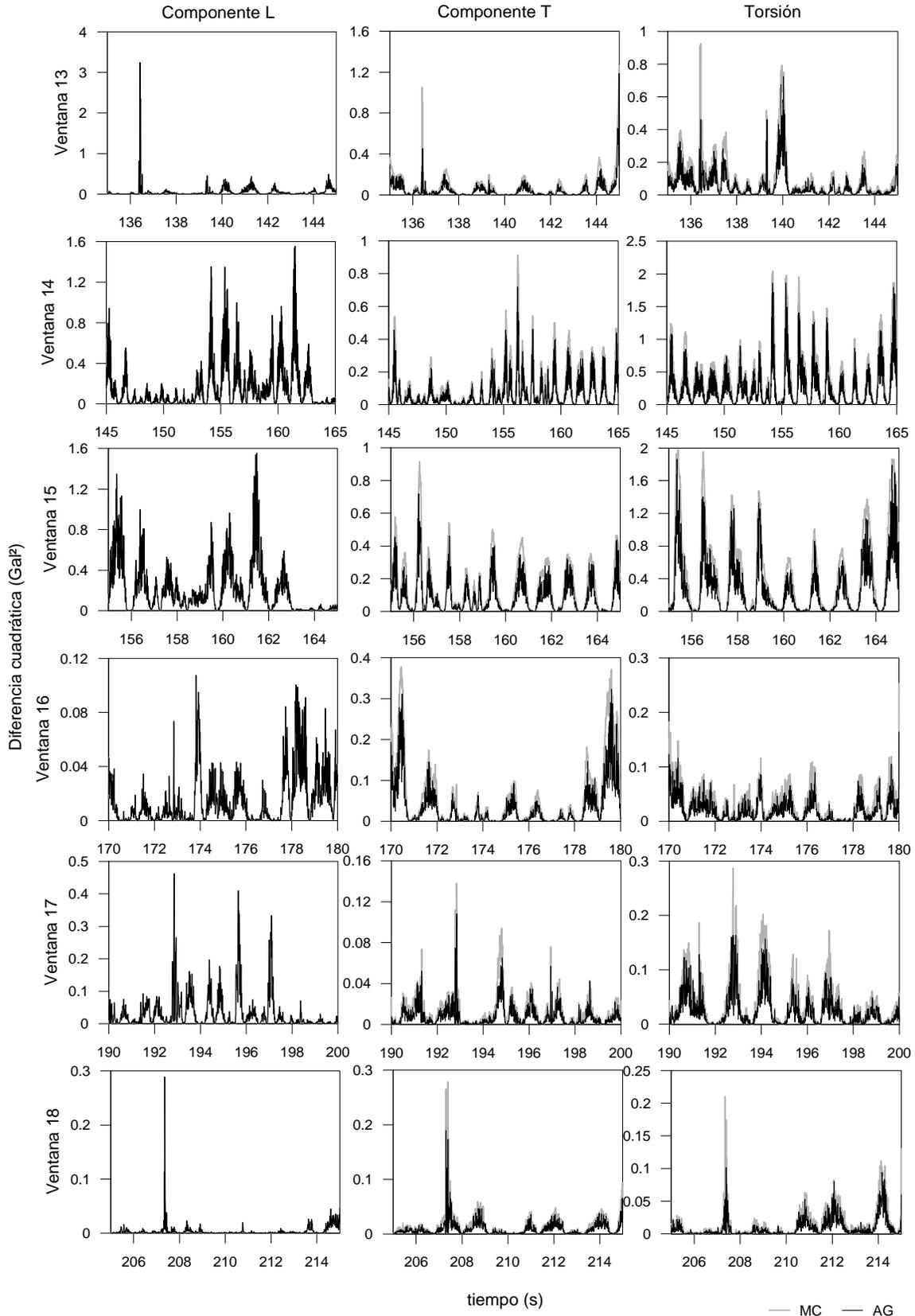


Figura A.22. Diferencia cuadrática entre señales medidas y calculadas, ventanas 13 a 18 edificio PC

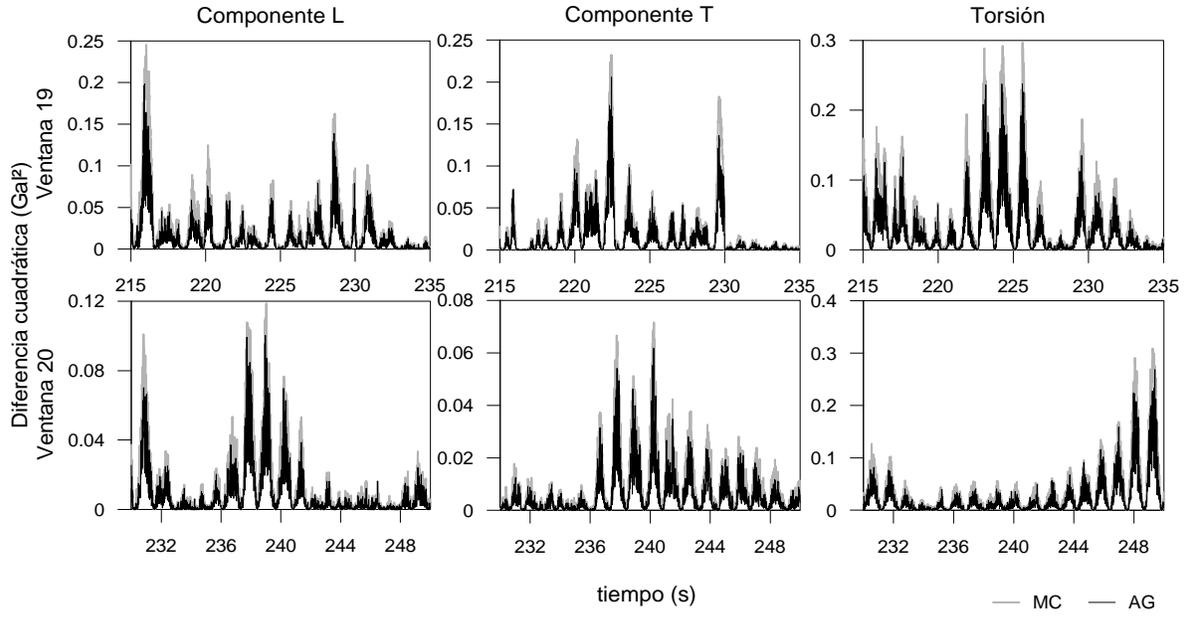


Figura A.23. Diferencia cuadrática entre señales medidas y calculadas, ventanas 19 y 20 edificio PC